

Verdiepend schade-onderzoek Kanaal Almelo - De Haandrik

Definitief eindrapport piping, veen, schadeoorzaken, effect kanaalpeil



Verdiepend schade-onderzoek Kanaal Almelo - De Haandrik
Definitief eindrapport piping, veen, schadeoorzaken, effect kanaalpeil

Auteur(s)

Voorwoord

Bewoners en eigenaren van panden langs het Kanaal Almelo de Haandrik hebben melding gedaan van schades aan hun panden. Vanaf 2011 zijn er omvangrijke werkzaamheden uitgevoerd aan het kanaal. In een aantal gevallen is sprake van ernstige schade, in andere gevallen van lichte schade. Het is onduidelijk wat de oorzaak is / oorzaken zijn van de schade. Deze onduidelijkheid leidt tot onzekerheid bij de bewoners over wat er moet gebeuren om de schades te verhelpen, of er nog meer schade te verwachten is en wat verder te nemen stappen zijn.

De Provincie heeft gevraagd om dit verdiepend onderzoek. Het is bedoeld om zoveel mogelijk feitelijke informatie boven water te halen over dat wat van invloed kan zijn geweest op de schade aan de panden langs het Kanaal Almelo de Haandrik. Bij de onderzochte panden zijn inspecties gedaan, metingen verricht en delen van funderingen ontgraven. Dit met als doel de bewoners meer zekerheid te geven over welke processen rondom en ter plaatse van hun woning en/of bedrijfspand leidden tot deze schade. We hopen dat het onderzoek de bewoners meer duidelijkheid geeft en een deel van de onzekerheid weg kan nemen.

Er is in korte tijd onderzoek uitgevoerd in nauwe interactie met de Provincie Overijssel en een begeleidingscommissie. Experts vanuit relevante vakgebieden zijn betrokken bij dit onderzoek om zo veel mogelijk inzicht te verschaffen in de oorzaken van de opgetreden schades. Desalniettemin is een onderzoek achteraf geen eenvoudige opgave, onder meer omdat er geen monitoring van de panden is uitgevoerd tijdens de werkzaamheden. Op basis van een combinatie van bronnen en rekenmodellen wordt in dit rapport een zo goed mogelijke analyse gegeven van de situatie, welke een (deel van de) onzekerheid kan wegnemen.

In dit rapport zijn namen van betrokkenen, adressen van onderzochte panden en andere privacygevoelige informatie geanonimiseerd of verwijderd.

Verdiepend schade-onderzoek Kanaal Almelo - De Haandrik
2e Concept eindrapport piping, veen, schadeoorzaken, effect kanaalpeil

Opdrachtgever	Provincie Overijssel
Contactpersoon	
Referenties	Offertevraag verdiepingsonderzoek Kanaal Almelo – De Haandrik, Provincie Overijssel, 13 april 2021 Definitief Plan van Aanpak voor verdiepend onderzoek naar de schade langs het Kanaal Almelo – De Haandrik, Deltares, 4 juni 2021
Trefwoorden	Kanaal Almelo – De Haandrik, schade, faalmechanismen, baggeren, damwanden, piping, grondwater, grondonderzoek, bodemdaling veen

Documentgegevens	
Versie	3.2
Datum	10-09-2021
Projectnummer	11207155-011
Document ID	11207155-011-GEO-0001
Pagina's	203
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)		

De namen van de auteurs en reviewers zijn om privacy redenen niet opgenomen.

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
3.2				

De namen van de auteurs en reviewers zijn om privacy redenen niet opgenomen.

Samenvatting

In dit rapport zijn namen van betrokkenen, adressen van onderzochte panden en andere privacygevoelige informatie geanonimiseerd of verwijderd.

Vraagstelling

Op verzoek van de Provincie Overijssel heeft Deltares in 2019 – 2020 onderzocht wat de relatie op gebiedsniveau is tussen de schadebeelden aan de panden langs het Kanaal Almelo – De Haandrik en de uitvoering van werkzaamheden aan het kanaal in de periode 2011 – 2016. Het rapport hierover is in mei 2020 gepubliceerd (Ref. [1]) en geeft een beeld over het oorzakelijk verband tussen schades en de werkzaamheden aan het kanaal. Het rapport geeft aan waar dit oorzakelijk verband duidelijk is en waar het onzeker is of er een verband is. Het betreffende rapport gaat niet in op de schademechanismen per pand.

Om meer duidelijkheid te verkrijgen in de mechanismen die de schade aan de panden kunnen verklaren is door de Provincie aan Deltares opdracht verleend voor een verdiepend onderzoek. Aanleiding was het rapport van de heer Van Baars “Piping bij Kanaal Almelo - De Haandrik” van 26 maart 2021 waarin hij stelde dat piping de oorzaak zou zijn van de schade.

Het verdiepend onderzoek concentreert zich op vier vragen:

1. Is piping een verklarend mechanisme van de schade aan de panden in het gebied.
2. Welke rol kan de aanwezigheid van veen (en het optreden van droogte/verandering in grondwaterstanden in het gebied) spelen bij het ontstaan van schade; alsmede de vraag om te onderzoeken of veen aanwezig is onder een aantal specifieke panden en of dit een rol speelt bij de schade aan deze panden, ofwel andere samendrukbare lagen die bij die panden tot inklinking/schade door zetting kunnen leiden.
3. Zo mogelijk duidelijkheid geven over andere schade-oorzaken (anders dan genoemd bij punt 1 en 2) aan de onderzochte panden in het gebied.
4. Nagaan of het verlagen van het waterpeil in het kanaal als (tijdelijke) oplossing tegen piping effectief is en inzichtelijk te maken welke consequenties dat met zich meebrengt.

Doelstelling en aanpak

Het hoofddoel van het verdiepend onderzoek is om aan de hand van de antwoorden op de vragen de schade-oorzaak of schade-oorzaken per onderzocht pand vast te stellen. Aanleiding voor het onderzoek waren de zorgen van de bewoners over de toekomstbestendigheid van hun woningen en de schade-afhandeling door de Provincie. In dit verdiepend onderzoek is voor 21 specifieke panden een uitgebreide analyse gedaan naar de oorzaken van de schade. Hierbij zijn zowel de lokale condities, zoals geologie, grondwaterstanden en ontginningsgeschiedenis van het gebied, alsmede de technische staat, zoals bouwwijze, funderingswijze en staat van de fundering, in kaart gebracht. De analyse van schade-oorzaken heeft zich in eerste instantie gericht op het mogelijk optreden van piping en de aanwezigheid van veen en andere samendrukbare lagen. Per pand is vervolgens vastgesteld of er sprake is van schade als gevolg van zakkingsverschillen of schade die niet het gevolg is van zakkingsverschillen. De specifieke afmeting van de fundering is vastgesteld, of die wel of niet op een veenlaag of zandlaag staat inclusief eventueel rondom het pand aangebrachte belastingen. Daarnaast zijn de gevolgen van veranderingen in de grondwaterstand beschouwd aan de hand van een aantal scenario's. Tot slot is er een kwalitatieve beschouwing uitgevoerd van de effecten van peilverlaging.

Resultaat

Op basis van deze aanpak komt Deltares tot de volgende antwoorden op de vier vragen.

1. Is piping een verklarend mechanisme voor de schade aan de panden?

In het onderzoek naar piping is naast de klassieke beschouwing van piping (pipe-vorming in zand onder slecht-doorlatende lagen gepaard gaand met zandmeevoerende wellen aan het maaiveld achter de dijk) gekeken naar suffosie (het uitspoelen van fijnere deeltjes uit een grover korrelskelet) en filterincompatibiliteit (het uitspoelen van fijnere lagen naar grovere lagen). De conclusies ten aanzien van piping als oorzaak voor de schades aan panden zijn:

- Deltares heeft geen afzettingen van zand in het veld waargenomen. Ook is er bij de panden geen sprake (geweest) van grote verhangen in het grondwater. Er zijn daarmee geen aanwijzingen dat klassieke piping hier een belangrijk actief mechanisme is. Daarom beschouwen we het onwaarschijnlijk dat klassieke piping een hoofdoorzaak is voor de opgetreden schades bij de onderzochte panden.
- Op grond van de in de literatuur voorgestelde criteria voor suffosie wordt het merendeel van de korrelverdelingen als intern stabiel geclassificeerd. Zoals hierboven al opgemerkt is er bij de panden daarbij geen sprake (geweest) van hoge hydraulische verhangen. We beschouwen het daarom als onwaarschijnlijk dat massaverlies of verminderd draagvermogen door suffosie een oorzaak is voor de opgetreden schades bij de panden.
- Alle mogelijke combinaties van grondmonsters zijn als intern stabiel geclassificeerd voor filterincompatibiliteit¹ aan de hand van de geldende ontwerpcriteria. Dit is met laboratoriumonderzoek getoetst. In combinatie met de afwezigheid van grote verhangen in het grondwater, beschouwen we het daarom als onwaarschijnlijk dat volumeverlies ten gevolge van filterincompatibiliteit een oorzaak is voor de opgetreden schades bij de panden.

Piping is daarmee geen verklarend mechanisme voor de opgetreden schade.

2. Is veen of ander samendrukbaar materiaal een schade oorzaak?

Er zijn twee potentiële mechanismen gerelateerd aan veen of andere samendrukbare lagen zoals klei en silt die een bijdrage kunnen leveren aan de zakkings van de panden en de waargenomen schade. Deze zijn:

- Samendrukking van veen of andere samendrukbare lagen als gevolg van de gebouwbelasting, inclusief eventuele verhoging of verandering daarvan door verbouwingen, aanbouwen alsmede door belasting zoals ophogingen naast of in het pand.
- Krimp van veen, waarbij het veen verzadigd blijft. Een verlaging van het watergehalte van het veen waarbij (nog) geen lucht het veen indringt, leidt tot volume afname van het veen en daarmee zakking van het maaiveld. Dit mechanisme kan zowel optreden in geval van een verlaging van de grondwaterstand ter plaatse van de panden als bij verdroging.

In het uitgevoerde grondonderzoek is onder een deel van de funderingen met name veen aangetroffen. Andere samendrukbare lagen komen slechts lokaal voor (klei- of leemlagen). Door de beperkte aanwezigheid van deze klei- en leemlagen en het feit dat de aangetroffen lagen onder de grondwaterstand liggen, is geconcludeerd dat zwel en krimp in de klei- of leemlaag geen verklaring voor de waargenomen schade kunnen zijn. Er is nagenoeg geen ge-oxideerd veen (veen dat aan de lucht is blootgesteld) aangetroffen in het uitgevoerde grond- en laboratoriumonderzoek. Hieruit is geconcludeerd dat oxidatie van veen de waargenomen schade niet kan verklaren. Uit de geohydrologische beschouwing blijkt dat het veen grotendeels boven de grondwaterstand ligt. Om die reden is het mechanisme samendrukking van de veenlaag als gevolg van een verlaging van de

¹ Filterincompatibiliteit treedt op wanneer fijn materiaal in contact staat met een grover materiaal en het fijne materiaal door de poriën van het grove materiaal weg kan spoelen ten gevolge van waterstroming.

grondwaterstand geen belangrijke schade-oorzaak. Krimp van veen als gevolg van grondwaterstandsverlaging heeft wel een bijdrage aan de zakkingen geleverd.

De grootte van de krimp bij verlaging van de grondwaterstand is bepaald op basis van variatie in het watergehalte van het veen in de boringen naast de panden. Op basis van ervaring en specialistische kennis hebben experts ingeschat dat de krimp onder de onderzochte panden de helft is van de krimp die zich voordoet naast de onderzochte panden.

Daarnaast varieert de grondwaterstand met de seizoenen en door de vervanging van beschoeiingen en damwanden. In de jaren '70 is krimp opgetreden, omdat de grondwaterstand daalde na vervanging van de houten beschoeiing door de eerste waterkerende damwanden. Op basis van ervaring en specialistische kennis is vastgesteld dat de krimp als gevolg van de latere vervanging van de damwanden en de daardoor veroorzaakte verlaging van de grondwaterstand 25% bedraagt van de eerste krimp na vervanging van de houten beschoeiing. De ordegrrootte van de aldus berekende zakking door krimp van de panden door vervanging van damwanden is minder dan 0,01 m en kan in combinatie met een extreem droge zomer oplopen tot maximaal ca 0,02 m. Dit is een bovengrens.

Er zijn in dit onderzoek samendrukbare lagen - veen, klei, silt onder de fundering, onder vloeren en onder kruipruimtes van diverse panden aangetroffen. We achten het waarschijnlijk dat in dat geval samendrukking van die lagen als gevolg van gebouwbelasting en mogelijk krimp van veen door verlaging van het watergehalte, tot vervormingen en schades hebben geleid.

3. Welke mogelijke andere schade-oorzaken zijn er?

De oorzaken van de schade aan de panden zijn afgeleid uit een synthese van:

- Analyse van de schademeldingen gebiedsbreed.
- Grondonderzoek en onderzoek van de situatie van het grondwater.
- Veranderingen in de situatie van het grondwater.
- Samendrukking van veen en andere samendrukbare lagen onder de funderingen, zoals hiervoor samengevat.
- Opname van schade en zakkingen van panden, satellietmetingen van zakkingen, inspectie van de fundering en rol van de samendrukbare lagen.

Analyse van de schademeldingen op gebiedsschaal

Naast de analyse voor de specifieke panden is een analyse van de schademeldingen over het hele schadegebied gedaan. Het grootste deel van de circa 370 schademeldingen is gedaan in 2018, 2019 en 2020. Bij een tiental schademeldingen uit 2011-2013 is er een verband tussen tijdstip en aard van de eerste schade en de werkzaamheden. Deze meldingen betroffen trillingsschade en wateroverlast. De eerste meldingen van schade door verzakkingen zijn eind 2018 gedaan.

De meeste schademeldingen hebben betrekking op panden tussen 15 en 40 m van het kanaal.

Uit vergelijking van de tijdlijn van de werkzaamheden en de tijdlijn van de schademeldingen volgt:

- In 2005 zijn damwanden vervangen. Het is mogelijk dat dit heeft geleid tot verlaging van de grondwaterstand. Dit zou tot zakkingsschade hebben kunnen leiden in het eerstvolgende zeer droge jaar, 2006. Ook zakkingsschade in de zeer droge jaren 2018-2020 kan zijn gerelateerd aan de vervanging van de damwanden in 2005 en hebben geleid tot schademeldingen.
- Een deel van de schademeldingen in 2011 en 2012 betreft trillingsschade en is gerelateerd aan het plaatsen van damwanden in die jaren.

- Een ander deel van de schademeldingen in 2012 betreft wateroverlast en is gerelateerd aan het baggeren. In 2013 is daarom op een aantal locaties een bodemafdichting in het kanaal aangebracht.
- Er zijn bij de Provincie geen andere schademeldingen gedaan over wateroverlast direct na het baggeren.
- Er is in 2011-2013 geen schade door verzakkingen gemeld.
- In 2018 zijn er in Daarlerveen twee meldingen gedaan die gerelateerd kunnen zijn aan de werkzaamheden aan de N750.
- Een deel van de schademeldingen in 2019 kunnen zijn gerelateerd aan vernieuwing van de damwanden in dat jaar. De aard van de schade is niet bekend. Een groot deel (twee derde) van de schademeldingen in 2018 en 2019 vonden plaats voordat de damwanden ter plaatse werden vervangen. Hieruit blijkt dat vooral de droogte in die jaren een rol speelde bij de schademeldingen.
- Voor het grootste deel van de schademeldingen in 2018-2020 kan de tijdslijn van de melding niet worden gekoppeld aan de tijdslijn van de werkzaamheden. Het is mogelijk dat er vanaf eind 2018 schademeldingen zijn gedaan voor schade die veel eerder is ontstaan, vanwege de toenemende aandacht voor het schade-onderzoek.

Automatische bewerkte InSAR-satellietmetingen zijn gebruikt voor analyse van zakkingsnelheden en sprongen in de tijdreeksen. De waarde van de volgende conclusies is daarom indicatief.

Uit de satellietmetingen volgt dat de zakkingsnelheid van de panden met schademelding, panden zonder schademelding en het omliggende terrein recht evenredig is met de dikte van het veen in de ondergrond. Bij eenzelfde veendikte is de zakkingsnelheid van panden met schademelding niet significant anders dan de zakkingsnelheid van panden zonder schademelding of van het omliggende terrein. De zakkingsnelheid van het maaiveld neemt af naarmate de afstand tot het kanaal groter is. Dit kan verband houden met de dikte van het veen in de ondergrond, die dichtbij het kanaal het grootste is. Dichtbij het kanaal is de gemiddelde zakkingsnelheid van de panden met schademelding niet significant anders dan de gemiddelde zakkingsnelheid van de panden zonder schademelding.

Gebiedsbreed is geen duidelijk verband gevonden tussen de tijdslijn van de werkzaamheden tussen 2010 en 2016 en het moment dat satellietmetingen van de zakking van de panden in het gebied een toename van de zakking laten zien.

Gegevens ontbreken om de tijdslijn van het ontstaan van de eerste schade en aard van de schade te vergelijken met de tijdslijn van de werkzaamheden. Ook ontbreken de gegevens om een vergelijking te maken tussen panden met respectievelijk zonder schade en verklarende factoren zoals funderingstype, constructiewijze, grondopbouw of leeftijd van de panden.

Veranderingen in de situatie van het grondwater

De grondwatersituatie bij het kanaal kan in de loop der tijd veranderd zijn door:

- Veranderingen in of direct langs het kanaal.
- Verandering in de regionale waterhuishouding.
- Verandering van het klimaat, van zowel natte als droge perioden.

Onderstaande bevindingen zijn gebaseerd op alle metingen en berekeningen, die voor dit onderzoek zijn uitgevoerd. Daarbij zijn ook historische meetreeksen beschouwd.

Relevante veranderingen in en bij het kanaal zijn:

- **Het aanleggen van waterkerende damwanden.** Dit betreft een blijvende verandering. Vóór het plaatsen van waterkerende damwand was de grondwaterstand in de bodem direct naast het

kanaal nagenoeg gelijk aan het waterpeil in het kanaal. Dat houdt in dat er naast het kanaal grondwater boven het veen aanwezig was. Door de veel lagere stijghoogte van het grondwater onder het veen werd het water boven het veen deels naar beneden getrokken en stroomde het deels boven het veen in de richting van de panden. Naarmate de afstand tot het kanaal toeneemt, werd de grondwaterstand boven het veen steeds lager, totdat die onder de bovenkant van het veen zakte. Afhankelijk van de aanwezigheid en de dikte van veenlagen in de bodem direct naast het kanaal en de ononderbroken verbreiding van die veenlagen richting de panden, was de grondwaterstand bij de panden voor aanleg van de damwanden 10 tot 30 cm hoger dan daarna. De bijbehorende stijghoogte van het grondwater in de zandlaag onder het veen is door de aanleg van de damwanden bij de panden 8 tot 12 cm omlaag gegaan. Op plekken waar het veen zich ononderbroken tot achter de panden uitstrekt zijn de dalingen relatief het grootst. Na aanleg van de damwanden was er geen sprake meer van grondwater boven het veen. Op meerdere plekken is de grondwaterstand direct naast het kanaal tot onder de onderkant van de veenlaag gezakt.

- **Het baggeren van het kanaal.** Dit betreft een tijdelijke verandering, waardoor de grondwaterstand tijdelijk omhoog gaat. Direct na het baggeren is de hydraulische weerstand van de kanaalbodem zo laag dat het kanaalwater met relatief grote snelheid de bodem in kan stromen. Dat wordt veroorzaakt door het grote verschil tussen kanaalwaterstand en grondwaterstand. Na het baggeren bevat het kanaalwater veel zwevend zeer fijn slibmateriaal. Dit fijne slib wordt met het water mee de bodem ingetrokken en zorgt ervoor dat de overwegend zandige kanaalbodem weer snel dichtslibt, waardoor de hydraulische weerstand van de kanaalbodem zich weer herstelt. Dit alles zorgt ervoor dat na het baggeren een tijdelijke stijging van de grondwaterstand bij de panden kan optreden van maximaal 20 tot 30 cm. Uit het onderzoek blijkt dat deze tijdelijke stijging na een week al weer grotendeels is verdwenen.
- **Regionale waterhuishouding.** Dit betreft een blijvende verandering. De aanwezige drainage in de wijde omgeving rond het kanaal heeft een afwateringsniveau dat momenteel 2 tot 3 m lager is dan het kanaalpeil. Dat zorgt ervoor dat de grondwaterstand bij de panden 1,5 tot 2 m onder kanaalpeil ligt. In de afgelopen tientallen jaren is de drainage van deze regio langzaam maar zeker intensiever geworden. Dit heeft in de afgelopen 40 jaar geleid tot een geleidelijke daling van de regionale grondwaterstand van enkele decimeters.
- **Klimaat.** De trend in de afgelopen tientallen jaren duidt erop dat enerzijds droge perioden langer zijn geworden en anderzijds meer extreme neerslag is gevallen. Langere droge perioden zorgen voor een sterkere verlaging van de grondwaterstand. Meer extreme neerslag zorgt voor meer wateroverlast. In de droge zomers van 2018 en 2019 is de grondwaterstand in de regio 20 tot 30 cm lager geweest dan gemiddeld in de zomer. In het verleden is dit echter wel vaker voorgekomen en vlakbij het kanaal zakt de grondwaterstand in het algemeen iets minder uit doordat dit deels wordt aangevuld met infiltrerend kanaalwater. Meer extreme neerslag kan met name in de lager gelegen achtertuinen bij de panden vaker leiden tot wateroverlast, door direct afstromend neerslagwater en door stijgend grondwater.

De hoogfrequente metingen in de peilbuizen geven aan dat er geen noemenswaardige invloed is van de scheepvaart op de grondwaterstand.

Een daling in de grondwaterstand kan hebben geleid tot zetting van in de bodem aanwezige veenlagen. Dat kan echter alleen als deze veenlagen zich geheel of gedeeltelijk onder de grondwaterstand bevinden. De enige kanaalingreep, die tot daling van de grondwaterstand kan hebben geleid, is het plaatsen van waterkerende damwanden geweest. Deze ingreep heeft ertoe geleid dat de grondwaterstand bij de panden 10 tot 30 cm omlaag is gegaan. Deze ingreep heeft echter al midden jaren 70 van vorige eeuw plaatsgevonden. Herstellen van inmiddels lekgeraakte damwanden, waardoor de grondwaterstand bij de panden weer is gestegen, geeft een herhaling van deze daling.

Een stijging van de grondwaterstand kan leiden tot wateroverlast. De enige kanaalingreep, die tot stijging van de grondwaterstand kan hebben geleid, is het baggeren van het kanaal. Deze ingreep

heeft ertoe geleid dat de grondwaterstand bij de panden 20 tot 30 cm omhoog kan zijn gegaan. Stijging van de grondwaterstand door baggeren is echter tijdelijk van aard en moet dan net samenvallen met een natte periode om tot wateroverlast te leiden.

Ontstaan van schade aan de panden

Het ontstaan van schade aan een pand is een samenspel van pandfundering, belasting vanuit het gebouw, ondergrond en (wisseling van) grondwaterstanden. In het verdiepend onderzoek zijn de schade-oorzaken van de onderzochte individuele panden duidelijk geworden. De schade-oorzaken zijn per pand gerapporteerd. Uit het grond- en pandonderzoek komt een onderscheidend beeld naar voren tussen panden met kleine en met grote zakkingsverschillen:

- Er zijn 7 panden met grote tot matig grote zakkingsverschillen (groter dan 6 cm): soms alleen in de kruipruimte, soms alleen de betonvloeren, soms het hele pand. In het laatste geval is veen of andere samendrukbaar materiaal onder de fundering de oorzaak van de zakkings, in de andere gevallen gaat het om veen of ander samendrukbaar materiaal boven de fundering.
- Er zijn 6 panden met kleine tot matig kleine zakkingsverschillen (kleiner dan 4 cm). In dat geval is de fundering onder het veen aangelegd. Soms is de top van de onderliggende zandlaag erg siltig waardoor er extra zakkingsverschillen zijn opgetreden.
- Er zijn 5 panden die daar tussen in vallen.

Alle onderzochte panden vertonen schade als gevolg van ongelijkmatige zakkings. Alle onderzochte panden vertonen ook scheuren en verschijnselen die als 'bouwkundig van aard' zijn aangemerkt. De werkzaamheden aan het kanaal kunnen een bijdrage hebben gehad aan het verergeren van schades.

- Bij 7 van de onderzochte panden is er een mogelijke bijdrage door baggerwerkzaamheden van het kanaal. Bij 4 van deze panden kan de draagkracht van de fundering tijdelijk zijn afgenomen en daardoor kan een zakking in de orde van 5 a 10% van de totale zakking van deze panden zijn opgetreden. Bij één pand kan scheurvorming in kelder vloeren zijn veroorzaakt door het baggeren.
- Bij 10 van de onderzochte panden levert het vervangen van damwanden door langere stalen damwanden een bijdrage aan het ontstaan van zakkingschade. De orde van grootte van de extra zakking varieert per pand en is tussen 2% en 8% van de totale zakking van deze panden.
- In 7 gevallen is er sprake van trillingsschade door het aanbrengen van een damwand. De andere gevallen bevinden zich op grotere afstand uit het kanaal of er is ter plaatse geen damwand vervangen. Ter plaatse van de onderzochte panden zijn nergens klapankers toegepast.

Daarnaast zijn er bij 11 panden verschijnselen waargenomen bij funderingen kruipruimtes of betonvloeren waar droogte een rol kan hebben gespeeld. De toename van de zakking van de panden door droogte varieert per pand en is in de orde van 10% tot 30% van de totale zakking van deze panden.

Er is sprake van een combinatie van schade-oorzaken (o.a. lokale condities, type fundering, bouwkundige staat, aanwezigheid van veen, verandering in grondwaterstand door natte en droge perioden en werkzaamheden aan het kanaal, trillingen) die per individueel pand verschillen.

4. Is verlaging van het kanaalpeil effectief tegen piping en welke andere gevolgen heeft deze maatregel?

Deltares heeft een kwalitatieve beschrijving van de effecten van peilverlaging gegeven (o.a. waterbeheersing, waterkwaliteit, bebouwing), die zijn aangevuld door deskundigen van de Provincie en het Waterschap Vechtstromen. De onderzochte effecten zijn niet verder kwantitatief beoordeeld.

Omdat het onderzoek piping uitsluit als waarschijnlijke oorzaak van schades aan de panden is dit deel van het onderzoek stopgezet.

Eindconclusie

Door het verdiepend onderzoek zijn de (combinaties van) oorzaken van de schades van de onderzochte panden per pand duidelijk geworden en daarmee is veel meer duidelijkheid gekomen voor bewoners en de provincie. Daarnaast is vanuit de metingen en analyses een onderscheidend beeld naar voren gekomen tussen panden met kleine en met grote zakkingsverschillen. Op basis van dit verdiepend onderzoek is geconcludeerd dat piping geen verklarend mechanisme is voor de schade aan de panden. Wel zijn er samendrukbare lagen -veen, klei, siltig zand- onder de fundering, onder vloeren en onder kruipruimtes van diverse panden aangetroffen. In de gevallen waar de fundering boven de veenlaag of een andere samendrukbare laag is aangelegd, heeft de samendrukking van deze lagen onder het gewicht van de panden geleid tot verzakkingen en daarmee tot schade aan de panden. Bij funderingen onder de samendrukbare laag op de (siltige) zandlagen is de zakking en de schade beperkter. Vervormingen in samendrukbare lagen kunnen zijn versterkt door de werkzaamheden aan het kanaal. Grondwaterstandverlagingen door vervangen van damwanden door stalen wanden en door droogte hebben een bijdrage aan de zakkingen gehad. De orde van grootte van deze bijdrage is in het voorafgaande deel van dit hoofdstuk gegeven. Daarnaast kan een tijdelijke grondwaterstandsverhoging door het baggeren ook invloed op de zakking van de funderingen hebben gehad.

De exacte kwantificering van de bijdrage van de autonome processen (bodemdaling, droogte, extreme neerslag, etc.) en de veranderingen (baggeren, vervanging damwanden en wijziging in grondwaterstand die dat tot gevolg gehad kan hebben) in en na de periode van de werkzaamheden aan het kanaal blijkt niet mogelijk op grond van de beschikbare (monitorings) gegevens. Er is sprake van combinaties van oorzaken voor de opgetreden schades. Uit de beschikbare gegevens van de situatie in de periode van voor en tijdens de werkzaamheden aan het kanaal, is dit niet meer te onderscheiden. In scenario-analyses zijn de effecten op de grondwaterstanden kwantitatief geduid en vervolgens zijn deze effecten door vertaald naar orde van grootte van de bijdragen aan de zakking door de werkzaamheden.

De satellietmetingen geven aan dat de zakkingsnelheid van de panden gebiedsbreed toeneemt met toenemende dikte van het veen in de ondergrond. Ook de analyse van de schade-oorzaken van de panden wijst op veen als belangrijke schakel in het faalmechanisme. Dat de schademeldingen vooral uit de zone nabij het kanaal komen heeft dus een logische verklaring. Veen komt het meeste voor nabij het kanaal; de dikte van de veenlaag is het grootst dichtbij het kanaal en neemt (veroorzaakt door de ontginning in het verleden) sterk af met toenemende afstand van het kanaal.

Toekomstverwachting

Nu er inzicht is in de oorzaken kan er ook antwoord worden gegeven op de vraag die bij bewoners leeft, of duurzaam herstel mogelijk is. Uit het onderzoek blijkt dat de schade-oorzaak niet bij alle panden hetzelfde is; dat betekent dat ook de toekomstverwachting verschillend is. Voorspelling van de toekomstige zakkingen is niet goed mogelijk op basis van de InSAR satellietmetingen. Deze zijn voor individuele panden niet betrouwbaar genoeg om te kunnen extrapoleren naar de langere termijn of om een voorspelling van het toekomstige zakkingsgedrag te geven. De onderstaande verwachting is gebaseerd op alle gegevens die tijdens het onderzoek zijn verzameld met betrekking tot de funderingen en het zakkingsgedrag tot nu toe.

Funderingen die boven het veen zijn aangelegd, zullen ook in de toekomst blijven zakken. Ondanks dat veel funderingen al tientallen jaren bestaan zal de zakking doorgaan, waarbij vooral tijdens droge zomers een toename van de zakking te zien zal zijn. Dit geldt voor de panden die op een fundering boven het veen staan, voor (beton)vloeren die op een aanvulling boven het veen zijn

aangelegd en voor de kruipruimten. De toename in de toekomst zal qua orde van grootte vergelijkbaar zijn met de zakking in de laatste jaren, afhankelijk van het plaatsvinden van extreem droge zomers.

Funderingen die onder het veen zijn aangelegd zijn over het algemeen minder gezakt en de verwachting is dat deze ook in de toekomst weinig zullen zakken. Droge zomers hebben bij deze panden ook minder zakking tot gevolg.

Met dit verdiepende onderzoek is veel inzicht in de schade-oorzaken verkregen. Een combinatie van oorzaken ligt naar ons inzicht aan de basis van de opgetreden schades. Door de beperkte hoeveelheid aan basisgegevens gedurende de periode van de werkzaamheden aan het kanaal, achten we het onwaarschijnlijk dat meer onderzoek aan de onderzochte panden meer inzicht in de oorzaken zal opleveren.

Inhoud

	Samenvatting	6
1	Inleiding	19
1.1	Wat is de vraag?	19
1.2	Kwaliteitsborging en onafhankelijkheid	19
1.3	Aanpak van het onderzoek	22
1.4	Status van dit rapport	23
2	Onderzoeksaanpak	24
2.1	Inleiding	24
2.2	Aanpak van het onderzoek naar de schade-oorzaak	24
2.2.1	Stap 1: verzamelen algemene informatie en informatie per pand	25
2.2.2	Stap 2: analyse schademeldingen gebiedsbreed	26
2.2.3	Stap 3: vaststellen van schade-oorzaken	26
2.3	Aanpak van het onderzoek naar de effecten van de verlaging van het kanaalpeil	29
2.4	Opzet van dit rapport	29
2.4.1	Opbouw documentatie	29
2.4.2	Leeswijzer	30
3	Algemene informatie ten behoeve van het onderzoek	32
3.1	Inleiding	32
3.2	Kanaal Almelo – De Haandrik	32
3.2.1	Geschiedenis van het kanaal (kort overzicht)	32
3.2.2	Geschiedenis damwanden / oeverconstructies	36
3.2.3	Tijdslijn werkzaamheden	39
3.3	Geologie en ontginningsgeschiedenis	44
3.3.1	Geologische setting	44
3.3.2	Conceptueel geologisch model	45
3.3.3	Menselijke invloeden en grondopbouw rondom de huizen	52
3.4	Geohydrologie	55
3.4.1	Algemeen	55
3.4.2	Beïnvloeding grondwaterstand rond het kanaal	56
3.4.3	Natte en droge perioden (neerslag en verdamping)	57
3.4.4	Bodemsamenstelling in relatie tot hydrologie	58
3.4.5	Beschikbare waterstandsmetingen	59
3.4.6	Aanvullende waterstandsmetingen	59
3.4.7	Maaiveldhoogte en grondwaterverhang	61
3.4.8	Samenvatting en conclusies geohydrologisch onderzoek	62
3.5	Panden en funderingen	66
3.5.1	Bebouwingsgeschiedenis	66
3.5.2	Bouwtype	67
3.5.3	Type funderingen	68
3.5.4	Kelders	70

3.6	Eerdere analyses	70
3.6.1	Aanvullende inventarisatie damwanden Witteveen en Bos 2016	70
3.6.2	Aanvullende inventarisatie Beens 2020	70
3.7	Samenvatting aanvullend grondonderzoek	71
3.7.1	Inleiding	71
3.7.2	Boringen en sonderingen	72
3.7.3	Peilbuizen en waterdrukmeters	73
3.7.4	Piping-kolomproeven	74
3.7.5	Herleidbaarheid grondonderzoek	76
4	Analyse van schademeldingen, werkzaamheden en satellietmetingen gebiedsbreed	77
4.1	Aanpak	77
4.2	Beschikbare gegevens	77
4.2.1	Overzicht beschikbaarheid gegevens	77
4.2.2	PS-InSAR satellietgegevens	79
4.2.3	Gebruikswaarde van InSAR metingen voor de gebiedsbrede analyse van de schade	82
4.2.4	Detectie van sprongen en heterogeniteiten in tijdreeksen	83
4.3	Vergelijking van de tijdlijn van de schademeldingen met de tijdlijn van de werkzaamheden	85
4.4	Relatie tussen de zakkingsnelheid van de panden volgens de satellietmetingen en gebiedskenmerken zoals bodemopbouw	88
4.4.1	Veendikte	89
4.4.2	Relatie met suffosiegevoeligheid en filterincompatibiliteit	90
4.4.3	Afstand tot de kanaalas	93
4.4.4	Bouwjaar	95
5	Analyse piping	96
5.1	Grondwaterstroming	96
5.2	Piping	98
5.2.1	Korrelverdelingen	98
5.2.2	Suffosie	99
5.2.2.1	Schademechanisme	100
5.2.2.2	Criteria	101
5.2.2.3	Kolomproeven	103
5.2.2.4	Toepassing criteria	105
5.2.3	Filterincompatibiliteit	109
5.2.3.1	Schademechanisme	109
5.2.3.2	Criteria	110
5.2.3.3	Kolomproeven	110
5.2.3.4	Toepassing criteria	113
5.2.4	Terugschrijdende erosie	117
5.2.4.1	Schademechanisme	117
5.2.4.2	Criteria	117
5.2.4.3	Toepassing criteria	118
5.2.4.4	Observaties	121
5.2.5	Erosie van zand naar kruipruimte of kelder	122
5.2.5.1	Schademechanisme	122
5.3	Samenvatting analyse piping	123
6	Analyse veen en ander samendrukbaar materiaal	125

6.1	Potentiële mechanismen m.b.t. samendrukbare lagen in de ondergrond	125
6.1.1	A. Overschrijden maximale funderingsdruk	127
6.1.2	B. Samendrukking klei- en veenlaag als gevolg van verandering van de grondwaterstand	128
6.1.3	C. Krimp en oxidatie van veen als gevolg van uitdroging	128
6.1.4	D. Krimp in klei- of leemlaag als gevolg van uitdroging	128
6.1.5	E. Zwel van klei- of leemlagen	129
6.1.6	F. Samendrukking klei- of veenlaag als gevolg van (nieuwe) belasting op de laag	129
6.1.7	Samenhang / uitsluitel mechanismen	129
6.2	Toets aan de hand van het beschikbare onderzoek	129
6.3	Nadere beschouwing veenlaag	130
6.4	Samendrukking veenlaag door spanningsverhoging	132
6.4.1	Toelichting indicatieve berekeningen	132
6.4.2	Zetting als gevolg van grondwaterstandsverandering	133
6.4.3	Zetting als gevolg van ophogingen van het terrein rond de panden	134
6.4.4	Zettingen als gevolg van het gewicht van de panden	136
6.5	Volumeverandering veenlaag door krimp of oxidatie	143
6.6	Samenvatting en conclusies met betrekking tot samendrukbaar materiaal in de ondergrond	147
7	Synthese per pand	150
7.1	Inspecties	150
7.2	Werkwijze analyse	151
7.2.1	Vraag 3a: Komt de schade door ongelijkmatige zakking, trillingen of bouwkundige oorzaken van het pand?	151
7.2.2	Vraag 3b: Kan de zakking zijn veroorzaakt door piping?	152
7.2.3	Vraag 3c: kan de zakking zijn veroorzaakt door veen of ander samendrukbaar materiaal?	152
7.2.4	Vraag 3d: wat is de schade oorzaak of combinatie van schade oorzaken per pand	153
7.2.5	Vraag 3e: Wat is de invloed van werkzaamheden aan het kanaal en invloed van natte en droge perioden	155
7.2.6	Toekomst verwachting	162
7.3	Toepassing INSAR op pandniveau	162
7.4	Samenvatting pandanalyse	164
7.4.1	Samenvatting in tabelvorm	164
7.4.2	Uitleg Tabel 7.3	165
7.4.2.1	Opgetreden zakking, zie 1 in de tabel	165
7.4.2.2	Bijdrage zakking baggeren kanaal, zie 2) in de tabel	165
7.4.2.3	Bijdrage door vervangen bestaande wand door stalen wand, zie 3) in de tabel	166
7.4.2.4	Krimp en droogte (zie 4) in de tabel)	167
7.5	Analyse van de schade-oorzaken per pand	168
8	Effect verlaging kanaalpeil	169
8.1	Vraagstelling	169
8.2	De effectiviteit van peilverlaging tegen piping	169
8.3	Aanpak van de analyse	169
8.3.1	Opzet in een stappenplan	169

8.3.2	Beschouwde effecten van kanaalpeilverlaging	170
8.4	Samenvatting van effecten van peilverlaging	170
8.4.1	Effect 1: Scheepvaart (capaciteit)	171
8.4.2	Effect 2: Waterbeheersing	171
8.4.3	Effect 3: Waterkwaliteit	172
8.4.4	Effect 4: Grondwaterbeheersing	172
8.4.5	Effect 5: Bebouwing	172
8.4.6	Effect 6: Waterkeringen en damwanden	172
8.4.7	Effect 7: Waterbouwkundige constructies	172
8.4.8	Effecten 8 en 9: Wegen en bruggen en Infrastructuur kabels en leidingen	172
8.4.9	Effecten 10 en 11: landbouw, natuur en ecologie	173
8.4.10	Effect 12: Waterwinning	173
8.4.11	Overige belangen, bedrijfsbelangen en recreatie	173
8.4.12	Afweging van effecten	173
8.5	Conclusie m.b.t. peilverlaging	173
9	Conclusies individuele hoofdvragen	174
9.1	Onderzoeksvraag 1: Is piping een verklarend mechanisme?	174
9.2	Onderzoeksvragen 2 en 3: Welke rol speelt veen en zijn er mogelijk nog andere schade- oorzaken	175
9.3	Onderzoeksvraag 4: Effecten verlaging van het kanaalpeil	179
10	Toelichting op de resultaten (synthese en eindconclusie)	180
10.1	Eindconclusie	180
10.2	Context van veranderingen van het Nederlands water en bodemsysteem	180
10.3	Synthese	181
10.4	Slotopmerking	183
11	Referenties	185
	A Tijdslijn werkzaamheden en schademeldingen	189
	B Tijdslijn InSAR trendbreuk en schademeldingen	190
	C Overzicht InSAR trends	191
	D Suffosie en tijdsduur	192
	E Effecten verlaging kanaalpeil	193
	F Damwanden langs het Kanaal Almelo – De Haandrik	194
	G Samenvatting gebiedsbreed schade-onderzoek	195
	H Draagkracht stroken en poeren en beïnvloeding ervan door grondwaterstand	196
	I Interne erosieproeven Kanaal Almelo de Haandrik, Factual Report	197
	J Grondwateranalyses en scenario's	198

K Factsheets per pand	199
L Pandrapporten TNO	200
M Samenvatting eerdere analyses kwel en toetsing	201
N Samenvatting bevindingen pand analyse	202

In dit rapport zijn namen van betrokkenen, adressen van onderzochte panden en andere privacygevoelige informatie geanonimiseerd of verwijderd.

Korte leeswijzer

De hoofdlijn van het onderzoek is te vinden in hoofdstuk 1, 2, 7, 9 en 10. Hoofdstuk 1 en 2 geven de context weer waarbinnen dit onderzoek wordt uitgevoerd. Hoofdstuk 7 gaat in op de oorzaak van de schade aan de onderzochte panden en hoofdstuk 9 en 10 geven de conclusies weer. De overige hoofdstukken betreffen inhoudelijke onderbouwingen van de onderzoeksvragen.

1 Inleiding

In dit rapport zijn namen van betrokkenen, adressen van onderzochte panden en andere privacygevoelige informatie geanonimiseerd of verwijderd.

1.1 Wat is de vraag?

Tussen 2011 en 2016 heeft de Provincie Overijssel het Kanaal Almelo – De Haandrik geschikt gemaakt voor schepen met een groter laadvermogen. Omwonenden hebben aangegeven dat er sinds de uitvoering van deze werkzaamheden schade aan hun woningen en percelen is opgetreden. Deltares heeft op verzoek van de Provincie eerder een gebiedsbreed onderzoek² gedaan naar het oorzakelijk verband tussen de schades en de werkzaamheden aan het kanaal. Het rapport hierover is in mei 2020 gepubliceerd (Ref. [1]) en geeft een beeld over het oorzakelijk verband tussen schades en de verdieping van het kanaal. Het rapport geeft aan waar dit oorzakelijk verband duidelijk is en waar het onzeker is of er een verband is. Het betreffende rapport gaat niet in op de schademechanismen per pand. Door het ontbreken van een uitspraak over de oorzaak van de schade per pand is het perspectief voor bewoners en eigenaren onzeker; gaat de schade door of stopt het proces? Daarom heeft de Provincie aan Deltares gevraagd om een verdiepend onderzoek te doen en verschillende mogelijke schade-oorzaken per pand te analyseren.

De insteek van het onderzoek en de wens van de Provincie is om de getroffen bewoners duidelijkheid te kunnen geven over schade-oorzaken en hen perspectief te kunnen bieden over de toekomstige ontwikkeling van de schade. Het verdiepende onderzoek is opgedeeld in vier onderdelen:

1. Onderzoek of piping³ een verklarend faalmechanisme⁴ is voor de schade aan de panden in het gebied.
2. Beschrijf welke rol de aanwezigheid van veen kan spelen bij het ontstaan van schade en onderzoek of er veen aanwezig is onder een aantal specifieke panden. Zijn er ook andere elementen in de samenstelling van de bodem die tot schade kunnen leiden?
3. Indien piping en veen de schades niet kunnen verklaren, onderzoek dan welke andere oorzaken een verklaring kunnen geven voor de schade aan de panden.
4. Ga na of het verlagen van het kanaalpeil als mogelijke (tijdelijke) oplossing effectief is tegen piping en welke consequenties dat met zich meebrengt.

1.2 Kwaliteitsborging en onafhankelijkheid

Op verschillende manieren is door Deltares en door de Provincie Overijssel de kwaliteit van het onderzoek gewaarborgd:

- Expertise in het onderzoeksteam.
- Interne review Deltares.

² Gebiedsbreed schade onderzoek aan panden Almelo de Haandrik kanaal (17 maart 2020)

³ Piping is een faalmechanisme waarbij de waterstroom in de ondergrond zo sterk is en andere omstandigheden zodanig zijn dat zandkorrels kunnen worden weggespoeld.

⁴ Faalmechanisme is een opeenvolging van gebeurtenissen die leidt tot falen. In de geotechniek wordt dit gebruikt als definitie van een bepaald gedrag van de ondergrond dat leidt tot bezwijken met als gevolg schade.

- Controle op de feiten door deskundigen van de Provincie, waterschap en waterleidingbedrijf (specifiek voor het onderdeel kanaalpeilverlaging).
- Externe review door de begeleidingscommissie.

Door Deltares is de benodigde expertise gebundeld in het onderzoeksteam (zie kader) dat dit rapport heeft opgesteld. Daarin zitten experts uit de kennisvelden piping, veen, geologie, geohydrologie, funderingstechniek en remote sensing/satellietmetingen. Voor de constructieve aspecten van de panden is het team aangevuld met expertise vanuit TNO. Volgens het kwaliteitssysteem van Deltares zijn alle uitgaande stukken beoordeeld door interne reviewers.

Deltares onderzoeksteam:

De namen zijn om privacy redenen niet vermeld.

Deltares review:

De namen zijn om privacy redenen niet vermeld.

Bij de bepaling van de effecten van kanaalpeilverlaging is niet voor alle aspecten de benodigde kennis en expertise bij Deltares aanwezig. Om de kwaliteit te borgen, is dit onderdeel voor een controle op de feiten voorgelegd aan deskundigen van de Provincie, waterschap en waterleidingbedrijf.

Met bewoners is contact geweest tijdens het uitvoeren van de inspecties van de funderingen en het uitvoeren van grondonderzoek.

De Provincie heeft een onafhankelijke begeleidingscommissie samengesteld (zie kader) die kritisch meekijkt of er geen aspecten over het hoofd worden gezien. De commissie wordt geadviseerd door Prof. dr. ir. S. (Stefan) van Baars en Prof.dr.ir. M. (Matthijs) Kok. De Provincie legt de bevindingen voor aan de begeleidingscommissie en aan de adviseurs die daarover hun mening en advies geven. Dit verdiepend onderzoek is gestart in april 2021 en in september 2021 worden de resultaten openbaar gemaakt.

De onafhankelijke begeleidingscommissie bestaat uit:

Prof. dr. ir. S.N. (Bas) Jonkman, hoogleraar Waterbouwkunde aan de TU Delft

Dr. ir. C. (Kees) Maas, geohydroloog

Em. prof. ir. J. (Jan) Maertens, emeritus hoofddocent Grondmechanica en Funderingstechnieken aan de KU Leuven

Dr. ir. J.J. (Jetse) Stoorvogel, universitair hoofddocent Bodem - Landgebruik Interacties aan Wageningen Universiteit

Em. prof. drs. ir. J.K. (Han) Vrijling, emeritus hoogleraar Waterbouwkunde aan de TU Delft

Met de Provincie en de begeleidingscommissie is gedurende het onderzoek regelmatig interactie geweest. Met ingebrachte stukken en presentaties is de begeleidingscommissie geïnformeerd; ook heeft de commissie commentaar op de tussenproducten geleverd. De commentaren op de stukken zijn voorzien van een antwoord hoe het commentaar zal worden verwerkt in volgende versies. De Provincie agendeert de bijeenkomsten en levert een verslag van de bijeenkomsten.

Vrijwel alle commentaarpunten van de begeleidingscommissie zijn verwerkt. Bij ingrijpendere adviezen spreekt de Provincie met Deltares af of deze meegenomen moeten worden in het onderzoek. Bij de geleverde stukken zijn opmerkingen van de leden van de begeleidingscommissie gebundeld door de voorzitter van de commissie en als nota geleverd aan Provincie en Deltares. Deltares heeft op deze nota's geantwoord door per commentaarpunt aan te geven hoe dit in het verdere onderzoek wordt opgepakt. Van de bijeenkomsten zijn notulen gemaakt door de Provincie.

Datum bijeenkomst	Agendapunten/stukken
26 april 2021	Eerste bijeenkomst, werkafspraken
10 mei 2021	Plan van Aanpak Concept rapport met Onderzoeksplan, Desk research en Diepere analyse van beschikbare gegevens
2 juni 2021	Bespreken reactie Deltares op opmerkingen commissie en verwerking in onderzoeksplan Bespreken reactie Van Baars en Kok op onderzoeksplan Stand van zaken onderzoek en eerste bevindingen, presentatie
21 juni 2021	Bezoek commissie en adviseurs aan laboratorium en kolomproeven Deltares Geologische setting Kolomproeven, pipingonderzoek
28 juni 2021	Concept Deelrapport Deltares Stand van zaken pandinspecties Vooruitblik
15 juli 2021	Locatiebezoek commissie aan aantal panden langs het kanaal
19 juli 2021	Deelrapport I en II van Deltares Reactie Van Baars en Kok op deelrapport I Publieksvriendelijke voortgangsrapportage Deltares
2 augustus 2021	Presentatie schade-oorzaken
16 augustus 2021	Eerste concept eindrapport Deltares
30 augustus 2021 & 1 september 2021	Bespreking Provincie, begeleidingscommissie, adviseurs en Deltares over eindrapportage

Met de begeleidingscommissie zijn discussies gevoerd over en suggesties gedaan t.a.v.:

- Geohydrologie en de wenselijkheid van een baggerproef of pompproef om de kanaalweerstand en het dichtslibben van het kanaal te beproeven.
- Metingen in het kanaal om de grootte van de lekstroom door de sliblaag.
- Is er meer informatie over de geschiedenis van het kanaal toegevoegd.
- Zijn er enkele extra metingen in het laboratorium uitgevoerd.
- Is de analyse van de schademeldingen gebiedsbreed een terugkerend thema.

Aan de meeste opmerkingen en wensen van de begeleidingscommissie is in overleg met de Provincie tegemoet gekomen. Er is één advies waarvan geoordeeld is dat dit buiten de scope van het huidige onderzoek valt en dat is het advies om een baggerproef uit te voeren om na te gaan hoe snel het opnieuw dichtslibben van de kanaalbodem plaatsvindt. De analyse van de schademeldingen op gebiedsschaal heeft minder opgeleverd dan verwacht.

Op 27 augustus hebben de Begeleidingscommissie en de adviseurs van Baars en Kok hun opmerkingen geleverd, waarna Deltares op 10 september het definitief eindrapport heeft opgeleverd. De begeleidingscommissie komt op 20 september 2021 met haar eindoordeel en advies.

1.3 Aanpak van het onderzoek

Projecten uitvoeren op of in de Nederlandse ondergrond is niet zonder risico. Kennis over de opbouw van de ondergrond, het grondwater- en het oppervlaktewater, de eigenschappen van de ondergrond en oude en bestaande objecten zijn allemaal van belang om de risico's goed in te schatten. Idealiter zijn deze gegevens voorafgaand aan de werkzaamheden bekend en wordt middels metingen het proces gecontroleerd. In dit geval was het nodig om de schade-oorzaak te achterhalen zonder aanwezigheid van monitoring van de panden en heeft het onderzoeksteam al deze onderwerpen achteraf in beschouwing genomen. Alle kwesties in samenhang beschouwen is voor het gebied langs Kanaal Almelo - De Haandrik een complexe puzzel. De ondergrond van het gebied is geologisch en geohydrologisch⁵ afwisselend. In de ondergrond zijn over de afgelopen eeuwen veel menselijke ingrepen gepleegd. De informatie over de uitvoering van de werkzaamheden aan het kanaal en de panden is beperkt. De baggerwerkzaamheden zijn jaren geleden uitgevoerd en er is geen monitoring van de panden uitgevoerd tijdens de werkzaamheden. De panden zijn over het algemeen aangelegd in de vorige eeuw en voor veel panden geldt dat er geen tekeningen zijn van de funderingen en hoe de grondopbouw er onder de panden uit ziet.

Het hoofddoel van het verdiepend onderzoek is om aan de hand van de antwoorden op de vier gestelde vragen door de Provincie de schade-oorzaak of schade-oorzaken per pand vast te stellen. Om de oorzaken van de schades boven water te krijgen is er verdiepend onderzoek uitgevoerd bij 21⁶ onderzochte panden. Daarbij is met name gekeken naar de funderingstechnische zaken en naar de ondergrond. Deltares heeft hierbij samengewerkt met TNO voor de constructieve aspecten, zoals gevels, vloeren, dak, kelder en bouwkundige staat van het pand. Voor het verzamelen van gegevens zijn andere partijen betrokken:

⁵ Geohydrologie is een toegepaste wetenschap die zich bezig houdt met de bestudering van de stroming van water in de ondergrond

⁶ 2 geselecteerde panden van de genoemde 21 panden zijn niet nader meegenomen in dit verdiepend onderzoek. Deze bewoners hebben geen medewerking verleend. 19 panden zijn in dit verdiepend onderzoek nader geanalyseerd en opgenomen. Voor een toelichting en specificaties wordt verwezen naar paragraaf 7.1.

- Fugro voor het grondonderzoek.
- Wiertsema & Partners voor het laboratoriumonderzoek.
- VWB Bodem voor de handboringen rondom de panden.
- Bureau Vermeer voor pandopnamen en metingen aan panden.
- SkyGeo voor analyse van de historische satellietbeelden.
- GEOxyz voor metingen aan de bodem van het kanaal.

In de zoektocht naar de oorzaak van de schade aan de panden zijn de volgende condities in beeld gebracht:

- De lokale condities zoals maaiveldhoogte, afstand tot kanaal, werkzaamheden aan het kanaal en damwanden.
- De constructie van het pand en de fundering van het pand.
- De ondergrond onder de fundering en rondom het pand.
- De grondwaterstanden en grondwaterstroming.
- Vervormingen van panden, wegen en erven in het verleden.

De opdracht is om antwoord te geven op de specifieke vragen over piping en veen. Daar waar mogelijk is gevraagd duidelijkheid te geven over mogelijke andere schade-oorzaken. Daarvoor is een open vizier noodzakelijk. Daarom is informatie uit verschillende invalshoeken verzameld en beschouwd en is het onderzoeksteam kritisch bevraagd door de begeleidingscommissie om zo tunnelvisie te voorkomen. Historische gegevens over de aanleg van het kanaal, het ontstaan van de bebouwing en de ontginning van het gebied zijn in beschouwing genomen. Daarnaast zijn de nieuwste technieken, zoals satellietgegevens, ingezet voor een gebiedsbrede analyse van de situatie. De verzamelde gegevens zijn gebruikt om rekenmodellen te ijken en te valideren. De modellen zijn gebruikt om verschillende situaties, die in het verleden kunnen zijn opgetreden, door te rekenen op hun effecten ook als er uit het verleden geen metingen zijn.

Deltares heeft gefocust op 21 panden waarbij lokale condities in detail zijn onderzocht. Bij een aantal panden zijn pandinspecties gedaan en zijn rondom de panden handboringen uitgevoerd. Zo nodig is een inspectieput gegraven zodat zichtbaar is hoe de fundering eruit ziet en tot welke diepte deze reikt. In dwarsprofielen is het verloop van de bodemopbouw nauwkeurig in beeld gebracht en er zijn berekeningen gemaakt aan grondwaterstanden in verschillende omstandigheden.

Ook dit omvangrijke onderzoek kent beperkingen. Voor elk onderzocht pand is op basis van de gegevens en analyses een zo goed mogelijke uitspraak gedaan over de schade-oorzaak (of combinatie van schade-oorzaken). Het is niet mogelijk om, binnen de gestelde tijd en middelen, voor ieder pand met schade langs het kanaal een dergelijk verdiepend onderzoek te doen.

1.4 Status van dit rapport

Het voorliggende rapport is het definitieve eindrapport van Deltares over het verdiepend onderzoek. Het rapport bevat een samenvatting van de analyse en conclusies voor alle onderzochte panden en een antwoord op de vier vragen gesteld door de Provincie. De opmerkingen van de Begeleidingscommissie, adviseurs en de Provincie op het eerste en tweede concept rapport zijn zoveel mogelijk verwerkt. Dit definitieve rapport vormt de basis voor het eindadvies van de begeleidingscommissie.

2 Onderzoeksaanpak

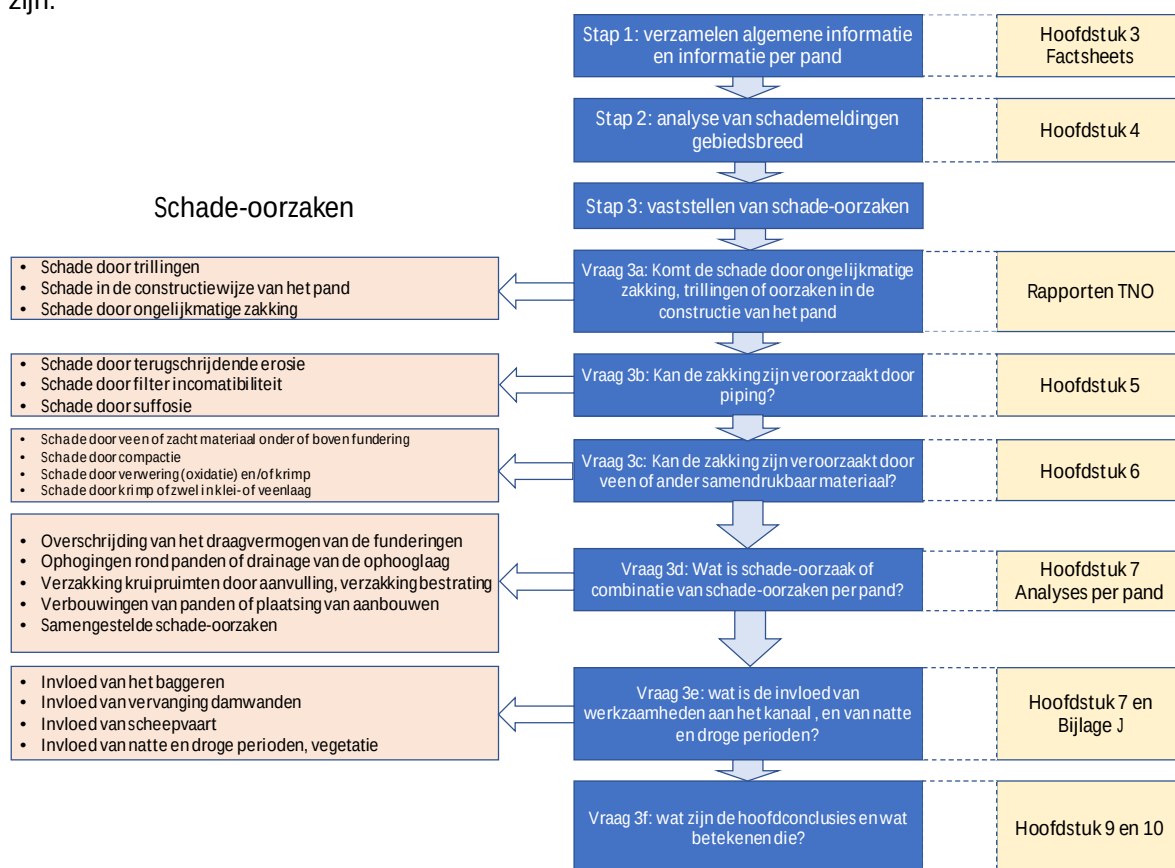
2.1 Inleiding

Om de door de Provincie gestelde vragen met een open vizier te beantwoorden hebben we in de aanpak van het onderzoek de diverse mogelijke schade-oorzaken als uitgangspunt genomen. Figuur 2.1 beschrijft welke schade-oorzaken zijn onderzocht, welke vragen hiervoor zijn beantwoord en waar dit te vinden is in dit rapport. Integratie van de antwoorden op deze vragen heeft geleid tot de beantwoording van de gestelde vragen. De beschreven aanpak betreft de eerste drie vragen van de Provincie. Het antwoord op de vierde vraag, de gevolgen van het verlagen van het kanaalpeil, is alleen relevant als uit het onderzoek naar vraag 1 blijkt dat piping een schade-oorzaak is.

Paragraaf 2.2 gaat in op de stapsgewijze integrale aanpak van het onderzoek naar de schade-oorzaken. Paragraaf 2.3 gaat in op de opzet van het onderzoek naar de gevolgen van het verlagen van het kanaalpeil. Paragraaf 2.4 geeft aan hoe de onderzoeksaanpak is terug te vinden in de opzet van dit rapport.

2.2 Aanpak van het onderzoek naar de schade-oorzaak

Figuur 2.1 geeft de stapsgewijze aanpak van het onderzoek weer, de informatie die daaruit wordt gehaald ten aanzien van de schade-oorzaken en waar de resultaten in dit rapport terug te vinden zijn.

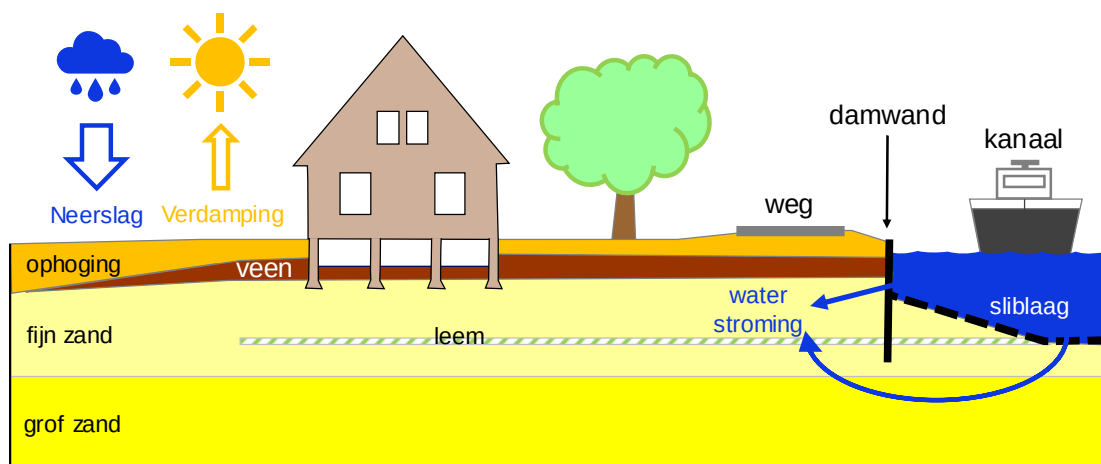


Figuur 2.1 Aanpak van het onderzoek (midden), schade-oorzaken (links) en relatie met de opbouw van het rapport (rechts)

2.2.1

Stap 1: verzamelen algemene informatie en informatie per pand

Figuur 2.12 geeft een schetsmatig beeld van de factoren die een rol spelen bij het analyseren van de schade-oorzaken. Dit beeld kan per pand verschillen, waarbij de wijze van funderen, de laag waarop de fundering staat, de grondopbouw, de diepte van de damwanden en de afstand tussen pand en kanaal variëren.



Figuur 2.2 Schematische doorsnede van de situatie van de panden en het kanaal met relevante factoren voor de analyse van de schade-oorzaken. De aanwezigheid van de getekende leemlaag is hoogst onzeker en zeker niet bij alle panden ononderbroken aanwezig vanaf het kanaal tot voorbij de panden

Om deze factoren in beeld te brengen is in de eerste plaats algemene informatie voor het hele gebied verzameld. Deze omvat:

- Geschiedenis van het kanaal en de werkzaamheden aan en rond het kanaal.
- Geologische ontstaansgeschiedenis, ontginningsgeschiedenis en grondwatersituatie.
- De bebouwingsgeschiedenis en wijze van funderen van de panden.
- Eerdere onderzoeken naar de gevolgen van werkzaamheden aan het kanaal.
- Beschikbaar grondonderzoek.

Daarnaast is informatie per pand bijeengebracht:

- Een algemene beschrijving van de meetraai die rond het pand en naburige panden is ingericht.
- Schademeldingen.
- Reden om het pand in het onderzoek op te nemen.
- Werkzaamheden aan het kanaal.
- Overige kenmerken in relatie tot mogelijke schade-oorzaken, zoals aanwezigheid van damwanden, riolering.
- Geologie ter plaatse van de meetraai afgeleid uit grondonderzoek.
- Peilbuiswaarnemingen en geohydrologie ter plaatse van de meetraai.
- Kenmerken van het pand: bouwjaar, werkzaamheden aan de panden, funderingswijze en aanwezigheid grote vegetatie.
- Observaties in het onderzoek in 2019-2020 (waar van toepassing).
- Observaties in het huidige onderzoek.
- Resultaten funderingsinspectie.
- Resultaten van grondonderzoek.

Deze informatie is beschreven in factsheets per pand, bijgevoegd in Bijlage K.

2.2.2 **Stap 2: analyse schademeldingen gebiedsbreed**

Het doel van stap 2 is door het gebiedsbreed analyseren van de schademeldingen aanwijzingen te vinden over schade-oorzaken en bepalende factoren in het hele gebied. Deze worden vervolgens per pand nader onderzocht. Dat gebeurt door een analyse van schademeldingen, werkzaamheden aan het kanaal en historische satellietmetingen van zakkings in het gebied.

Voor deze analyse zijn tijdlijnen opgesteld voor de verschillende gebeurtenissen. Deze tijdlijnen worden onderling vergeleken. Zo wordt de tijdlijn van alle circa 370 schademeldingen vergeleken met de tijdlijn van de werkzaamheden. De vergelijking wordt aangevuld door de analyse heterogeniteit en sprongen in satellietmetingen van zakkings vanaf 2010. Hierbij wordt ook de relatie tussen schademeldingen, zakkings en gebiedskenmerken zoals bodemopbouw onderzocht.

2.2.3 **Stap 3: vaststellen van schade-oorzaken**

Voor elk onderzocht pand stellen we de volgende zes vragen:

- a. Komt de schade door ongelijkmatige zakking, trillingen of andere oorzaken of bouwkundige oorzaken van het pand?
- b. Kan de zakking zijn veroorzaakt door piping?
- c. Kan de zakking zijn veroorzaakt door veen of ander samendrukbaar materiaal onder de panden en funderingen?
- d. Wat is schade-oorzaak of combinatie van schade-oorzaken per pand?
- e. Welke invloed hadden de werkzaamheden aan het kanaal, en welke invloed hebben natte en droge perioden op de schade?
- f. Wat zijn de hoofdconclusies en wat betekenen die (is er een eenduidige oorzaak voor de schade te geven en welke (meerdere) mechanismes hebben een rol gespeeld)?

Hierna volgt een toelichting hoe het onderzoek deze vragen beantwoordt.

Vraag 3a: Komt de schade door ongelijkmatige zakking, trillingen of bouwkundige oorzaken van het pand?

Bij alle panden is eerst een bureaustudie uitgevoerd, waarbij zoveel mogelijk historische en recente informatie over de panden is verzameld en beoordeeld. Hierin zijn, bij toestemming van de bewoners, ook eerdere schade opnamen door bouwkundige bureaus opgenomen. Deze gegevens vormen de basis voor het onderzoek per pand waarin deskundigen van Deltares en TNO de constructie en de kruipruimte van de panden hebben geïnspecteerd.

Uitgangspunt voor het onderzoek naar de schade-oorzaken is de volgende indeling die TNO hanteert in het schade-onderzoek:

- Schade door ongelijkmatige zakkings.
- Schade door trillingen.
- Overige schade met oorzaak in de constructiewijze van het pand.

Per pand is vastgesteld of er sprake is van schade als gevolg van ongelijkmatige zakkingen of schade die niet het gevolg is van ongelijkmatige zakkingen. Als TNO constateert dat er sprake is van schade als gevolg van ongelijkmatige zettingen dan is het schade-onderzoek geïntegreerd met het onderzoek van Deltares, waarbij de kennis van de opbouw van de bodem en de kenmerken van de fundering zijn ingebracht. De volgende schademechanismen kunnen dan aan de orde zijn:

- Piping (vraag 3b).
- Veen of ander samendrukbaar materiaal onder de fundering (vraag 3c).
- Andere oorzaken (vraag 3d).

Vraag 3b: Kan de zakking zijn veroorzaakt door piping?

Het onderzoek naar piping als schade-oorzaak bestaat uit:

- Het beoordelen of terugschrijdende erosie een schade-oorzaak is, onder andere door analyse van de verticale en horizontale verhangen waargenomen door middel van peilbuizen in 12 raaien ter plaatse van de panden en door veldwaarnemingen.
- Het beoordelen of suffosie een schade-oorzaak is, door analyse van de interne stabiliteit van de grondopbouw op basis van de korrelverdelingen van grove en fijne zanden, en directe meting van de interne stabiliteit in kolomproeven.
- Het beoordelen of de grondwaterstroming rond het kanaal suffosie mogelijk maakt.

De grondwaterstroming rond het kanaal wordt gemodelleerd om verschillende condities langs het kanaal en in de tijd te kunnen berekenen. De simulatie van de grondwaterstroming rond het kanaal ondersteunt verschillende onderdelen van het onderzoek:

- De analyse van piping als schade-oorzaak (vraag 3c).
- De beoordeling welke invloed de werkzaamheden aan het kanaal en natte en droge perioden hebben op de schade per pand (vraag 3d).
- Bepaling van het effect van verlaging van het kanaalpeil op de grondwatersituatie in de omgeving (paragraaf 2.3).

Vraag 3c: kan de zakking zijn veroorzaakt door veen of ander samendrukbaar materiaal?

De aanwezigheid van veen of ander samendrukbaar materiaal wordt afgeleid uit boringen, sonderingen, gutsboringen en de funderingsinspectie. De funderingsinspectie geeft tevens informatie over het funderingsniveau, soort en conditie van de fundering. Uit het onderzoek bij de panden kunnen drie gevallen worden onderscheiden:

- Er is geen veen of ander samendrukbaar materiaal onder de fundering aanwezig.
- Er is veen of ander samendrukbaar materiaal aanwezig maar boven het aanleg niveau van de fundering.
- Er is veen of ander samendrukbaar materiaal onder de fundering aanwezig.

In geval dat veen of andere samendrukbare lagen aanwezig zijn **onder** het funderingsniveau is er een scala van mogelijke oorzaken van de zakking van het pand, zoals samendrukking, kruip, krimp en oxidatie in geval van veen. Deze oorzaken kunnen worden verergerd door ophogingen nabij het pand en verhoging van de belasting vanuit het pand of kruipruimte (vraag 3d) of verlaging van de grondwaterstand (vraag 3e).

In geval dat veen of andere samendrukbare lagen aanwezig zijn **boven** het funderingsniveau zijn er dezelfde mogelijke oorzaken van de zakking rondom het pand. Deze oorzaken kunnen worden verergerd door ophogingen rondom het pand (vraag 3d) of verlaging van de grondwaterstand (vraag 3e).

In geval veen of ander samendrukbaar materiaal boven het funderingsniveau aanwezig is, bijvoorbeeld onder de kruipruimte dan kan krimp en oxidatie van veen een oorzaak zijn van verzakken van de bodem van de kruipruimte. Schade aan de panden zelf is in dit geval minder waarschijnlijk.

In geval dat piping niet oorzaak van de zakking is en er is **geen** samendrukbaar materiaal onder het funderingsniveau aanwezig dan is er sprake van “andere” oorzaken van de zakking van de panden. Een van de mogelijk andere oorzaken is het overschrijden van het draagvermogen van de fundering op poeren. Dit wordt onderzocht in vraag 3d.

Uit het eerdere onderzoek van Deltares bleek reeds dat de marge tussen belasting en draagkracht bij de aangetroffen funderingen laag was. Tijdelijke verhoging van de grondwaterstand door werkzaamheden aan het kanaal of door extreme neerslag kan in zo'n situatie (mede) een oorzaak zijn waardoor zakking gaat optreden. Dit wordt onderzocht in vraag 3e.

Vraag 3d: wat is de schade-oorzaak of combinatie van schade-oorzaken per pand?

Deze stap omvat de synthese van de voorafgaande bevindingen uit het schade-onderzoek aan de panden (vraag 3a), de analyse van piping (vraag 3b) en de aanwezigheid van veen of ander samendrukbaar materiaal (vraag 3c).

De te beschouwen andere schade-oorzaken zijn beschreven in paragraaf 2.4 van het Definitief rapport Desk research, Diepere analyse van de gegevens en Onderzoeksplan [44]:

- Overschrijding van het draagvermogen van de funderingen.
- Verzakkingen door ophogingen rond panden of drainage van de ophooglaag.
- Verzakking kruipruimte door aanvullingen van kruipruimten.
- Schade bestaande uit verzakking van de bestrating om de panden.
- Verbouwingen van panden of plaatsing van aanbouwen aan panden.
- Samengestelde schade-oorzaken.

Vraag 3e: wat is de invloed van werkzaamheden aan het kanaal, en van natte en droge perioden?

Werkzaamheden aan het kanaal kunnen hebben geleid tot verlaging of verhoging van de grondwaterstand en trillingen. Verlaging van de grondwaterstand verergert de zakkingen veroorzaakt door veen of andere samendrukbare lagen. Een verhoging van de grondwaterstand kan tot zakking leiden als de draagkracht van de fundering wordt benaderd. Het onderzoek zal de gevolgen van veranderingen in de grondwaterstand beschouwen als gevolg van:

- Tijdelijke verhoging van de grondwaterstand tijdens het baggeren als gevolg van verhoogde lekkage door het verwijderen van de sliblaag.
- Verlaging van de grondwaterstand door het vervangen van een lekkende damwand door een langere dichte damwand.
- Droge perioden.
- Versterking van de invloed van droge perioden op de grondwaterstand door de aanwezigheid van grote vegetatie (bomen).

Vraag 3f: wat zijn de hoofdconclusies en wat betekenen die (is er een eenduidige oorzaak voor de schade te geven en welke (meerdere) mechanismes hebben een rol gespeeld)?

Deze stap geeft de hoofdconclusie weer alsmede de synthese van de antwoorden op de vier gestelde vragen uit het onderzoek. Dit door een integrale beschouwing van de analyse van

de schade-oorzaken voor de panden (vragen 3d en 3e), de algemene gebiedskenmerken (stap 1) en de bevindingen uit de analyse van schademeldingen (stap 2).

Ook geeft het onderzoek een indicatie van het verloop van de schade aan de onderzochte panden in de toekomst als gevolg van de verschillende oorzaken.

2.3 Aanpak van het onderzoek naar de effecten van de verlaging van het kanaalpeil

Het eerste deel van de vierde onderzoeksvraag betreft na te gaan of het verlagen van het waterpeil in het kanaal als mogelijke (tijdelijke) oplossing effectief is tegen piping. Indien piping een schade-oorzaak blijkt te zijn wordt het effect van verlaging van het kanaalpeil op het mechanisme bepaald. Grondwatermodellen ondersteunen de analyse door simulatie van de invloed van de verlaging op de grondwatersituatie in de omgeving (zie stap 3b in paragraaf 2.2.3).

Het tweede deel van de onderzoeksvraag is na te gaan welke andere effecten een verlaging van het kanaalpeil heeft. Omdat sprake is van een veelheid van belangen in de omgeving van het kanaal is een aanpak van grof naar fijn gevolgd.

Het onderzoek beschouwt de volgende effecten:

- Scheepvaart (capaciteit).
- Waterbeheersing oppervlaktewater.
- Waterkwaliteit.
- Grondwaterbeheersing.
- Bebouwing.
- Waterkeringen (vervorming en stabiliteit van damwanden en beschoeiingen).
- Waterbouwkundige constructies (sluizen en stuwen).
- Infrastructuur wegen en bruggen.
- Infrastructuur riolering, kabels en leidingen.
- Landbouw.
- Natuur en ecologie.
- Waterwinning.
- Overige onderwerpen.

2.4 Opzet van dit rapport

2.4.1 Opbouw documentatie

Er is voor gekozen om de hoofdtekst van dit rapport zo beknopt mogelijk te houden. De hoofdtekst weerspiegelt de aanpak van het onderzoek naar de schade-oorzaken zoals weergegeven in Figuur 2.1, de effecten van de verlaging van het kanaalpeil, een samenvatting van de conclusies per pand en de beantwoording van de vier onderzoeksvragen.

Meer uitgebreide informatie is gegeven in een aantal aparte bijlagen:

- Uitwerking InSar satellietmetingen (Bijlagen A, B en C).
- Uitleg over piping suffosie (Bijlage D).
- Achtergronden bij Effecten kanaalpeilverlaging (Bijlage E).
- Gegevens over damwanden (Bijlage F).
- Samenvatting van het eerdere gebiedsbrede onderzoek van Deltares (2020) (Bijlage G).

- Uitwerking draagkracht poeren en strokenfundering en de invloed van grondwaterstand daar op (Bijlage H).
- Rapportage over kolomerosieproeven (Bijlage I).
- Rapportage over grondwaterstand analyse en scenario's (Bijlage J).
- De factsheets per pand waarin alle verzamelde gegevens op pandniveau worden samengevat (Bijlage K).
- TNO rapporten over de pandopnamen en pandinspecties (Bijlage L).
- Samenvatting eerdere analyse kwel en toetsing (Bijlage M).
- Samenvatting bevindingen pand analyse (Bijlage N).

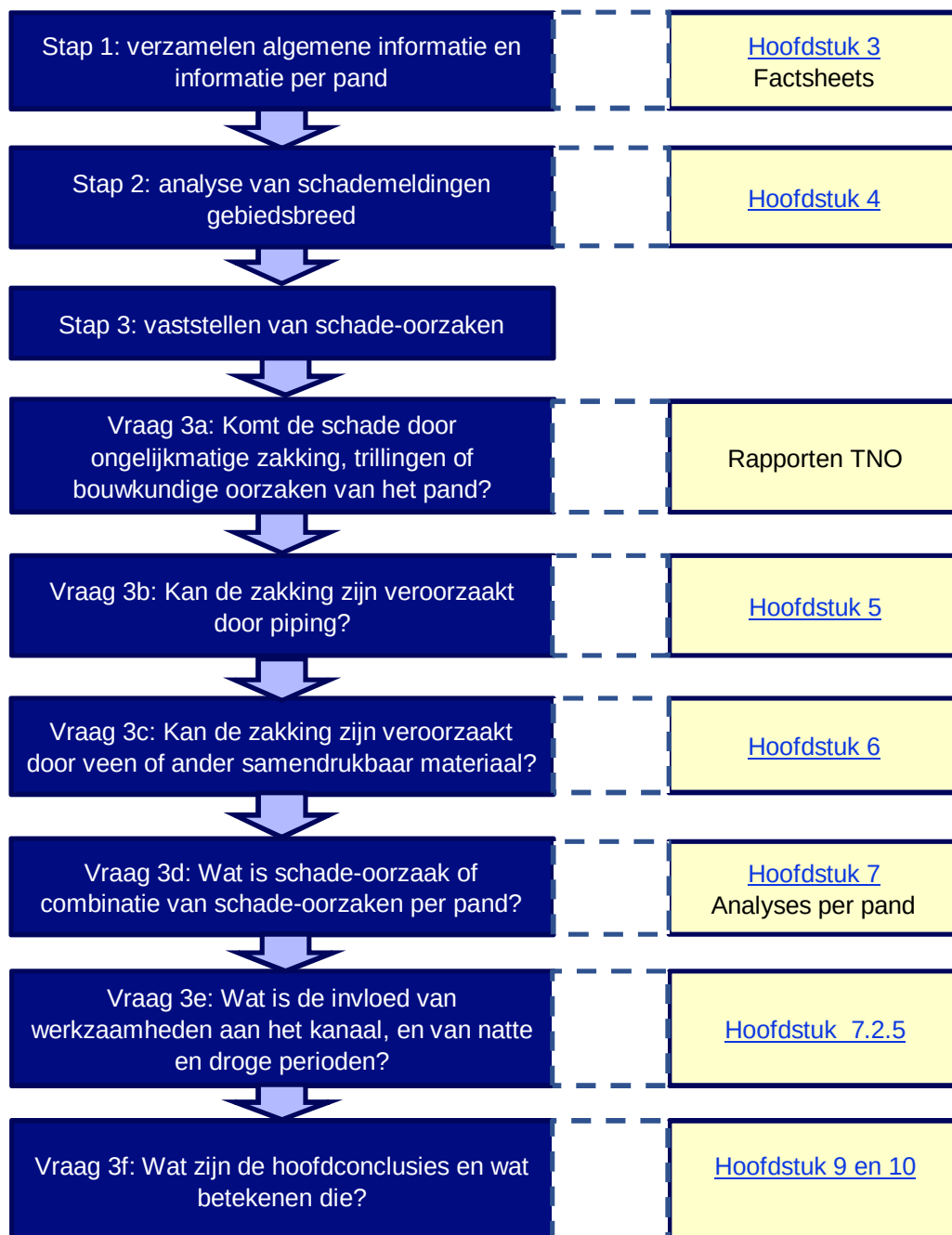
De totale feitelijke rapportage over het veld- en laboratoriumonderzoek zijn in de volgende aparte documenten opgenomen:

- Fugro (2021). Grondonderzoek Kanaal Almelo – De Haandrik Overijssel – Rapportage geotechnische onderzoek | Almelo. Rapport 1321-190893 d.d. 24 juni 2021.
- Wiertsema&Partners (2021) Rapport 79024 – 1R 77983 Geotechnisch laboratoriumonderzoek.
- VWB gutsboringen opgeleverd als aparte bestanden op SharePoint, opgenomen in factsheets.
- Van de databestanden van SkyGeo (satellietmetingen) is geen apart rapport, analyses zijn verwerkt in dit rapport en figuren op pandniveau in factsheets. De metingen zijn toegankelijk via het dataportaal van SkyGeo.
- De metingen van de kanaalbodemscan (GeoXYZ) zijn geleverd en staan op SharePoint.
- Universiteit Gent heeft enkele korrelverdelingen en aerometerproeven uitgevoerd. Deze zijn als losse bestanden geleverd en verwerkt in het rapport over kolomproeven.

De hoofdtekst over piping en veen en ander samendrukbaar materiaal en de factsheets per meetraai vatten de relevante informatie uit deze feitelijke rapportages samen.

2.4.2 Leeswijzer

De aanpak van het onderzoek naar de schade-oorzaken (onderzoeksvragen 1, 2 en 3) is de leidraad voor dit rapport. De hoofdlijn van het onderzoek is te vinden in hoofdstuk 1, 2, 7, 9 en 10. Hoofdstuk 1 en 2 geven de context weer waarbinnen dit onderzoek wordt uitgevoerd. Hoofdstuk 7 gaat in op de oorzaak van de schade aan de onderzochte panden en hoofdstuk 9 en 10 geven de conclusies weer. De overige hoofdstukken betreffen inhoudelijke onderbouwingen van de onderzoeksvragen.



[Hoofdstuk 8](#) beschrijft de resultaten van het onderzoek effecten verlaging kanaalpeil (onderzoeksvraag 4).

3 Algemene informatie ten behoeve van het onderzoek

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de verzamelde informatie die in de studie gebruikt wordt. Dit is in Figuur 2.1 Stap 1 genoemd. In de eerste plaats is algemene informatie voor het hele gebied verzameld, welke omvat:

- Geschiedenis van het kanaal en de werkzaamheden aan en rond het kanaal (paragraaf 3.2).
- Geologische ontstaansgeschiedenis, ontginningsgeschiedenis (paragraaf 3.3) en grondwatersituatie (paragraaf 3.4).
- De bebouwingsgeschiedenis en wijze van funderen van de panden (paragraaf 3.5).
- Eerdere onderzoeken naar de gevolgen van werkzaamheden aan het kanaal (paragraaf 3.6).
- Beschikbaar en aanvullend grondonderzoek (paragraaf 3.7).

3.2 Kanaal Almelo – De Haandrik

3.2.1 Geschiedenis van het kanaal (kort overzicht)

Het Kanaal Almelo – De Haandrik, ook aangeduid als vaarweg V77, ligt tussen sluis Aadorp en sluis De Haandrik en heeft een lengte van circa 32,6 km met een breedte variërend van veelal 20 m tot maximaal 40 m. Het kanaal loopt van de onderleider (sifon) net ten zuidoosten van sluis Aadorp (km 0,0) tot de grens met Drenthe (km 32,6), circa 500 m voorbij de sluis van De Haandrik. Net voor km 32 kruist het kanaal de rivier de (Overijsselse) Vecht. Aan weerszijden van de Vecht ligt in het kanaal een schutsluis.

Het kanaal is midden 19e eeuw aangelegd, onder andere op basis van plannen van ingenieur Stieltjes (1819 – 1878), om de Overijsselse Kanalen van water te voorzien, slechts ten dele voor de industriële ontwikkeling in de Twentse regio, maar vooral voor transport van met name van veen en turf dat in het omliggende hoogveengebied werd ontgonnen (zie [58]). In de concessie volgens het Koninklijk Besluit van 13 oktober 1850 staat vermeld: “Het graven van een kanaal van de Regge naar Daarle en van daar naar de Vecht boven den Hardenbergh met de nodige sluizen, bruggen en eene stuw in de rivier de Vecht, voor eene opstuwing van ongeveer acht ellen⁷ (8) boven A.P.”.

Door de Overijsselsche Kanalisatie Maatschappij werd het kanaal van Almelo naar Zwolle gerealiseerd, waarbij ook een tak van Vroomshoop naar De Haandrik werd aangelegd. In 1858 werd het kanaal opengesteld. Op de waterstaatskaart van 1884 is een kanaalpeil van AP +9,30 m aangegeven. Op de waterstaatskaart van begin 20^e eeuw is een waterstand van NAP +9,10 m aangegeven [59], [60].

In de periode na de eerste wereldoorlog ontstonden plannen om het Twentekanaal aan te leggen. Het duurde tot 1953 tot de aansluiting van het Twentekanaal naar Almelo gereed was.

⁷ In 1820 werd een el gelijk gesteld aan een meter.



Figuur 3.1 Aanleg van de Overijsselse kanalen, omslag van RWS-uitgave over OKM en MOK [Smolders] [58]

Voor de bevordering van de scheepvaart op het traject Almelo-Coevorden is het kanaal in 1965 verdiept. In de jaren tachtig en negentig werd het kanaal verbeterd. In Aadorp werd in 1987 een nieuwe sluis gebouwd en zijn de bruggen vernieuwd. Volgens bestek 9706 is de vaargeul in het kanaal bij verruiming tot 400 ton (scheepvaart) gebaggerd tot NAP +5,45 à NAP +5,7 m (waterdiepte 3,40 m met enkele decimeters extra verdieping in verband met onderhoud).

Volgens mondelinge informatie van de Provincie Overijssel zijn rond 1997 bij Hardenberg een zwaaiком aangelegd en bij de bruggen verbredingen van de vaargeul gemaakt. In 2006 / 2007 vond een opwaardering van het kanaal plaats om dit gereed te maken voor 600 ton scheepvaart. Rond 2008 is onderhoudsbaggerwerk uitgevoerd. Dat betrof het weer in profiel brengen van enkele uitgezakte onderwatertaluds langs de oevers, waar door de scheepvaart erosie was opgetreden. Dit werk is uitgevoerd vanaf de wal met een kraan met lange giek, onder toepassing van GPS-besturing om het gewenst profiel van 1:4 te herstellen. Daarnaast zijn enkele geërodeerde waterbodems met een egalisator (een soort hark) achter een klein baggerschip recht getrokken (waarbij netto geen grond is afgevoerd, maar wel in de hogere bodemdelen de aanwezige sliblaag tijdelijk kan zijn verstoord).

Vanwege stimulering van transport over water is rond 2010 besloten om het kanaal verder op te waarderen om grotere schepen in klasse CEMT II met belading tot circa 700 ton toe te kunnen laten, conform de daarvoor geldende richtlijnen [61]. Volgens het verkeersbesluit van Gedeputeerde Staten [62] geldt dat de standaard maximum afmetingen voor het Kanaal Almelo – De Haandrik zijn vastgesteld op:

- Lengte: 55 m (en schepen tot 67 m, inclusief actieve kopbesturing).
- Breedte: 6,60 m à 7,40 m (afhankelijk diepgang).
- Diepgang: 2,60 m respectievelijk 2,40 m (afhankelijk breedte).

De vaargeul van het kanaal moest daarvoor worden verbreed en het aantal wachtplaatsen vergroot. De wachtplaatsen zijn nodig omdat het grootste deel van het kanaal is ingericht als enkelstrooks kanaal, maar er wordt (onder voorwaarden) toegestaan dat schepen elkaar passeren.

Tussen het tweede deel van 2010 en de zomer van 2016 werd de opwaardering van het kanaal uitgevoerd waarbij volgens een memo van Provincie Overijssel [63] de volgende werkzaamheden zijn uitgevoerd (zie ook Figuur 3.2):

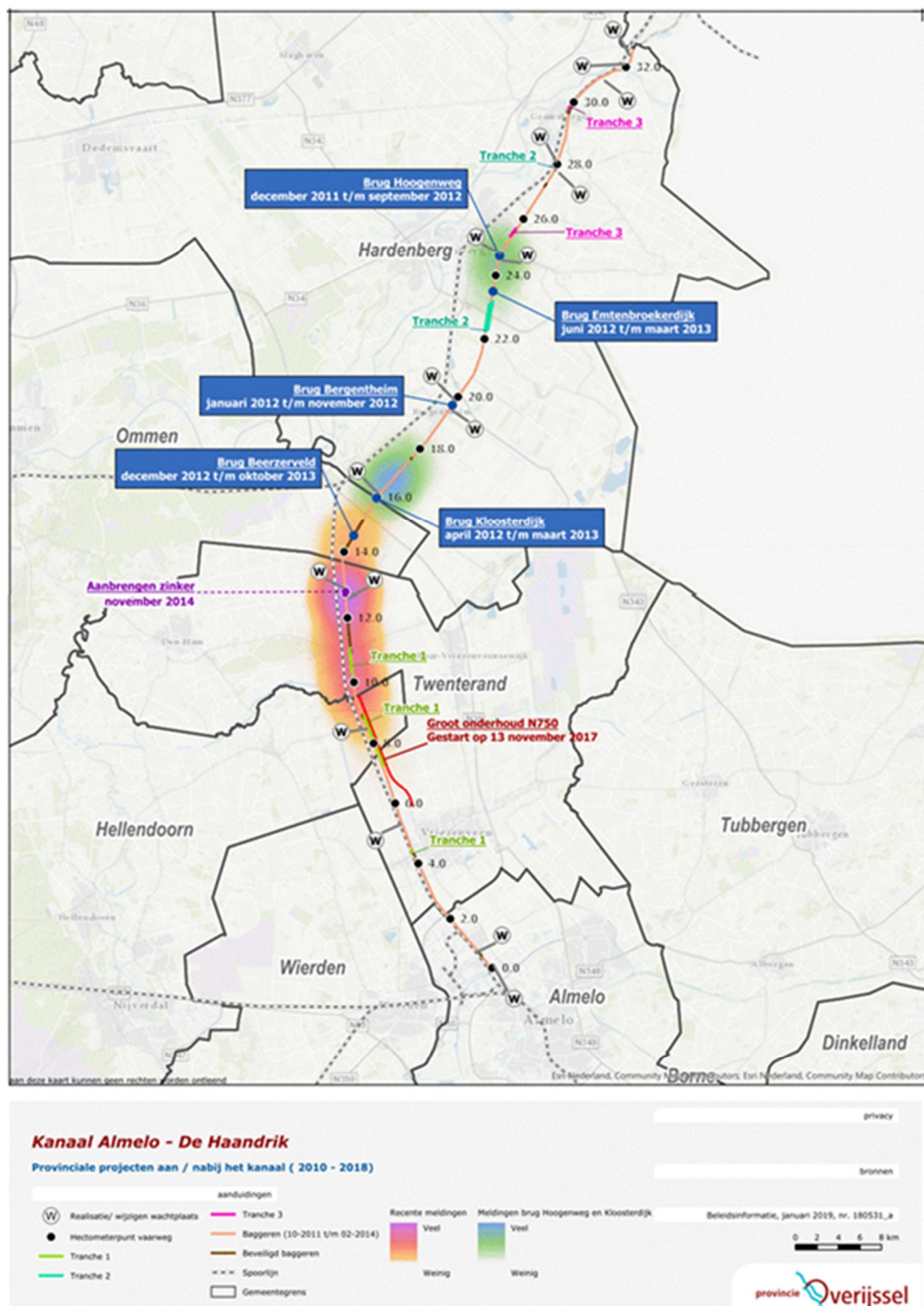
- Vervangen van 5 beweegbare bruggen (Hoogenweg, Bergentheim, Kloosterdijk, Emtenbroekerdijk, Beerzerveld) om de doorvaart te verbreden naar 9,5 à 10,5 m.
- Aanpassen en realiseren van wachtplaatsen.
- Aanleg van voorzieningen voor scheepvaart, bedrijven en fauna-uittrede.
- Baggerwerken.

Ten behoeve van de opwaardering van het kanaal voor de scheepvaart zijn bestaande wachtplaatsen aangepast en enkele nieuwe aangelegd (zie locaties aangeduid met W in Figuur 3.2). Daarbij zijn ook oevervoorzieningen (damwanden) vernieuwd.

Het baggerwerk ten behoeve van de opwaardering van het kanaal is in de periode oktober 2011 tot februari 2014 uitgevoerd door de firma Heuvelman Ibis. Bij het baggeren is een onderhoudsdiepte (waterdiepte) van 3,60 m gerealiseerd, iets meer dan de diepte van 3,50 m die is aangegeven in principeprofielen. Daarbij is het onderwaterprofiel verbreed naar een trapeziumvormig profiel (horizontale bodem en flauwe taluds) in plaats van een V-profiel. Dit werk is verricht onder monitoring met sonarpeilingen met controle via multibeam-peilingen na afloop. Derhalve zijn er geen redenen om te vermoeden dat de baggerdiepte bij dit werk te groot zou zijn geweest.

In Geerdijk is in november 2014 een nieuwe zinker aangelegd. Volgens mondelinge informatie van de Provincie is hierbij vermoedelijk de gebaggerde geul na afloop niet goed genoeg afgedekt. De daardoor aanwezige overdiepte is tijdens het baggerwerk op het kanaal hersteld door hier bentoniet aan te brengen. Door eigenaren van omliggende percelen werd melding gedaan van vernatting in dezelfde periode. Een duidelijke samenhang is echter niet vastgesteld (ref. [73]). Volgens betrokkenen van Provincie betrof het enerzijds vernatting tijdens aanleg van funderingswerken en is waarschijnlijker dat er een samenhang was met weersomstandigheden. In deze omgeving zijn echter meer meldingen van schade gedaan na het baggeren. Dit betrof scheurvorming in woningen. Deze kwesties worden nader in voorliggend rapport behandeld.

Ter plekke van Niet Gesprongen Explosieven (NGE) verdachte locaties is aanvullend baggerwerk verricht door de firma van Heteren tussen medio 2015 en maart 2016. Vanwege voorkomende kabels en leidingen voor de bediening van bruggen was zorgvuldige uitvoering van het baggerwerk noodzakelijk. Dit werk is uitgevoerd met lokaal baggeren (met een zuiginstallatie) begeleid door duikers. Vanwege de kabels en leidingen is de diepte beperkt.

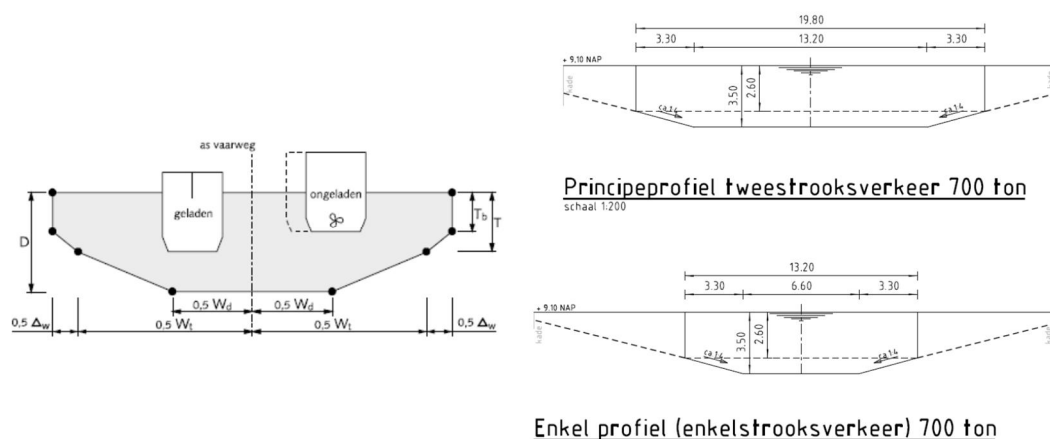


Figuur 3.2 Uitgevoerde werken bij de opwaardering van Kanaal Almelo – De Haandrik in de periode 2010-2018 met aanduiding van uitgevoerde werken, meldingen en kilometrering langs het kanaal [64]

Overwegend is Kanaal Almelo – De Haandrik nu op verschillende delen geschikt voor enkelstrooksverkeer, afgewisseld met trajecten met een krap profiel tweestrooksverkeer. Op 8,89 km is krap tweestrooksverkeer mogelijk en over 22,51 km is de vaarweg enkelstrooks [66]. Volgens figuur 8 en tabel 18 uit de Richtlijnen Vaarwegen 2020 gelden voor CEMT II de volgende afmetingen, zoals aan gegeven in Tabel 3.1 en Figuur 3.3.

Tabel 3.1 Afmetingen van vaarweg in klasse CEMT II [bron: Richtlijnen vaarwegen 2020 [61], tabel 18]

Minimum vaarweg afmetingen CEMT II	Waterdiepte vaargeul D [m]	Vaargeul breedte W_d [m]	Totale breedte W_t [m]	Onderwater taluds	Zijwand toeslag ΔW [m]
Enkelstrooks verkeer	3,3-3,4	6,6	13,2	1:4	ntb
Krap tweestrooks verkeer	3,3-3,4	13,2	19,8	1:4	4



Figuur 3.3 Links: Minimum vaarweg profiel [bron: Richtlijnen Vaarwegen 2020 [61], deel van figuur 8], Rechts: implementatie volgens bestek baggerwerk. Bron: Provincie Overijssel, kanaal-upgrade 700 ton, principe profielen, tekening 9W0044.A0/2323-803

Volgens recente multibeam-peilingen is de waterdiepte van de vaargeul na het baggeren van enige jaren geleden afgenomen (mondelinge mededeling). De oorzaak en aard van de verondieping (slib of zand) is niet bekend. Mogelijke oorzaken zijn afstervende water- en oeverplanten, aanvoer van slib van elders, nazakken van taluds na verdieping, beweging van slib onder invloed van scheepvaart. Hier doet de Provincie momenteel onderzoek naar. De meeste wachtplaatsen waar geen maatregelen zijn getroffen bij de opwaardering, voldoen niet aan de benodigde waterdiepte van 3 m voor schepen met een diepgang van 2,60 m. Maar ook enkele opgewaardeerde wachtplaatsen voldoen niet geheel meer aan de waterdiepte van 3 meter.

3.2.2 Geschiedenis damwanden / oeverconstructies

Op 7 juni 2021 is aanvullende informatie verkregen over de damwanden in de keringen langs het kanaal tijdens een gesprek met een specialist van Provincie Overijssel.

De eerste kaden langs het kanaal zijn aangelegd halverwege de 19^e bij het graven van het kanaal, met de daarbij vrijgekomen grond. De kades aan weerszijden van het kanaal vormen de waterkeringen langs het kanaal. Het kanaal is waarschijnlijk eerst als een ontgraving in V-vorm gerealiseerd waarbij de oevers door houten beschoeiingen werden gesteund en beschermd.



Figuur 3.4 Werkzaamheden aanleg kanaal nabij Vriezenveen. Bron: www.canonvannederland.nl

In de afgelopen anderhalve eeuw is het kanaal vermoedelijk op verschillende tijdstippen en locaties (beperkt) verbreed waarbij tevens langs de oevers van het kanaal oeverconstructies (ook wel boordvoorzieningen genoemd) in de vorm van damwandconstructies zijn aangelegd. De oudste damwanden waren ondiepe betonnen damwanden, die rond 1973 à 1974 over lange strekkingen zijn aangebracht. Uit informatie van de Provincie Overijssel (zie hierna) blijkt dat in de loop van de tijd een deel van de betonnen damwanden zijn verbeterd en vervangen. Bekend is, dat in 2005 op een aantal trajecten bestaande (betonnen) damwanden verankerd zijn en nieuwe stalen damwanden geplaatst zijn. Bij de opwaardering van het kanaal naar CEMT II – scheepvaart (700 ton) in de periode 2011 tot 2016 hebben ook de nodige aanpassingen aan de oeverconstructies plaats gevonden, waarbij in de periode 2011-2012 een aantal bestaande oeverconstructies verankerd zijn en bij een aantal lig- en wachtplaatsen nieuwe stalen damwanden zijn geïnstalleerd. Een overzicht en inventarisatie van de oudere damwanden is gegeven in de rapportage van RHDHV betreffende de toetsing van de regionale kering op waterveiligheid uit 2008 [72]. Bijlage M gaat hier verder op in.

Vanaf 2019 worden op een aantal trajecten de betonnen damwanden vervangen door onverankerde stalen damwanden, het eerst in de periode 2019-2020. In de zomer van 2021 worden de betonnen damwanden aan de oostzijde vervangen vanaf de Schoolstraat in Vroomshoop tot Fortwijk. Volgens [68] heeft in november 2014 een visuele inspectie van de boordvoorzieningen plaatsgevonden door Nebest. Aanvullend hierop zijn door Nebest, middels een veldonderzoek in december 2014, de ontbrekende gegevens aangevuld.

Deze gegevens zijn in 2015 verwerkt in de rapportage “Stabiliteit boordvoorzieningen Almelo – De Haandrik” van RHDHV [67]. Deze rapportage betreft stabiliteit, constructieve veiligheid en de onderhoudstoestand van de boordvoorzieningen (damwanden). Omdat er bij de Provincie Overijssel twijfels waren gerezen omtrent de juistheid en nauwkeurigheid van de eerdere onderzoeken heeft Witteveen+Bos in 2016 een onderzoek opgestart, dat bestaan heeft uit:

- Een inventarisatie van alle aanwezige constructies langs beide oevers van het kanaal, waarbij over het hele traject, het type constructie (object), de waterdiepte, de hoogte ten opzichte van het waterpeil, wel/geen verankering, afmetingen, type damwand en bijzonderheden gerapporteerd zijn.

- Een duikinspectie op 5 locaties in januari 2017, waarmee de onderhoudstoestand onderwater bepaald is. De 5 locaties zijn daarbij op aanwijzing van de Provincie gekozen op plaatsen waar twijfels waren over de staat en stabiliteit van de constructie.
- Aanvullend op de inventarisatie en de duikinspectie is eind januari 2017 een inspectie uitgevoerd met het doel om, op basis van engineering judgement, te bepalen of de constructie of gordingen binnen 5 jaar vervangen zouden moeten worden. Daarbij is tevens het achterland in kaart gebracht.

Verder heeft Beens Groep in 2020 in opdracht van de Provincie Overijssel metingen uitgevoerd aan de constructies langs het kanaal, waarbij met een hart op hart afstand van 25 m, totaal 488 locaties onderzocht zijn [70]. Daarbij is het volgende onderzocht:

- Materiaalsoort van de beschoeiing/constructie; staal, beton of hout.
- Dikte van de beschoeiing.
- Scheefstand van de beschoeiing.

De gegevens van de inventarisaties zijn tevens vastgelegd in overzichtstabellen (spreadsheets).

Bekend is dat de betonnen beschoeiingen in het verleden bij aanleg onder een hoek van 10:1 zijn aangebracht. Uit de uitgevoerde scheefstandsmetingen blijkt dat, door vervorming in de loop der jaren, de betreffende helling vaak niet meer aanwezig is en een deel van de wanden meer richting het kanaal buigt. Daarbij moet opgemerkt worden dat in de rapportages niet is aangegeven in welke richting de hellingen gemeten zijn. Volgens de interpretatie van Witteveen+Bos [68] en de revisie, opgesteld door aannemer Beens Groep [70] resteert nog circa 11 km betonwand aan de oostzijde en 16 km aan de westzijde. De waterkering bestaat uit het grondlichaam waar de weg op ligt langs het kanaal en op sommige locaties ook uit de damwanden langs de vaarweg.

De informatie over de damwanden langs het kanaal is opgenomen in verschillende documenten [67], [68], [70]. Volgens de geraadpleegde specialist van Provincie Overijssel (gesprek 7 juni 2021) geeft de informatie van Witteveen+Bos [68] met inspectie in 2016 de actuele situatie het beste weer. De informatie van Royal Haskoning DHV [67] is volgens de specialist van Provincie Overijssel niet volledig (damwandtype, -lengte en aanlegdatum) en op meerdere punten onjuist (afwijkende situaties).

Zoals aangegeven bestaat over grote lengten de oeverbescherming uit betonnen damwanden. Deze betonnen wanden zijn voor een belangrijk deel kort (4 meter) en volgens toelichting door de specialist is niet helder in welke staat deze verkeren hoewel ze op het oog goed lijken. Maar de betonwanden vertonen wel lekken omdat zwellassen die moeten zorgen voor afdichting rond de waterlijn vergaan zijn.

Een deel van de oudere stalen damwanden is aangetast door corrosie waardoor zich rond de waterlijn gaten in de damwand bevinden. Op sommige locaties bevinden zich spoelgaten achter de betonnen en stalen damwanden [71]. Wanneer nodig wordt aan de achterkant van de damwanden een kunststof filterdoek aangebracht en wordt het spoelgat aangevuld.

Bij de opwaardering van het kanaal is in 2011-2012 een aantal wachtplaatsen gemaakt of opgewaardeerd. De stalen damwanden die hierbij zijn toegepast hebben een lengte van circa 8 meter. Bij de verbetering van damwanden in 2011-2012 (zowel voor het verbeteren van trajecten als aanpassingen bij de realisatie van wachtplaatsen) is in de meeste gevallen verankering met klapankers toegepast. Gegevens daarover staan in de inventarisatielijst van Witteveen+Bos [68] en in de revisielijst van aannemer Beens [70]. Bijlage F bevat een lijst

van de trajecten waar damwanden zijn toegepast, vervanging van damwand heeft plaatsgevonden of gaande is.

3.2.3 Tijdlijn werkzaamheden

Deze paragraaf geeft een algemeen beeld van de tijdlijn van de werkzaamheden en schademeldingen. Hoofdstuk 4 Analyse van satellietmetingen gebiedsbreed gaat meer in detail in op de schademeldingen en de mogelijke relatie met de werkzaamheden.

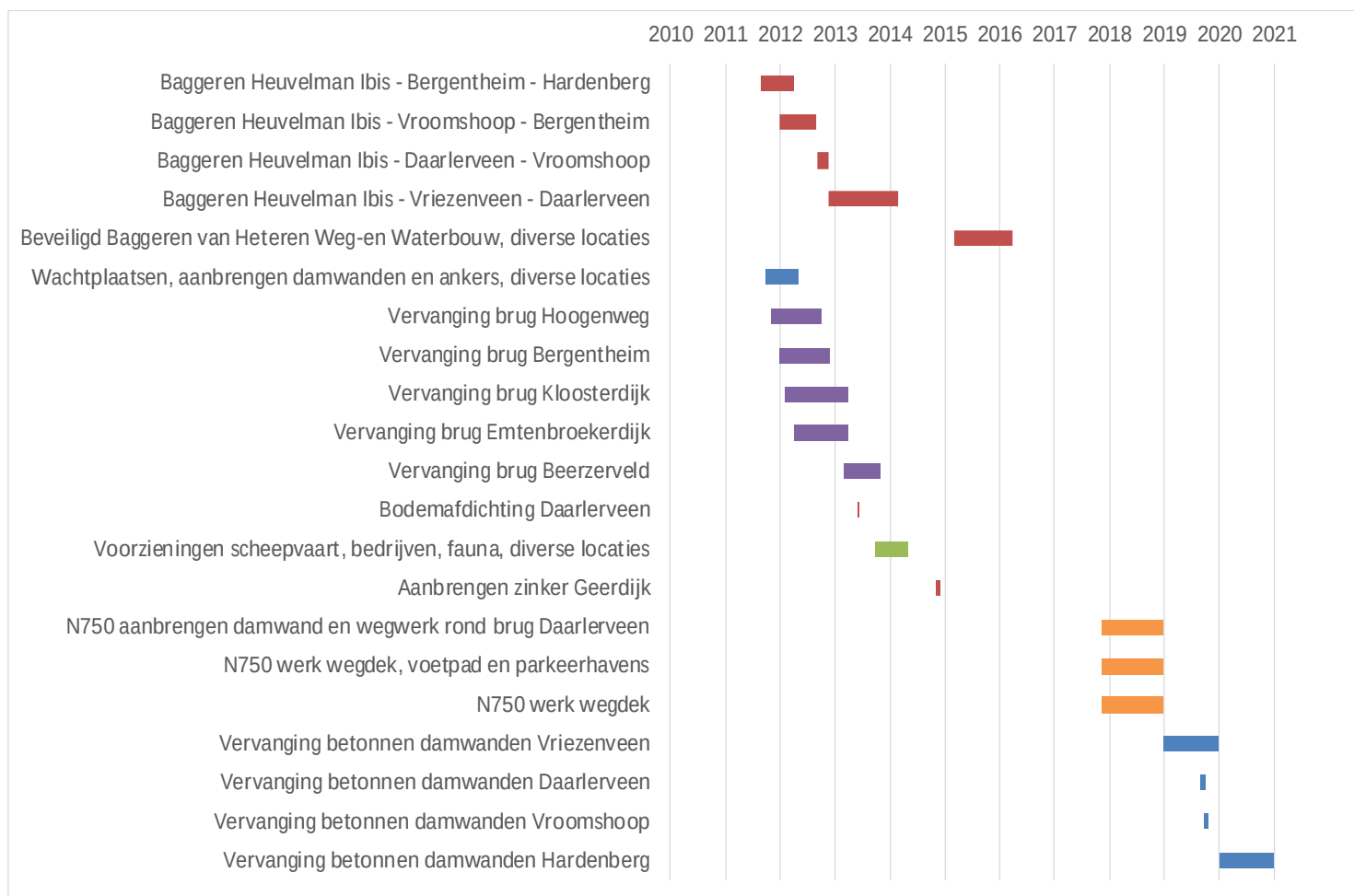
Figuur 3.2 geeft een algemeen beeld van de werkzaamheden en de schademeldingen. Tabel 3.2 geeft een overzicht van aard, globaal tijdstip en locatie van de werkzaamheden. Figuur 3.5 geeft een grafische weergave van de tijdlijn van de werkzaamheden.

Tabel 3.2 Aard, globaal tijdstip en locatie van de werkzaamheden

Soort werkzaamheden	Werkzaamheden	km begin	km eind	Zijde	Datum begin	Datum eind	Opmerking	Bron
Damwanden en ankers	Aanbrengen damwanden, verankeren bestaande en nieuwe damwanden, diverse locaties	diverse locaties	diverse locaties	west/oost	01/01/2005	31/12/2005		RHDHV (2015) BD4245_R002_D0.1_Stabiliteit boordvoorzieningen AdH (incl. bijlagen); Provincie Overijssel (2021). Gegevens damwanden sinds 2005.xlsx
Baggeren	Baggeren Heuvelman Ibis - Bergentheim - Hardenberg	20.00	25.00	kanaal	01/09/2011	31/03/2012	Km indicatief, delen zijn beveiligd gebaggerd	Heuvelman Ibis (2011-2013). Verslagen bouwvergaderingen.
	Baggeren Heuvelman Ibis - Vroomshoop - Bergentheim	12.00	20.00	kanaal	01/01/2012	31/08/2012	Km indicatief, delen zijn beveiligd gebaggerd	Heuvelman Ibis (2011-2013). Verslagen bouwvergaderingen.
	Baggeren Heuvelman Ibis - Daarlerveen - Vroomshoop	8.00	12.00	kanaal	01/09/2012	14/11/2012	Km indicatief, delen zijn beveiligd gebaggerd	Heuvelman Ibis (2011-2013). Verslagen bouwvergaderingen.
	Baggeren Heuvelman Ibis - Vriezenveen - Daarlerveen	5.00	8.00	kanaal	14/11/2012	28/02/2014	Werk heeft een jaar stilgelegen	Heuvelman Ibis (2011-2013). Verslagen bouwvergaderingen.
Baggeren	Beveiligd Baggeren van Heteren Weg-en Waterbouw, diverse locaties	diverse locaties	diverse locaties	kanaal	01/03/2015	31/03/2016	Baggeren van NGE verdachte gebieden; het merendeel van de werkzaamheden was gereed voor kerst 2015	Heteren, van (2015). Baggerprofielen overzichtstekening. Tekening 100; Planning CE baggeren Almelo de Haandrik V1.0.pdf
Damwanden en ankers	Wachtplaatsen, aanbrengen damwanden en ankers, diverse locaties	diverse locaties	diverse locaties	west/oost	01/10/2011	01/05/2012		Provincie Overijssel (2021). Gegevens damwanden sinds 2005.xlsx
Bruggen	Vervanging brug Hoogenweg	24.63	24.63	kanaal	01/11/2011	30/09/2012		Provincie Overijssel (2019). 180531_a activiteiten opwaardering en meldingen.pdf
Bruggen	Vervanging brug Bergentheim	19.71	19.71	kanaal	01/01/2012	30/11/2012		Provincie Overijssel (2019). 180531_a activiteiten opwaardering en meldingen.pdf

Soort werkzaamheden	Werkzaamheden	km begin	km eind	Zijde	Datum begin	Datum eind	Opmerking	Bron
Bruggen	Vervanging brug Kloosterdijk	15.96	15.96	kanaal	01/02/2012	31/03/2013		Provincie Overijssel (2019). 180531_a activiteiten opwaardering en meldingen.pdf
Bruggen	Vervanging brug Emtenbroekerdijk	23.51	23.51	kanaal	01/04/2012	31/03/2013		Provincie Overijssel (2019). 180531_a activiteiten opwaardering en meldingen.pdf
Bruggen	Vervanging brug Beerzerveld	14.59	14.59	kanaal	01/03/2013	31/10/2013		Provincie Overijssel (2019). 180531_a activiteiten opwaardering en meldingen.pdf
Bodemafdichting	Bodemafdichting Daarlerveen	8.57	8.77	kanaal	29/05/2013	11/06/2013		Van Heteren (2013). 313011 Evaluatie afdichten kanaalbodem 2013
Voorzieningen	Voorzieningen scheepvaart, bedrijven, fauna, diverse locaties	diverse locaties	diverse locaties	west/oost	01/10/2013	01/05/2014		Provincie Overijssel (2019). Opwaardering Kanaal Almelo - De Haandrik 700 ton.pdf
Zinker	Aanbrengen zinker Geerdijk	12.77	12.77	kanaal	01/11/2014	30/11/2014	Tegenover Pand 7	Provincie Overijssel (2019). Opwaardering Kanaal Almelo - De Haandrik 700 ton.pdf; Heteren, van (2014). 114130 Zinker Geerdijk.pdf
Groot onderhoud N750	N750 aanbrengen damwand en wegwerk rond brug Daarlerveen	8.76	9.00	oost	13/11/2017	31/12/2018	Exacte einddatum ontbrekend	Aveco De Bondt (2017). UO tekeningen 171746-T-01-NW-01_3.3.pdf tot en met 171746-T-01-NW-05_3.3.pdf
Groot onderhoud N750	N750 werk wegdek, voetpad en parkeerhavens	8.50	9.60	oost	13/11/2017	31/12/2018	Exacte einddatum ontbrekend	Aveco De Bondt (2017). UO tekeningen 171746-T-01-NW-01_3.3.pdf tot en met 171746-T-01-NW-05_3.3.pdf
Groot onderhoud N750	N750 werk wegdek	7.00	8.50	oost	13/11/2017	31/12/2018	Exacte einddatum ontbrekend; zuidelijk van km 7.00 ook werk aan N750, niet langs kanaal	Aveco De Bondt (2017). UO tekeningen 171746-T-01-NW-01_3.3.pdf tot en met 171746-T-01-NW-05_3.3.pdf
Damwanden	Vervanging betonnen damwanden Vriezenveen	4.35	4.51	west	01/01/2019	31/12/2019	Geen exacte datum	Provincie Overijssel (2021). Gegevens damwanden sinds 2005.xlsx; Beens Groep (2020). Revisietekeningen

Soort werkzaamheden	Werkzaamheden	km begin	km eind	Zijde	Datum begin	Datum eind	Opmerking	Bron
Damwanden	Vervanging betonnen damwanden Daarlerveen	7.18	8.74	oost	26/08/2019	08/10/2019		Provincie Overijssel (2021). Gegevens damwanden sinds 2005.xlsx; Beens Groep (2020). Revisietekeningen; Beens groep (2020). Logboek Almelo-de Haandrik tm week 43 damwanden 2019.xlsx (trillingsmetingen)
Damwanden	Vervanging betonnen damwanden Vroomshoop	10.26	11.05	west	24/09/2019	25/10/2019		Provincie Overijssel (2021). Gegevens damwanden sinds 2005.xlsx; Beens Groep (2020). Revisietekeningen; Beens groep (2020). Logboek Almelo-de Haandrik tm week 43 damwanden 2019.xlsx (trillingsmetingen)
Damwanden	Vervanging betonnen damwanden Hardenberg	22.09	23.10	oost	01/01/2020	31/12/2020	Geen exacte datum	Provincie Overijssel (2021). Gegevens damwanden sinds 2005.xlsx; Beens Groep (2020). Revisietekeningen
Damwanden	Vervanging betonnen damwanden Hardenberg	22.19	23.01	west	01/01/2020	31/12/2020	Geen exacte datum	Provincie Overijssel (2021). Gegevens damwanden sinds 2005.xlsx; Beens Groep (2020). Revisietekeningen
Damwanden	Vervanging betonnen damwanden Hardenberg	27.88	28.02	west	01/01/2020	31/12/2020	Geen exacte datum	Provincie Overijssel (2021). Gegevens damwanden sinds 2005.xlsx; Beens Groep (2020). Revisietekeningen



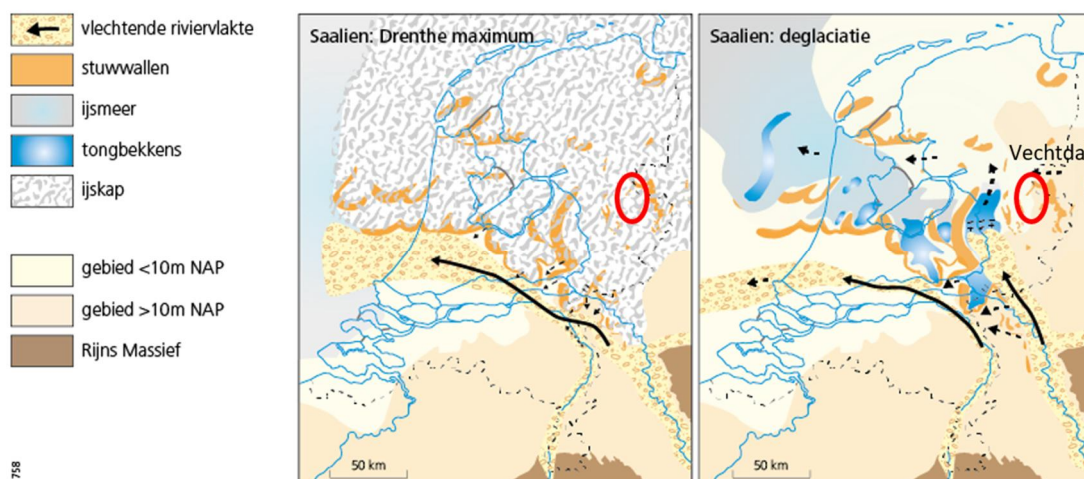
Figuur 3.5 Grafische weergave van de tijdlijn van de werkzaamheden

3.3 Geologie en ontginningsgeschiedenis

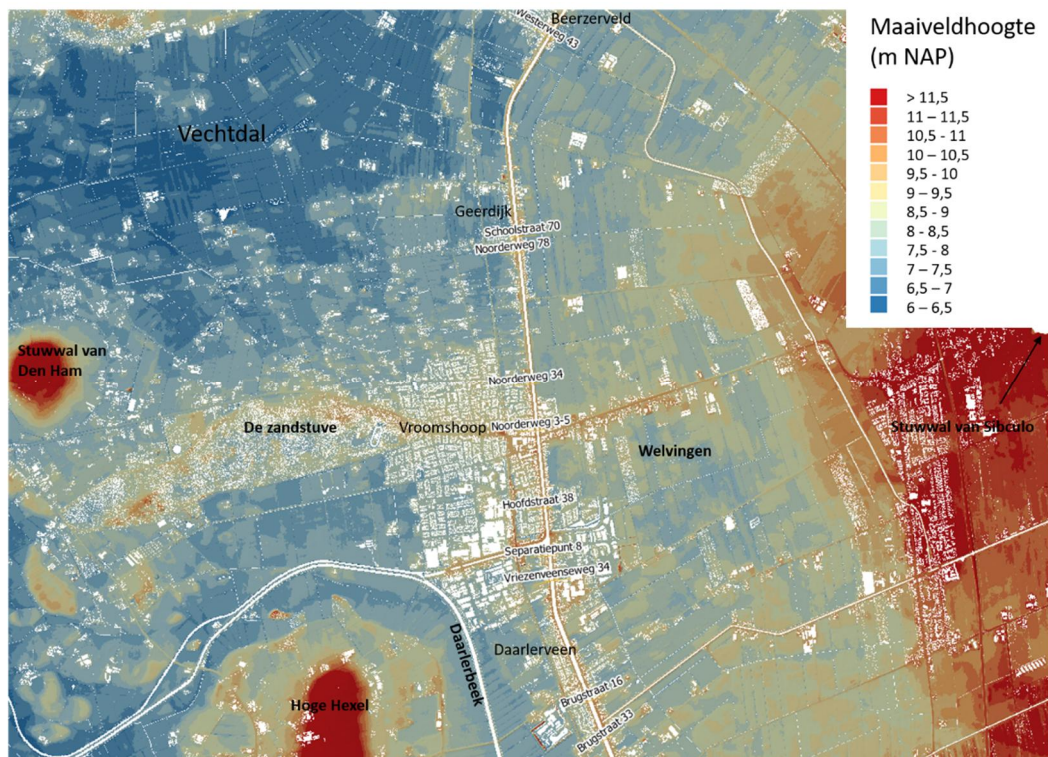
Voor het beantwoorden van de vragen van de Provincie is het belangrijk om de geologische opbouw onder en langs het kanaal goed te kennen en de eigenschappen van de onderscheiden lagen. Met deze kennis kan worden beredeneerd welke schademechanismen een rol kunnen spelen, bijvoorbeeld veenoxidatie of piping. Ook is deze kennis noodzakelijk om te reconstrueren welke lagen zijn verwijderd bij het uitdiepen van het kanaal, tot welke lagen de damwanden reiken, en welke effecten dit kan hebben op grondwaterstroming. Het opgestelde geologische model dient ook als basis voor een grondwatermodel waarin de effecten van de kanaalverdieping op de grondwaterstroming gesimuleerd worden.

3.3.1 Geologische setting

De huidige topografie van het gebied rondom het kanaal is een gevolg van geologische processen weerspiegeld tijdens de laatste twee ijstijden. Tijdens de voorlaatste ijstijd (Saalien) bedekten ijskappen het gebied, werden stuwwallen gevormd en werden glaciële afzettingen afgezet onder en voor het ijsfront (Figuur 3.6). Na de terugtrekking van de ijskap ontstond een diep en breed rivierdal aan de noordkant van het gebied, het oerdal van de Vecht. Het zuidelijk deel van het kanaal tussen Almelo en Geerdijk ligt in een glaciaal dal tussen de stuwwallen, terwijl het noordelijke deel in het Vechtdal ligt (Figuur 3.7). Na het Saalien volgde een warme periode (Eemien) met zeespiegelstanden tot 6-9 m hoger dan tegenwoordig. De kustlijn lag in de Noordoostpolder en in het dal van Vecht werd klei afgezet en veen gevormd. Dit natte gebied strekte zich uit tot in het glaciële dal van het zuidelijke deel van het kanaal. Tijdens de laatste ijstijd daalde de zeespiegel weer (Weichselien) en werden sedimenten door kleine beekjes getransporteerd van de hogere delen in het landschap naar de dalen. Ook werden zandkopjes gevormd door verstuiving van zand.



Figuur 3.6 Overzicht van Nederland tijdens de voorlaatste ijstijd en de vorming van stuwwallen en het Vechtdal na terugtrekking van de ijskappen (Stouthamer et al., 2020). De ligging van het kanaal is aangegeven met een rode ovaal

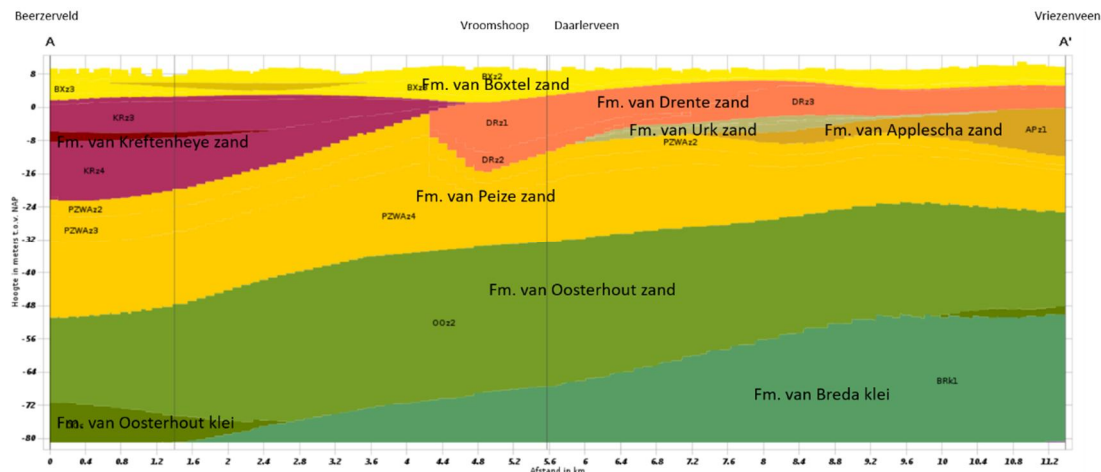


Figuur 3.7 Hoogtemodel op basis van het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN3) rond Kanaal Almelo de Haandrik. De belangrijkste landschapselementen zijn aangegeven, en ook de belangrijkste adressen van de aanvullende studie. De lengte van noord naar zuid langs het kanaal is ongeveer 7 km

3.3.2 Conceptueel geologisch model

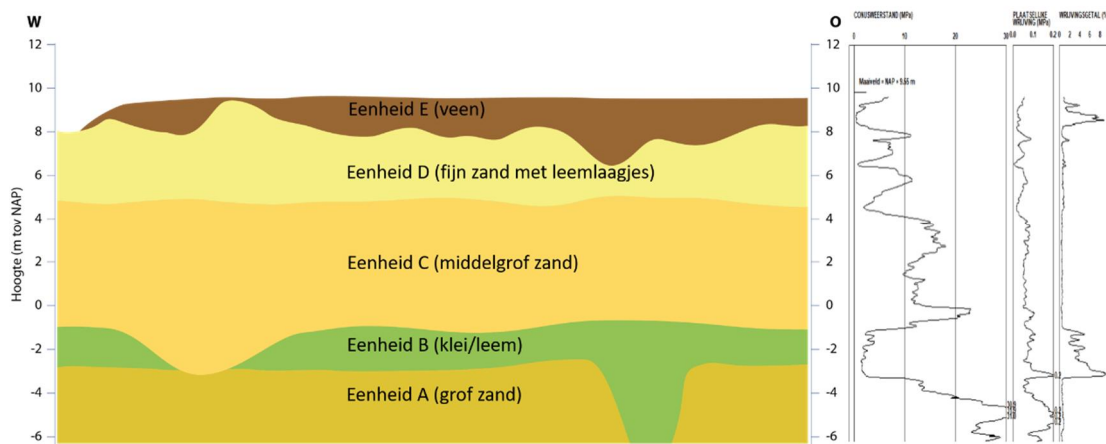
Op basis van regionale ondergronddata en modellen (dinoloket.nl), geologische kaarten (Almelo-Oost 280), wetenschappelijke literatuur, door de Provincie Overijssel aangeleverd grondonderzoek en de boringen uit het grondonderzoek dat nu wordt uitgevoerd, is een conceptueel geologisch model gemaakt van de omgeving rond Kanaal Almelo de Haandrik, van Daarlerveen tot Beerzerveld.

Voor de diepere opeenvolging is gebruik gemaakt van het hydrogeologische model REGIS-II (Figuur 3.8; dinoloket.nl). Daaruit blijkt dat de hydrogeologische basis in het gebied bestaat uit de kleilagen van Tertiaire ouderdom van de **Formatie van Breda en Oosterhout**. Deze bevinden zich op een diepte van -40 m NAP in het zuiden van het gebied tot zo'n -70 m NAP in het noorden van het gebied. Op deze kleilagen ligt een pakket van voornamelijk zand, eerst marien zand van de **Formaties van Oosterhout** tot ongeveer -30 m NAP en daarop rivierzand van de **Formatie van Peize** tot ongeveer -10 à -15 m NAP.

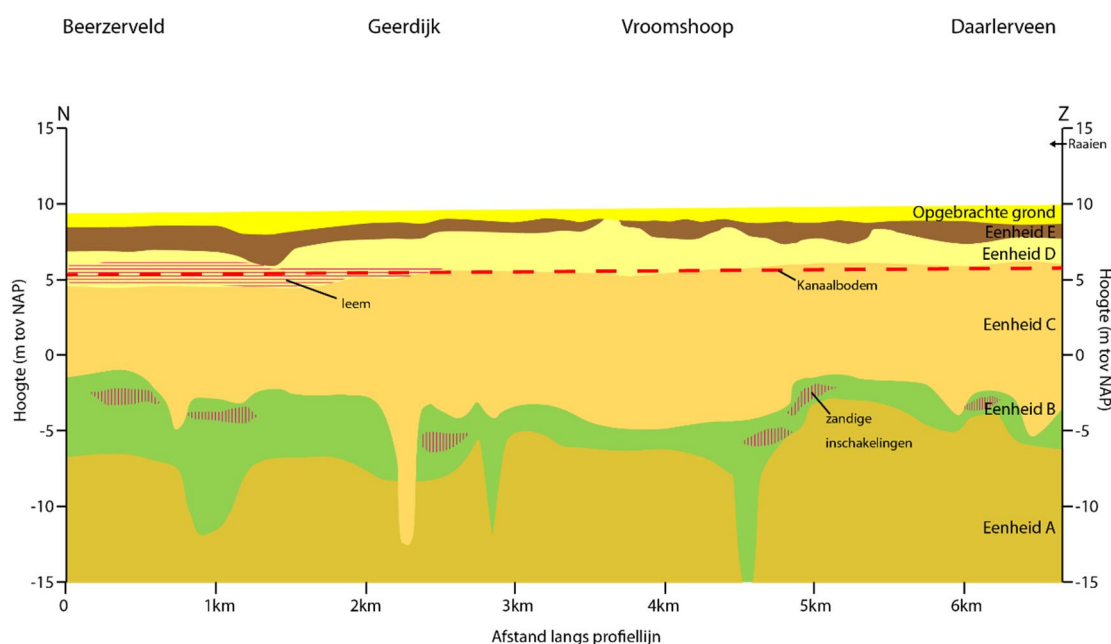


Figuur 3.8 Overzicht van de regionale (hydro)geologische opbouw volgens het REGIS-II model (dinoloket.nl) langs het kanaal

De ondiepe grondopbouw in het REGIS-II model bestaat uit de Formatie van Appelscha, Formatie van Urk, Formatie van Drente, Formatie van Kreftenheye en de Formatie van Bixtel. Voor dit dieptebereik kan het model echter worden verfijnd op basis van de uitgevoerde boringen en sonderingen. Figuur 3.9 toont een conceptueel model van de ondiepe geologische opbouw voordat het kanaal werd gegraven op basis van de uitgevoerde boringen en sonderingen. De belangrijkste bron voor de opbouw onder 10 m diep is een set sonderingen beschikbaar tot 20 à 25 meter diep voor het traject van Vroomshoop tot Beerzerveld. In het model kunnen vijf geologische eenheden worden onderscheiden die onderling verschillen in eigenschappen. Figuur 3.10 is een interpretatie van de ondergrondopbouw langs het kanaal met de onderzochte raaien. De figuur laat zien dat over de lengte van het kanaal er binnen de eenheden enige variatie in diepte, dikte en samenstelling bestaat. De koppeling van de eenheden aan geologische formaties is voorsnog niet eenduidig en daarom wordt gewerkt met eenheden, die vervolgens geïnterpreteerd zijn naar lithologie en eigenschappen. Een vergelijking van het conceptuele model met het REGIS-II model (Figuur 3.8) laat zien dat in de nieuwe ondergronddata geen aanwijzingen zijn voor horizontale overgangen van geologische formaties, zoals wel in het model wordt aangegeven. Hierbij moet beseft worden dat het REGIS-II model gebaseerd is op een relatief beperkte hoeveelheid data. Het is daarom niet verwonderlijk dat een nieuwe set ondergrondgegevens tot een aanpassing van het (hydro)geologische model leidt.



Figuur 3.9 Conceptueel geologisch profiel loodrecht op kanaal ter hoogte van Vroomshoop voordat veenontginning heeft plaatsgevonden. Het profiel toont schematisch variaties in dikte en diepte van de eenheden die zijn onderscheiden. Aan de rechterkant is een typische sondering weergegeven ter referentie. De kanaalbodem ligt op ongeveer +5.5 m NAP.



Figuur 3.10 Interpretatie van de ondergrondopbouw langs het kanaal op basis van het uitgevoerde grondonderzoek en sets diepere sonderingen. De kanaalbodem is schematisch weergegeven en ligt op ongeveer +5.5 m NAP

Eenheid A

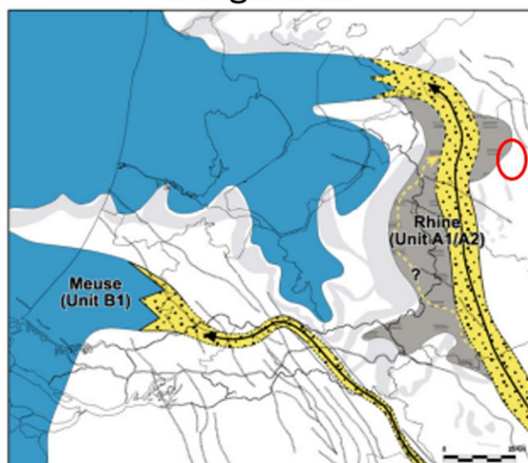
Onderin de sonderingen komt vanaf een diepte van -3 m NAP in het zuiden en -7.5 m NAP in het noorden een eenheid voor met een hoge conusweerstand en laag wrijvingsgetal. Dit duidt op een pakket grove zanden, dat mogelijk door ijsbedekking extra geconsolideerd is geraakt. Op basis van regionale karteringen wordt deze eenheid geïnterpreteerd als de **Formatie van Urk**, de **Formatie van Appelscha**, of de **Formatie van Drente, Laagpakket van Schaarsbergen**. Deze formaties bestaan allen uit een pakket matig grof tot uiterst grof zand. Deze zijn afgezet in grote rivieren uit het zuiden in het geval van de Formatie van Urk (Rijn), rivieren vanuit het oosten in het geval van de Formatie van Appelscha, en als waaiers van smeltwaterafzettingen in het geval van de Formatie van Drente.

Eenheid B

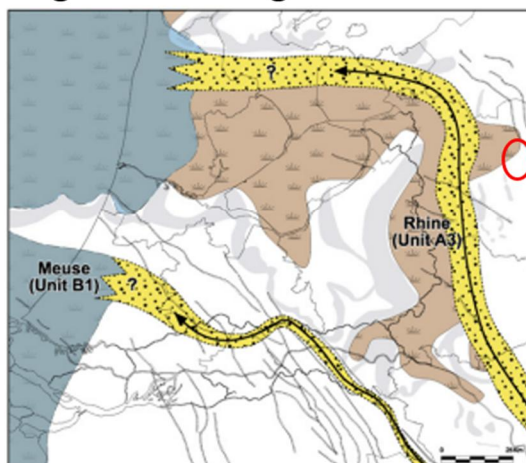
De grove zanden van Eenheid A worden bedekt door een eenheid die in sonderingen wordt geïnterpreteerd als klei met zandinschakelingen. In enkele boringen wordt ook veen beschreven in deze eenheid. In het zuiden rond Vroomshoop is de dikte van de eenheid slechts anderhalve meter, waarvan slechts enkele decimeters klei of leem. De eenheid kan ook lokaal ontbreken. Richting het noorden neemt de dikte van het pakket toe tot 6 m en heeft klei de overhand. Lokaal is de basis van de eenheid diep (tot -15m NAP) wat suggereert dat het opvullingen betreft van depressies in de eenheid eronder. De top varieert van -1 m tot -6 m NAP.

Het afzettingmilieu van deze eenheid is niet te bepalen met alleen sonderingen. Op basis van het regionale beeld en het feit dat er veen wordt beschreven in boringen wordt de eenheid toegeschreven aan afzettingen van rivieren (komklei), meren en moerassen tijdens het laatste interglaciaal (Eemien), en het begin van de laatste ijstijd (Weichselien). In het noorden van het onderzoeksgebied wordt deze eenheid in het hydrogeologische model ook wel aangeduid als het **Laagpakket van Zutphen** van de **Formatie van Kreftenheye**. Dit laagpakket wordt in het IJsseldal en Vechtdal beschreven als een eenheid die bestaat uit klei, gyttja (sediment gevormd op de bodem van een eutroof meer), veen, en met regelmatig zandinschakelingen (Figuur 3.11). De zandige inschakelingen zijn dan afkomstig van beeksystemen of/ en van inspoeling vanaf de hogere delen richting de lagere natte gebieden. De toenemende dikte richting het lagere Vechtdal pleit ook voor een connectie met het Vecht/Rijnsysteem. Een minder waarschijnlijke optie is dat het gaat om afzettingen die in een glaciaal meer zijn afgezet in het diepe bekken dat ontstond bij het terugtrekken van de ijstong. De randen van het glaciaal meer lagen in dat geval rond Vroomshoop, waar pulsen grof sediment vanuit het omringende land het meer vulden, dat verder opgevuld raakte met klei. In dit geval zou de eenheid behoren tot de **Formatie van Drente, Laagpakket van Uitedam**. Deze uitleg strookt echter niet met het voorkomen van veen in boringen op deze diepte, zoals in boringen B28B0070 en B28B0094 uit Vroomshoop. Veenvorming is namelijk typisch voor warmere perioden. In beide gevallen zou de basis van deze eenheid het niveau zijn waar ijsbedekking heeft plaatsgevonden. Mogelijk zijn lokaal resten keileem aanwezig aan de basis van deze eenheid. Dit is een mix van klei, leem en zand en grind die onder een gletsjer is afgezet, en ook regelmatig keien bevat. Echter, in de twee nieuw uitgevoerde boringen voor dit project die tot deze diepte reiken is geen keileem aangetroffen. In één van deze boringen is een duidelijke kleilaag aanwezig. In de andere boring is geen klei of veen aangetroffen op deze diepte.

Eemien interglaciaal



Begin Weichsel glaciaal



Figuur 3.11 Paleogeografische kaarten van de loop van de Rijn tijdens het laatste interglaciaal (Eemien) en het begin van de laatste ijstijd (Weichselien) (uit: Busschers et al., 2007). De globale ligging van het onderzoeksgebied is aangegeven met een rode ovaal. De uitloper naar het oosten is het Vechtdal, waarin volgens deze globale kaart achtereenvolgens komkleien en moerasafzettingen zijn gekarteerd.

Eenheid C

De fijnkorrelige Eenheid B wordt bedekt door een pakket zand. In de sonderingen is regelmatig te zien dat het pakket naar boven fijner wordt (afnemende conusweerstand naar boven toe). De nieuw uitgevoerde boringen laten horizontaal gelaagde zanden met lokaal leeminschakelingen zien (Figuur 3.12). De basis is regelmatig grofzandig en grindrijk, en naar boven toe voornamelijk middelgrof zand afgewisseld met lagen grof zand, fijn zand en silt. Opvallend is dat dit pakket kalkrijk is en bestaat uit bonte zanden, vergelijkbaar met de samenstelling van de Formatie van Urk. De interpretatie van deze eenheid is dat het gaat om afzettingen van lokale beeksystemen uit de laatste ijstijd toen de ijskappen niet tot Nederland reikten. De afzettingen behoren tot de **Formatie van Boxtel**. Er heersten regelmatig permafrost condities in het gebied, waarbij 's zomers veel oppervlakkige beekjes vormden die zand afspoelden van hoger gelegen gebieden naar het dal, mogelijk aangesloten aan het Vechtdal en Ijsseldal.

Een andere, minder waarschijnlijke optie voor deze eenheid is dat het gaat om glaciale smeltwaterafzettingen (sandr) die zijn afgezet aan het front van het ijs tijdens de voorlaatste ijstijd. Vergelijkbare zanden zijn ook uitvoerig beschreven in de geologische beschrijving van Kaartblad Almelo-Oost. Deze zanden behoren tot de **Formatie van Drente, Laagpakket van Schaarsbergen**. Deze optie is chronologisch echter alleen mogelijk als de onderliggende afzettingen van Eenheid B uit oudere glaciale meerafzettingen bestaan, en niet uit jongere Eemien komafzettingen.



Figuur 3.12 Foto's van boring B01-01 (Pand 20) met daarin de beschreven eenheden (witte letters). Maaiveld (linksboven in boring) is 9,20 m NAP. De kernen zijn 1 m hoog. De bovenste 1,20 m zijn opgebrachte grond. Een aantal opvallende details zijn aangegeven. In Eenheid C is de sterke horizontale afwisseling opvallend met veel sprongen in korrelgrootte. De algemene trend is een verfijning naar boven. Eenheid D bevat regelmatig leemlaagjes verspreid over de dikte. De doorworteling in deze eenheid komt vanuit het veenniveau erboven. Het veen in Eenheid E is onderin voedselrijk en wordt naar boven toe voedselarm. De top is veraard

Eenheid D

Op de smeltwaterafzettingen van Eenheid C ligt een pakket van kalkloos, fijn tot middelgrof zand, met ingeschakelde leem- en kleilaagjes. De overgang naar deze eenheid is vaak geleidelijk en is in de sondeerstaten en boorbeschrijvingen niet altijd eenduidig (zie ook Figuur 3.12). Regelmatig vormt een dunne leemlaag (<10cm) de basis van deze eenheid. De overgang lijkt in de boringen overeen te komen met de overgang van kalkrijk in het onderliggende pakket naar kalkloos in het bovenliggende pakket. Deze eenheid wordt geïnterpreteerd als lokale beekafzettingen en windafzettingen (duintjes) die zijn afgezet aan het eind van de laatste ijstijd en het begin van de huidige warme periode. Deze behoren net als Eenheid C ook tot de **Formatie van Boxtel, Laagpakket van Singraven (beekafzettingen) en Wierden (dekzand)**. Echter gaat het hier om over het algemeen fijnere sedimenten met meer variatie, zoals kleilaagjes, leemlaagjes, organische laagjes. Het gebied was nauwelijks begroeid, waardoor ook duinen ontstonden door opstuiving door de wind. Hierdoor heeft de top van de formatie een variabele hoogte, met door de wind afgezette fijnkorrelige dekzanden op de hogere delen en beekafzettingen (zandige geulafzettingen maar ook lemige oever en overstromingsafzettingen) op de lagere delen. In de profielen lijkt bijvoorbeeld in Vroomshoop bij het begin van de Noorderweg een zandopduiking aanwezig te zijn. In het gebied grofweg ten noorden van de Tonnendijk lijken de afzettingen meer lemig ontwikkeld en wat dikker. Mogelijk heeft dit te maken met het Vechtdal. Dit betekent dat op deze plekken onder het kanaal waarschijnlijk nog leemlaagjes aanwezig zijn die hydraulische weerstand bieden.

Eenheid E

De beek- en dekzandafzettingen van Eenheid D worden bedekt met een eenheid die voornamelijk bestaat uit veen, met lokaal klei of leem aan de basis. Aan de basis is het veen

matig voedselrijk veen (riet en zegge), en naar boven toe voedselarm hoogveen met wollegras en (veen)mos (zie ook Figuur 3.12). De top is veraard door oxidatie, die optreedt als (delen van) het veen boven de grondwaterspiegel komt te liggen. De basis van dit slappe pakket bevindt zich meestal rond de 7,5 m NAP, maar kan lokaal rond 5 m NAP liggen (zoals aan de noordoost kant van Vroomshoop en ter hoogte van de Hammerdijk). Deze afzettingen worden geïnterpreteerd als opvullingen van oude beekdalen die gevormd waren tijdens de laatste ijstijd. Lokaal bij dekzandkopjes kan het veen ook ontbreken.

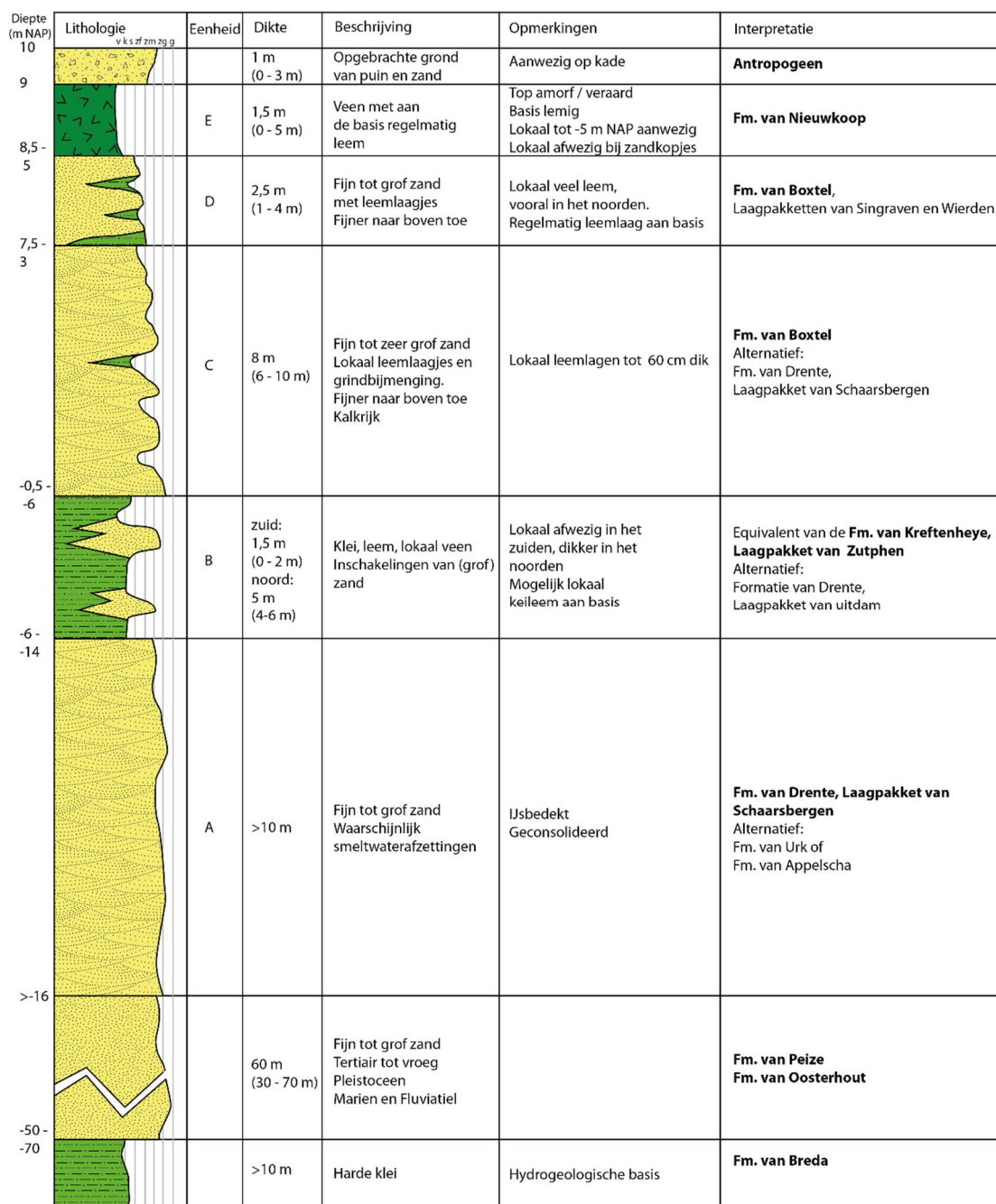
Het veen behoort tot de **Formatie van Nieuwkoop**, de lokaal onderliggende klei hoort officieel bij de **Formatie van Bortel**, maar het veen en klei is hier samengevoegd tot één eenheid. Het veen is ontstaan na de ijstijd toen het klimaat warmer werd en het gebied begroeid raakte. Hierdoor werd het reliëf van het glaciaal landschap van stuwwallen, dekzandkoppen en beekdalen vastgelegd. Vervolgens ontstond door slechte afwatering een moerasgebied waar veen in vormde: eerst voedselrijk laagveen, daarna voedselarm hoogveen. Met name ter plaatse van beekdalen is de veenlaag wat dikker. Op de hoogste dekzandkoppen is het veen lokaal afwezig. Hierdoor heeft het slappe pakket een variabele dikte. Richting Almelo ligt de top van het zand ook hoger, en zal er minder veen gevormd zijn en/of gelegen hebben.

Opgebrachte grond

De opgebrachte grond is variabel van samenstelling en bestaat regelmatig uit zand van variabele grofheid, regelmatig vermengd met puin. Langs het kanaal bestaat de basis van dit pakket vaak uit fijn zand, vergelijkbaar met het zand van Eenheid D. Dit ondersteunt het idee dat in eerste instantie de kanaaldijk werd opgebracht met grond uit het kanaal recht onder het veen. Lokaal is ook omgewerkt veen aanwezig als opgebracht materiaal. In boringen is in die gevallen regelmatig “antropogeen veen” beschreven.

Samengevat

Bovenstaande beschrijving van de aangetroffen eenheden laat zien dat de opbouw van de ondergrond onder en langs het kanaal goed te vatten is in vijf eenheden. Er is vrij veel vertrouwen in de bijbehorende geologische formaties die zijn aangetroffen, maar er zijn ook enkele, minder waarschijnlijke, alternatieven. Dit hoeft echter niet problematisch te zijn, omdat vooral de eigenschappen van de aangetroffen eenheden van belang zijn voor het onderzoek en niet zozeer tot welke geologische formatie ze behoren. Voor het huidige onderzoek is de kennis over de ondergrondopbouw en eigenschappen voldoende om een goede inschatting te maken van de weerstand in de kanaalbodem, de grondwaterstroming en de sterktes tegen belasting. Figuur 3.13 geeft een overzicht van de onderscheiden eenheden in het gebied en de mogelijke relaties van de eenheden tot de geologische formaties.



Figuur 3.13 Lithostratigrafische kolom van de geologie onder de kanaaldijk in het onderzoeksgebied. De waterbodem van het kanaal ligt rond +5.5 m NAP

3.3.3 Menselijke invloeden en grondopbouw rondom de huizen

Voor de aanleg van Kanaal Almelo de Haandrik in het midden van de 19^e eeuw bestond het gebied uit een landschap met stuwwallen (Bijvoorbeeld Hoge Hexel, Stuwwal van Den Ham, en de Stuwwal van Sibculo), dekzandkoppen (de zandstuve) en beekdalen (Vechtdal, Daarlesche Beek) met daartussen een kussen van hoogveen van zo'n 2 m hoog. Op de topografische kaart van 1820 is het gebied nog ingetekend als uitgestrekt (hoogveen) moerasgebied. Op de topografische kaart van 1850 (Figuur 3.14) is het kanaal al aangelegd en zijn de veengebieden nog niet ontgonnen. Het veengebied stopt vlak ten westen van het kanaal waar de Daarlerbeek stroomt en de hogere zandgronden en stuwwallen zijn. Bij de

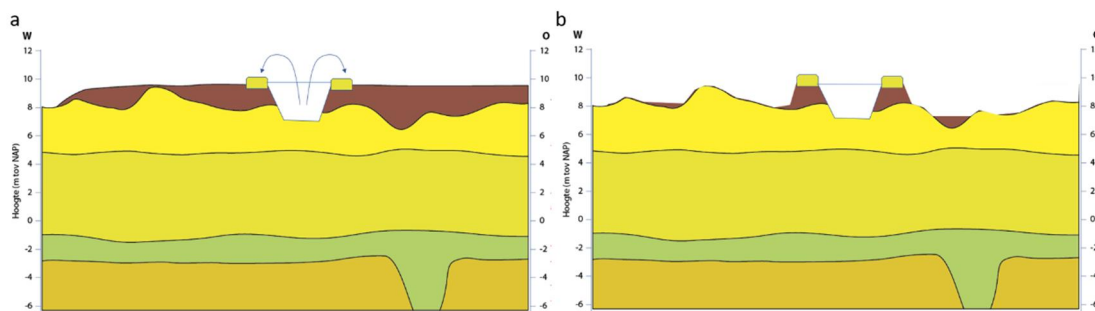
ontginning is de veenlaag grotendeels weggegraven waardoor de top van het onderliggende zand aan het oppervlak ligt.



Figuur 3.14 Militaire topografische kaart van rond 1850. Het kanaal is al aangelegd, de veengebieden zijn nog niet ontgonnen. De adressen van de aanvullende studie zijn aangegeven

Op het huidige hoogtemodel (Figuur 3.7) zijn welvingen zichtbaar in de zandige akkers die het kanaal tegenwoordig omringen. Dit zijn de kopjes van dekzand afgewisseld met laagtes waarin kleine beekjes hebben gestroomd. In de diepere delen van dit landschap is het veen niet ontgonnen en ligt het nog steeds aan het oppervlak. Ook in de kades van het kanaal is het veen nog meestal aanwezig.

Bij de aanleg van het kanaal is het veen weggegraven (en waarschijnlijk weggevoerd), en het onderliggende zand is gebruikt om de kades op te hogen (Figuur 3.15). Het omringende land is vervolgens ontgonnen waardoor de kade nog grotendeels uit veen bestaat, onder een ophooglaag van zand en alles wat in de anderhalve eeuw sinds de aanleg is gebruikt als ophooglaag. Langs de kade loopt het maaiveld vanuit de akkers regelmatig glooiend op, wat suggereert dat hier nog een wig veen aanwezig kan zijn en de verveningen richting het kanaal minder diep zijn doorgevoerd.

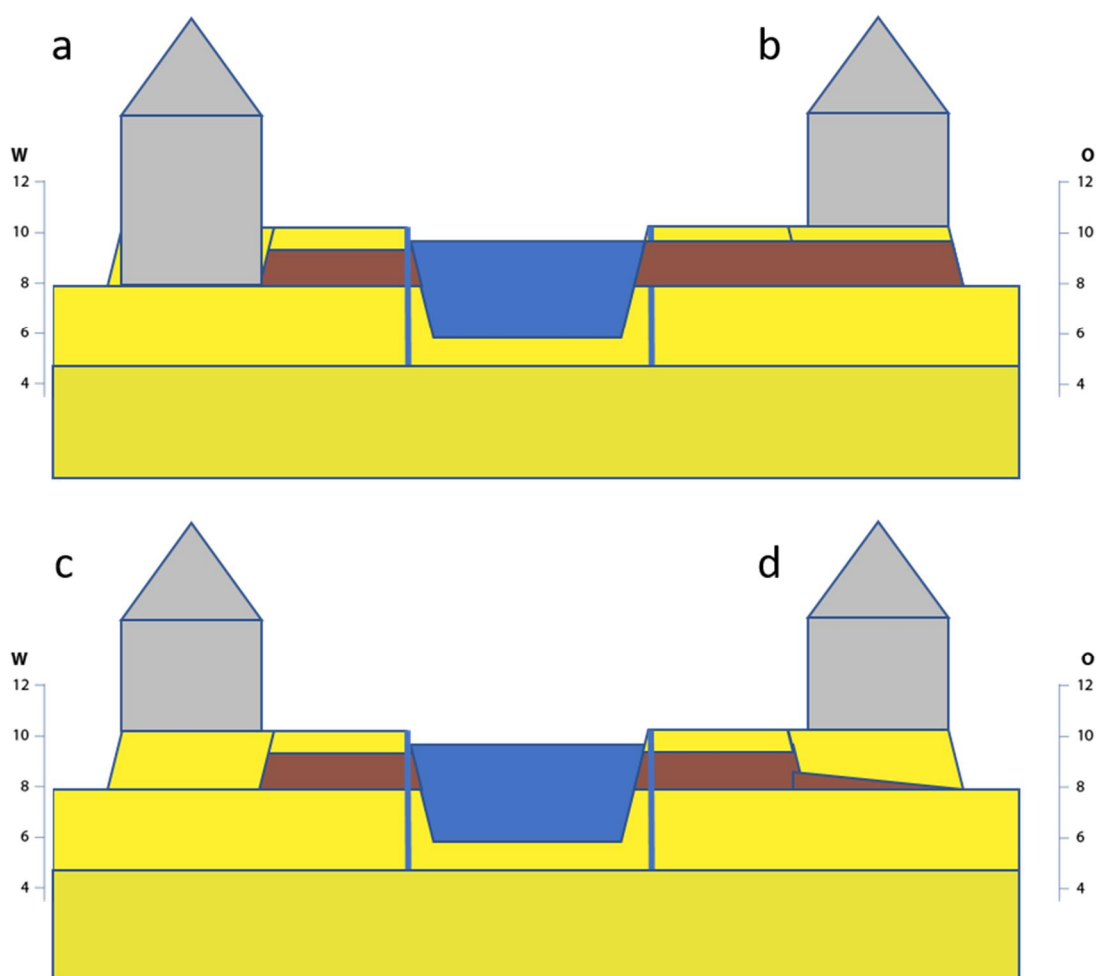


Figuur 3.15 Schematisch figuur van a) de aanleg van het kanaal in de omliggende geologie, en b) de situatie na vervening met kades met een veenkern en veen in de lage delen van het landschap. Het kanaal is later verbreed en verdiept, maar dit is vanwege de duidelijkheid niet in de figuur opgenomen

In de 20^{ste} eeuw zijn langs het kanaal veel huizen gebouwd aan de landzijde van de kade. Een belangrijke vraag in deze studie is waar deze huizen op zijn gebouwd en hoe ze zijn gefundeerd. Voor de opbouw van de grond rond de huizen zijn meerdere opties (Figuur 3.16):

- De kelder/fundering is op het zand gebouwd en zand is rondom aangebracht.
- De kade was een stuk breder en de huizen zijn op de kade gebouwd. In dat geval zou er net zoveel veen rond de huizen aanwezig zijn als in de kade.
- Het resterende veen is afgegraven en zand is opgebracht.
- Lokaal was er nog veen aanwezig waar het zand is opgebracht.

Uiteraard is ook een variatie van bovenstaande opties mogelijk als het huis in meerdere fases is (uit)gebouwd.



Figuur 3.16 Schematische weergave van de bebouwingsgeschiedenis onder huizen

Van belang in het huidige onderzoek is om de werkelijke grondopbouw langs en onder de huizen te begrijpen en de eigenschappen in te schatten. Met behulp van archieven is het niet gelukt om de geschiedenis langs de kanaaldijk te reconstrueren. Daarom is grondonderzoek uitgevoerd in de vorm van gutsboringen langs gevels, steekboringen (ook voor de plaatsing van peilbuizen) en sonderingen. De bijgeleverde factsheets geven per onderzoeksraai een interpretatie van de ondergrondopbouw rondom de onderzochte panden.

3.4 Geohydrologie

Deze paragraaf geeft een korte samenvatting van de geohydrologische bevindingen van het onderzoek. Meer detail is te vinden in het geohydrologisch deelrapport (Bijlage J) en in de factsheets per pand (Bijlage K).

3.4.1 Algemeen

Het Kanaal Almelo – De Haandrik ligt met een streefwaterpeil van NAP +9.10 m in de winter en NAP +9.15 m in de zomer ruim boven de drainageniveaus van de omliggende gebieden en ook boven het maaiveld in die gebieden. Alleen in de directe omgeving van het kanaal ligt het aanwezige maaiveld hoger dan het kanaalwaterpeil. Dat betekent dat er water uit het kanaal naar de omliggende bodem infiltreert. De grootte van deze infiltratie hangt af van de hydraulische weerstand die het water daarbij tegenkomt. Deze weerstand kan grofweg worden verdeeld in kanaalbodemweerstand en damwandweerstand. Damwanden zijn primair aangebracht uit oogpunt van grondstabiliteit, maar dienen ook om het waterverlies uit het

kanaal te beperken. Damwanden hebben bij goed functioneren in het algemeen een hoge weerstand. De weerstand op de kanaalbodem bouwt zich op door in het water aanwezige zwevende slib, waarvan de fijne deeltjes de bodem ingezogen worden, de ruimte tussen de zandkorrels verstoppen en daardoor een sterk afdichtende werking veroorzaken. Bovenop de bodem kan zich vervolgens langzaam een sliblaag afzetten, waardoor de hydraulische weerstand van de kanaalbodem nog iets verder zal oplopen.

Damwanden behouden hun hydraulische weerstand in het algemeen lang, maar daarin kunnen door diverse vormen van erosie (scheuren van beton, vergaan van houtdelen, corrosie van staal en dergelijke) in de loop der tijd gaten ontstaan, waardoor lokaal het omliggende grondwater kan gaan stijgen. De bodem kan zijn hydraulische weerstand over grote stukken verliezen als het kanaal gebaggerd wordt. Of en hoeveel weerstand er dan resteert en in welk tempo een nieuwe weerstand zich weer opbouwt, is op voorhand niet exact aan te geven. Eerder opgedane ervaringen bij sterk infiltrerende plassen en kanalen duiden op een zeer snelle opbouw van de bodemweerstand. Het kan echter van geval tot geval verschillen hoe snel deze weerstand zich opbouwt en tot hoe groot.

3.4.2 **Beïnvloeding grondwaterstand rond het kanaal**

De grondwaterstand in de omgeving van Kanaal Almelo – De Haandrik kan beïnvloed worden door:

- Directe neerslag op en verdamping uit de bodem.
- Het gehandhaafde waterpeil in het kanaal.
 - Via kwelstromen door de bodem van het kanaal.
 - Via lekstromen door de damwanden langs het kanaal.
- Door overstroming van de oevers: golfoverslag bij passerende schepen (zowel mogelijk bij beroepsvaart als bij pleziervaart).

En verder door meer regionale invloeden als:

- De regionale stroming, globaal van de heuvelrug Ootmarsum – Uelsen (Duitsland) ten oosten naar het Reggedal ten westen van het kanaal.
- De afwateringsniveaus van de drainage in de wijde omgeving van het kanaal.
- Grootschalige grondwateronttrekkingen:
 - Drinkwaterwinning Hammerflie (vergunning 5 miljoen m³/jaar, onttrekking circa 1.5 miljoen m³/jaar) op circa 2 km ten westen van het kanaal, noordwestelijk van Vroomshoop.
 - Drinkwaterwinning Hoge Hexel (vergunning 2.5 miljoen m³/jaar, onttrekking circa 2.5 miljoen m³/jaar) op circa 3 km ten westen van het kanaal, westzuidwestelijk van Vriezenveen.

De effecten van neerslag en verdamping zijn evident, die zorgen voor natte en droge perioden met stijgende respectievelijk dalende grondwaterstanden. Kwelstromen via de bodem en lekstromen door de damwand treden ook zeker op, omdat zowel bodem als damwanden nooit 100% waterdicht zijn. De vraag is alleen hoe groot deze bijdrage is. Indien golfoverslag van de oevers optreedt, zal dit beperkt zijn tot een smalle strook direct langs het kanaal. Het effect van golfoverslag op de grondwaterstand is bij dit kanaal waarschijnlijk verwaarloosbaar, omdat het weinig blijkt voor te komen en omdat de volumes klein zijn.

De regionale oost-west gerichte grondwaterstroming zorgt ervoor dat de grondwaterstanden op enige afstand ten oosten van het kanaal in het algemeen wat hoger zijn dan op enige afstand ten westen van het kanaal. Binnen enkele tientallen meters van het kanaal zijn deze verschillen echter klein. In lengterichting van het kanaal gezien zijn de grondwaterstanden in

het zuiden in het algemeen wat hoger dan in het noorden. De regionale drainage heeft een afwateringsniveau dat 2 tot 3 meter onder kanaalpeil ligt. Dit zorgt ervoor dat de grondwaterstand in de directe omgeving van het kanaal 1.5 tot 2 meter onder kanaalpeil ligt.

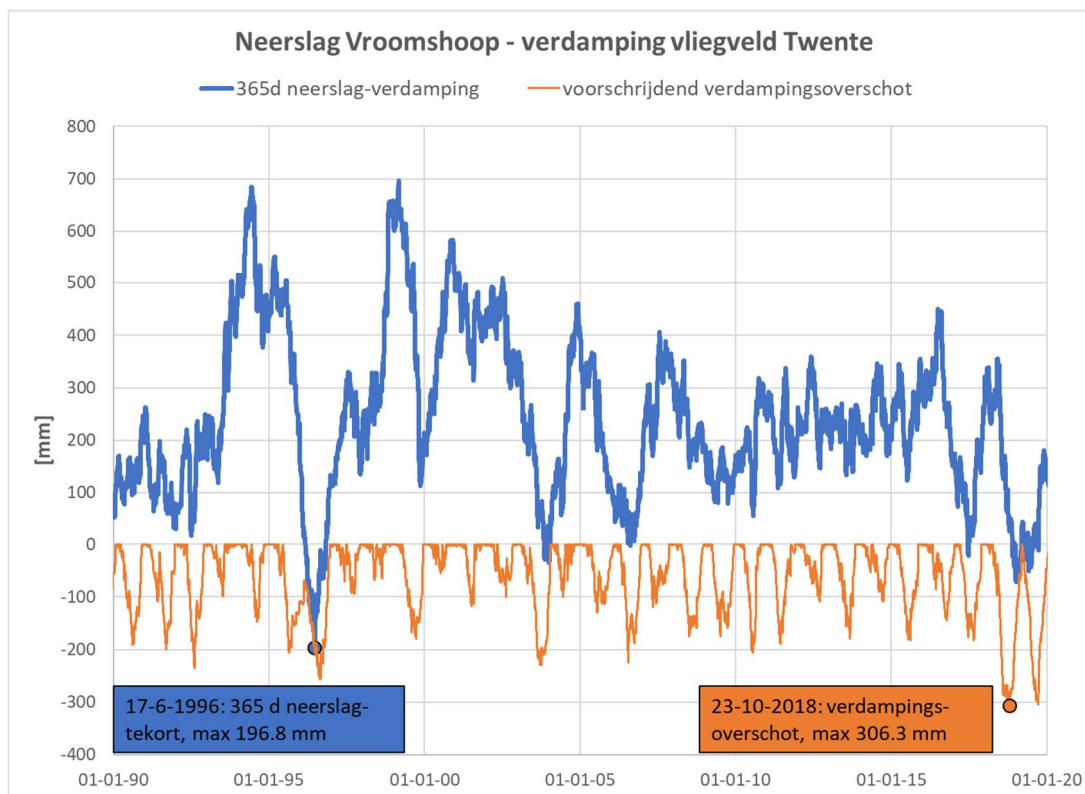
De enige grote grondwateronttrekkingen, die nu nog actief zijn, zijn de drinkwaterwinningen Hammerflie en Hoge Hexel. De winning Hammerflie wordt gevoed met water dat uit het kanaal wordt ingelaten naar de Hammerwetering die langs het wingebied stroomt. De jaarlijkse inlaat varieert tussen de 1 en 3 miljoen m³. Mede door deze waterinlaat is het effect van deze winning op de grondwaterstand bij het kanaal verwaarloosbaar klein. De winning Hoge Hexel ligt in gestuwd gebied met winputten op meer dan 20 meter diepte. Hierdoor is de totale weerstand tegen grondwaterstroming van kanaal naar winning relatief groot, waardoor de invloed van deze winning op de grondwaterstand rond het kanaal beperkt is.

3.4.3 Natte en droge perioden (neerslag en verdamping)

Voor zowel de metingen van de freatische grondwaterstand als voor de metingen van de stijghoogte van het grondwater in het diepere watervoerend pakket is het belangrijk om te zien in hoeverre deze worden beïnvloed door natte en droge perioden. Beschouwd zijn dagelijkse neerslagmetingen van KNMI neerslagstation Vroomshoop en neerslag- en verdampingmetingen van KNMI meteostations Heino en Twente.

De waarnemingen in de drie stations komen redelijk met elkaar overeen. De verschillen, die voornamelijk worden veroorzaakt door lokale variatie in neerslag, zijn over het algemeen klein. Dat duidt erop dat er in de beschouwde 30 jaar relatief weinig grote verschillen in natte en droge perioden zijn geweest tussen deze drie locaties en dus dat de neerslagmetingen in Vroomshoop als representatief kunnen worden beschouwd voor de regio waarin het kanaal ligt.

Figuur 3.17 geeft een overzicht van de neerslag en verdamping over een periode van 30 jaar (1990 – 2020). De blauwe lijn geeft voor elke dag het totaal van neerslag – verdamping over de 365 dagen voorafgaand aan die dag. De oranje lijn geeft voor elke dag het totaal van potentiële gewasverdamping – neerslag vanaf de dag dat de verdamping meer is dan de neerslag tot de dag dat de totale neerslag weer groter is. Zodra de totale neerslag weer groter is dan de totale verdamping wordt de waarde van het verdampingsoverschot weer op nul gezet. Beide lijnen geven een goede indicatie van de opgetreden droge periodes in de beschouwde 30 jaar.



Figuur 3.17 Voortschrijdend jaarlijks neerslagoverschot (blauwe lijn) en voortschrijdend verdampingoverschot (oranje lijn), op basis van KNMI data van neerslagstation Vroomshoop en meteostation Twente

De figuur laat zien dat de droge periode van 1995-1996 op basis van het hier berekende neerslagoverschot nog wat extremer was dan in 2018 en 2019, maar dat het verdampingoverschot zowel in 2018 als in 2019 iets extremer was.

Er zijn geen doorlopende metingen beschikbaar die kunnen aantonen in hoeverre de grondwaterstanden ter plaatse van de panden direct langs het kanaal in 1995-1996 anders zijn geweest dan in 2018 en 2019. Peilbuizen op die locaties die deze tijdspanne omvatten zijn niet voorhanden.

3.4.4 Bodemsamenstelling in relatie tot hydrologie

De bodemopbouw in het gebied rond het kanaal varieert sterk. In grote delen van het gebied komen venige en moerige gronden voor. In beschikbare boringen wordt veen in het algemeen alleen in de bovenste 2 meter aangetroffen. Klei en leemlagen zijn in boringen ook op wat grotere diepte aangetroffen. Op tal van plekken is in boringen alleen zand aangetroffen. Dat duidt erop dat aanwezige klei-, leem- en veenlagen niet continu zijn en hooguit lokaal van invloed kunnen zijn.

Uitgevoerde boringen in de kanaaldijk tonen aan dat op vele plekken veen voorkomt tussen een diepte van ongeveer 1 en 2 meter onder maaiveld. Het aangetroffen veen in deze boringen is echter in de kanaaldijk overal bruin en vochtig en bevat veel plantenresten en wat dieper houtresten. Ondanks dat de grondwaterstand op de meeste Dergelijke verlagingen waren echter bij aanleg van de damwand (voordat de lekkage ontstond) ook al opgetreden. plekken ruim onder het veen lag, duidt dit erop dat het veen in de kanaaldijk niet geoxideerd is. Dat lijkt erop te duiden dat de boven het veen liggende bodemlaag (meestal zandig) het onderliggende veen voldoende van de lucht afsluit om oxidatie te voorkomen. Hoofdstuk 6 beschouwt dit nader.

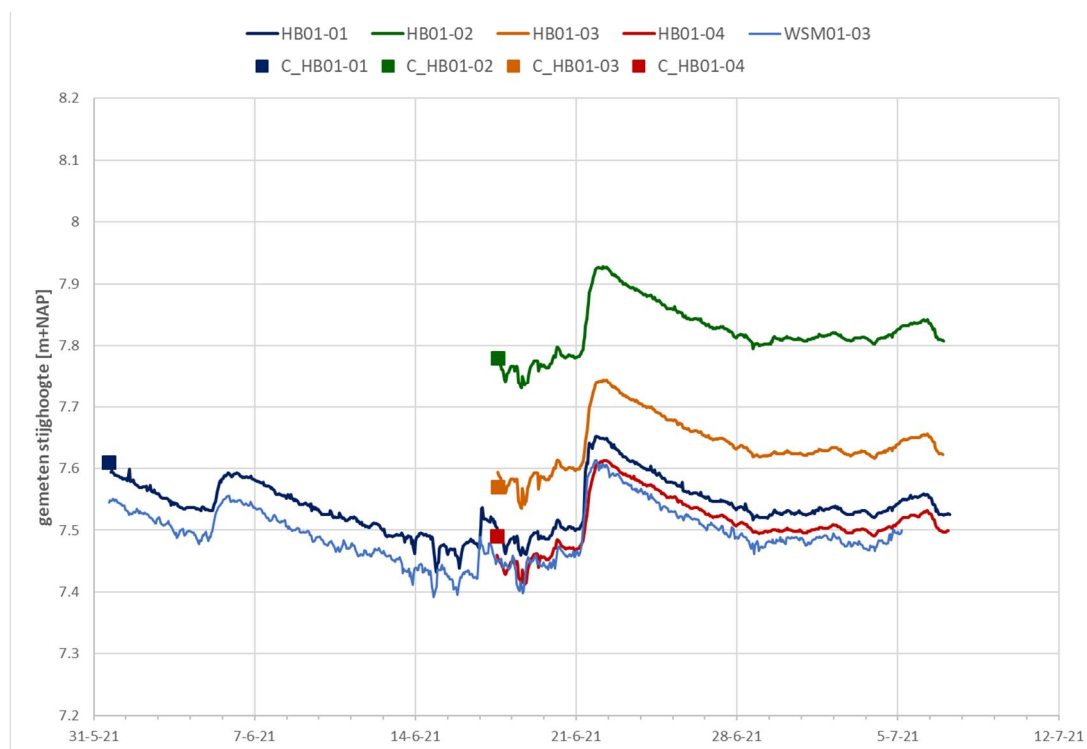
Venige gronden kunnen gevoelig zijn voor veranderingen in grondwaterstand, met name voor sterke verlagingen van de grondwaterstand. Omdat het kanaalpeil hoger ligt dan het maaiveld in grote delen van de omgeving en zeker hoger is dan de grondwaterstand in droge perioden kan (meer) lek van water uit het kanaal geen oorzaak zijn van verlaging van de grondwaterstand. Vervanging van een lekke damwand door een nagenoeg waterdichte damwand kan wel een oorzaak zijn van verlaging van grondwaterstanden.

3.4.5 Beschikbare waterstandsmetingen

Om effecten van neerslag en verdamping goed te kunnen onderscheiden van eventueel andere optredende invloeden zijn waarnemingen met meetfrequentie van een dag (of kleiner) essentieel. Er zijn in de regio ruim 90 peilbuizen beschikbaar met een dergelijke meetfrequentie. Ruim 50 daarvan liggen binnen de grenzen van een beschikbaar regionaal grondwatermodel, waarmee effecten van veranderingen van kanaalpeil en bodem en damwandweerstand op de grondwaterstand kunnen worden berekend. De beschikbare meetpunten zijn gebruikt om de plausibiliteit van de modelresultaten te beschouwen. Bijlage J geeft de grondwateranalyses en doorgerekende scenario's in het kader van dit verdiepend onderzoek weer.

3.4.6 Aanvullende waterstandsmetingen

Op meer dan tien locaties zijn loodrecht op het kanaal meetraaien met peilbuizen ingericht. Deze zijn ook voorzien van divers, sensoren die automatisch elk uur de waterstand (stijghoogte) in de peilbuizen registreren. Figuur 3.18 geeft daar een voorbeeld van.



Figuur 3.18 Voorbeeld van automatische registratie van stijghoogten in peilbuizen voor locaties vlakbij het kanaal (HB01-01, donkerblauw), voorzijde van het pand (HB01-02, donkergroen), achterzijde van het pand (HB01-03, bruin) en ruim 40 m achter het pand (HB01-04, donkerrood). De helblauwe lijn is een waterspanningsmeter die onder de kanaalbodem, is gestoken, vlak voor de damwand

Een eerste analyse van deze metingen leert dat in bijna alle meetraaien de grondwaterstand op enkele meters afstand van het kanaal 1,5 tot 2 meter onder het kanaalpeil ligt. Dat betekent dat in de huidige situatie de damwand en de kanaalbodem relatief weinig water

doorlaten. Maar ook dat er op deze plekken slechts een gering verhang in grondwaterhoogte aanwezig is, waarmee het optreden van piping kan worden uitgesloten.

Of dat in het verleden altijd zo geweest is, kan niet met zekerheid gezegd worden. Het kan dus zijn, dat de grondwaterstand direct langs het kanaal hoger is geweest. Dan wel tijdelijk door baggeren van de kanaalbodem, dan wel langdurig voordat een waterdichte damwand is aangebracht.

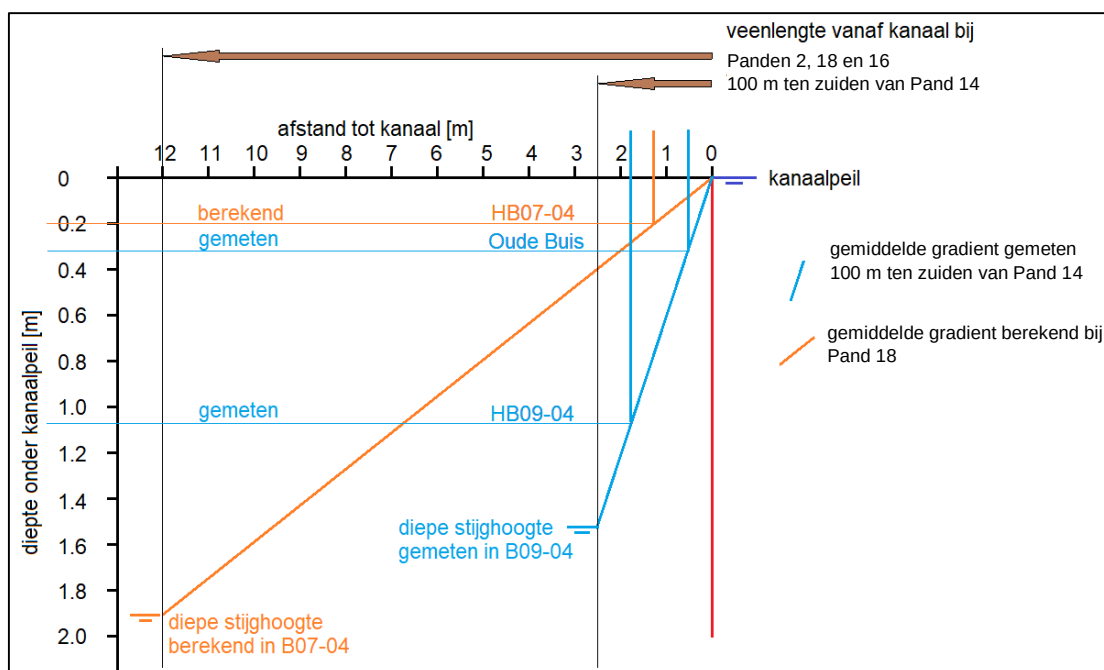
100 m ten zuiden van Pand 14 is over meerdere tientallen meters een lekke damwand aangetroffen, waarbij de grondwaterstand aan de binnenzijde van de damwand gelijk is aan kanaalpeil. Dit is op vier plekken geconstateerd. Op twee plekken zijn spoelgaten aangetroffen, waarin water is aangetroffen dat meebeweegt met het kanaalwater. Op twee plekken, waar een peilbuis vlakbij het kanaal staat (oude peilbuis en peilbuis HB09-04), zijn handboringen gezet direct tegen de damwand aan. Daarin is een grondwaterstand aangetroffen die exact gelijk was aan het kanaalpeil.

De grondwaterstand in de peilbuizen, die direct naast deze plekken staan, is beduidend lager. In de oude peilbuis, die op ongeveer een halve meter afstand van de damwand staat, schommelt de continu gemeten grondwaterstand tussen de 36 en 62 cm onder kanaalpeil. In peilbuis HB09-04, die op ongeveer 1,75 m afstand van de damwand staat, schommelt de continu gemeten grondwaterstand tussen 77 en 92 cm onder kanaalpeil. In de daarnaast gelegen diepe peilbuis B09-04 zijn stijghoogtes gemeten tussen 1,47 en 1,63 m onder kanaalpeil, ongeveer 70 cm lager dan in de ondiepe peilbuis HB09-04. In de waterspanningsmeter WSM09-02, die naast de damwand in de kanaalbodem is gedrukt, liggen de gemeten waterspanningen tussen 1,81 en 1,97 meter onder kanaalpeil, Dat is nog eens 30 cm lager dan in de diepe peilbuis B09-04.

De metingen laten zien dat er een hydraulische weerstand aanwezig is in de kanaalbodem en dat het effect van de lekke damwand snel afneemt met de afstand tot het kanaal. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door de regionale drainage, die 2 tot 2,5 m onder kanaalpeil ligt, en door de hoge doorlatendheid van de onderliggende zandpakketten. Dat de grondwaterstand bij een lekke damwand snel afneemt met de afstand tot het kanaal is ook geconstateerd bij de scenarioberekeningen voor een lekkende damwand, die met het detailmodel voor Panden 2, 16 en 18 zijn uitgevoerd.

De gradiënt waaronder de grondwaterstand (bij een lekke damwand) met toenemende afstand tot het kanaal lager wordt, hangt ook af van de lengte van de veenlaag. Met lengte van de veenlaag wordt hier de afstand tot het kanaal bedoeld, waarover de veenlaag ononderbroken aanwezig is. Naarmate de lengte van de veenlaag kleiner is, is de gradiënt van de grondwaterstand steiler. 100 m ten zuiden van Pand 14 is de lengte van de veenlaag ongeveer 2,5 meter. Bij Panden 2, 16 en 18 is de lengte van de veenlaag ongeveer 12 meter. Daarom is de gemeten gradiënt 100 m ten zuiden van Pand 14 een stuk steiler dan de berekende gradiënt bij Panden 2, 16 en 18 voor het scenario met lekke damwand.

Figuur 3.19 geeft een schematische weergave van dit fenomeen. Bij de kanaaloever is de grondwaterstand gelijk aan kanaalpeil. Daar waar de veenlaag eindigt is de grondwaterstand gelijk aan de stijghoogte in het onderliggende watervoerend pakket. Naarmate de veenlaag over een grotere lengte aanwezig is, wordt de gradiënt van de grondwaterstand dus kleiner (minder steil).



Figuur 3.19 Schematische weergave van het effect van de lengte van de veenlaag op de gemiddelde gradiënt van de grondwaterstand bij afwezigheid van een waterkerende damwand. De lichtblauwe gradiënt is gebaseerd op de gemeten stijghoogte in B09-04 100 m ten zuiden van Pand 14. De oranje gradiënt is gebaseerd op de berekende stijghoogte in B07-04 bij Pand 18. De bijbehorende horizontale lijnen geven de grondwaterstand van de genoemde meetpunten weer, zoals die zijn afgeleid uit de gradiënt-lijnen

De schematische weergave in Figuur 3.19 gaat uit compleet homogene omstandigheden, die op beide locaties identiek zijn. De gemeten waterhoogtes in HB09-04 en Oude Buis, die 16 m van elkaar verwijderd liggen, en de berekende waterhoogtes in HB07-04 wijken daarom 1 à 2 decimeter af van de rechte gradiënt-lijnen in deze figuur.

De berekende stijghoogten in het onderliggende watervoerend pakket (B07-04) liggen een stuk lager, 1,78 tot 2,06 m onder kanaalpeil. 100 m ten zuiden van Pand 14 zijn in het diepe meetpunt B09-04 stijghoogten gemeten tussen 1,47 en 1,63 m onder kanaalpeil. Het verschil tussen de diepe meetpunten (B07-04 en B09-04) wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat Pand 14 ruim 3 km zuidelijker ligt dan Pand 18 en de regionale stijghoogte hier enkele decimeters hoger is.

Dit zorgt er in ieder geval voor dat er ook bij een lekke damwand geen grote verhangen in grondwater in de buurt van de panden ontstaan, omdat de grondwaterstand ruim voor de panden al verlaagd is tot bijna hetzelfde niveau als de grondwaterstand bij de panden.

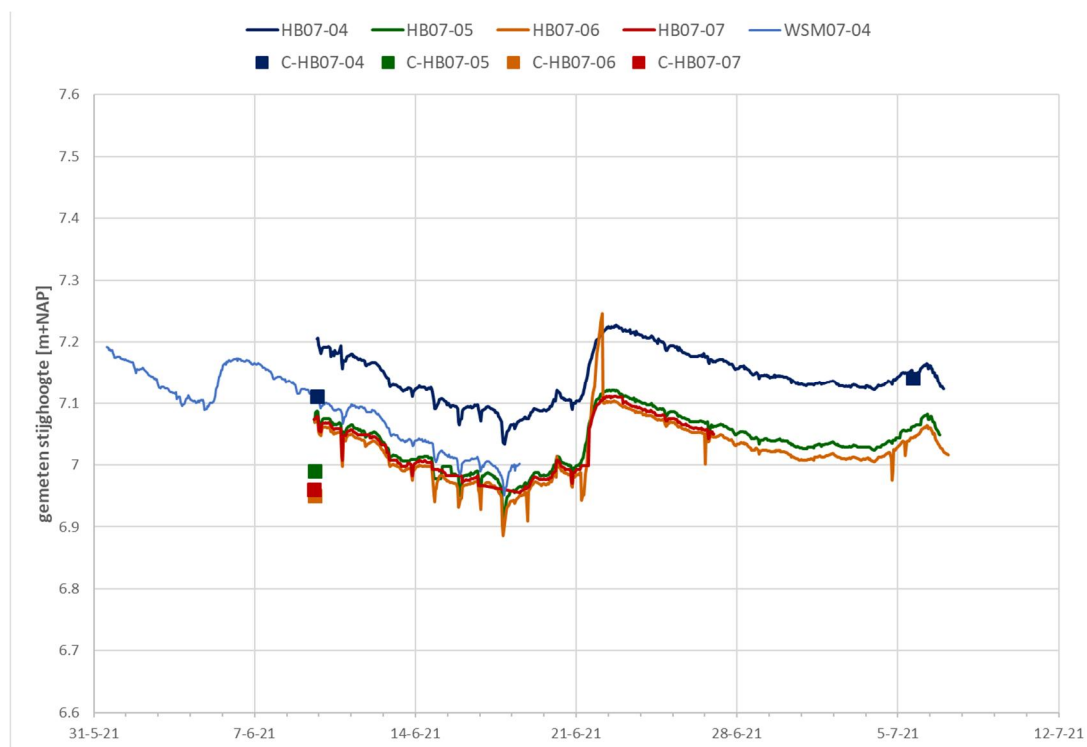
3.4.7 Maaiveldhoogte en grondwaterverhang

De hoogte van het maaiveld is van belang, omdat het drainageniveau (gehandhaafd waterpeil, slootbodem, drains, en dergelijk) daar in ieder geval onder ligt. Laag gelegen gebieden op korte afstand van het kanaal kunnen, bij lokale afwezigheid van kanaalbodem- en/of damwandweerstand, resulteren in relatief grote verhangen in grondwaterstand en dus in relatief grote stroomsnelheden in het grondwater.

Het grootste verschil tussen kanaalwaterpeil en maaiveld direct achter het pand is aanwezig bij Panden 2, 18 en 16. Daar lijkt de grootste kans te bestaan op aanwezigheid van een relatief groot verhang in grondwaterstand. Deze locatie is daardoor interessant om met een

zeer gedetailleerd grondwatermodel te onderzoeken. Daarvoor zijn lokale metingen aan bodemopbouw en stijghoogte essentieel.

De eerste resultaten van de metingen hier toonden aan dat de verhangen in grondwater hier nagenoeg verwaarloosbaar zijn (Figuur 3.20). Toch is het interessant om hier in detail te modelleren, omdat het effect van het wegnemen van de weerstanden van bodem en/of damwand daarmee kan worden bepaald. De andere locatie waarvoor nader onderzoek interessant is, is die 100 m ten zuiden van Pand 14, waar uit recente metingen is gebleken dat de damwand daar lek is. Voor deze locatie is uiteindelijk geen detailmodel gemaakt, omdat op die locatie onvoldoende waarnemingspunten zijn ingericht om een goede kalibratie van het detailmodel te kunnen waarborgen.



Figuur 3.20 Eerste meetresultaten bij Pand 18. Stijghoogten in peilbuizen voor locaties vlakbij het kanaal (HB07-04, donkerblauw), voorzijde van het pand (HB07-05, donkergroen), achterzijde van het pand (HB07-06, bruin) en 16 m achter het pand (HB07-07, donkerrood). De helblauwe lijn is een waterspanningsmeter die in de kanaalbodem is gestoken, vlak naast de damwand. De vierkante punten zijn handpeilingen ter controle

3.4.8 Samenvatting en conclusies geohydrologisch onderzoek

Een uitgebreide beschrijving van het geohydrologisch onderzoek staat in het geohydrologisch deelrapport (bijlage J). Hieronder volgt een beknopte samenvatting en worden de belangrijkste conclusie herhaald.

De uitgevoerde analyse is gebaseerd op metingen en berekeningen. De metingen zijn onder te verdelen in metingen die specifiek voor dit onderzoek zijn verricht en metingen die al eerder zijn gedaan. De berekeningen zijn verricht met een regionaal model voor het gehele onderzoeksgebied en een detail model voor een specifieke locatie, Panden 2, 18 en 16. Op grond van het verhang in maaiveld over het pand is dit de locatie met een van de grootste potenties op het optreden van piping. Het aantonen of er een grondwaterverhang kan optreden dan wel in het verleden kan zijn opgetreden, waarbij piping mogelijk is, is een van de doelen van dit onderzoek.

De metingen die specifiek voor dit onderzoek zijn verricht, zijn uitgebreid beschreven in de factsheets per raai en daarom niet nogmaals in dit rapport opgenomen. De metingen bij Panden 2, 16 en 18 zijn wel gebruikt in de detailmodellering en de samen met de andere metingen in deze grondwateranalyse.

De berekeningen met het regionale model zijn vooral uitgevoerd om het effect van een kanaalpeilverlaging op de grondwaterstand te kunnen kwantificeren, om mogelijk iets tegen piping te kunnen doen als het onderzoek zou uitwijzen dat dit inderdaad optreedt. De berekeningen met het detailmodel zijn gebruikt om verschillende mogelijk maatgevende situaties te kunnen analyseren.

Metingen

Alle waterspanningsmeters die in de kanaalbodem gedrukt zijn, laten zien dat de stijghoogten van het grondwater onder de kanaalbodem veel lager zijn dan het waterpeil van het kanaal, orde 1,5 tot 2 meter lager. Daarnaast vertonen de gemeten waterspanningen nagenoeg dezelfde variatie als de gemeten grondwaterstand in de nabijgelegen peilbuizen. Beide duiden erop dat, gedurende de meetperiode van begin juni tot begin augustus 2021, de bodemweerstand van het kanaal aanwezig was.

Bijna alle ondiepe peilbuizen die binnen een paar meter van het kanaal staan, laten zien dat de stijghoogten van het grondwater vlak naast het kanaal veel lager zijn dan het waterpeil van het kanaal, orde 1,5 tot 2 meter lager. Ook dat duidt erop dat, gedurende de meetperiode van begin juni tot begin augustus 2021, de damwandweerstand van het kanaal groot was.

Alleen 100 m ten zuiden van Pand 14 zijn de gemeten stijghoogtes vlakbij het kanaal duidelijk hoger. Daar is de damwand dusdanig lek dat het water aan de landzijde van de damwand op meerdere plaatsen gelijk is aan kanaalpeil. Op ongeveer een halve meter vanaf het kanaal schommelt de gemeten grondwaterstand (oude peilbuis) tussen de 36 en 62 cm onder kanaalpeil. Ongeveer 16 meter noordelijker, op ongeveer 1,75 m uit het kanaal (HB09-04) schommelt de gemeten grondwaterstand tussen de 77 en 92 cm onder kanaalpeil. Op deze locatie was de gemeten stijghoogte in de diepe meting naast het kanaal (B09-04) ongeveer 70 cm lager dan in de ondiepe meting HB09-04. De naastgelegen waterspanningsmeter onder het kanaal gaf hier met standen rond de 1.85 m onder kanaalpeil nog 30 cm lagere meetwaarden. Het gemeten steile verhang in grondwaterstand op deze locatie wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het hoge doorlaatvermogen van het onderliggende watervoerend pakket in combinatie met de lage regionale drainageniveaus.

Regionale modellering

De resultaten van het regionale model duiden erop dat het kanaal een relatief grote bodemweerstand heeft en op de meeste plekken ook een grote damwandweerstand. Vergelijking van de rekenresultaten met de beschikbare regionale peilbuismetingen laat zien dat op ook plekken langs het kanaal zijn waar de damwand geen waterkerende werking heeft.

Een kanaalpeilverlaging heeft alleen een relevant effect op de grondwaterstand voor locaties waar de damwand over een relevante afstand lek is en / of als de weerstand van de bodem gedurende langere tijd klein is.

Als de bodemweerstand van het kanaal gedurende langere tijd klein is, zal de grondwaterstand in de omgeving van het kanaal sterk omhoog gaan. Dat kan leiden tot grondwateroverlast. Datzelfde gebeurt als de damwand over langere trajecten lek is.

Detailmodellering

De uitgevoerde zeer gedetailleerde grondwatermodellering bij de panden van Panden 2, 16 en 18 onderbouwt de relatief grote weerstanden van kanaalbodem en damwand voor deze locatie.

Uit de scenarioberekeningen blijkt dat er bij een lekke damwand over een grote lengte van het kanaal een grote grondwatergradiënt ontstaat, waarbij de grondwaterstand over enkele meters afneemt van kanaalpeil direct naast de damwand tot ruim anderhalve meter lager op zo'n 10 meter afstand van het kanaal. De metingen bij de lekke damwand 100 m ten zuiden van Pand 14 duiden zelfs op een nog snellere afname. Daar reikt de aanwezige veenlaag in de kanaaloever echter maar tot de weg die ongeveer 2,5 m van de kanaaloever ligt. De veenlaag bij Panden 2, 16 en 18 reikt (in het model) een stuk verder, waardoor het directe contact tussen de zandpakketten boven en onder de veenlaag ook op wat grotere afstand van het kanaal ligt. Het grote doorlaatvermogen van de onderliggende zandpakketten en de laaggelegen regionale drainageniveaus zorgen ervoor dat de relatief kleine instroom- "opening" van kanaalwater boven de veenlaag relatief snel uitdempt. Ook de aanwezige bodemweerstand van het kanaal draagt bij aan de lage stijghoogten onder de veenlaag.

De spreiding van het effect van een lekke damwand op de grondwaterstand hangt samen met de afstand waarover de aanwezige veenlaag zich vanaf de damwand landinwaarts uitstrekt. In het detailmodel van Panden 2, 16 en 18 is aangenomen dat de veenlaag zich tot voorbij de weg uitstrekt, over een afstand van 12 meter. 100 m ten zuiden van Pand 14 is bekend dat de veenlaag onder de weg niet aanwezig is en daarmee beperkt blijft tot ongeveer 2,5 m vanaf het kanaal. Daarom is het gemeten verloop van de grondwaterstand 100 m ten zuiden van Pand 14 ook steiler dan het berekende verloop van de grondwaterstand bij Panden 2, 16 en 18.

Dat betekent ook dat op locaties waar de veenlaag zich verder uitstrekt, het effect van een lekke damwand op de grondwaterstand groter is. Uit de berekeningen volgt dat de bijdrage van een lekke damwand aan de grondwaterstand ter plekke van de panden bij Panden 2, 16 en 18 in de orde van 10 cm ligt. Een indicatieve berekening waarbij deze veenlaag zich tot ongeveer 20 meter achter het pand uitstrekt, resulteert aan de voorzijde van het pand in een stijging van de grondwaterstand van ongeveer 30 cm. Als de hydraulische weerstand over de gehele lengte van de veenlaag een factor 5 groter is dan aangenomen kan de stijging aan de voorzijde van het pand nog 10 cm meer zijn.

De scenarioberekeningen voor de bodemweerstand tonen aan dat bij een snel dichtslibbende bodem het effect van baggeren op de grondwaterstand beperkt blijft tot een tijdelijke stijging van enkele decimeters. Als de bodem langzaam dichtslibt, kan de tijdelijke stijging van de grondwaterstand oplopen tot een meter. Bij langzaam dichtslibben van de bodem zou er in 2012 gedurende langere tijd een sterk verhoogde grondwaterstand moeten zijn gemeten. Kortdurende stijgingen van de grondwaterstand na baggeren zijn destijds mogelijk wel opgetreden. De waarnemingen van destijds kunnen dit echter niet eenduidig aantonen. Langdurige stijgingen van de grondwaterstand na baggeren zijn niet waargenomen. Ook dat duidt erop dat de kanaalbodem na baggeren waarschijnlijk weer snel dichtslibt.

De scenarioberekeningen voor verdroging tonen aan dat de grondwaterstand ook in extreem droge situaties in de buurt van het kanaal niet heel ver uitzakt, tot ongeveer een halve meter onder de voorjaarsgrondwaterstand en orde 20 tot 30 cm lager dan in een gemiddelde zomer. De aanvulling van het grondwater door lekkend kanaalwater verhindert verdere uitzakking van de grondwaterstand. Ook als de bodemweerstand en damwandweerstand relatief hoog zijn.

Vervangen van goed functionerende (niet lekke) damwanden van 4 meter lengte door damwanden van 9 meter lengte heeft nagenoeg geen enkel effect op de grondwaterstand. Alleen als daarbij een slechtdoorlatende klei- of leemlaag, die onder het gehele kanaal over grotere lengte aanwezig is, wordt doorsneden, zal de grondwaterstand in de buurt van het kanaal door het aanbrengen van een langere damwand een paar decimeter kunnen stijgen. Kanttekening 1 daarbij is dat in dat geval het effect van baggeren van de kanaalbodem vele malen kleiner wordt. Kanttekening 2 is dat een situatie met een slechtdoorlatende laag onder het gehele kanaal aannemelijk is voor slechts één locatie in het gebied.

Conclusies

- De verhangen in grondwater over de panden zijn relatief laag (enkele procenten). Piping kan op basis van deze verhangen niet optreden. Dat geldt zowel voor de huidige situatie als voor situaties waarbij de bodemweerstand en / of de damwandweerstand laag is.
- Een lekke damwand over een langer traject van het kanaal kan tot een kleine stijging van de grondwaterstand leiden bij panden die dicht langs het kanaal staan. De grondwaterstand bij deze panden kan door een lekke damwand 10 tot 15 cm omhoog komen. Omdat deze situatie zich gedurende langere tijd voordoet, kan dat in zeer natte perioden leiden tot lichte grondwateroverlast.
- Alleen bij locaties waarbij een continue veenlaag zich uitstrekt van het kanaal tot voorbij het pand, kan de grondwaterstand door een lekke damwand nog wat verder oplopen (tot ca 30 cm) en is de kans op grondwateroverlast door een lekke damwand groot.
- Bij het (langdurig) ontbreken van een bodemweerstand is de potentiële grondwateroverlast een stuk groter. Het is echter onwaarschijnlijk dat een dergelijke situatie zich door het baggeren van de kanaalbodem heeft voorgedaan.
- Als na baggeren de bodem snel weer dichtslibt, geleidelijk in ca 2,5 dagen, is de stijging van de grondwaterstand bij de panden relatief klein (orde 10 à 20 cm) en wordt er geen wateroverlast verwacht. Alleen als dat net samenvalt met een zeer natte periode is er kans op enige grondwateroverlast.
- Als na het baggeren de bodem langzaam dichtslibt, geleidelijk in ca 2 maanden, is het effect bij de panden relatief groot (orde 1 m) en kan er (gedurende enkele weken) grondwateroverlast optreden.
- Er zijn geen aanwijzingen (metingen), die eenduidig aantonen dat de bodem van het kanaal in het verleden na baggeren gedurende langere tijd open is gebleven.
- De extreme droogte in het groeiseizoen van 2018 heeft relatief weinig effect op de grondwaterstand. Ook bij relatief hoge weerstanden van de bodem en de damwand wordt het grondwater door het kanaal voldoende aangevuld om heel diep uit te zakken te voorkomen. In dergelijke droge zomers zakt de grondwaterstand wel een paar decimeter verder uit dan in gemiddelde zomers, maar dat blijft door de aanvulling uit het kanaal beperkt tot hooguit een halve meter onder de grondwaterstand in het voorjaar.
- Het aanbrengen van een langere damwand heeft nagenoeg geen effect op de grondwaterstand. Alleen als daarbij een slecht doorlatende laag, die onder de gehele kanaalbodem over grotere lengte van het kanaal aanwezig is, wordt doorsneden, zal de grondwaterstand in de buurt van het kanaal een paar decimeter kunnen dalen. In dat geval zal het effect van baggeren van de kanaalbodem op de grondwaterstand echter een stuk kleiner zijn. De aanwezigheid van een dergelijke slecht doorlatende laag onder de gehele breedte van het kanaal is aannemelijk voor slechts één locatie in het gebied. Deze situatie komt dus waarschijnlijk niet of slechts zeer lokaal voor.
- Door de relatief hoge weerstanden van de kanaalbodem en de damwand, is het effect van kanaalpeilverlaging (als mogelijke maatregel tegen piping) op de grondwaterstand klein tot verwaarloosbaar, zeker zolang de peilverlaging beperkt blijft tot 50 cm.
- Alleen als de bodemweerstand van het kanaal gedurende lange periode na het baggeren klein is, kan het effect van kanaalpeilverlaging tijdelijk relevant zijn. Datzelfde geldt in veel minder mate op plekken waar de damwand over grotere lengte langs het kanaal lek is. Gezien de verwachte snelheid van het sedimentatieproces, is het minder waarschijnlijk

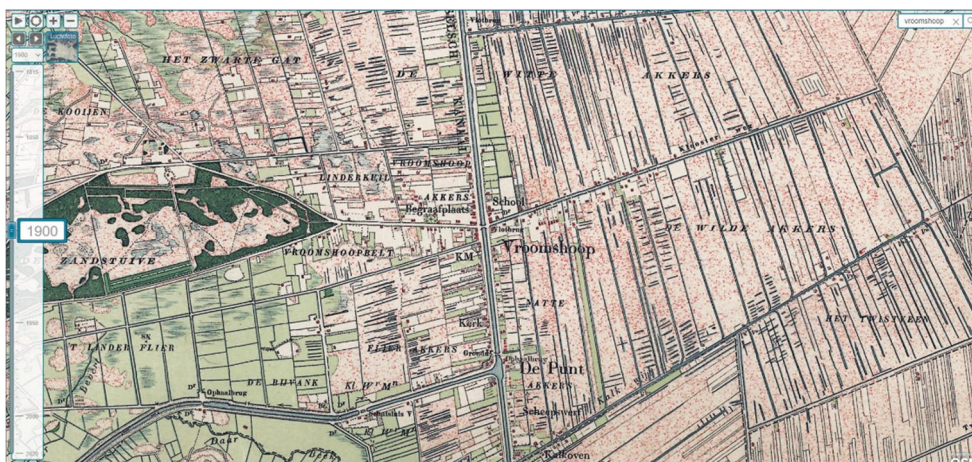
dat de bodemweerstand gedurende lange periode laag blijft dan dat de damwand over grotere lengtes lek is.

3.5 Panden en funderingen

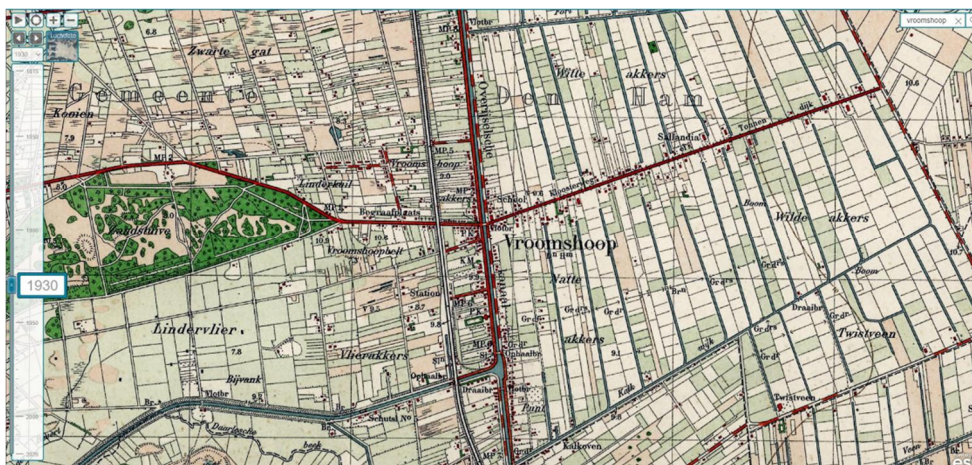
Deze paragraaf geeft een korte samenvatting van de bebouwingsgeschiedenis en wijze van funderen van de panden. Dit is naast de verzamelde informatie over de geschiedenis van het kanaal, de geologische ontstaansgeschiedenis één van de ingrediënten die gebruikt worden in de verdere studie/het onderzoek. Daarnaast is een tijdlijn opgesteld t.a.v. de schademeldingen. Daarvoor wordt verwezen naar paragraaf 4.3.

3.5.1 Bebouwingsgeschiedenis

Het kanaal werd aangelegd in het midden van de 19^{de} eeuw en opengesteld in 1856. Er was toen hooguit sporadisch bebouwing in het gebied. In Figuur 3.21 is een tekening met de situatie in 1900 weergegeven, waarop langs het kanaal de nodige bebouwing te zien is. Figuur 3.21 t/m Figuur 3.25 geven respectievelijk de situatie van 1900, 1930, 1950, 1970 en 1990. Uit deze tekeningen blijkt dat er langs het kanaal tussen 1900 en 1950 geleidelijk steeds meer bebouwing kwam. Vooral tussen 1950 en 1990 werd veel gebouwd in de gebieden verder van het kanaal. Uit de figuren blijkt dat de bebouwing langs het kanaal het oudst is en verder weg van het kanaal de meer recente bebouwing staat.



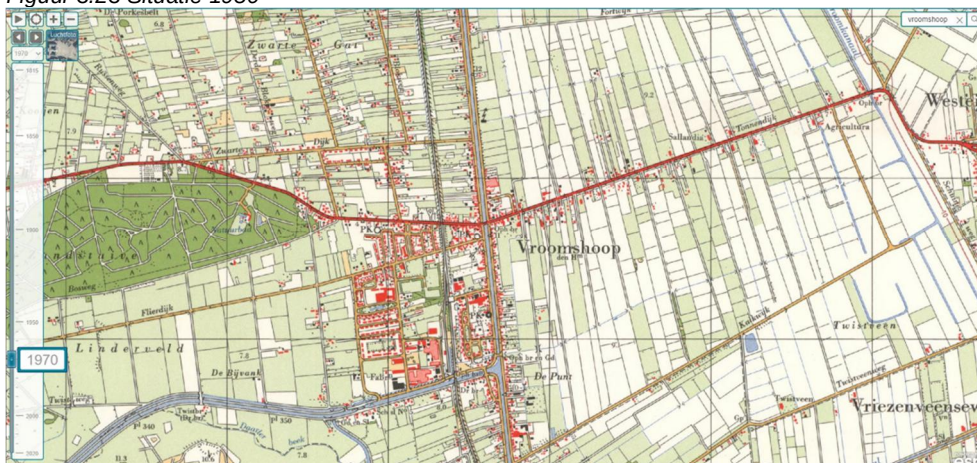
Figuur 3.21 Situatie 1900



Figuur 3.22 Situatie 1930



Figuur 3.23 Situatie 1950



Figuur 3.24 Situatie 1970



Figuur 3.25 Situatie 1990

3.5.2

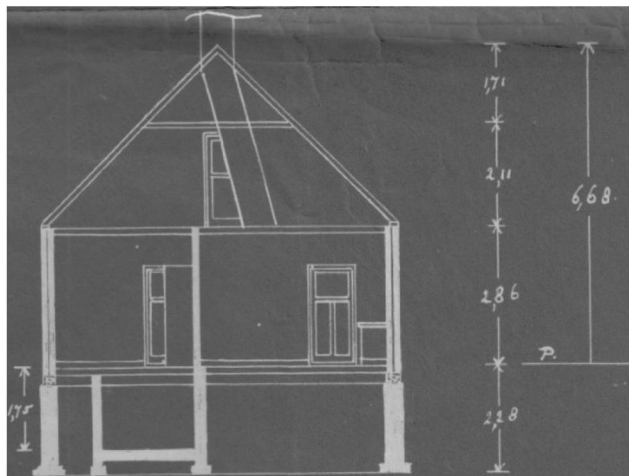
Bouwtype

De oudere bebouwing betreft bijna allemaal woningen met twee lagen, dat wil zeggen begane grond en een verdieping. De oudere bouw is opgebouwd uit dragend steens metselwerk en houten balklagen. Deze oudere woningen staan meestal dicht langs de weg, die langs het kanaal op de kanaaldijk, ligt. De later gebouwde huizen staan op wat grotere afstand. De oudere huizen waren van oorsprong veelal klein en uit bouwtekeningen blijkt dat

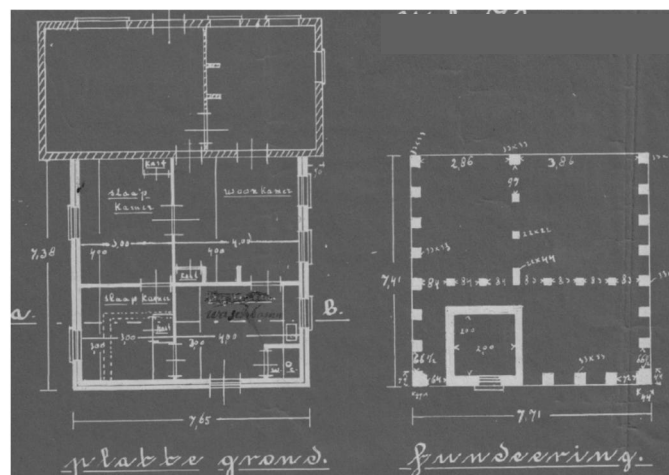
er naderhand vaak aanbouwen werden bijgebouwd of dat de panden geheel of gedeeltelijk werden vernieuwd.

3.5.3 Type funderingen

Voor zover bekend zijn de woningen langs het kanaal op staal gefundeerd op gemetselde poeren en soms op staal op een doorgaande funderingsstrook. De latere bebouwing is soms op een betonplaat gefundeerd. Volgens de beperkt aanwezige bouwtekeningen werd de onderkant van de poeren destijds veelal circa 2 m onder maaiveld aangelegd. Deze diepte werd destijds kennelijk nodig gevonden omdat de (harde) zandlaag pas op die diepte werd aangetroffen. Volgens sommige bouwtekeningen beschikken de poeren over een zogenaamde uitgetande voet, dat wil zeggen dat de onderkant van de poeren breder is dan de hogere delen.



Figuur 3.26 Doorsnede van nieuw achterhuis met fundering



Figuur 3.27 Tekening van fundering op poeren, waarbij achterhuis aan een bestaand pand werd vastgebouwd. De fundering van het bestaande pand is niet aangegeven

Bij de oudere panden werd op de poeren in bogen verder gemetseld, zie Figuur 3.28, bij de later gebouwde panden werd op de poeren een betonbalk aangebracht waarop verder werd gemetseld, zie Figuur 3.29.



Figuur 3.28 Fundering op poeren met gemetselde bogen



Figuur 3.29 Poerfundering met betonbalk over de poeren

De werkwijze met betrekking tot de aanleg van de poerfunderingen in het gebied is al decennia feitelijk niet anders en kent twee varianten (referentie [2]). Bij de eerste variant worden de slappe samendrukbare lagen ter plaatse van de poeren afgegraven tot op de diepte waar de eerste draagkrachtige zandlaag wordt aangetroffen. Veelal is dit dus tot circa 2 m onder maaiveld. Vanaf dit niveau worden poeren gemetseld, met de bogen, tot aan het oorspronkelijke maaiveld. Bij de tweede variant wordt het veen niet geheel afgegraven maar worden boorgaten gemaakt tot op het vaste zand die vervolgens met beton (en wapening) worden volgestort.

Een aandachtspunt bij een fundering op poeren en gemetselde bogen is de horizontale steundruk die aan het einde van een funderingsmuur noodzakelijk is om de bogen te laten werken. Deze steundruk moet of door de grond geleverd worden of de hoekpoeren moet zodanig van afmetingen zijn dat de resultaten van de druk binnen de poer ligt. Dit is bijvoorbeeld bij Pand 15 geconstateerd.

Bij funderingen op een doorgaande strook is het mogelijk dat het veen is uitgegraven en eerst een aanvulling met zand, dat verdicht werd, is aangebracht. Dit zijn dus stroken fundering op een grondverbetering. Ook werd melding gemaakt van recentere funderingen waarbij het veen over het volledige oppervlak van de woning werd vervangen door een grondverbetering waarop dan een betonplaat als fundering werd toegepast.

3.5.4 Kelders

Bij de meerderheid van de onderzochte panden is een kelder aanwezig. De afmetingen variëren sterk, evenals de diepte van de kelders.

Kelders spelen in meerdere opzichten een rol:

- Als funderingen zakken blijkt dat de kelder meestal nauwelijks zakt omdat de funderingsdrukken onder de kelder gering zijn en er vaak eerst is ontgraven voordat de kelder is aangelegd; dit levert dus lagere spanningen in de ondergrond dan naast de kelder. Het lijkt daarom in veel gevallen net of “het pand over de kelder zakt”.
- Bij de inspecties bleek dat de meeste kelders niet uit waterdichte constructies bestaan; kennelijk was de grondwaterstand in de periode van de bouw 1,5 à 2 m onder maaiveld. Dat er tijdens het baggeren vochtklachten zijn geweest door een tijdelijke verhoging van de grondwaterstand is derhalve plausibel.

3.6 Eerdere analyses

Ook eerdere onderzoeken naar de gevolgen van werkzaamheden aan het kanaal zijn ter informatie bekeken. Bijlagen G en M geven de resultaten van een eerdere analyse van de kwelproblematiek en de toetsing op veiligheid.

Bijlage G en M beschrijven eerdere analyses die door voortschrijdend inzicht in dit onderzoek kunnen zijn achterhaald. De inzichten en conclusies uit de eerdere analyses kunnen door voortschrijdend inzicht in dit onderzoek zijn achterhaald. Citaten uit de eerdere analyses zijn opgenomen ter informatie en vertegenwoordigen niet de mening van Deltares.

3.6.1 Aanvullende inventarisatie damwanden Witteveen en Bos 2016

Omdat er bij de Provincie Overijssel twijfels waren gerezen omtrent de juistheid en nauwkeurigheid van de eerdere onderzoeken, heeft Witteveen+Bos in 2016 een onderzoek, c.q. inventarisatie uitgevoerd naar de aanwezige oeverconstructies (boordvoorzieningen) langs het Kanaal Almelo – De Haandrik. Zie ook paragraaf 3.2.3.

3.6.2 Aanvullende inventarisatie Beens 2020

In 2020 is, in opdracht van de Provincie Overijssel, door Beens Groep een inventarisatie uitgevoerd van de constructies langs het kanaal, waarbij met een hart op hart afstand van 25 m, totaal 488 locaties onderzocht zijn. Daarbij is het volgende onderzocht:

- Materiaalsoort van de beschoeiing/constructie; staal, beton of hout.
- Dikte van de beschoeiing.
- Scheefstand van de beschoeiing

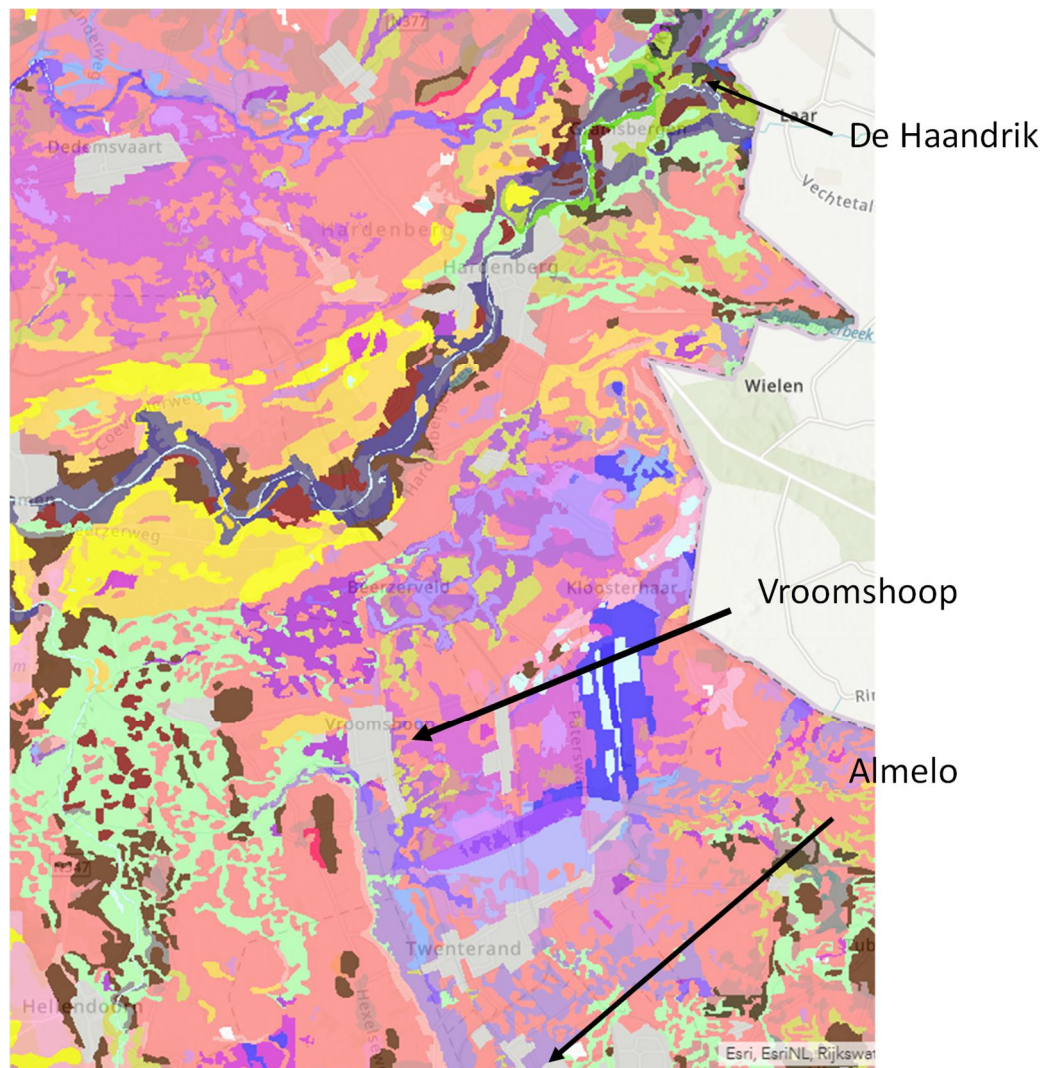
De gegevens van de inventarisaties zijn tevens vastgelegd in paragraaf 3.2.3.

3.7 Samenvatting aanvullend grondonderzoek

Ten behoeve van dit verdiepend onderzoek is aanvullend grondonderzoek uitgevoerd. Deze paragraaf beschrijft welk grondonderzoek dat betreft.

3.7.1 Inleiding

Het Kanaal Almelo – De Haandrik bevindt zich in een gebied met een sterk wisselende samenstelling van de ondergrond. Dit is een gevolg van de geologische geschiedenis van het gebied en de menselijke activiteiten door de eeuwen heen. Bij dat laatste moet bijvoorbeeld worden gedacht aan het afgraven van veen voor turfwinning of de aanleg van het kanaal. Als basis voor het onderzoek is een gedetailleerd inzicht nodig in de laagopbouw van de ondergrond, het type grond (zand, klei, veen of een mengvorm) en de geotechnische⁸ en geohydrologische eigenschappen van de grond. Bij deze eigenschappen van grond gaat het met name om de vraag hoe makkelijk water kan stromen door grond (waterdoorlatendheid) en hoe de grond zich gedraagt onder het gewicht van bovenbelasting, bijvoorbeeld door de funderingsdruk van een huis (draagvermogen en samendrukbaarheid).



Figuur 3.30 Bodemkaart van Nederland, ingezoomd op het traject Almelo – De Haandrik. Blauw en paars geven de gebieden aan waar veen in de ondergrond voorkomt

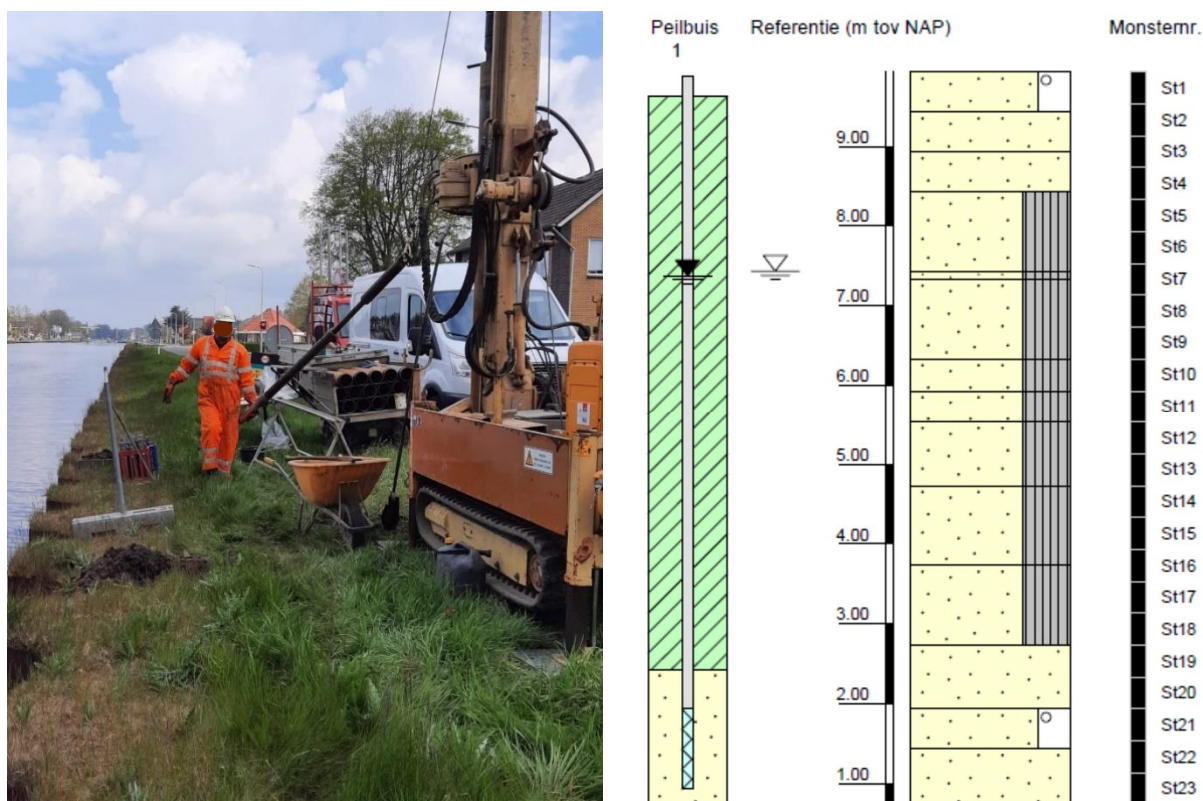
⁸ Geotechniek is een toegepaste wetenschap gericht op het bestuderen van grondgedrag met als doel het bouwen in en op grond.

3.7.2 Boringen en sonderingen

Op basis van de onderzoeksvragen en beschikbare informatie heeft het onderzoeksteam een grondonderzoek laten uitvoeren, bestaande uit:

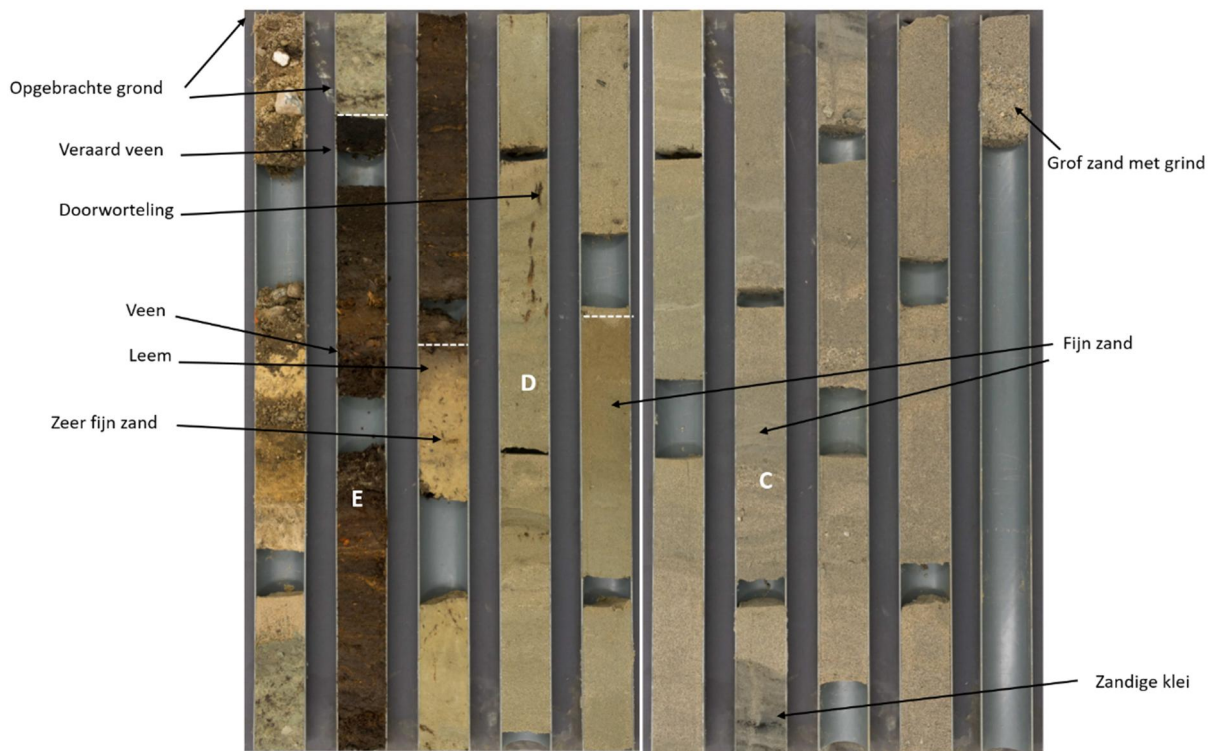
- 51 Mechanische en 51 handmatige boringen. Hiermee is het type grond vastgesteld en zijn grondmonsters genomen ten behoeve van het laboratorium onderzoek.
- 38 Sonderingen. Bij een sondering wordt een stalen stang tot diep in de grond gedrukt en wordt gemeten wat het draagvermogen is van de grondlagen.
- 270 Laboratorium proeven om het type grond vast te stellen (classificeren) en geotechnische en geohydrologische eigenschappen te bepalen.

De werkzaamheden zijn deels met de hand en deels met machine uitgevoerd tot diepten variërend tot 10 meter beneden het maaiveld. Daar waar nodig is gewerkt met relatief kleine boor- en sondeermachines om de overlast voor bewoners in het gebied zoveel mogelijk te beperken.



Figuur 3.31 Uitvoering van een mechanische boring (links) en voorbeeld resultaat boring (rechts)

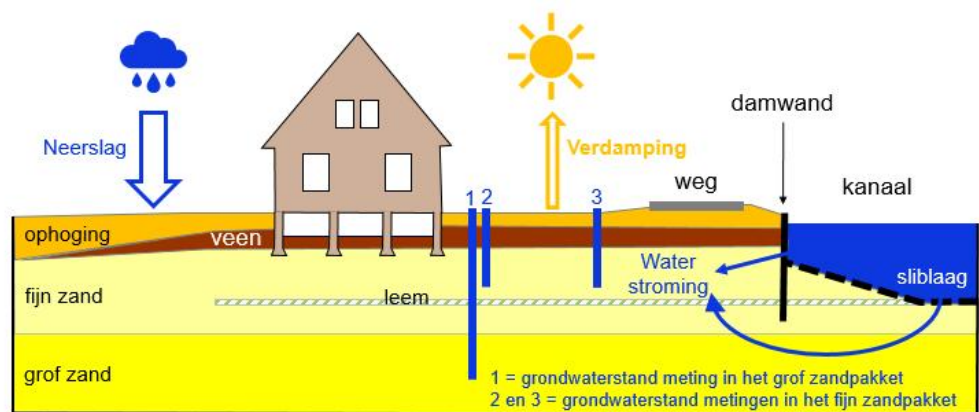
De aangetroffen laagopbouw uit boringen en sonderingen wordt gebruikt om de ondergrond te schematiseren in profielen vanaf het kanaal tot en met het bebouwde gebied. Bij deze interpretatieslag wordt door de experts geologische gebiedskennis gebruikt. Met de eigenschappen van de grond vormt dit de basis voor een zogenaamd geotechnisch model van de ondergrond. Met het geotechnisch model zijn de berekeningen uitgevoerd om bepaalde oorzaken van de schades te analyseren. Dit is gebeurd in samenhang met andere informatiebronnen en uitkomsten van andere onderdelen van het onderzoek.



Figuur 3.32 Foto van een in het laboratorium uitgelegde boring. Maaiveld (linksboven in boring) is NAP +9,20 m. De kernen zijn 1 m hoog. De bovenste 1,20 m is opgebrachte grond. Uit het boringen zijn eerst monsters genomen voor proeven. Vandaar de 'gaten' in het boorprofiel

3.7.3 Peilbuizen en waterdrukmeters

De waterhuishouding in het gebied rondom de panden en het kanaal is van betekenis voor het verloop van de grondwaterstand loodrecht op het kanaal. Het verhang van de grondwaterstand wordt bepaald, omdat dit de drijvende kracht kan zijn achter een deel van de faalmechanismen die worden beschouwd in het onderzoek naar de verklaring van schades aan de huizen. De lokale geohydrologie is een complex geheel dat wordt beïnvloed door vele factoren zoals neerslag, verdamping en stroming uit het kanaal via de kanaalbodem of damwanden.



Figuur 3.33 Schematische weergave geohydrologie rondom het kanaal, kaden en woningen

Wanneer er een verschil is tussen twee waterstanden dan zal er een waterstroming ontstaan. De snelheid van de waterstroom wordt bepaald door het verschil in waterstand en de doorlatendheid van de grond. Vanwege de korrelstructuur, kent zand een relatief hoge

waterdoorlatendheid ten opzichte van klei en veen. De aanwezigheid van zandige lagen en hoever deze lagen zich uitstrekken tussen kanaal en woningen is dus van belang voor het onderzoek. De aanwezigheid en samenstelling van de zandlaag (korrelverdeling⁹) en de stroomsnelheid zijn een aantal van de bepalende factoren voor het beantwoorden van de vraag of het faalmechanisme piping¹⁰ is opgetreden.

Klei- en veenlagen worden beïnvloedt door de grondwaterstand. Een voorbeeld van een faalmechanisme dat hiermee samenhangt is oxidatie¹¹ van veen als gevolg van uitdroging. Dat kan leiden tot inklinking van de veenlaag. Wanneer het veen zich onder de fundering van een huis bevindt is verzakking van de fundering en schade aan de woning een reële mogelijkheid. Een ander voorbeeld, tegenovergesteld aan veenoxidatie, is zwel van klei- en leemlagen door vernatting als gevolg van hogere waterstanden. Hierdoor kunnen maaiveld en fundering juist omhoog worden gedrukt. Het vaststellen van de oorzaak van dit soort effecten wordt bemoeilijkt doordat er ook sprake kan zijn van seizoensinvloeden.

Het grondonderzoek heeft inzicht opgeleverd in de laagopbouw en de eigenschappen van de grondlagen. Dit is aangevuld met het onderzoek naar de waterhuishouding:

- Nadat de boring op diepte is gekomen is in het boorgat een peilbuis geplaatst om de waterstand in de ondergrond te volgen. De 51 peilbuizen zijn voorzien van waterdruk meetsensoren.
- Het direct op diepte plaatsen van 21 waterdrukmetingen. Dit is gebeurd met een sondeervoertuig of een ingehuurde kraan.

Doel van het gehele meetsysteem is het continu monitoren van de grondwaterstanden. De metingen worden automatisch verricht en zijn per dag doorgezonden voor verdere verwerking en interpretatie. Hierdoor hoeven er ter plekke alleen onderhoud en incidentele metingen te worden uitgevoerd. Het meetsysteem is nu operationeel en kan desgewenst langere tijd operationeel blijven.

3.7.4 Piping-kolomproeven

Een zandmonster zoals dat van nature voorkomt, bestaat uit een mengsel van zandkorrels met verschillende korrelgrootten variërend van uiterst fijn tot en met uiterst grof. Bij een bepaalde vorm van piping kan, onder invloed van waterstroming, fijn zandmateriaal getransporteerd worden naar een zandlaag van grover materiaal. Het fijne zand past dan in de poriën van het grovere materiaal. Om dit effect te onderzoeken, zijn de zandmonsters uit het gebied onderzocht in een speciaal voor dit onderzoek opgezet experiment: de piping-kolomproef. Doel van de piping-kolomproef is vast te stellen of dit transport van fijn materiaal in een grove zandstructuur mogelijk is en bij welke verschillen in waterstand het effect dan optreedt. Wanneer dit wordt vergeleken met de waterstanden in de praktijk dan kan de vraag worden beantwoord of deze vorm van piping in dit gebied kan optreden.

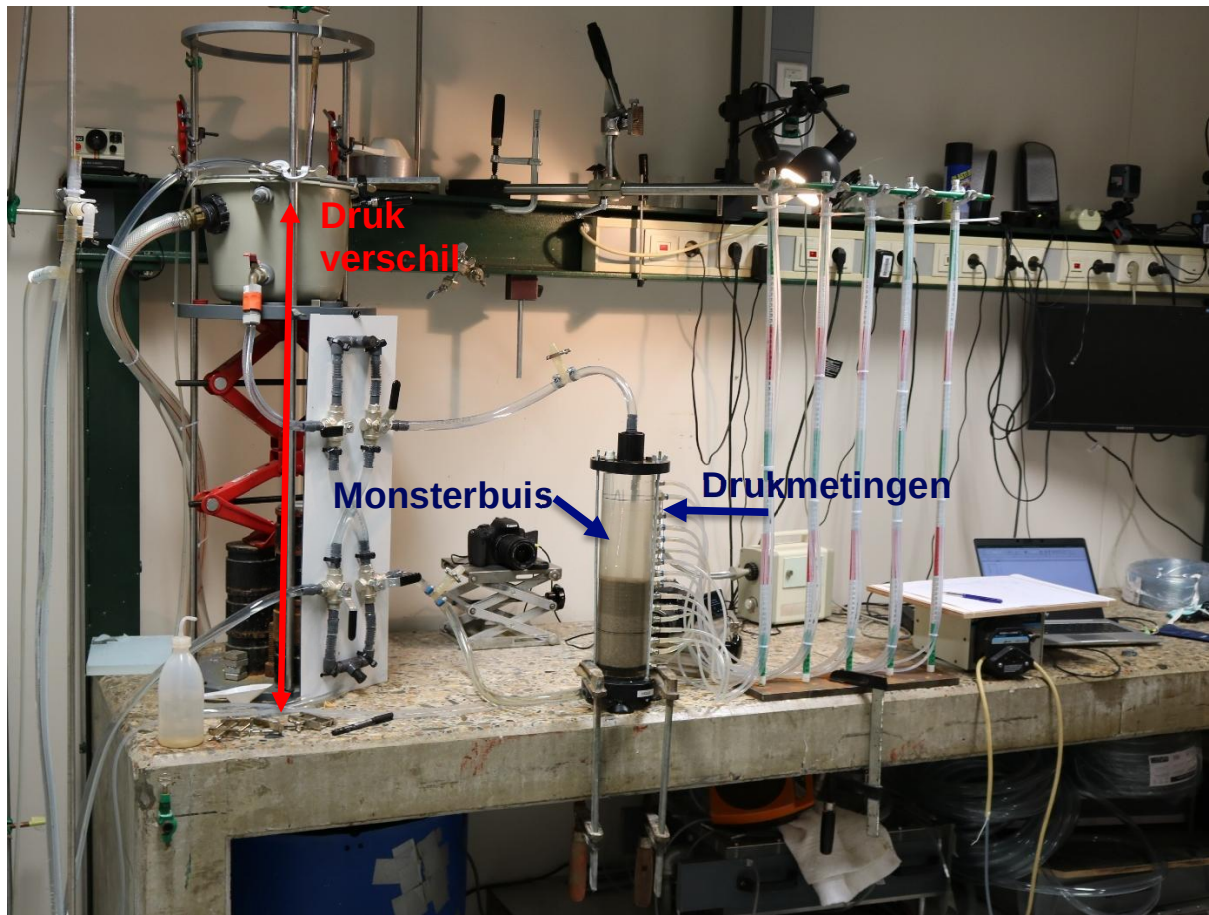
Het zandmonster bevindt zich in de perspex buis waarbij een monster uit de praktijk is aangebracht op een zandlaag met een grovere korrelstapeling. Via de slangen aan de bovenzijde en onderzijde van de monsterbuis wordt een bepaald verschil in waterdruk aangebracht en de optredende waterstroom gemeten. Een camera legt de verandering in monstervolume en zichtbaar transport van zandkorrels vast. De aansluitingen aan de zijkant

⁹ Met behulp van o.a. zeefanalyses wordt een verdeling gemaakt van de percentages zand met een bepaalde grootte. Dit wordt gepresenteerd in een zogenaamd korrelverdelingsdiagram.

¹⁰ Piping is een faalmechanisme waarbij de waterstroom in de ondergrond zo sterk is en andere omstandigheden zodanig zijn dat zandkorrels kunnen worden weggespoeld.

¹¹ Veen is een natte, sponsachtige grondsoort die veel organisch materiaal bevat. Veen dat aan buitenlucht wordt blootgesteld 'verbrand' langzaam waardoor de veenlaag dunner wordt en zelfs kan verdwijnen.

geven een beeld van de waterdrukverdeling over de hoogte van het monster. Indien het effect van transport van fijn materiaal in de grovere korrelstapeling optreedt dan zal de waterdrukverdeling veranderen als gevolg van verandering van de waterdoorlatendheid van dat deel van het monster. Tijdens de proef is stapsgewijs het verschil in waterdruk opgevoerd en geobserveerd hoe het zandmonster reageert. In totaal zijn 10 monsters van verschillende samenstelling beproefd.



Figuur 3.34 Opstelling piping-kolomproef in het laboratorium van Deltares

3.7.5 Herleidbaarheid grondonderzoek

Het is niet mogelijk om alle resultaten van het uitgevoerde grondonderzoek in dit rapport op te nemen. In onderstaande Figuur 3.35 is een overzicht gegeven van grondonderzoek en onderzoek aan de panden. In paragraaf 2.4.1 is een overzicht gegeven van de totale omvang van de verzamelde gegevens en waar deze zijn beschreven.



Figuur 3.35 Overzicht omvang uitgevoerd onderzoek panden en grondonderzoek

4 Analyse van schademeldingen, werkzaamheden en satellietmetingen gebiedsbreed

4.1 Aanpak

De aanpak op hoofdlijnen is beschreven in paragraaf 4.2 van de Desk research, diepere analyse van de gegevens en Onderzoeksplan [44]. De aanpak van de analyse van de schademeldingen, werkzaamheden en satellietmetingen in detail is als volgt:

- Deltares heeft gegevens verzameld over schademeldingen, werkzaamheden aan en rond het kanaal en de wegen, gebiedsgegevens, grondwater en zakkingsmetingen (paragraaf 4.2.1).
- SkyGeo heeft de InSAR satellietmetingen in het huidige portaal opnieuw bewerkt en de meetreeksen uitgebreid tot 2021 (paragraaf 4.2.2).
- Deltares heeft heterogeniteit en sprongen gedetecteerd in de satellietmetingen op basis van procedures die Deltares recent heeft ontwikkeld (paragraaf 4.2.4).
- De gegevens die nodig zijn voor de analyse op macroschaal zijn samengebracht in een GIS.
- De tijdlijn van de schademeldingen is vergeleken met de tijdlijn van de werkzaamheden die hebben plaatsgevonden, ondersteund door de analyse van heterogeniteit en sprongen in de satellietmetingen (paragraaf 4.3).
- De relatie tussen kenmerken van de satellietmetingen en gebiedskenmerken zoals bodemopbouw is onderzocht (paragraaf 4.4). Ook is de relatie onderzocht tussen schademeldingen en de leeftijd van de panden en de afstand tot het kanaal (paragraaf 4.4.3 en 4.4.4).

De gegevens ontbreken om de tijdlijn van de eerste schade en aard van de schade te vergelijken met de tijdlijn van de werkzaamheden. Ook ontbreken de gegevens om een vergelijking te maken tussen enerzijds panden met en zonder schade en verklarende factoren zoals funderingstype, constructiewijze, grondopbouw of leeftijd van de panden.

Om deze reden is een groot deel van de analyse uitgevoerd op basis van InSAR satellietwaarnemingen. In de InSAR tijdreeksen is gezocht naar sprongen en heterogeniteiten in het zakkingsbeeld die kunnen duiden op een externe schadeoorzaak. Ook zijn gemiddelde zakkingsnelheden bepaald.

De gebruikswaarde van de InSAR satellietmetingen voor de gebiedsbrede analyse van de schade wordt beschreven in paragraaf 4.2.2. Bij de analyse van de schade-oorzaken per pand in hoofdstuk 7 wordt ook gebruik gemaakt van de InSAR metingen. De gebruikswaarde van de InSAR metingen voor de analyse van de schade-oorzaken wordt beschreven in paragraaf 7.3.

4.2 Beschikbare gegevens

4.2.1 Overzicht beschikbaarheid gegevens

Paragraaf 3.1 uit de Desk research, diepere analyse van de gegevens en Onderzoeksplan [44] bevat een overzicht van gegevens die nodig zijn voor de analyse van de schade op macroschaal. De tijdstippen van schademeldingen zijn ongeveer bekend, maar van de schade zelf is er geen of geen goede informatie beschikbaar. Tabel 4.1 geeft een overzicht van de beschikbaarheid van de gegevens.

Tabel 4.1 Overzicht van de beschikbaarheid van de gegevens en verdere acties om de gegevens te verkrijgen

Gegevens	Status	Bevindingen
Schademeldingen		
Formele schademeldingen ontvangen door de Provincie: tijdstip van de melding, tijdstip van eerste schade, aard van de schade	Beschikbaar	Tijdstip eerste schade en aard van de schade niet beschikbaar
Informele schademeldingen verzameld door de Provincie: tijdstip van de melding, tijdstip van eerste schade, aard van de schade	Beschikbaar	
Waarnemingen in de rapporten van Van Baars	Beschikbaar	
Meldingen van breuken van water-, elektra- en gasleidingen: tijdstip van de melding	Niet beschikbaar	Geen meldingen
Voor- en na opnames van de panden	Beschikbaar	
Locatie van de panden met schademeldingen	Beschikbaar	
Bouwwaren van de panden	Beschikbaar	
Verzakkingen van sinkholes in de erven rondom de panden, verzakking van de vloeren van kruipruimten: tijdstip van de schade	Beschikbaar	Tijdstip schade niet bekend
Aanvulling van kruipruimten met zand: tijdstip van de aanvulling	Beschikbaar	Tijdstip aanvulling niet bekend
Verzakkingen van de wegen op de kanaaldijken, klein en groot onderhoud aan de wegen	Beschikbaar	Tijdstip gebeurtenis niet bekend
Vernatting van erven	Beschikbaar	Tijdstip gebeurtenis niet bekend
Wateruittreding uit taluds	Niet beschikbaar	Tijdstip gebeurtenis niet bekend
Overige opvallende verschijnselen aan en rond de panden	Beschikbaar	Geen nadere informatie bekend
Werkzaamheden aan het kanaal en wegen		
Overzichtstekening van activiteiten en schademeldingen	Beschikbaar	
Korte beschrijving van de opwaardering van het Kanaal.	Beschikbaar	
Bestekken van het Baggeren	Beschikbaar	
Uitpeilingen kanaal profielen van 1998	Beschikbaar	
Peildata baggeren t.b.v. de opwaardering, 2010	Beschikbaar	
Uitpeilingen kanaal profielen van 2016	Beschikbaar	
Tekeningen en grondwateranalyse met betrekking tot de zinker te Geerdijk, tijdstip van werkzaamheden	Beschikbaar	
Wachtplaatsen bestek: inbrengen van nieuwe damwanden en klapankers, tijdstip van werkzaamheden	Beschikbaar	
Wachtplaatsen bestek: het mogelijk deformeren/bezwijken van de damwanden, locatie van betonnen damwanden.	Beschikbaar	
Het verwijderen van damwanden en ankers, tijdstip van werkzaamheden.	Beschikbaar	
Trillingsmetingen wachtplaatsen 2011-2012	Niet beschikbaar	
Trillingsmetingen damwanden 2019-2020	Beschikbaar	

Gegevens	Status	Bevindingen
Documenten betreffende de vervanging van de brug Kloosterdijk.	Beschikbaar	
Documenten betreffende de werkzaamheden aan de wegen op de kanaaldijk (N750).	Beschikbaar	
Aanbrengen en onderhoud aan wegen en drempels in de weg langs het kanaal, tijdstip van werkzaamheden.	Beschikbaar	
Zwaardere transport op de weg langs het kanaal	Niet beschikbaar	Geen nadere gegevens
Meer en zwaardere scheepvaart in het kanaal	Niet beschikbaar	Geen nadere gegevens
Gebiedsgegevens		
Maaiveldhoogten, publieke bronnen	Beschikbaar	
Grondopbouw, publieke bronnen	Beschikbaar	
Grondonderzoeken Mos 1995	Beschikbaar	
Grondonderzoek ten behoeve van vervanging damwanden 2017-2018	Beschikbaar	
Veendiktekaart	Beschikbaar	
Grondwater		
Regionale en lokale grondwaterhuishouding, tijdstip van ingrepen	Niet beschikbaar	Gebied met veel kleine slootjes en maatregelen, is niet centraal bijgehouden. Te bewerkelijk.
Peilbuizen, publieke bronnen	Beschikbaar	
Peilbuizen, monitoring tijdens baggeren	Beschikbaar	
Meteorologische tijdreeksen neerslag, verdamping	Beschikbaar	
Meteorologische tijdreeksen overige	Beschikbaar	
Zakkingsmetingen		
PS-InSAR satellietmetingen Sentinel-1 via bodemdalingkaart.nl	Beschikbaar	Niet geschikt voor analyse per pand
PS-InSAR satellietmetingen Envisat, Radarsat-2	Beschikbaar	Inclusief uitbreiding tot brug bij Kloosterdijk
Bodemdaling in het grotere gebied rond het kanaal	Beschikbaar	
SBAS-InSAR satellietmetingen bodemdaling veenweidegebied	Niet beschikbaar	Onvoldoende detail
Gevolgen zoutwinning	Niet van toepassing	

Voor het merendeel van de schademeldingen geldt dat het tijdstip van de eerste schade niet bekend is. De tijdlijn van de werkzaamheden aan het kanaal en de wegen is opgenomen in paragraaf 3.2.3. Voor veel werkzaamheden geldt dat niet precies bekend is wanneer deze zijn uitgevoerd. In het bijzonder geldt dit voor het baggeren.

4.2.2 PS-InSAR satellietgegevens

SkyGeo heeft in opdracht van de Provincie een dataportaal ingericht waarin de InSAR satellietmetingen in een strook rond het kanaal kunnen worden ingezien en gedownload. De datasets zijn beschikbaar gemaakt via het portaal van SkyGeo: <https://maps.skygeo.com/>. Voor meer technische achtergrond wordt er verwezen naar de InSAR technical background manual 2.2 van SkyGeo [54]. De gegevens in het portaal zijn lokaal geoptimaliseerd voor het gebied rond het kanaal.

Op het moment van totstandkoming van deze rapportage bestaan de metingen in het portaal uit data afkomstig van twee verschillende satellieten en vier datasets:

- Envisat (ENV), dalende baan, periode 2003-2010.
- Radarsat-2, Standard 3 (RSAT S3), dalende baan, periode juni 2010-november 2016.
- Radarsat-2 Extra-Fine resolution beam (RSAT XF), stijgende baan, periode 2015-2021.
- Radarsat-2 Extra-Fine resolution beam (RSAT XF), dalende baan, periode 2016-2021.

Er is ook gekeken naar de InSAR beelden van de bodemdalingskaart.nl. Deze zijn gebaseerd op data van een andere satelliet, de Sentinel-1 met een lagere resolutie (13 x 13,5 m) maar een hogere frequentie (één maal in de zes dagen plus een combinatie van verschillende tracks, gemiddeld één beeld per 1,4 dagen). Met de bodemdalingskaart is het alleen mogelijk beweging van grote vlakken vast te stellen, zoals grote schuren of het maaiveld. Individuele woningen kunnen hier minder goed mee worden beschouwd. De bodemdalingskaart beelden zijn wel meer geschikt voor het analyseren van seizoensinvloeden, omdat er meer meetpunten in de tijd beschikbaar zijn, maar daarvan is dus minder goed bekend op welke locatie deze zich bevinden.

Vanwege de beschikbaarheid van de Radarsat-2 datasets met hogere resolutie en lokale optimalisatie zijn de Radarsat-2 datasets voor de analyse van de zakkingen per pand gebruikt, en niet de Sentinel-1 data van bodemdalingskaart.nl.

Figuur 4.1 geeft een indruk van de datadichtheid van de Envisat, Figuur 4.2 van de Radarsat S3 metingen. Figuur 4.3 geeft hetzelfde beeld voor de Radarsat XF metingen. Figuur 4.4 geeft een voorbeeld van een tijdreeks.

Figuur 4.1 Voorbeeld van de Envisat (2003-2010) dataset, Permanent (PS) en Distributed (DS) Scatterers, dalende satellietbaan

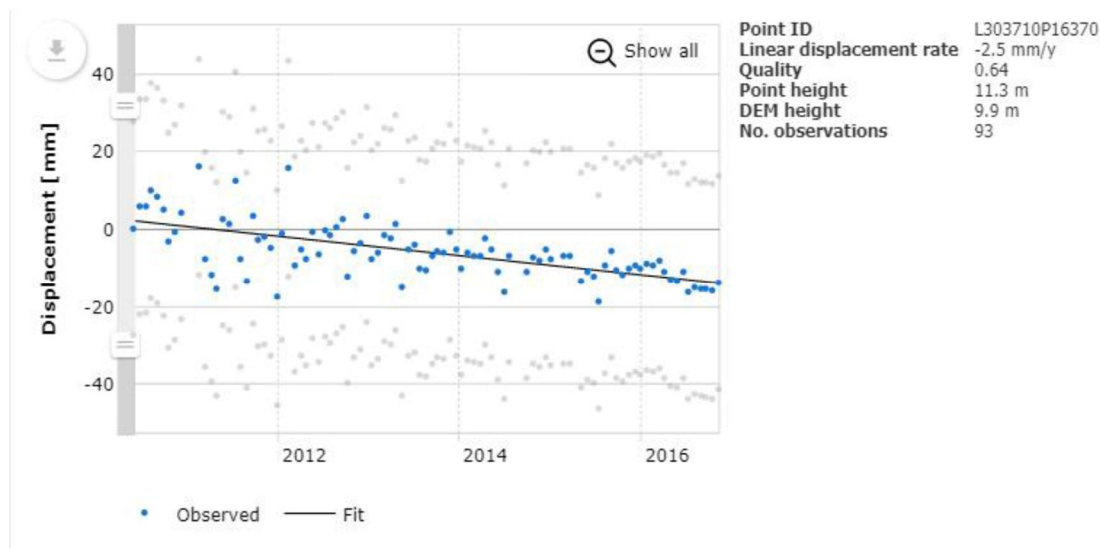
Figuur 4.1 is om privacy redenen niet opgenomen.

eFiguur 4.2 Voorbeeld van de Radarsat S3 (2010-2018) dataset, Permanent (PS) en Distributed (DS) Scatterers, dalende satellietbaan

Figuur 4.2 is om privacy redenen niet opgenomen.

Figuur 4.3 Voorbeeld van de Radarsat XF dataset (2015/6-2021), Permanent Scatterers (PS), hoge punten, stijgende en dalende satellietbaan

Figuur 4.3 is om privacy redenen niet opgenomen.



Figuur 4.4 Voorbeeld van een tijdreeks (Radarsat S3 dataset)

De datasets omvatten zowel Permanent Scatterer (PS) en Distributed Scatterer (DS) meetpunten¹². Ook is er in de Radarsat-2 XF dataset onderscheid tussen meetpunten hoger dan 2,5 m boven maaiveld (“hoge punten”) en punten lager dan 2,5 m boven maaiveld (“lage punten”). De tijdreeksen vertegenwoordigen de verticale vervormingen van de meetpunten. Deze zijn afgeleid uit de gemeten vervormingen in de kijkrichting van de satelliet (“Line-of-Sight” vervormingen), waarbij is verondersteld dat de meetpunten geen horizontale vervormingen ondergaan.

De InSAR deformatiedata bestrijkt een gebied van 250 m rond het kanaal tussen Vriezenveen en Kloosterdijk, ten noorden van de brug en het gebied van 250 m rond het Zwolsekanaal in de bebouwde kom van Vroomshoop.

SkyGeo heeft een op maat lokale InSAR processing uitgevoerd op bestaande radarbeelden van de Envisat en Radarsat-2 satellieten.

Ook heeft SkyGeo de Radarsat-2 dataset met standaard S3 resolutie van 2010-2016 in de tijd uitgebreid door deze te verbinden met metingen vanaf 2015/2016 met XF-resolutie. Hiertoe is de Radarsat-2 XF dataset verlengd tot 2021 en bewerkt (gedownsamled). Het bewerken van de Radarsat-2 XF data vergt erg veel rekencapaciteit en is uitgevoerd op basis van “best effort”. Binnen de beschikbare tijd is een dataset verkregen van 2010 tot april 2018.

De verandering van resolutie in de opnames van Radarsat-2 in 2015/2016 (van standaard S3 modus naar extra fijne XF modus) verstoort de datacontinuïteit. Helaas is het niet gelukt om de twee datasets aan elkaar te verbinden zonder in een deel van de tijdreeksen een artefact te introduceren. Dit artefact bestaat uit een sprong in de vervormingen en lijkt op het fenomeen van een trendbreuk in de data (zie paragraaf 4.2.4). Voor een deel van de tijdreeksen is het dus niet duidelijk of deze trendbreuk in de data terug te leiden is naar vervormingen of dat het een artefact is van de InSAR processing. In de InSAR data-analyse is de uitbreiding van de Radarsat-2 standaard S3 dataset daarom ook niet meegenomen. Alle onderstaande resultaten met InSAR zijn daarom afgeleid van de Radarsat-2 standaard 3 dataset die loopt van juni 2010 tot november 2016.

¹² Zie voor uitleg <https://maps.skygeo.com/technical-background/insar/measurement-principles/#L3>

Als volgende stap heeft SkyGeo een aggregatie van de meetpunten op pandniveau uitgevoerd waarbij de volgende parameters zijn meegenomen: adres, identificatiecode van het pand in de Basisregistratie Adressen en Gebouwen (BAG-ID), gemiddelde snelheid van de beweging, 15% en 85% percentielen van de snelheid. De aggregatie is uitgevoerd in een buffer van 1 m rondom de voetafdruk van elk pand.

De BAG-ID wordt als parameter aan de meetpunten toegevoegd. Hiervoor wordt aan alle meetpunten binnen de buffer van 1 m rond de voetafdruk van een pand de betreffende BAG-ID toegewezen. Punten buiten de buffer krijgen geen BAG-ID.

Per InSAR meetpunt is de volgende informatie toegevoegd:

- Coëfficiënten van de regressielijn door alle meetpunten in elke tijdreeks; de regressielijn kan een lineaire of kwadratische functie zijn, met daarop gesuperponeerd een seizoen effect.
- De gemiddelde afwijking van de vervormingen van de regressielijn per jaar.
- De ensemble coherence¹³ van de vervormingen per jaar.

De laatste twee parameters worden gebruikt bij de detectie van sprongen en heterogeniteiten in de tijdreeksen, zie paragraaf 4.2.4.

4.2.3

Gebruikswaarde van InSAR metingen voor de gebiedsbrede analyse van de schade

InSAR metingen kennen een brede toepassing voor monitoring van vervormingen van objecten. Het voordeel van InSAR metingen is dat in veel gevallen ook metingen beschikbaar zijn van vervormingen in het verleden. De potentie van de InSAR metingen voor monitoring is echter sterk afhankelijk van het soort object en de beschikbare gegevens. Hierbij spelen de volgende factoren mee:

- De metingen betreffen de zakking van de bovenkant van de panden, en een koppeling met de zakking van de funderingen van de panden is niet vanzelfsprekend. De metingen kunnen bijvoorbeeld ook worden beïnvloed door thermische effecten in de panden. De voorspellende waarde van de InSAR metingen voor vervormingen van de funderingen dient te worden bevestigd door validatie van de InSAR metingen aan directe vervormingsmetingen. Ook dient er een fysiek mechanisme te zijn dat het vervormingsbeeld in de InSAR metingen verklaart.
- Het aantal metingen per pand, met name in de Envisat (2003-2010) en de Radarsat-2 dataset met standaard S3 resolutie (2010-2016), is beperkt. Het aantal meetpunten per pand in de Radarsat-2 dataset met hoge XF resolutie (2015/6-2021) is veel groter. Om deze reden is de laatstgenoemde dataset gebruikt voor de analyse van de schadeoorzaken van de panden (hoofdstuk 7).
- De plaats- en hoogtenauwkeurigheid van de meetpunten is in de orde van 5 m. Dit houdt in dat een meetpunt dat wordt aangegeven op een pand in werkelijkheid ook naast een pand kan liggen.
- Het aantal meetpunten op de panden in de Radarsat-2 dataset met standaard S3 resolutie is circa 17.000; dit is zodanig veel dat alleen automatische interpretatie mogelijk is. Er is gebleken dat de automatische analyse in sommige tijdreeksen leidt tot incorrecte zakkingssnelheden, of tot incorrecte identificatie van het tijdstip van optreden van sprongen en heterogeniteiten in de tijdreeksen.

¹³ De ensemble coherence is een maat voor de kwaliteit van de tijdreeks, uitgedrukt als een waarde tussen 0 en 1. Een waarde 0 betekent complete ruis, terwijl een waarde 1 een perfecte overeenkomst betekent tussen vervormingsmodel en tijdreeks.

- Soms is de zakking van een object in de orde van grootte van de fase van het satelliet signaal. In dat geval kunnen fasesprongen voorkomen. In de metingen is het gevolg van een fasesprong een toename van de zakking. Het is niet mogelijk een automatische interpretatie te maken van het al dan niet optreden van fasesprongen.

Om deze redenen zijn de waarde van InSAR metingen én de conclusies uit de Radarsat-2 standaard S3 metingen voor de analyse op gebiedsschaal indicatief. De automatische interpretatie van zakkingsnelheden, sprongen en heterogeniteiten in individuele tijdreeksen kan incorrect zijn; dit kan alleen door handmatige analyse van de tijdreeksen worden vastgesteld.

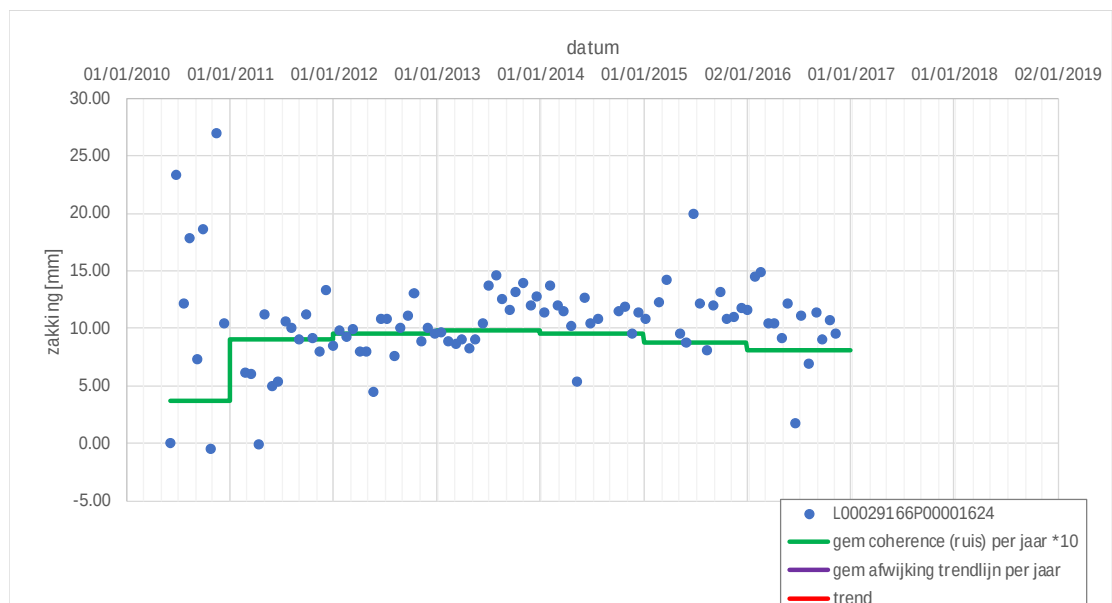
4.2.4 Detectie van sprongen en heterogeniteiten in tijdreeksen

Deltares heeft de InSAR metingen automatisch geanalyseerd door middel van procedures die recent zijn ontwikkeld. Hierbij is gezocht naar sprongen en heterogeniteiten in de tijdreeksen die kunnen wijzen op veranderingen in het vervormingsgedrag van de panden in de tijd. Hierbij is ook contact gezocht met TNO die ook ervaring heeft met de detectie van anomalieën in de meetreeksen. De aanpak bleek vergelijkbaar met die van Deltares.

De analyse is uitgevoerd op de Radarsat-2 dataset met standaard S3 resolutie (2010-2016), omdat deze de jaren van de werkzaamheden het beste dekt. Zoals eerder beschreven is het niet gelukt om deze dataset naar de latere jaren uit te breiden.

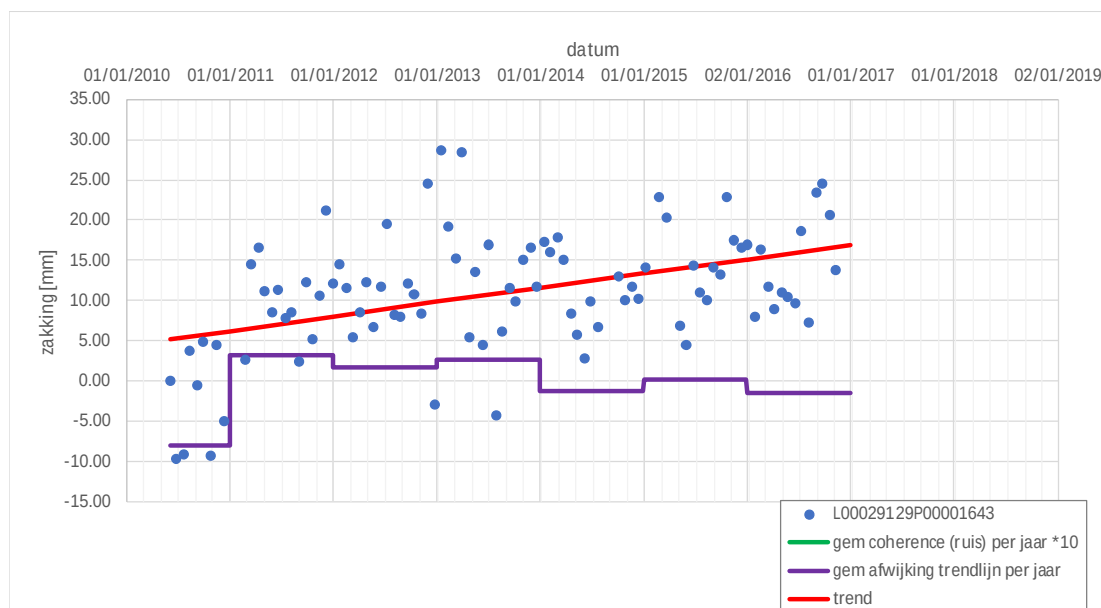
De analyse is automatisch uitgevoerd omdat het aantal meetpunten (circa 17.000) veel te groot is om alle tijdreeksen handmatig te analyseren. Om dezelfde reden is geen volledige controle uitgevoerd op de resultaten van de automatische analyse. De analyse bestaat uit:

- Detectie van heterogeniteiten in de metingen door te zoeken naar het grootste quotiënt van de ensemble coherence per jaar in twee opeenvolgende jaren. Figuur 4.5 geeft hiervan een voorbeeld. De groene lijn in de figuur is de ensemble coherence *10. In 2010 is de ensemble coherence veel lager (circa 0,4) dan in de jaren daarna (groter dan 0,8). Dit kan wijzen op een gebeurtenis aan het object tussen 2010 en 2011 die invloed heeft gehad op de ensemble coherence / ruis in de metingen. De drempel voor het quotiënt waarbij sprake is van een heterogeniteit is 2,3. De drempel is vastgesteld op basis van expert judgement, door een beperkt aantal tijdreeksen met verschillende mate van homogeniteit visueel te beoordelen.



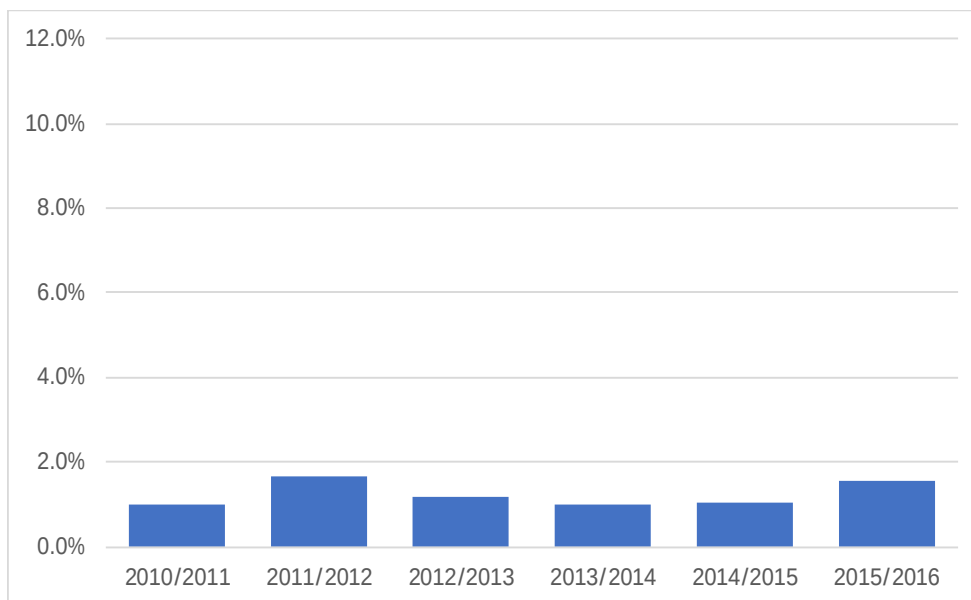
Figuur 4.5 Voorbeeld van een InSAR tijdreeks met een heterogeniteit in de ensemble coherence / ruis. De groene lijn geeft de ensemble coherence per jaar *10

- Detectie van sprongen in de metingen door het zoeken naar het grootste verschil tussen de gemiddelde afwijkingen van de metingen per jaar van de regressielijn in twee opeenvolgende jaren. Figuur 4.6 geeft hiervan een voorbeeld. De paarse lijn in de figuur is de gemiddelde afwijking per jaar van de trendlijn. In 2010 is de gemiddelde afwijking negatief (circa -8 mm) ten opzichte van 2011 (circa +3 mm). Dit kan wijzen op een gebeurtenis aan het object tussen 2010 en 2011 die invloed heeft gehad op de vervorming. De drempel voor het verschil waarbij sprake is van een sprong is 4,0. De drempel is vastgesteld op basis van expert judgement, door een beperkt aantal tijdreeksen met verschillende sprongen visueel te beoordelen.



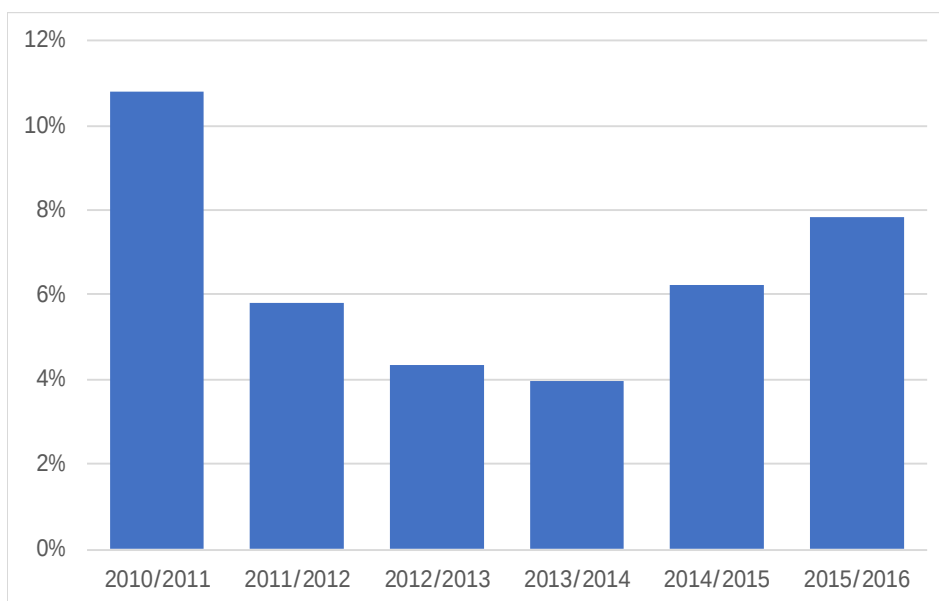
Figuur 4.6 Voorbeeld van een InSAR tijdreeks met een sprong in de metingen. De paarse lijn geeft de gemiddelde afwijking per jaar van de trendlijn

Uit de detectie van heterogeniteiten in de tijdreeksen blijkt dat circa 7% van de tijdreeksen een heterogeniteit vertoont. De verdeling van de jaren waartussen de heterogeniteit optreedt is gegeven in Figuur 4.7.



Figuur 4.7 Percentage van het totaal aantal tijdreeksen met jaar van optreden van de heterogeniteit. De aanduiding 2010/2011 betekent dat de heterogeniteit optreedt tussen het jaar 2010 en 2011. De gebruikte dataset Radarsat-2 standaard S3 dataset beslaat de jaren 2010-2016 zoals toegelicht in paragraaf 4.2.2

Uit de detectie van sprongen in de tijdreeksen blijkt dat circa 39% van de tijdreeksen een sprong vertoont. De verdeling van de jaren waartussen de sprong optreedt is gegeven in Figuur 4.8.



Figuur 4.8 Percentage van het totaal aantal tijdreeksen met jaar van optreden van de sprong. De aanduiding 2010/2011 betekent dat de sprong optreedt tussen het jaar 2010 en 2011. De gebruikte dataset Radarsat-2 standaard S3 dataset beslaat de jaren 2010-2016 zoals toegelicht in paragraaf 4.2.2

4.3 Vergelijking van de tijdlijn van de schademeldingen met de tijdlijn van de werkzaamheden

De locatie van de panden met een schademelding is gegeven in bijlage A (ingekleurde panden). De meeste meldingen zijn ontvangen uit het gebied tussen km 7 (ten noorden van

Vriezenveen) en km 16 (Kloosterdijk). De afstand van de meeste panden met schademelding tot het kanaal bedraagt tussen 15 en 40 m, met een kleiner aantal panden op 40 tot 80 m van het kanaal (zie onderste figuur van Figuur 4.15).

Van een tiental schademeldingen uit 2011-2012 heeft de Provincie een verband vastgesteld tussen tijdstip en aard van de eerste schade en de werkzaamheden, in het onderzoek van de schadeclaim. Dit betreft meldingen van trillingsschade en wateroverlast. Er zijn uit die tijd geen meldingen van verzakkingen; van een aantal meldingen is de aard van de schade niet bekend. De enige meldingen van wateroverlast direct na het baggeren betroffen Pand 20 en twee tegenover gelegen panden. Alle andere meldingen van wateroverlast zijn pas gedaan geruime tijd na het baggeren (mondelinge informatie Provincie).

Eind 2018 waren er ruim 100 schademeldingen gedaan. 31 hiervan betroffen verzakkingen of scheuren aan panden; 17 meldingen betroffen wateroverlast. Het tijdstip van de eerste schade varieerde sterk van “tijdens en vanaf het baggeren in 2012” tot “de laatste 2 jaren”.

Voor de vergelijking van de tijdlijn van alle schademeldingen met de tijdlijn van de werkzaamheden zijn twee sets kaarten gemaakt:

- **Tijdlijn werkzaamheden en schademeldingen:** zeven kaarten tussen km 7 (zuidelijk van Daarlerveen) en km 16 (brug in Kloosterdijk) langs het kanaal waarop de werkzaamheden en het jaar waarin deze plaatsvonden worden vergeleken met het jaar waarin voor het eerst schade werd gemeld aan een pand (Bijlage A).
- **Tijdlijn InSAR sprongen en schademeldingen** zeven kaarten tussen km 7 en km 16 langs het kanaal waarop het jaar van een sprong in de InSAR tijdreeksen (dus een plotselinge daling of stijging van het InSAR punt) wordt vergeleken met het jaar van de werkzaamheden (Bijlage B). De kaarten zijn gemaakt op basis van de Radarsat2 S3 dataset voor de periode van juni 2010 tot en met november 2016. Zoals toegelicht in paragraaf 4.2.2 is het niet gelukt de dataset uit te breiden naar latere jaren. Dit heeft tot gevolg dat de analyse geen uitsluitsel geeft over mogelijke veranderingen in de zakking als gevolg van de droogte in 2018 en 2019.

De kaarten van het jaar waarop een heterogeniteit in de tijdreeksen optreedt zijn niet gepresenteerd, omdat het aantal tijdreeksen met een heterogeniteit veel kleiner is dan het aantal tijdreeksen met een sprong.

en geven een weergave van de tijdlijn van de werkzaamheden en de schademeldingen aan west- respectievelijk oostzijde van het kanaal. Met uitzondering van de meldingen rond 2012 is alleen het jaar van de schademelding bekend; voor de tijdlijn is het tijdstip van de werkzaamheden ook afgerond op hele jaren.

Figuur 4.9 Tijdlijn van de werkzaamheden en de schademeldingen aan de westzijde van het kanaal

Figuur 4.9 is om privacy redenen niet opgenomen.

Figuur 4.10 Tijdlijn van de werkzaamheden en de schademeldingen aan de oostzijde van het kanaal

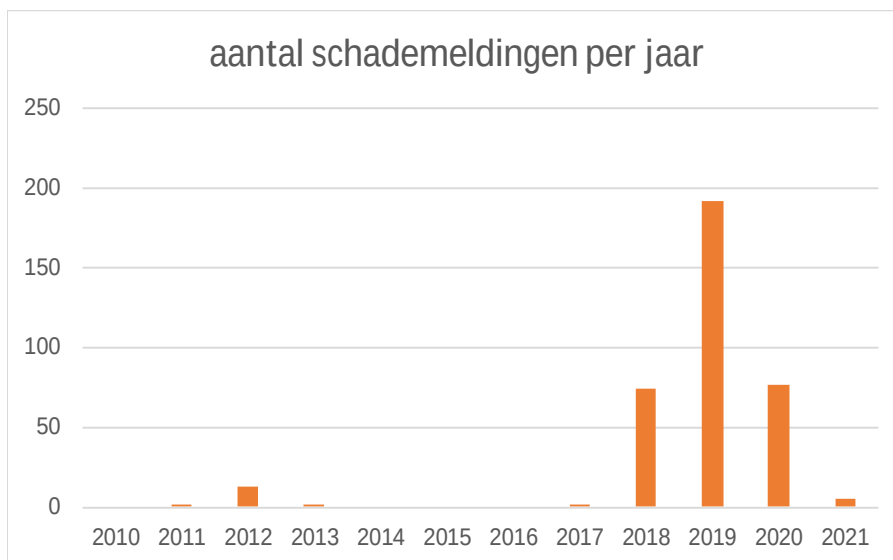
Figuur 4.10 is om privacy redenen niet opgenomen.

Uit de tijdlijn voor de westzijde (Figuur 4.9) en informatie van de Provincie over de meldingen rond 2012 is af te leiden:

- Het grootste deel van de schademeldingen is gedaan in 2018, 2019 en 2020; Figuur 4.11 geeft een histogram van het jaar van de schademeldingen.
- In 2005 zijn over beperkte lengte damwanden vervangen. Het is mogelijk dat dit een verlaging van de grondwaterstand heeft veroorzaakt. Dit zou tot zakkingsschade kunnen hebben leiden in het eerstvolgende zeer droge jaar, 2006. De vervanging van de damwanden heeft echter niet geleid tot schademeldingen in de zeer droge jaren 2018-2019.
- Eén schademelding in 2012 betreft een aanvaring tijdens het baggeren.
- Een aantal schademeldingen in 2011 en 2012 betreffen trillingsschade en is gerelateerd aan het plaatsen van damwanden.
- Eén schademelding in 2012 betreft wateroverlast; de claim is afgewezen.
- Er zijn drie schademeldingen omtrent wateroverlast bij Daarlerveen; twee claims zijn toegewezen en zijn gerelateerd aan het baggeren. In 2013 is hier een bodemafdichting in het kanaal aangebracht.
- Er zijn geen andere schademeldingen over wateroverlast direct na het baggeren.
- De schademeldingen in 2019 in Vroomshoop kunnen zijn gerelateerd aan vernieuwing van de damwanden. De aard van de schade is niet bekend; mogelijke schademechanismen zijn trillingen door inbrengen van damwanden en de zeer droge jaren 2018-2019. Een groot deel (twee derde) van de schademeldingen in 2018 en 2019 vonden plaats voordat de damwanden ter plaatse werden vervangen. Hieruit blijkt dat vooral de droogte in die jaren een rol speelde bij de schademeldingen.

Uit de tijdlijn voor de oostzijde (Figuur 4.10) en informatie van de Provincie over de meldingen rond 2012 is af te leiden:

- Het grootste deel van de schademeldingen is gedaan in 2018, 2019 en 2020; Figuur 4.11 geeft een histogram van het jaar van de schademeldingen.
- In 2005 zijn damwanden vervangen. Het is mogelijk dat dit heeft geleid tot verlaging van de grondwaterstand. Dit zou tot zakkingsschade kunnen hebben leiden in het eerstvolgende zeer droge jaar, 2006. Het is ook mogelijk dat een deel van de schademeldingen in 2018-2020 is gerelateerd aan de vervanging van de damwanden in 2005.
- De schademeldingen in 2012 rond Pand 20 betreft wateroverlast; de claim is toegewezen. In 2013 is hier een bodemafdichting in het kanaal aangebracht.
- Een aantal schademeldingen in 2012 betreffen trillingsschade en zijn gerelateerd aan het plaatsen van damwanden.
- Er zijn geen andere schademeldingen over wateroverlast direct na het baggeren.
- In 2018 zijn er in Daarlerveen twee meldingen die gerelateerd kunnen zijn aan de werkzaamheden aan de N750.
- De schademeldingen in 2019 in Daarlerveen kunnen zijn gerelateerd aan vernieuwing van de damwanden. De aard van de schade is niet bekend; mogelijke schademechanismen zijn trillingen of zakkingen als gevolg van de verlaging van de grondwaterstand door dichtere damwanden en de zeer droge jaren 2018-2019. Een groot deel (twee derde) van de schademeldingen in 2018 en 2019 vonden plaats voordat de damwanden ter plaatse werden vervangen. Hieruit blijkt dat vooral de droogte in die jaren een rol speelde bij de schademeldingen.



Figuur 4.11 Aantal schademeldingen per jaar

Uit bijlage B volgt geen duidelijk verband tussen de tijdlijn van de werkzaamheden en het moment dat een sprong in de data optreedt.

4.4 Relatie tussen de zakkingsnelheid van de panden volgens de satellietmetingen en gebiedskenmerken zoals bodemopbouw

De InSAR data zijn gebruikt om verbanden te leggen met andere (onafhankelijke) variabelen waarvan verondersteld wordt dat ze invloed hebben op de beweging van bodem en panden. Er is geen relatie gezocht tussen schademeldingen en gebiedskenmerken omdat de datum van de eerste schade niet bekend is.

Voor het onderzoek naar relaties tussen kenmerken van de satellietmetingen en gebiedskenmerken zoals bodemopbouw is een derde set kaarten gemaakt. Bijlage C geeft zeven kaarten tussen km 7 en km 16 langs het kanaal waarop de lineaire component van de zakkingsnelheid van de trendlijn door de InSAR tijdreeksen is gegeven. De kaarten zijn gemaakt op basis van de Radarsat2 S3 PS datapunten voor de periode van juni 2010 tot en met november 2016. Zoals toegelicht in paragraaf 4.2.2 is het niet gelukt de dataset uit te breiden naar latere jaren. Dit heeft tot gevolg dat de analyse geen uitsluitsel geeft over mogelijke veranderingen in de zakking als gevolg van de droogte in 2018 en 2019.

Voor dit project is gekeken naar de volgende variabelen en bijbehorende verwachtingen:

- **Veendikte in eerste 3 m onder maaiveld**, in de veronderstelling dat een dikker veenpakket in de ondiepe ondergrond leidt tot een hogere zakkingsnelheid.
- **Relatie met suffosiegevoeligheid en filterincompatibiliteit**, in de veronderstelling dat er een ruimtelijke relatie is tussen suffosiegevoeligheid/filterincompatibiliteit en zakkingsnelheid (zie Figuur 4.14).
- **Afstand tot de kanaalas**, in de veronderstelling dat de zakkingsnelheid hoger is nabij het kanaal (zie Figuur 4.12).
- **Bouwjaar**, in de veronderstelling dat nieuwere panden een lagere zakkingsnelheid vertonen. Het bouwjaar is verkregen uit de Basisregistratie Adressen en Gebouwen (BAG) (zie Figuur 4.13). Het bouwjaar betreft het jaar van eerste aanleg van het hoofdgebouw, en niet het jaar van plaatsing van aanbouwen of interne verbouwingen. Zakking ten gevolge van aanbouwen of verbouwingen heeft geen direct verband met het bouwjaar en zal een mogelijke relatie tussen bouwjaar en zakkingsnelheid diffuser maken.

De 'puntkwaliteit' van een InSAR tijdsreeks is een maat voor de afwijking tussen de meetpunten in de InSAR tijdreeks en het vervormingsmodel dat wordt opgelegd bij de lokale optimalisatie. De punt kwaliteit varieert tussen 0 en 1. Een waarde 0 betekent complete ruis, terwijl een waarde 1 een perfecte overeenkomst betekent tussen vervormingsmodel en tijdreeks. InSAR meetpunten waarbij de puntkwaliteit lager is dan 0,65 zijn uit de data gefilterd voor deze analyse, omdat het toepassen van een lagere puntkwaliteit een te ruig beeld opleverde. De overgebleven InSAR meetpunten zijn in drie categorieën verdeeld:

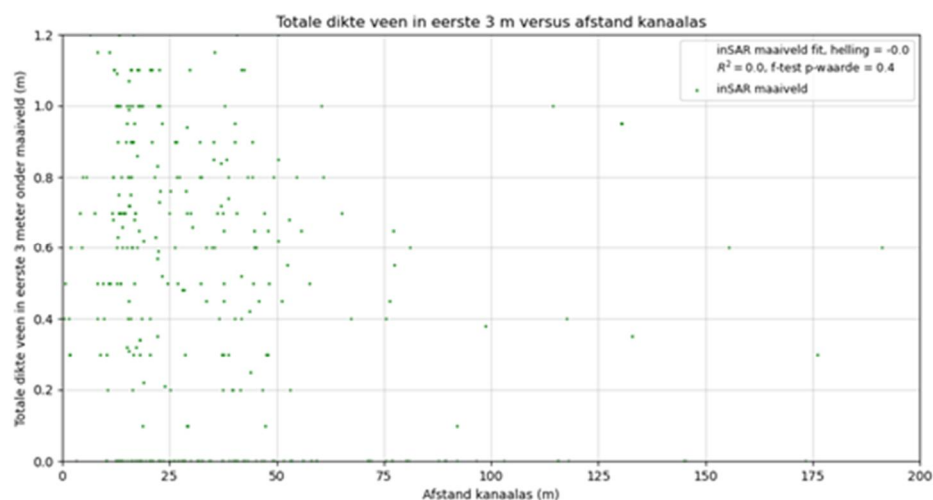
- 1 Punten verder dan 1 m buiten een pand (groene punten in de navolgende figuren, maaiveld).
- 2 Punten binnen 1 m van een pand waar geen schade is gemeld (blauwe punten in de navolgende figuren, pand met schademelding).
- 3 Punten binnen 1 m van een pand waarvoor schade is gemeld (rode punten in de navolgende figuren, pand zonder schademelding).

Voor de puntenwolken die volgen uit de vergelijking van de InSAR gegevens en onafhankelijke variabelen is een lineaire regressielijn gefit door middel van de ordinary least squares methode. De relevantie van de regressielijn wordt gekarakteriseerd door R^2 en de p -waarde van de F-test (zie de legenda van de navolgende figuren). R^2 is een maat voor de voorspellende waarde van de lineaire regressie: deze waarde wordt geïnterpreteerd als het deel van de afhankelijke variabele dat verklaard kan worden door de onafhankelijke variabele. Bijvoorbeeld: als de invloed van veendikte op de lineaire trendwaarde van InSAR punten wordt bekeken en de R^2 van de regressie is 0,2, dan kan 20% van de variatie in de lineaire trendwaarde verklaard worden door de veendikte. De F-test is een statistische test die gebruikt wordt om aan te tonen dat er een statistisch significant verband bestaat tussen de variabelen. De nulhypothese (H_0) is dat er geen verband is en dat de hellingscoëfficiënt van de regressielijn dus gelijk is aan 0. Als de p -waarde kleiner is dan 0,05 (bij een betrouwbaarheidsinterval van 95%) dan wordt de nulhypothese verworpen en wordt verondersteld dat er wel degelijk een verband is tussen de twee geteste variabelen. Als de p -waarde groter is dan 0,05 wordt de regressielijn niet weergegeven in de figuren.

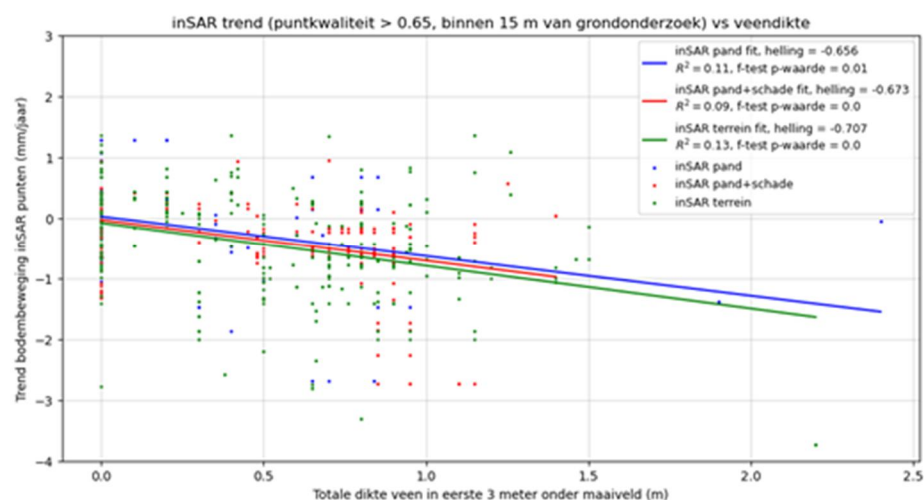
4.4.1 Veendikte

De veendikte is bepaald uit de beschrijving van alle bestaande boringen en sonderingen die langer zijn dan 3 m. Van deze data is de totale dikte van het veen in de eerste 3 m onder maaiveld genomen en vergeleken met de zakkingsnelheid van InSAR meetpunten op minder dan 15 m van de boringen en sonderingen. Zie Figuur 4.12 voor het maaiveld op basis van de lage InSAR punten en Figuur 4.13 voor de panden met de hoge punten. In Figuur 4.13 is onderscheid gemaakt tussen panden met en zonder schademelding.

Een correlatie tussen de veendiktekaart en de actuele (in dit onderzoek gemeten) veendikte is niet goed te leggen. De veendikte kaart is te grof om variaties op kleine schaal in kaart te kunnen brengen. De conclusie is dat de veendiktekaart niet geschikt is als basis voor de gebiedsbrede analyse.



Figuur 4.12 Veendikte versus afstand tot kanaalas



Figuur 4.13 Veendikte versus gemiddelde zakkingsnelheid

Uit Figuur 4.13 volgt dat er een significante lineaire relatie is tussen de veendikte en de zakkingsnelheid tussen 2010 en 2016. Een grotere veendikte betekent dat de gemiddelde zakkingsnelheid groter is. Bij een veendikte van nul is de gemiddelde zakkingsnelheid ongeveer nul. Significante lineaire relaties zijn gevonden voor InSAR punten op panden met schademelding (rode lijn), InSAR punten op panden zonder schademelding (blauwe lijn) en InSAR punten op het maaiveld rondom de panden (groene lijn).

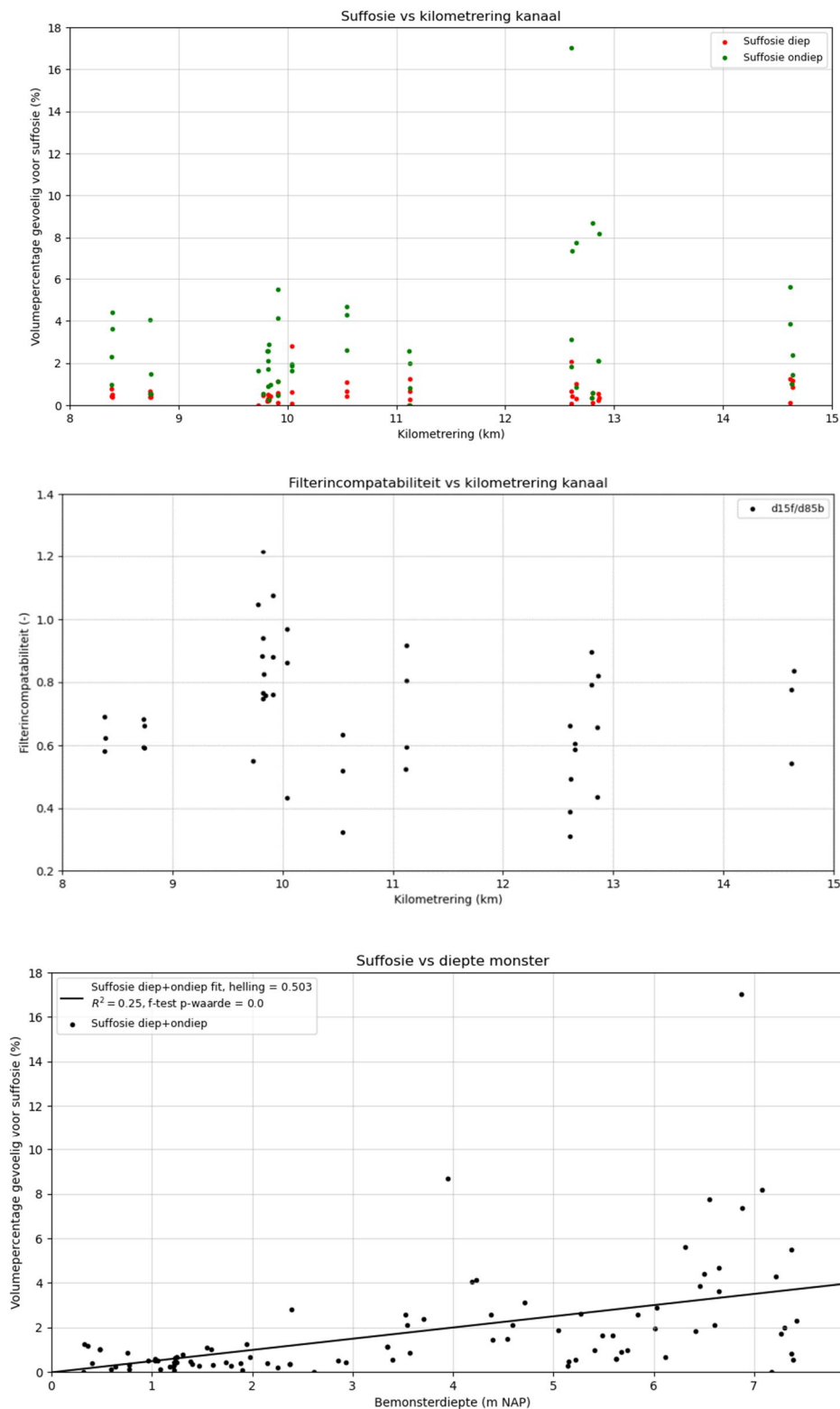
De lineaire relatie tussen veendikte en gemiddelde zakkingsnelheid (de ligging van de lijnen) is niet significant anders voor de panden met schademelding, de panden zonder schademelding en het omliggende terrein.

4.4.2 Relatie met suffosiegevoeligheid en filterincompatibiliteit

Er is onderzocht of er een relatie is tussen suffosiegevoeligheid en filterincompatibiliteit, uitgedrukt als percentage van het monster dat mogelijk suffosiegevoelig is, en de kilometrering, zie Figuur 4.14. Hieruit volgt geen duidelijke relatie, behalve dat er rond km 12,5 - 13 hogere waarden gevonden worden ten opzichte van de rest van het traject. Het betreft de onderzoeksraaien bij Pand 3 en Panden 2, 18, 16 en 7. Ook is er gekeken naar de

filterincompatibiliteit (zie Figuur 4.14 midden). De gevoeligheid hiervoor is uitgedrukt als ratio van de korrelgrootte (verdeling) $d_{15,f} / d_{85,b}$, per boring. Hierin wordt de korrelgrootteverdeling bepaald aan de hand van zeefkrommes, dus D_{15} is de korrelgrootte waarbij 15% van de massa van het materiaal kleiner is dan deze grootte.

Uit deze ruimtelijke analyse van suffosiegevoeligheid en filterincompatibiliteit blijkt dat er geen ruimtelijke component is langs het kanaal. Om deze reden is het niet zinvol een relatie te leggen tussen suffosiegevoeligheid/filterincompatibiliteit en zakkingsnelheid.

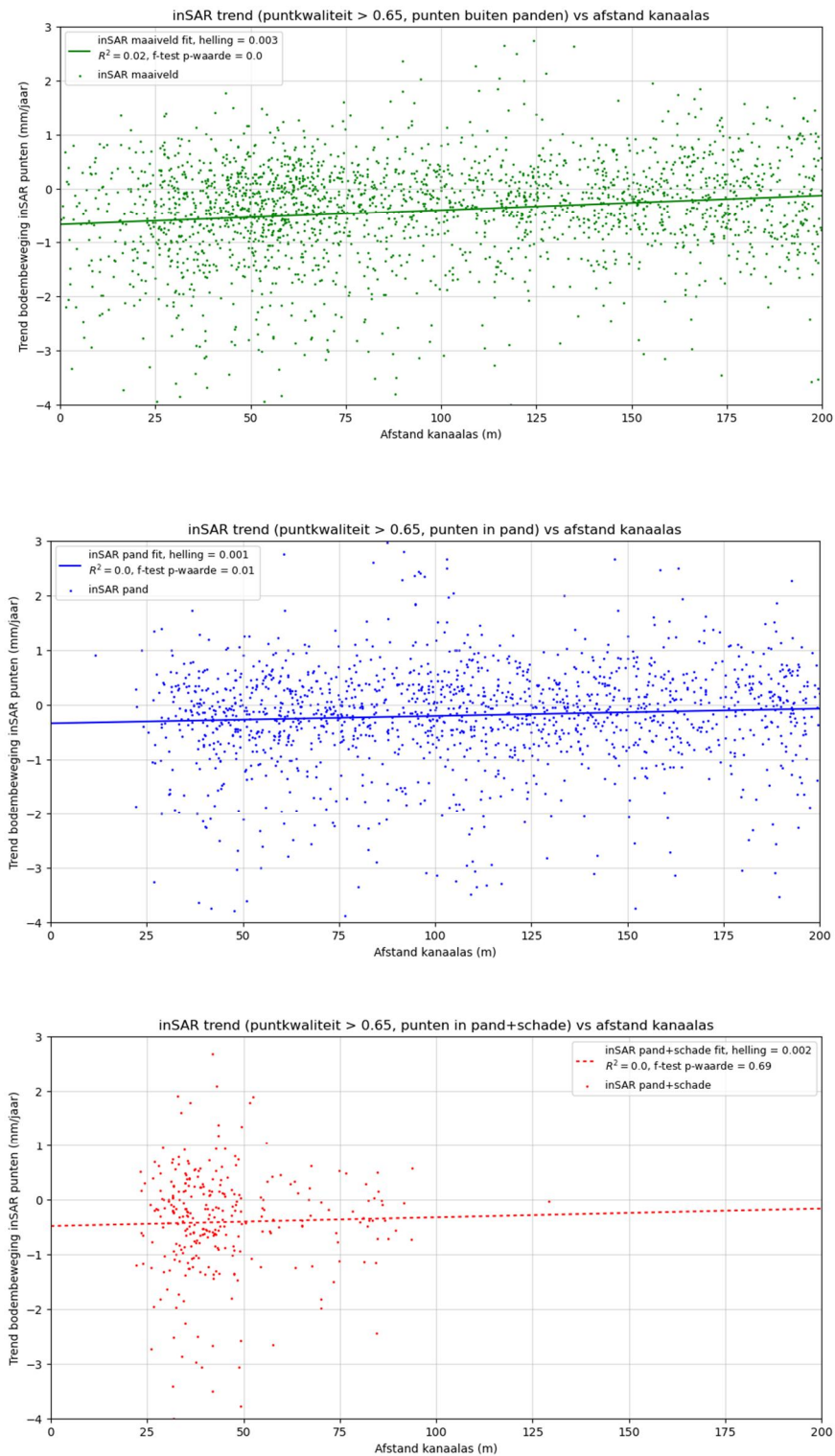


Figuur 4.14 Suffosiegevoeligheid en filterincompatibiliteit in relatie tot kilometrering (boven) en monsterdiepte (onder) en filterincompatibiliteit in relatie tot kilometrering (midden)

4.4.3 Afstand tot de kanaalas

In Figuur 4.15 is de zakkingssnelheid uitgezet tegen de afstand tot de kanaalas. Nabij het kanaal bedraagt de gemiddelde zakkingssnelheid van het maaiveld tussen 2010 en 2016 ongeveer 0,5 mm/jaar. Op grotere afstand van de kanaalas gaat deze snelheid naar ongeveer 0 mm/jaar, geen zakking of stijging. Dit kan verband houden met de dikte van het veen in de ondergrond. De veendiktekaart laat zien dat de ondergrond minder veen bevat naarmate de afstand tot het kanaal groter is, overeenkomstig de ontginningsgeschiedenis van het gebied.

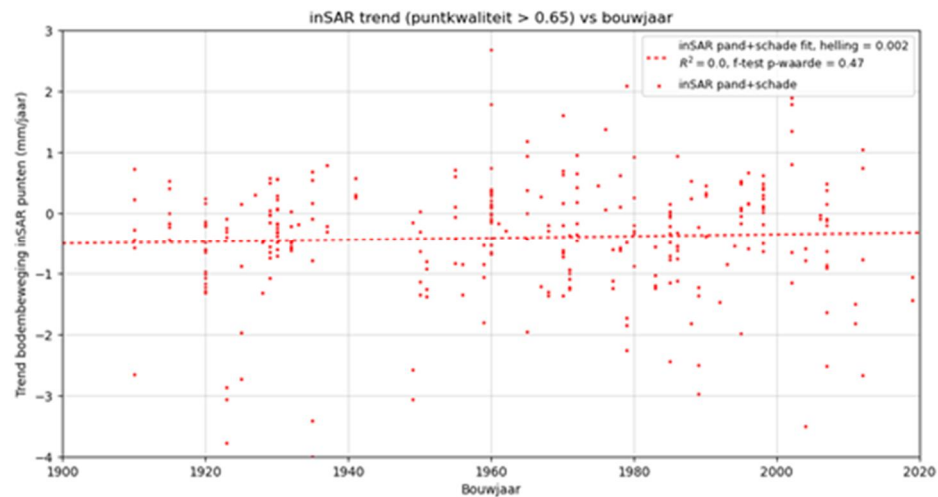
Voor de panden zonder schademelding is deze relatie niet zo duidelijk aanwezig: de puntenwolk bevindt zich over de gehele afstand tot de kanaalas tussen + 1 en -1 mm/jaar. Dichtbij het kanaal is de gemiddelde zakkingssnelheid van de panden zonder schademelding circa 0,3 mm/jaar. De gemiddelde zakkingssnelheid van de panden met schademelding dichtbij het kanaal is circa 0,4 mm/jaar. Het verschil is niet statistisch significant.



Figuur 4.15 Zakkingssnelheid versus afstand tot kanaalas, panden met schademelding (onder) vs. zonder schademelding (midden) vs. omgeving (boven)

4.4.4 Bouwjaar

In Figuur 4.16 is de zakkingssnelheid versus bouwjaar weergegeven. Het betreft hier de panden met schademelding. Er is een grote spreiding van de zakkingssnelheid per bouwjaar, die varieert tussen circa -2 mm/jaar en +1 mm/jaar. Hier is het niet relevant om een lineaire regressie aan te geven: op basis van de data is er geen relatie te vinden tussen de leeftijd van een pand en de zakkingssnelheid. Het is mogelijk dat een relatie tussen bouwjaar en zakkingssnelheid wordt versluierd omdat de zakkingssnelheid ook kan worden bepaald door aanbouwen of verbouwingen die in andere jaren hebben plaatsgevonden.



Figuur 4.16 Zakkingssnelheid versus bouwjaar van pand + schade

5 Analyse piping

Zoals in de bureaustudie (Deltares, 2021) beschreven, wordt voor het onderzoeken van het fenomeen piping als oorzaak voor de schades bij Kanaal Almelo – De Haandrik gekeken naar verschillende vormen van interne erosie: terugschrijdende erosie, suffosie en filterincompatibiliteit. Daarnaast is de erosie van zand beschouwd van maaiveld naar kruipruimte of kelder. Hoewel dit niet onder interne erosie valt, kan dit wel tot schade leiden.

Voor alle drie de vormen van interne erosie is grondwaterstroming de drijvende kracht: er moet een zeker verhang aanwezig zijn om de korrels in beweging te brengen. Voor erosie van zand naar de kruipruimte zal een verhang zeker bijdragen, maar ook onder het eigen gewicht kan het zand migreren. De regel van Sellmeijer (Förster *et al.*, 2012) geeft een indicatie voor het kritiek verhang waarbij, gegeven een uitstroom mogelijkheid aan het maaiveld, een pipe gevormd kan worden. Hierbij spelen observaties ook een rol: er moet dan ook zand afgezet zijn aan het maaiveld.

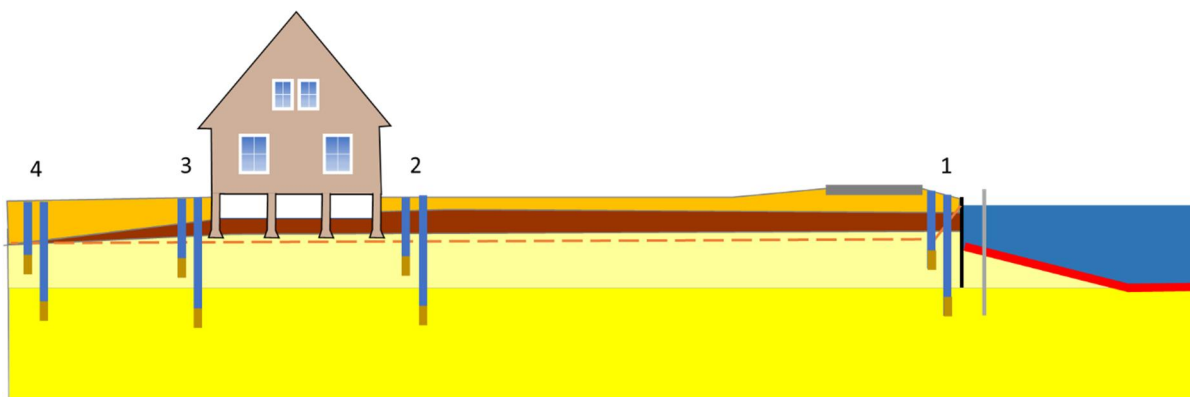
Voor suffosie en filterincompatibiliteit zijn er geometrische criteria, die afgeleid zijn voor veel hogere verhangen dan aanwezig bij het Kanaal Almelo - de Haandrik. De kolomproeven bieden inzicht in de toepasbaarheid van deze eisen voor de situatie bij Kanaal Almelo de Haandrik.

In de navolgende paragrafen wordt eerst ingegaan op de aanwezige verhangen ter plaatse van de raaien bij Kanaal Almelo - de Haandrik. Daarna wordt in de paragraaf piping ingegaan op de criteria voor terugschrijdende erosie.

5.1 Grondwaterstroming

Om korrels daadwerkelijk in beweging te brengen is grondwaterstroming nodig. Bij het kwantificeren van de verhangen die resulteren in stroming wordt onderscheid gemaakt tussen de huidige situatie en mogelijke situaties in het verleden. De huidige situatie is in kaart gebracht door middel van metingen in peilbuizen en waterspanningsmeters. Scenario's waarin afwijkende omstandigheden worden gesimuleerd, zoals de afwezigheid van een sliblaag, geven inzicht in mogelijke situaties uit het verleden en/of de toekomst.

Om vast te stellen hoe groot de huidige grondwaterstroming is ter plaatse van de panden, zijn peilbuizen en waterspanningsmeters geplaatst in 12 raaien. Figuur 5.1 geeft een voorbeeld van een dergelijke raai. Op basis van diepe en ondiepe metingen is gekeken naar de aanwezige verhangen. Deze verhangen worden bepaald door het verschil tussen twee metingen te delen door de afstand tussen de metingen. Voor piping zijn vooral de verticale en horizontale verhangen onder het pand van belang (tussen peilbuis 2 en 3), en het horizontale verhang tussen 1 en 2. De stijghoogtemetingen zijn voor elke raai afzonderlijk weergegeven in de factsheets. Voor alle meetraaien is echter vastgesteld dat de stijghoogte op zeer korte afstand van het kanaal sterk afneemt en dat ook de waterspanningsmeters onder het kanaal een lage waarde wordt gevonden, wat duidt op een lage doorlatendheid van de kanaalbodem en waardoor het niet waarschijnlijk is dat er hoge verhangen aanwezig zijn op enige afstand van het kanaal (bijvoorbeeld ter plaatse van de huizen). De stijghoogteverschillen tussen 1 en 2, en 2 en 3 zijn marginaal, in de ordegrootte van enkele centimeters. Het verticale verhang is ook zeer klein voor locaties 2 en 3, maar kan minder betrouwbaar zijn: een relatief groot verschil in stijghoogte duidt meestal op de aanwezigheid van een slecht doorlatende laag met een hoge weerstand tegen grondwaterstroming, wat resulteert in lage verticale stroomsnelheden.



Figuur 5.1 Voorbeeld van een raai met peilbuizen en waterspanningsmeter

Door middel van hoogfrequente metingen in de peilbuizen is aangetoond dat de scheepvaart geen noemenswaardige invloed heeft op de aanwezige stijghoogte.

In dit rapport is gefocust op de stroming in diepere lagen, veroorzaakt door het kanaal dat een hogere stijghoogte heeft dan de omgeving. Een flinke hoosbui kan echter ook tot lokale verhangen leiden nabij het maaiveld. Dit kan met name optreden nabij de panden: naast het pand is de stijghoogte verhoogd ten gevolge van de neerslag en afstromend water afkomstig van het pand. Onder het pand is de stijghoogte initieel niet verhoogd. Een stijghoogteverschil van 0.5 m naast en onder het pand is hierbij niet vreemd. Stroming boven het veen kan leiden tot erosie van zand naar kelders en kruipruimten, indien deze niet afgesloten zijn. Dit heeft echter geen effect op de grondwaterstroming in diepere lagen, maar wel op de grondwaterstroming boven het veen.

De metingen geven een beeld van de huidige situatie. Tabel 5.1 geeft een overzicht van de maximale gemeten gradiënten tussen waterspanningsmeter 1 en 2 en 2 en 3, voor zowel diepe als ondiepe meetlocaties. De gradiënten vertonen niet veel variatie, het maximum wijkt over het algemeen niet veel af van het gemiddelde. De hoogste gradiënt nabij de panden is gevonden bij Pand 15: 0,0402. Deze waarde lijkt echter niet betrouwbaar, aangezien de gradiënt veel lager is van kanaal naar pand.

Tabel 5.1 Overzicht maximale horizontale gradiënten

raai	adres	Maximale gradiënten			
		diep 1 - 2	diep 2 - 3	ondiep 1 - 2	ondiep 2 - 3
1	Pand 20	0.0123	0.0119	-0.0139	0.0122
2	Pand 12	0.0006	0.0059	-0.0025	-0.0035
3	Pand 13	-0.0068	0.0079	-0.0073	0.0040
4	Pand 9	-0.0088	-0.0001	-0.0128	0.0005
6	ca. 50 m ten noorden van Pand 3	-0.0083	n.a.	-0.0085	n.a.
7noord	Pand 2	-0.0037	0.0018	0.0281	0.0027
7zuid	Pand 18	-0.0006	0.0163	0.0093	0.0049
8	Pand 11	-0.0382	0.0043	-0.0129	0.0056

raai	adres	Maximale gradienten			
		diep 1 - 2	diep 2 - 3	ondiep 1 - 2	ondiep 2 - 3
10noord	Pand 4	-0.0101	0.0137	0.0066	0.0015
10zuid	Pand 19	0.0181	-0.0014	0.0142	0.0037
11oost	tegenover Pand 15	0.0126	0.0060	0.0449	0.0076
11west	Pand 15	-0.0037	0.0190	-0.0058	0.0402
12	Pand 3	-0.0036	-0.0648	-0.0030	-0.1349

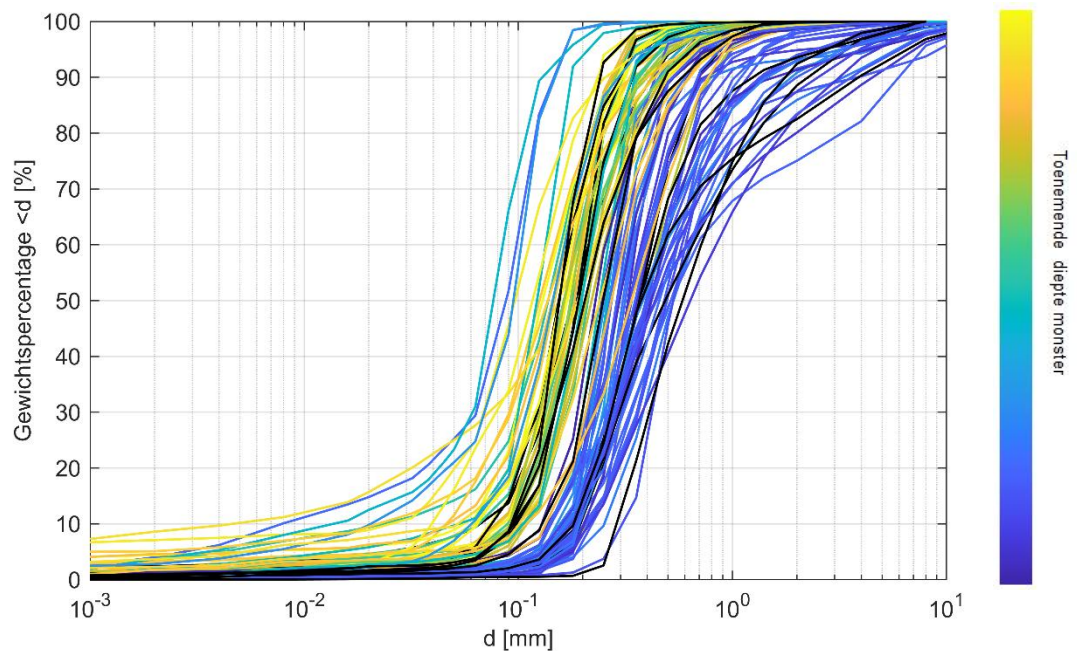
Met grondwaterstromingsmodellen is bepaald wat de verhangen geweest kunnen zijn onder andere omstandigheden. Uit deze berekeningen volgt dat bij een geringe weerstand van de kanaalbodem en damwanden de gradiënten alleen wat hoger op kunnen lopen wanneer er een ondoorlatende laag op gering diepte aanwezig is. Het precieze verhang is dan afhankelijk van het meest nabije drainagepunt, de omvang van het gebied in de kanaalbodem met een kleine weerstand en drainage door bijna ondoorlatende lagen. Voor meer details met betrekking tot de scenario-studie wordt verwezen naar paragraaf 3.4.

5.2 Piping

Het toepassen van criteria voor interne erosie vergt kennis van de zandlagen in de ondergrond. Aan de hand van de korrelverdelingen weergegeven in paragraaf 5.2.1 kan de gevoeligheid voor suffosie en filterincompatibiliteit worden beoordeeld, met behulp vanuit de literatuur beschikbare criteria. In de paragrafen 5.2.2, 5.2.3, en 5.2.4 worden suffosie, filterincompatibiliteit en terugschrijdende erosie geëvalueerd. In paragraaf 5.2.5 wordt ingegaan op erosie van zand van maaiveld naar kruipruimte.

5.2.1 Korrelverdelingen

In de bureaustudie (Deltares, 2021) is toegelicht dat het onderzoek zich richt op een selectie van panden in 12 raaien. Per raai zijn ca. 4-5 boringen geplaatst tot een diepte van 1 m+NAP. Daarnaast zijn er ook twee diepere boringen uitgevoerd ca. NAP-12 m. Per boring zijn twee monsters genomen voor korrelverdelingen: een monster in het 'ondiepe zand' en een monster in het 'diepere zand'. Er is geen sprake van een abrupte overgang tussen een fijne zandlaag en een grove zandlaag, maar het betreft het een afwisseling van fijne en grove laagjes (zie paragraaf geologie en ontginningsgeschiedenis). Zo kan het zijn dat in de top van de dieper gelegen Eenheid C, zie figuur 2.8, fijnere zandlaagjes voorkomen dan in de basis van de hoger gelegen Eenheid D. Ook is de overgang tussen beide eenheden niet altijd even duidelijk, de eenheden C en D zijn opgebouwd uit vergelijkbaar bronmateriaal. Daardoor kan op basis van korrelverdeling, mineralogie, kleur of vorm niet altijd vastgesteld worden waar de overgang tussen de beide eenheden ligt en of er sprake is van een fijne laag op een grove laag met een scherpe overgang.



Figuur 5.2 Overzicht van beschikbare korrelverdelingen (zeefkrommes). In zwart de korrelverdelingen uit de referentieboringen

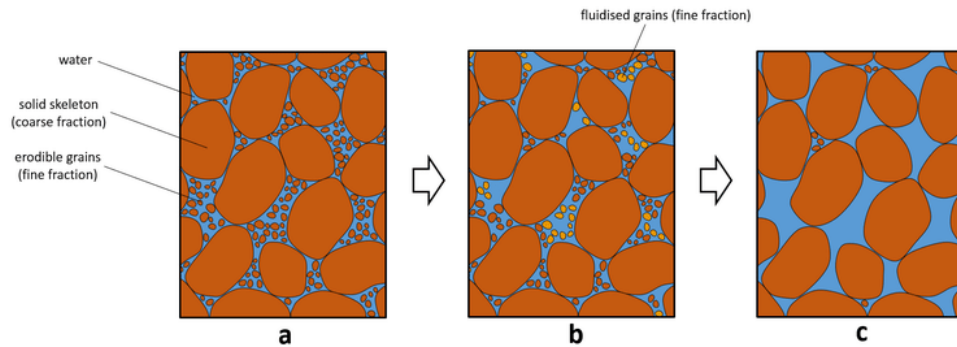
Figuur 5.2 laat alle korrelverdelingen uit de boringen zien. In deze figuur is duidelijk te zien dat gemiddeld genomen het zand grover wordt met de diepte. De spreiding in de korrelverdelingen is voor smeltwaterafzettingen relatief groot. Deze spreiding wordt naar verwachting goed afgedekt door de hoeveelheid korrelverdelingen die wordt uitgevoerd.

Figuur 5.2 laat ook zien dat een factor 4 tussen de korreldiameters (bijv. d_{50}/d_{15} , d_{85}/d_{15}) voor de verschillende korrelverdelingen regelmatig voorkomt. Door de spreiding van korrelgroottes binnen een zandpakket is de verhouding tussen de korrels die in het pakket zouden moeten migreren en de porieruimte echter veel kleiner dan 4. In paragraaf 5.2.3 wordt nader ingegaan op de stabiliteit van mogelijke combinaties van fijn en grof materiaal.

Een aantal boringen is geplaatst op een locatie die niet onder invloed staat van het kanaal, bijvoorbeeld achter een kwelsloot. Dit zijn de zogenaamde referentieboringen. Bij deze boringen kan er onder invloed van het kanaal geen fijn materiaal in het grove materiaal gespoeld zijn. Wanneer er bij deze boringen geen fijn materiaal ingespoeld zou zijn, terwijl dit bij de panden wel is gebeurd, is te verwachten dat de materialen in deze boringen meer uniform zijn dan de overige boringen. Figuur 5.2 laat echter zien dat deze korrelverdelingen goed in het plaatje van de overige boringen passen.

5.2.2 Suffosie

Suffosie (in de Engelstalige literatuur wordt zowel de term *suffusion* als *suffosion* gebruikt) is gedefinieerd als het eroderen van fijn materiaal uit een grovere matrix ten gevolge van waterstroming (ICOLD, 2017) (Figuur 5.3). Een dragend skelet van grove korrels blijft achter. De erosie van fijn materiaal uit de grovere matrix zorgt voor een toename van de doorlatendheid, maar veelal slechts weinig verandering in volume (ICOLD, 2017).

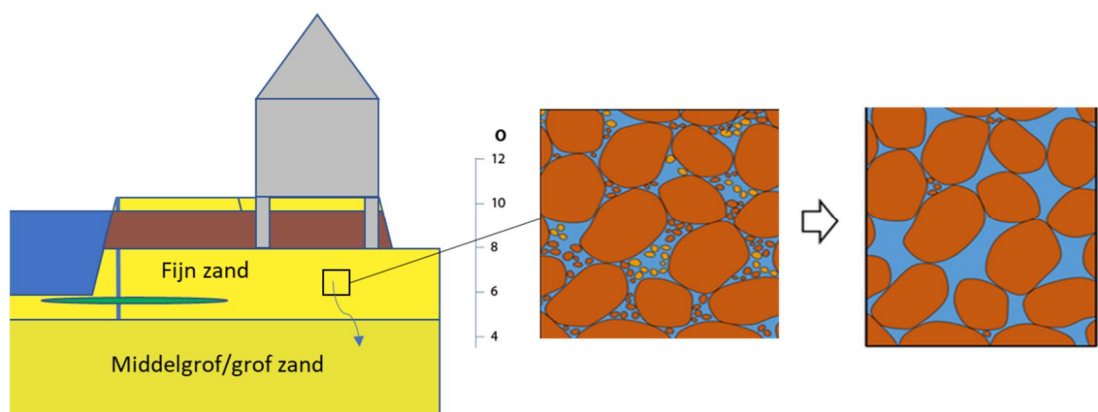


Figuur 5.3 Illustratie van suffosie: de fijne fractie wordt geërodeerd, er blijft een dragend skelet achter (Yerro et al., 2017)

5.2.2.1 Schademechanisme

Suffosie zou op verschillende manieren tot uiting kunnen komen bij Kanaal Almelo de Haandrik. In Figuur 5.4 en Figuur 5.5 is dit weergegeven. Zoals eerder aangegeven worden de zandlagen gemiddeld genomen steeds grover met toenemende diepte, hoewel er geen sprake is van een duidelijke overgang tussen 'fijn' en 'grof'. Wanneer suffosie optreedt in de fijnere zandlagen die relatief dicht bij de fundering liggen kan verlies aan draagkracht of zelfs volumeverlies optreden (Figuur 5.4). De fijne fractie uit het fijne zand die door de matrix van het fijne zand beweegt zal zich vermoedelijk ook door de matrix van het onderliggende grovere materiaal kunnen bewegen. Het verlies van fijne fractie in de bovenste fijne zandlaag kan voor volumeverlies of verlies van draagkracht zorgen.

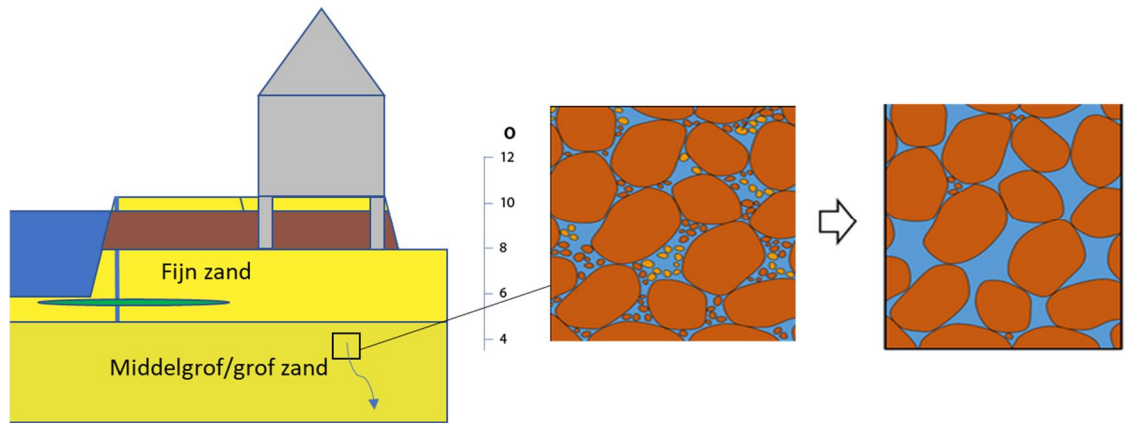
Naar het verlies van draagkracht door suffosie is beperkt onderzoek gedaan. Ke et al. (2014, 2015) onderzochten het spanningsrek gedrag in monsters voor en na suffosie. Deze studies zijn nader toegelicht in (Deltares, 2021). Een voorzichtige conclusie uit deze studies is dat bij kleine verliezen van fijne fractie het spannings-rek gedrag niet veel verandert. Wel kan het zo zijn dat het achtergebleven skelet een vrij lage relatieve dichtheid heeft, waardoor het gevoeliger wordt voor trillingen. Daarbij wordt opgemerkt dat lage relatieve dichtheden van nature ook kunnen voorkomen. Volumeverlies kan optreden als het skelet ook beïnvloed wordt door het verlies van de fijne fractie.



Figuur 5.4 Suffosie in de fijne zandlaag onder de panden

Wanneer suffosie optreedt in de diepere en grovere zandlagen (Figuur 5.5, is de kans dat volumeverlies tot ongelijkmatige zettingen leidt klein. Wel is er na uitspoeling wellicht meer kans op filterincompatibiliteit: de fijne zandlaag kan dan mogelijk in zijn geheel inspoelen in

de diepere grove lagen. Daarom wordt er ook voor deze lagen bekeken of suffosie mogelijk is.



Figuur 5.5 Suffosie in de diepere grovere zandlaag

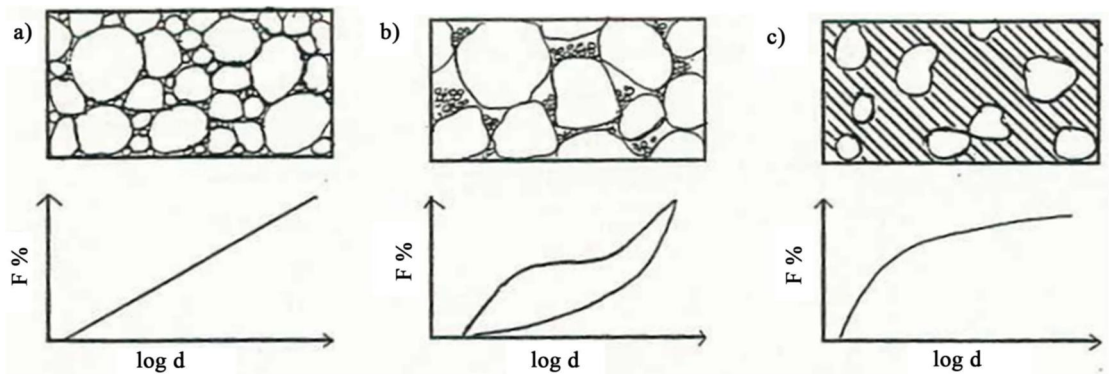
5.2.2.2 Criteria

In de bureaustudie (Deltares, 2021) zijn criteria geselecteerd voor suffosie (Kenney en Lau (K&L) methode, en Wan en Fell methode).

Kenney en Lau (Kenney and Lau, 1985) hebben hun theorie afgeleid op basis van proeven op goed verdicht materiaal en een hoge hydraulische gradiënt van 5 tot 60. Ze veronderstellen dat het materiaal bestaat uit een dragende fractie en een fractie van losse deeltjes. De fractie van losse deeltjes beslaat maximaal 30 massa-%: de fractie daarboven is per definitie dragend.

De losse fractie kan alleen in beweging komen als de poriën genoeg ruimte bieden voor migratie van deze losse fractie. Daarbij wordt aangenomen dat de diameter van een korrel die door een porie kan migreren maximaal $\frac{1}{4}$ is van de korreldiameter van de grovere fractie. Daarom beschouwt de K&L-methode het massa-% tussen de fijne fractie met grootte D en een grovere fractie met grootte $4D$. Het verschil in massa-% tussen de fijne (D) en grove fractie ($4D$) wordt aangeduid met H . Wanneer er weinig materiaal aanwezig is tussen deze fracties, is er voldoende ruimte voor de korrels om te migreren: het materiaal is intern instabiel. De vergelijking tussen D en $4D$ wordt voor de hele curve uitgevoerd. Vervolgens wordt vastgesteld wat de verhouding is tussen H en F (massa-% fijne fractie D). Wanneer $H/F > 1$ voor alle diameters die tot de losse fractie kunnen behoren ($F < 30\%$) is er voldoende materiaal tussen de fracties om het materiaal stabiel te houden. De minimale waarde van H/F wordt de stabiliteitsindex genoemd.

Uit de methode volgt dat materiaal intern stabiel is, als er voor $F < 30\%$ voldoende materiaal tussen D en $4D$ zit: dat betekent namelijk dat de korrels kleiner dan D niet door de porieruimte kunnen bewegen. Een voorbeeld van een dergelijk materiaal is weergegeven in Figuur 5.6 a. In Figuur 5.6 b is een voorbeeld gegeven waarbij er voor $F < 30\%$ weinig materiaal aanwezig is tussen D en $4D$: de kleine korrels kunnen dan bewegen door het skelet van grovere korrels. In Figuur 5.6 c is een voorbeeld gegeven van een materiaal waarbij er weinig materiaal is tussen D en $4D$, voor $F > 30\%$. De fijne fractie is dan dragend en maakt deel uit van het korrelskelet: dit materiaal is intern stabiel. Bij Kanaal Almelo - de Haandrik is het contrast tussen grove fractie en fijne fractie wat minder groot dan weergegeven in Figuur 5.3. Door de meer geleidelijke verdeling is er dus minder risico voor suffosie.



Figuur 5.6 a) Een intern stabiel materiaal waarbij de grove fractie dragend is b) een intern instabiel materiaal waarbij de grove fractie dragend is en c) een stabiel materiaal waarbij de fijne fractie dragend is (Rönnqvist and Viklander, 2014)

Het door Kenney en Lau gebruikte verhang is veel hoger dan dat we in de omgeving van het Kanaal Almelo – De Haandrik kunnen verwachten. Voor dat aspect geeft de methode van Kenney en Lau dus veilige uitkomsten. Het is echter de vraag of de relatieve dichtheid van het zand langs het kanaal altijd zo hoog is als bij de proeven van Kenney en Lau. Dat zou kunnen betekenen dat materialen die voldoen aan het criterium van Kenney en Lau toch niet intern stabiel zijn. Daarom wordt in de kolomproeven (zie volgende paragraaf) een lager verhang (maar wel hoger dan verwacht bij Kanaal Almelo - de Haandrik) en lagere relatieve dichtheid (<50%), aangehouden. Op basis van literatuur (Rönnqvist and Viklander, 2014) lijkt het zeer redelijk te veronderstellen dat deze methode een goede eerste indruk geeft van de stabiliteit tegen suffosie van de zandlagen rondom het kanaal.

Een andere methode genoemd in het ICOLD bulletin (ICOLD, 2015) is de Wan en Fell adaptatie van Burenkova (1993). De methode van Burenkova is gebaseerd op de d_{90}/d_{60} en d_{90}/d_{15} . De verhouding tussen d_{90} en d_{60} is representatief voor de helling in de korrelverdeling van de grove fractie in het monster: een hoge waarde staat voor een slechte sortering en daarmee grote ruimte tussen de korrels. De verhouding d_{90}/d_{15} kan worden gezien als een maat voor filtering tussen de grove en fijne fractie. De methode Burenkova geeft geen duidelijke grens tussen stabiel en instabiele materialen. Wan en Fell (2008) definieerden contouren voor de kans op instabiliteit (vergelijking 1 en 2):

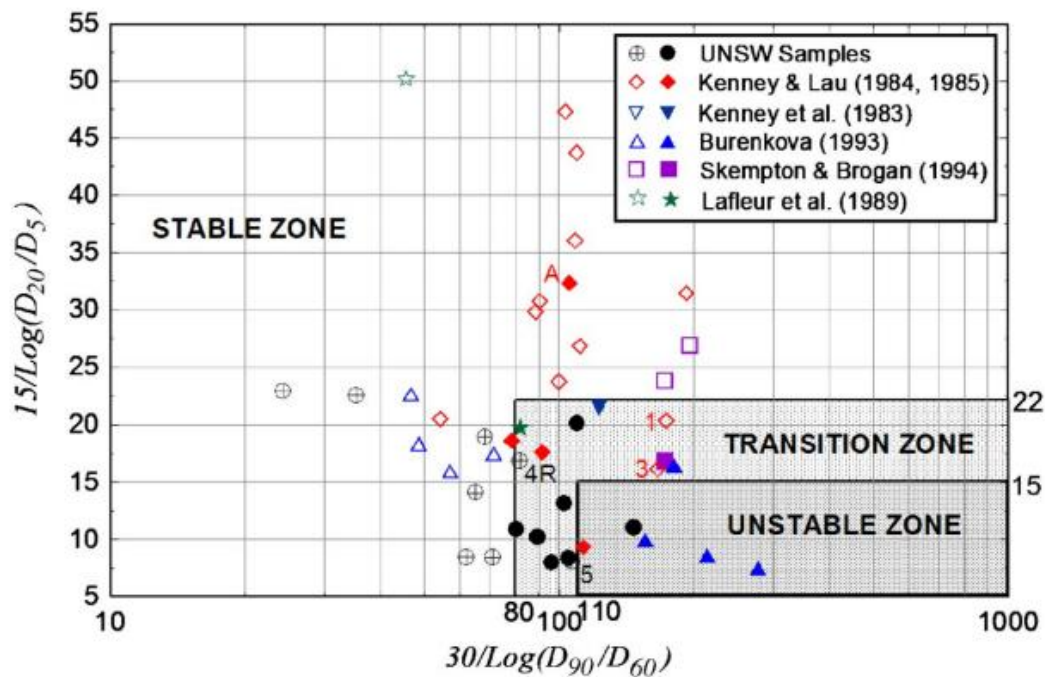
$$p_f = \frac{e^Z}{1+e^Z} \quad \text{Vergelijking 1}$$

$$Z = 3.875 \log(h'') - 3.591h' + 2.436 \quad \text{Vergelijking 2}$$

Waarin:

- p_f : de voorspelde kans op interne instabiliteit.
- Z : variabele van de logaritmische regressie vergelijking.
- h' : gedefinieerd als d_{90}/d_{60} door Burenkova (1993).
- h'' : gedefinieerd als d_{90}/d_{15} door Burenkova (1993).

Op basis van ervaring met de Burenkova methode geven Wann en Fell (2008) een alternatieve methode voor gegradeerde materialen met een steile helling in de grove fractie en een flauwe helling in de fijne fractie (Figuur 5.7). Deze methode is niet toepasbaar voor gap-graded materialen.



Notes:

1. Hollow symbol represents internally stable sample.
2. Solid symbol represents internally unstable sample.

Figuur 5.7 Alternatieve methode voor het beoordelen van de interne stabiliteit voor breed gegradeerde silt-zand-gravels (Wan en Fell, 2008)

5.2.2.3 Kolomproeven

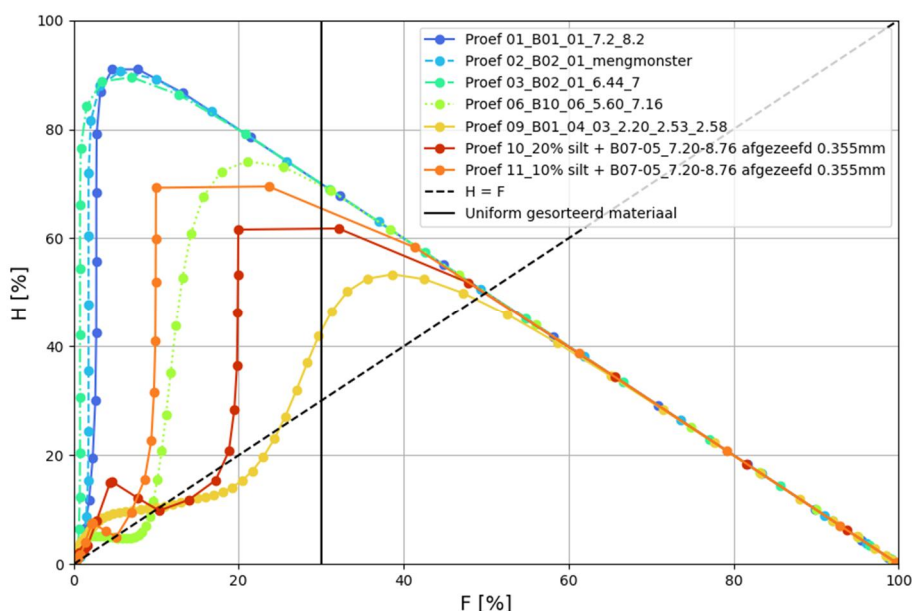
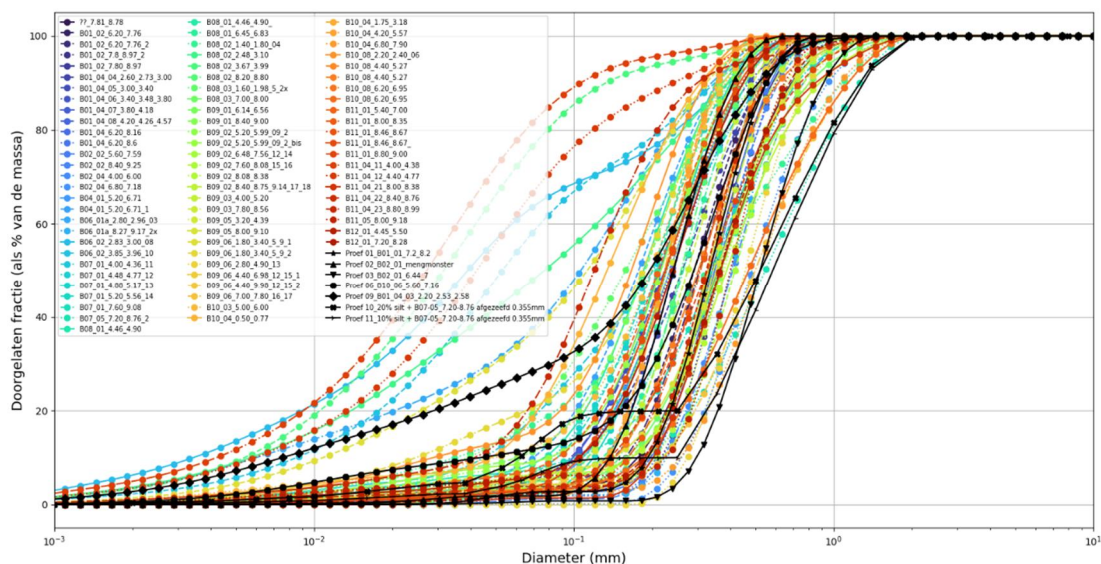
De kolomproeven zijn uitgevoerd met de volgende doelen:

- De criteria voor suffosie en filterinstabiliteit te verifiëren voor de zanden ter plaatse van Kanaal Almelo - de Haandrik. Hierbij wordt benadrukt dat de criteria voor filterinstabiliteit ontwerpcriteria zijn ofwel ontwikkeld zijn voor hogere verhangen en de daadwerkelijke grens tussen stabiel en instabiel in de situatie bij Almelo de Haandrik hoger zal liggen. Het geplande aantal proeven is onvoldoende om de daadwerkelijke grens tussen stabiel en instabiel te onderzoeken: het doel van de proeven is slechts om de gevonden resultaten op basis van de criteria te bevestigen.
- De uitspoeling, of het gebrek aan uitspoeling, te visualiseren.

De kolomproeven zijn in detail beschreven in (Wopereis et al., 2021). In dit rapport is een samenvatting en evaluatie van de resultaten weergegeven.

De proeven zijn uitgevoerd in een kolom met binnendiameter van 90 mm en hoogte van 370 mm. In de kolom wordt een zandmonster geprepareerd, wat aan de onderkant wordt tegengehouden door een filterplaatje. De maasgrootte van het filterplaatje is 500 μm . In de wand van de kolom zijn stijghoogtebuisjes aangebracht om de stijghoogte over de hoogte van de opstelling te meten.

In totaal zijn 7 suffosieproeven uitgevoerd met materialen afkomstig van Kanaal Almelo de Haandrik. De materialen zijn geselecteerd op basis van de korrelverdelingen van de binnengekomen monsters en de evaluatie met suffosiecriteria. De korrelverdelingen van de geselecteerde materialen zijn in zwart weergegeven in Figuur 5.8, de niet geselecteerde materialen zijn weergegeven in kleur. Volgens de Kenney & Lau analyse zijn de monsters van proeven 1 tot 3 intern stabiel en proeven 6, 9, 10 en 11 niet intern stabiel (Figuur 5.9).



Figuur 5.9 Kenney en Lau analyse van alle suffosie proeven met H (verschil in massa-% tussen de fijne (D) en grove fractie (4D)) uitgezet tegen F (massa-% fijne fractie D). Wanneer een lijn met metingen voor waarden van $F < 30\%$ onder de zwarte gestreepte lijn komt is volgens Kenney en Lau suffosie mogelijk

Tabel 5.2 Schema uitvoering proef

Stap	Verhang [-]	Tijdsduur [minuten]
Matige stroming	-0.2	30
Retourstroming	0.05	10
Matige stroming	-0.2	30
Grote stroming	-1	30
Retourstroming	0.5	10
Grote stroming	-1	30

In geen van de proeven is uitspoeling van fijn materiaal of volumeverandering waargenomen, ook zijn er geen veranderingen in stijghoogte of debiet waargenomen, met uitzondering van de problemen rondom de verstopping van de bovenkant van het zandpakket (veroorzaakt door fijne deeltjes in het invoervat, afkomstig van de slang van de ontluuchtingsinstallatie).

Op basis van de analyse van de korrelverdeling na de proef op verschillende hoogtes in het monster, is gebleken dat het materiaal van proef 6 en 9 over de gehele hoogte minder fijn materiaal bevatte dan het oorspronkelijke monster. Mogelijk is een gedeelte van de fijne fractie verloren gegaan tijdens de preparatie. Het is niet mogelijk dat dit materiaal is uitgespoeld tijdens de proef, dat had moeten blijken uit de visuele analyse en verandering van doorlatendheid. Door de lagere fijne fractie was het resterende materiaal niet meer suffosie-gevoelig volgens de criteria. Daarom zijn nog twee extra proeven uitgevoerd, met een combinatie van silt, dat beschikbaar was bij Deltares, en grover materiaal, afkomstig uit de boringen. In geen van de proeven is volumeverandering of uitstromend zand waargenomen.

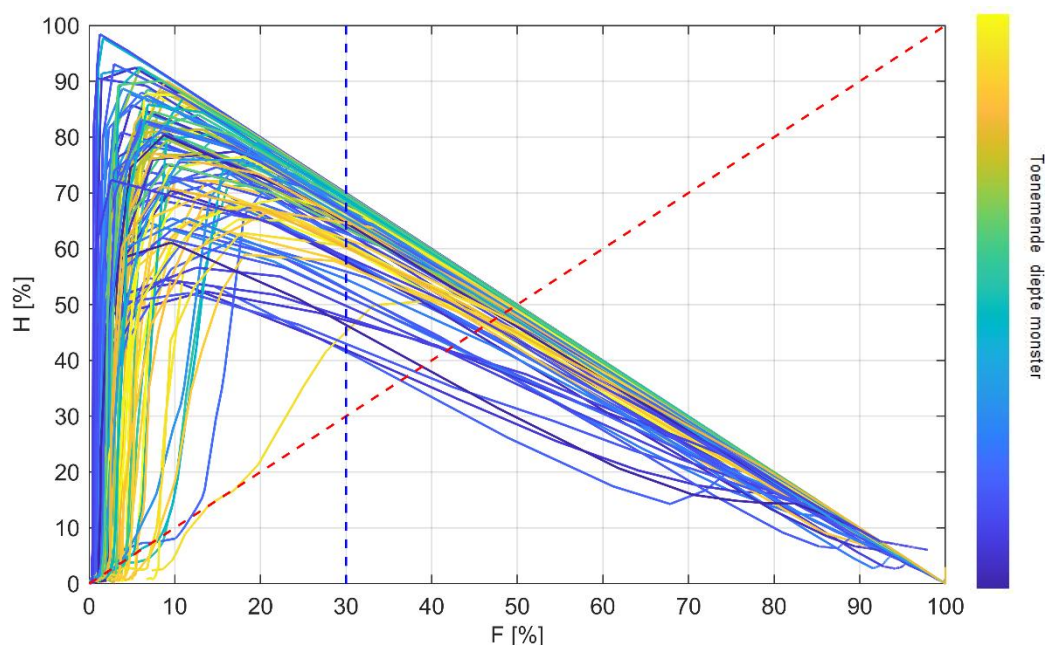
In één proef is op basis van de analyse van korrelverdeling na afloop van de proef wel gevonden dat de fijne fractie iets is toegenomen richting de onderkant van de zandkolom. Omdat er geen verandering is geweest in andere parameters, is het onduidelijk bij welk verhang deze migratie is opgetreden, of dat deze verdeling door de preparatie is ontstaan. Mogelijk zijn de deeltjes door zelf-filtering weer in het monster opgevangen. Gezien de beperkte verandering, lijkt het onwaarschijnlijk dat een dergelijke migratie tot verlies van draagkracht kan leiden (zie hiervoor ook de literatuurstudie in Deltares, 2021).

Uit de proeven wordt geconcludeerd dat de criteria voor suffosie bij lagere verhangen conservatief zijn en voor niet suffosie-gevoelige monsters bevestigd worden.

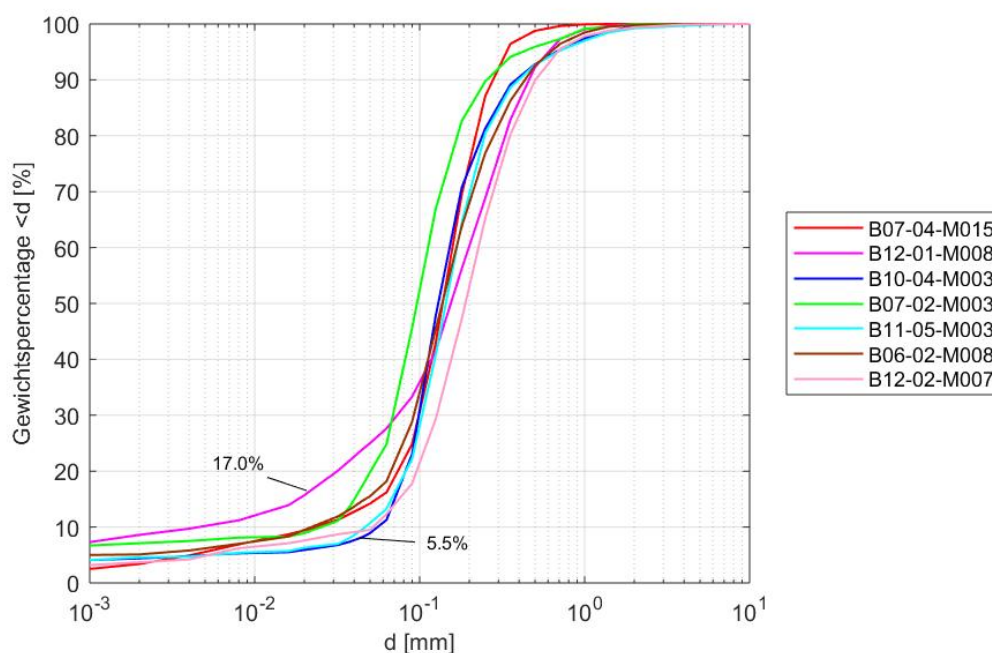
5.2.2.4 Toepassing criteria

De Kenney en Lau methode is toegepast op alle beschikbare korrelverdelingen uit de boringen, met uitzondering van de materialen die als klei zijn geclassificeerd. In Figuur 5.10 zijn de resultaten van deze analyse weergegeven. Er zijn meerdere korrelverdelingen die volgens de criteria van Kenney en Lau gevoelig zijn voor suffosie. De mate waarin varieert: voor sommige monsters komt een heel beperkt stukje van de curve onder de $H=F$ lijn uit, in andere monsters is dat wat meer. In Figuur 5.11 zijn de korrelverdelingen van de monsters waarvoor meer dan 5% massa onder de curve uitkomt weergegeven. Opvallend is dat dit vooral fijn zand met relatief grote fijne fractie betreft. De dieper gelegen grovere monsters blijken minder gevoelig voor suffosie, zo blijkt ook uit een analyse tussen monsterdiepte en suffosiegevoelig massapercentage (Figuur 5.12). De referentieboringsen zouden op twee manieren kunnen afwijken van de overige boringen. In de materialen uit deze boringen kan suffosie onder invloed van het kanaal niet zijn opgetreden. Voor de ondiepe materialen zou dit betekenen dat er nog geen suffosie is opgetreden, waardoor de suffosiegevoeligheid

groter zou moeten zijn (er is immers nog geen materiaal uitgespoeld). Voor de materialen met grotere bemonsterdiepte kan hierdoor ook een grotere suffosiegevoeligheid gevonden worden. Daarentegen kan het ook zo zijn dat er juist in deze diepere materialen nog geen fijn zand is ingespoeld vanuit hogere lagen, waardoor de suffosiegevoeligheid lager is. Uit de analyse blijkt dat de suffosiegevoeligheid voor materiaal uit referentieboringen in dezelfde range ligt als materiaal uit boringen nabij het kanaal.



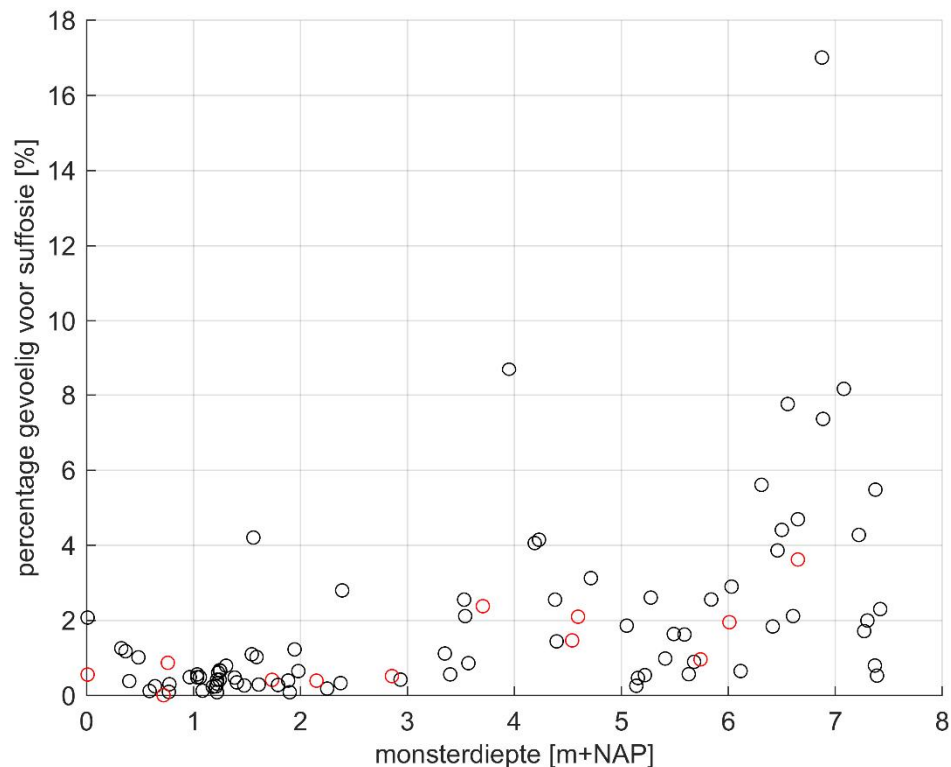
Figuur 5.10 Resultaten Kenney en Lau analyse voor alle korrelverdelingen



Figuur 5.11 Korrelverdelingen waarbij het massapercentage dat gevoelig is voor suffosie groter is dan 5%

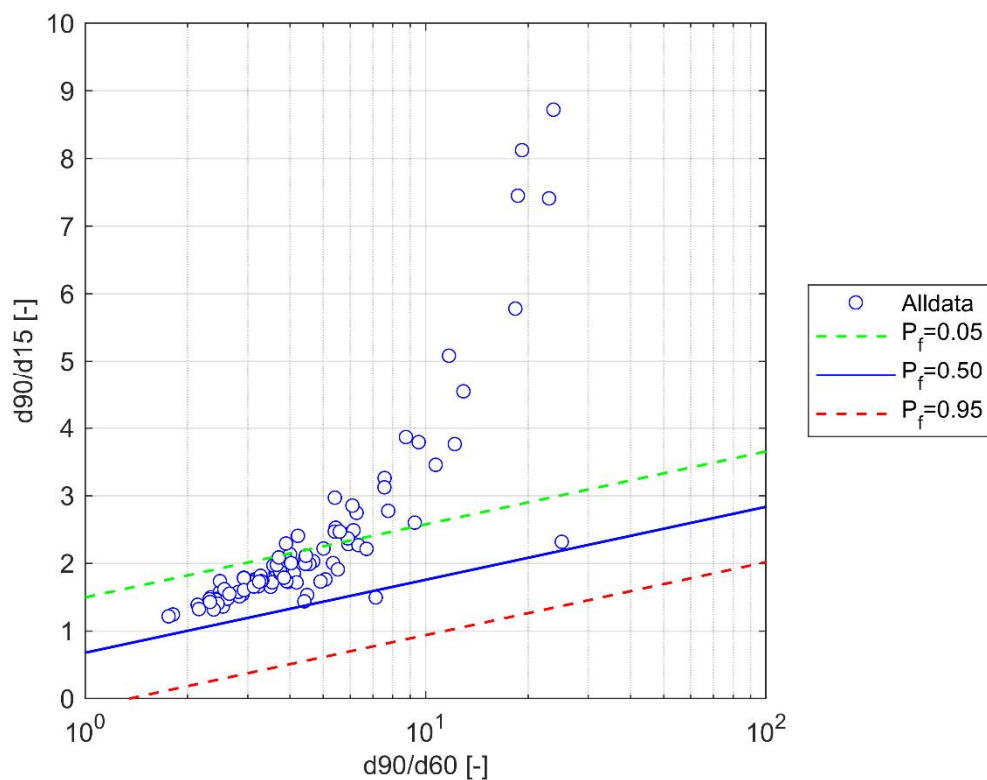
Tabel 5.3 Details van monsters waarbij het massapercentage gevoelig voor suffosie groter is dan 5%

	Diepte m+NAP	% gevoelig voor suffosie
B07-04-M015	3.95	8.70
B12-01-M008	6.875	17.01
B10-04-M003	7.375	5.48
B07-02-M003	7.08	8.16
B11-05-M003	6.31	5.61
B06-02-M008	6.555	7.76
B12-02-M007	6.885	7.36

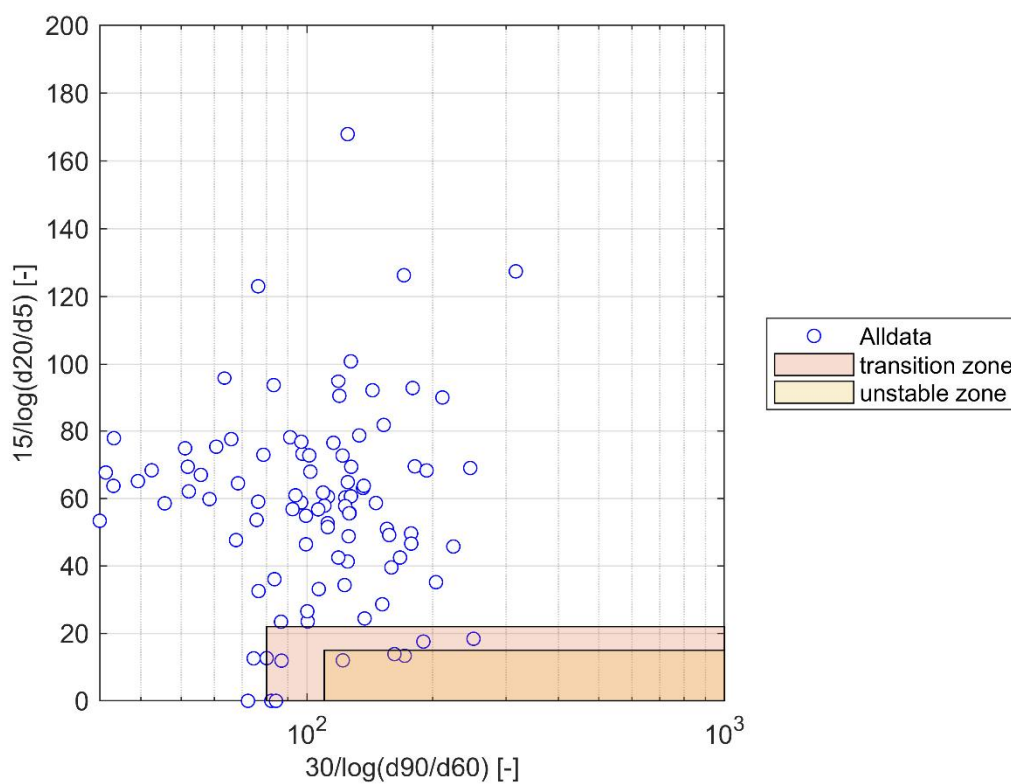


Figuur 5.12 Relatie tussen monsterdiepte (m+NAP) en massapercentage gevoelig voor suffosie. In rood de monsters uit referentieboringen

Figuur 5.13 en Figuur 5.14 laten de resultaten zien voor de door Wan en Fell aangepaste methode van Burenkova voor zandige gronden met $d_{10} > 0.075$ mm en hun alternatieve methode voor breed gegradeerde monsters. De korrelverdelingen komen allemaal boven de $P_f = 0.50$ lijn uit, met uitzondering van B02-03-015. Omdat deze methode een kans voor interne instabiliteit geeft, is het nooit uitgesloten dat de monsters intern instabiel zijn (de kans is nooit nul). De aangepaste methode van Wan en Fell laat zien dat de meeste monsters in de categorie intern stabiel vallen. De monsters B02-03-M015, B07-04-M015 en B10-03-M012 vallen in de categorie instabiel. Twee van deze monsters worden ook volgens Kenney en Lau instabiel bevonden, voor het derde monster was het instabiel massapercentage beperkt (instabiel massapercentage respectievelijk 4.2, 8.7, 1.1%).



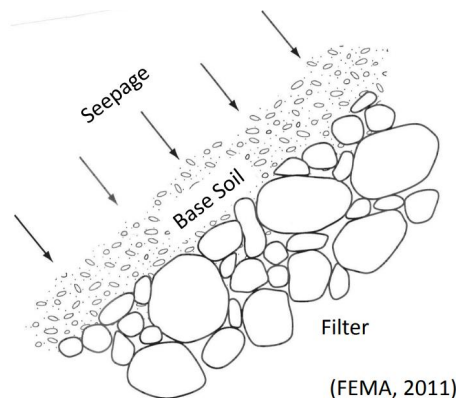
Figuur 5.13 Resultaten door Wan en Fell aangepaste methode Burenkova. voor monsters met een $d_{10} > 0.075$ mm. De lijnen geven de kans op suffosie weer



Figuur 5.14 Resultaten alternatieve methode Wan en Fell voor breed gegradeerde monsters

5.2.3 Filterincompatibiliteit

Filterincompatibiliteit treedt op wanneer fijn materiaal in contact staat met een grover materiaal en het fijne materiaal door de poriën van het grove materiaal weg kan spoelen ten gevolge van waterstroming. Dit type erosie kan optreden wanneer filterconstructies niet goed ontworpen zijn.

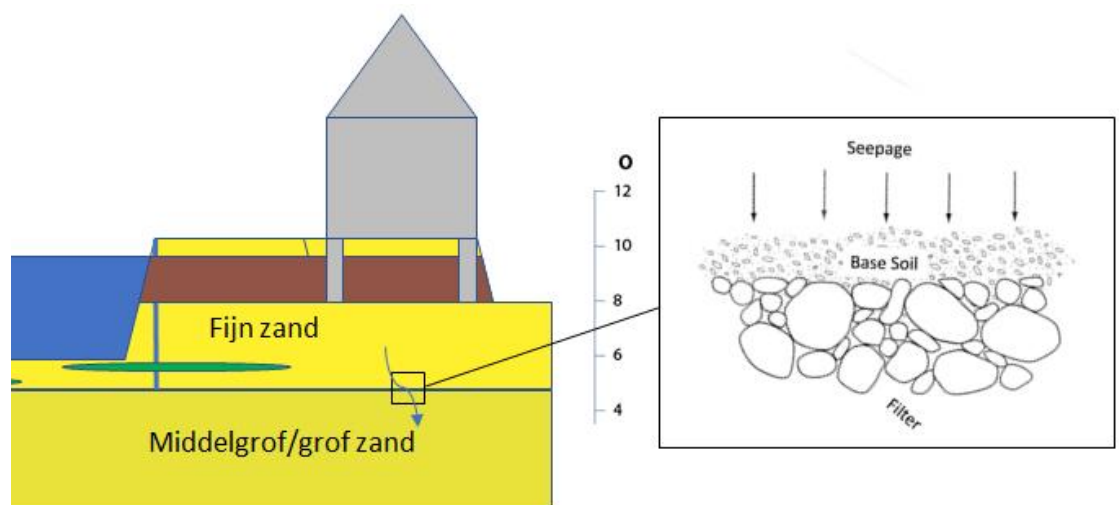


(FEMA, 2011)

Figuur 5.15 Fijn materiaal in contact met grof materiaal, onder de invloed van waterstroming (FEMA, 2011)

5.2.3.1 Schademechanisme

Zoals eerder aangegeven worden de zandlagen ter plaatse van Kanaal Almelo de Haandrik gemiddeld genomen steeds grover met toenemende diepte, hoewel er geen sprake is van een duidelijke overgang tussen 'fijn' en 'grof'. Wanneer een relatief fijne laag gelegen is op een grovere laag, kan wanneer daar voldoende ruimte voor is in de poriën van het grove zand en bij voldoende groot verhang, het fijne materiaal inspoelen in het grove. Dit leidt tot volumeverlies, waardoor er schade aan de panden kan ontstaan. In Figuur 5.16 is dit weergegeven.



Figuur 5.16 Filterincompatibiliteit bij een fijne zandlaag gelegen op een grovere zandlaag

5.2.3.2 Criteria

Zoals beschreven in de rapportage (Deltares, 2021) worden voor het bestuderen van filtercompatibiliteit de criteria volgens Lambe en Whitman (1969) toegepast. Deze criteria worden internationaal geadviseerd (USACE, 2000; FEMA, 2011; ICOLD, 2017) en houden rekening met het feit dat zowel het grove materiaal (doorgaans aangeduid als filter) als het fijne materiaal (aangeduid als basismateriaal) een verdeling van korrels kent. In het filtermateriaal wordt de porieruimte bepaald door de fijne korrels in de verdeling. Om vast te stellen of het basismateriaal (in zijn geheel) hierin kan migreren, leidend tot volumeverlies, moeten niet alleen de kleinere korrels van het basismateriaal tussen de korrels van het filtermateriaal passen maar ook de grotere. Dit concept heeft o.a. geleid tot de criteria van Terzaghi (zoals beschreven in (ICOLD, 2017) en (Lambe and Whitman, 1969):

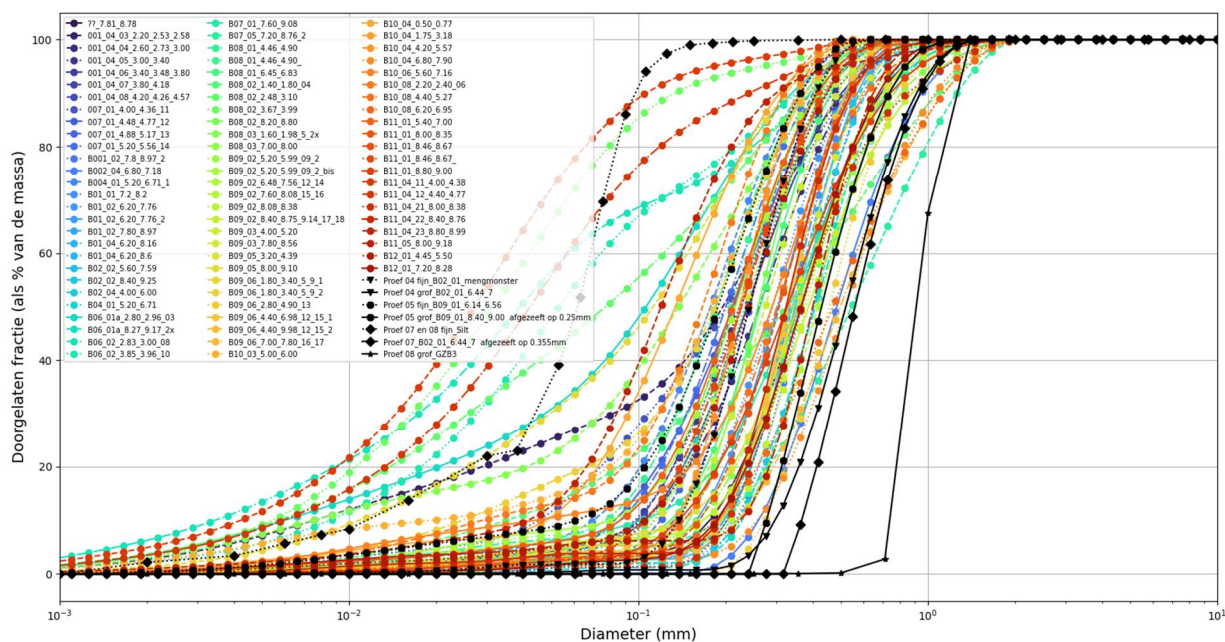
$$\frac{d_{15,f}}{d_{85,b}} < 4 \quad \frac{d_{15,f}}{d_{15,b}} < 20 \quad \frac{d_{50,f}}{d_{50,b}} < 25$$

De toegepaste criteria zijn zogenaamde geometrische ontwerpcriteria. De kleine deeltjes kunnen niet migreren tussen de grotere deeltjes, omdat het simpelweg niet past. Als niet aan deze geometrische criteria wordt voldaan hoeft er echter nog steeds geen inspoeling van het fijne materiaal op te treden. Bij de totstandkoming van de Oosterschelde Stormvloedkering is uitgebreid onderzoek uitgevoerd naar de zogenaamde hydraulische criteria (de Graauw, van der Meulen and van der Does de Bye, 1983)). In dat onderzoek is gebleken dat bij verhangen onder de 0.1, inspoeling van het fijne materiaal in het grove materiaal pas bij hogere waarden van $d_{15,f}/d_{85,b}$ kan optreden.

5.2.3.3 Kolomproeven

Een korte beschrijving van de doelstelling van de kolomproeven en de opstelling is gegeven in paragraaf 5.2.2.3. De kolomproeven zijn in detail beschreven in (Wopereis et al., 2021). In dit rapport is een samenvatting en evaluatie van de resultaten weergegeven.

In totaal zijn 4 filterincompatibiliteitsproeven uitgevoerd. De materialen zijn geselecteerd op basis van de korrelverdelingen van de binnengekomen monsters en de evaluatie met filtercriteria. De korrelverdelingen van de geselecteerde materialen zijn in zwart weergegeven in Figuur 5.18, de niet geselecteerde materialen zijn weergegeven in kleur. De eerste drie proeven zijn uitgevoerd met materialen afkomstig van Kanaal Almelo - de Haandrik. In de laatste twee proeven is silt toegepast dat bij Deltares beschikbaar was. Er is voor dit materiaal gekozen om het verschil tussen fijn en grof materiaal zo groot mogelijk te maken. In de laatste proef is voor het filtermateriaal een filtergrind gekozen. Dit materiaal is gekozen om tot een $d_{15,f}/d_{85,b}$ verhouding te komen die ver boven de ontwerpcriteria uitkomt, om te zien of instabiliteit in de proefopstelling kan optreden. In Tabel 5.4 is een overzicht gegeven van de waarden van de belangrijkste filtereis voor de beproefde combinaties.



Figuur 5.17 Overzicht korrelverdelingen beschikbare (in kleur) en geselecteerde (in zwart) materialen voor filterincompatibiliteitsproeven. De beproefde combinaties van materialen hebben gelijke markers

Tabel 5.4 Overzicht uitgevoerde filterincompatibiliteitsproeven

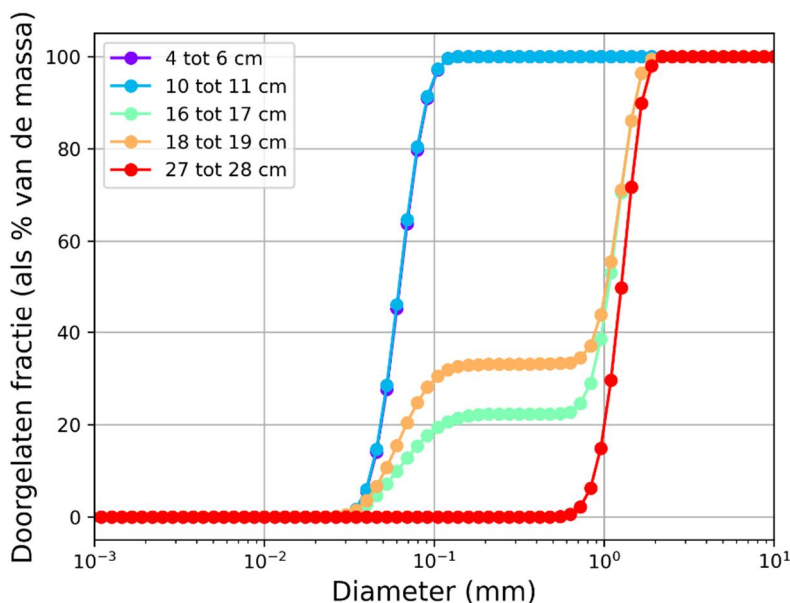
Proefnummer	Basismateriaal	Filtermateriaal	d15,f/d85,b [-]
Proef 04	B02-01 mengmonster 5.92-6, 6.15-6.44, 7.25-7.38 m-mv	B02-01 B02-01 6.44-7.0	0.89
Proef 05	B09-01 6.14-6.56 m-mv	B09-01 8.40-9 m-mv, afgezeefd tot d30	0.61
Proef 07	silt	B02-01 B02-01 6.44-7.0, afgezeefd tot d30	4.38
Proef 08	silt	GZB3	8.60

De proeven zijn uitgevoerd met een tijdsduur van 30 minuten per stap (Tabel 5.5), zolang er geen observaties waren van verandering in stijghoogte, debiet, volumeverandering of migratie van korrels uit de kolom. Bij Kanaal Almelo - de Haandrik zijn de verhangen lager dan 1, maar is de tijdsduur groter. Hoewel eventuele filterinstabiliteit snel tot veranderingen in het verloop van de stijghoogte zou moeten leiden, is desondanks in proef 7 en 8 zowel het verhang verhoogd (2.5) als de tijdsduur verlengd naar enkele dagen. Het verhang van 2.5 is in proef 7 gedurende 40 uur aangehouden. In die tijd is 2x een retourstroming aangebracht.

Tabel 5.5 Schema uitvoering proef

Stap	Verhang [-]	Tijdsduur [minuten]
Matige stroming	-0.2	30
Retourstroming	0.05	10
Matige stroming	-0.2	30
Grote stroming	-1	30
Retourstroming	0.5	10
Grote stroming	-1	30

In geen van de proeven is uitspoeling van fijn materiaal waargenomen. In proeven 4, 5 en 7 is geen volume- of doorlatendheidsverandering waargenomen, met uitzondering van verstopping van de bovenste laag. In proef 8 was wel geleidelijke inwassing van silt zichtbaar, zowel visueel als in de doorlatendheid, die bovenin het filtermateriaal steeds lager werd. Het meest overtuigend is echter de CSI analyse, die laat zien dat de fijne fractie in de bovenste lagen sterk is toegenomen (Figuur 5.18) en de volumeverandering van enkele centimeters. Opvallend was dat de inwassing steeds iets verder toenam na de retourstroming (figuur volumeverlies). Dat duidt erop dat de inwassing van silt, ondanks de hoge ratio van $d_{15,f}/d_{85,b}$, gehinderd werd door brugvorming en niet vrijelijk door het monster kan stromen.

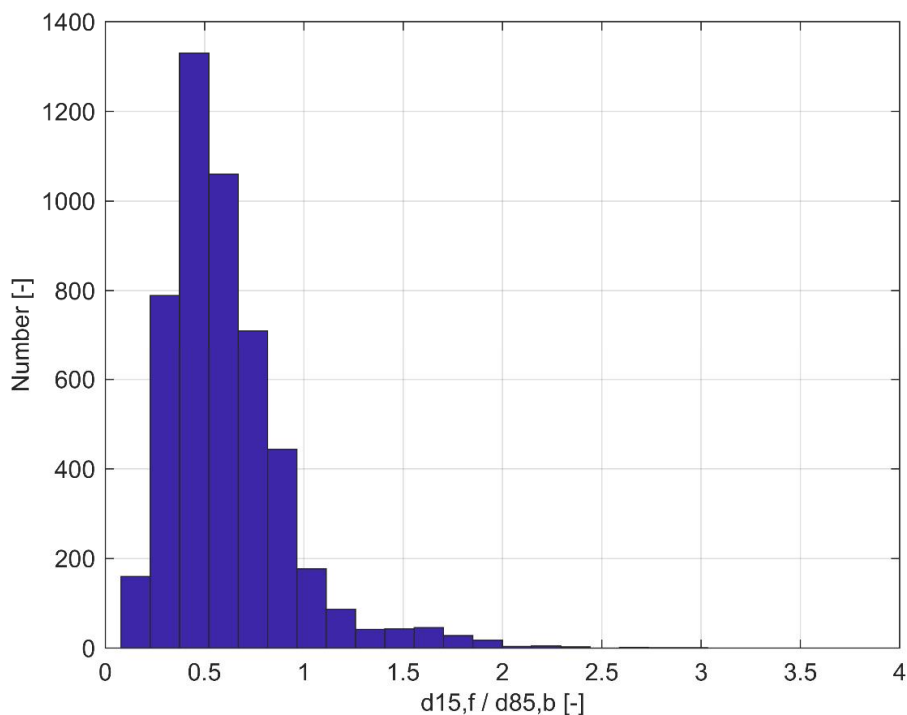


Figuur 5.18 Proef 08 – Korrelverdeling per laag na het einde van de proef. De lagen zijn vanaf de bovenkant van het monster gemeten

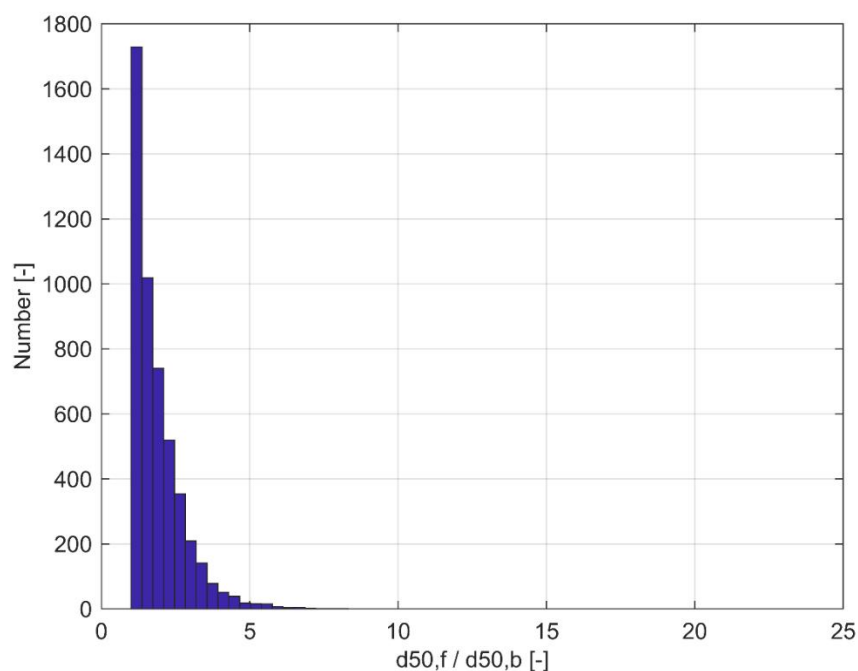
Uit deze proeven wordt geconcludeerd dat de filtercriteria die in de praktijk voor ontwerp worden gehanteerd aan de conservatieve kant zijn. Zelfs bij veel hogere verhoudingen van $d_{15,f}$ en $d_{85,b}$ dan wordt aanbevolen voor het ontwerp – getest tot 8.60 – kan het materiaal nog niet geheel vrijelijk door het monster stromen. Retourstroming is dan noodzakelijk om gevormde bruggen weer los te maken. Wel is er bij deze ratio sprake van volumeverlies. Bij een verhouding van 4.38 was dit nog niet het geval. De gehanteerde ratio van 4 wordt daarom als geschikt ervaren, zeker wanneer de verhangen veel lager zijn dan hier gehanteerd.

5.2.3.4 Toepassing criteria

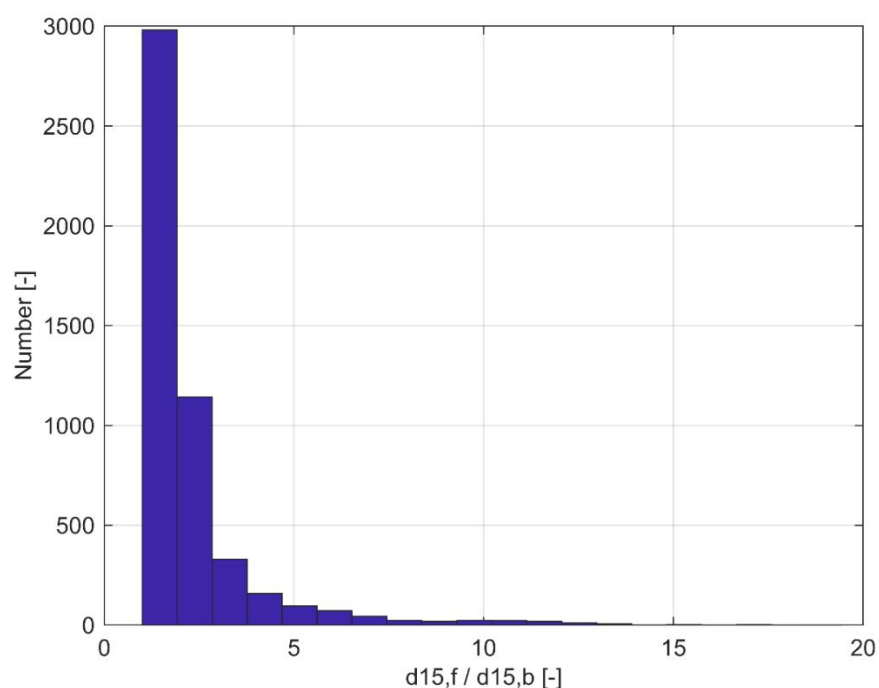
In de analyse is voor elke combinatie van monsters berekend, ongeacht of deze lagen onder elkaar voor kunnen komen, wat de ratio van $d_{15,f} / d_{85,b}$ is, waarbij voor elke monstervergelijking de meest ongunstige combinatie van $d_{15,f}$ en $d_{85,b}$ is gekozen (het meest grove materiaal dient als filter en het fijne als basismateriaal). De resultaten zijn weergegeven in Figuur 5.19. Dezelfde analyse is uitgevoerd voor $d_{50,f} / d_{50,b}$ en $d_{15,f} / d_{15,b}$ (Figuur 5.20 en Figuur 5.21). Duidelijk blijkt dat voor de beproefde monsters filterincompatibiliteit geen probleem is. Alle geteste combinaties zijn stabiel met ook nog een vrij grote marge t.o.v. de criteria.



Figuur 5.19 Verhouding van $d_{15,f}$ en $d_{85,b}$ voor alle mogelijke combinaties van monsters waarvoor een korrelverdeling beschikbaar is. De combinatie van materialen wordt stabiel verondersteld wanneer $d_{15,f} / d_{85,b} < 4$



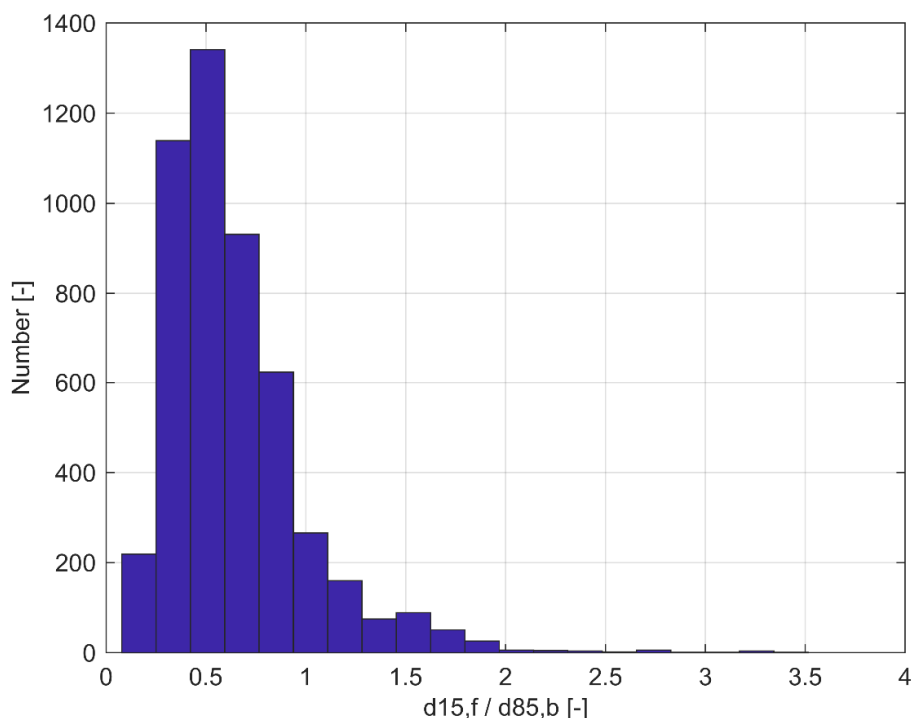
Figuur 5.20 Verhouding van $d_{50,f}$ en $d_{50,b}$ voor alle mogelijke combinaties van monsters waarvoor een korrelverdeling beschikbaar is. De combinatie van materialen wordt stabiel verondersteld wanneer $d_{50,f} / d_{50,b} < 25$



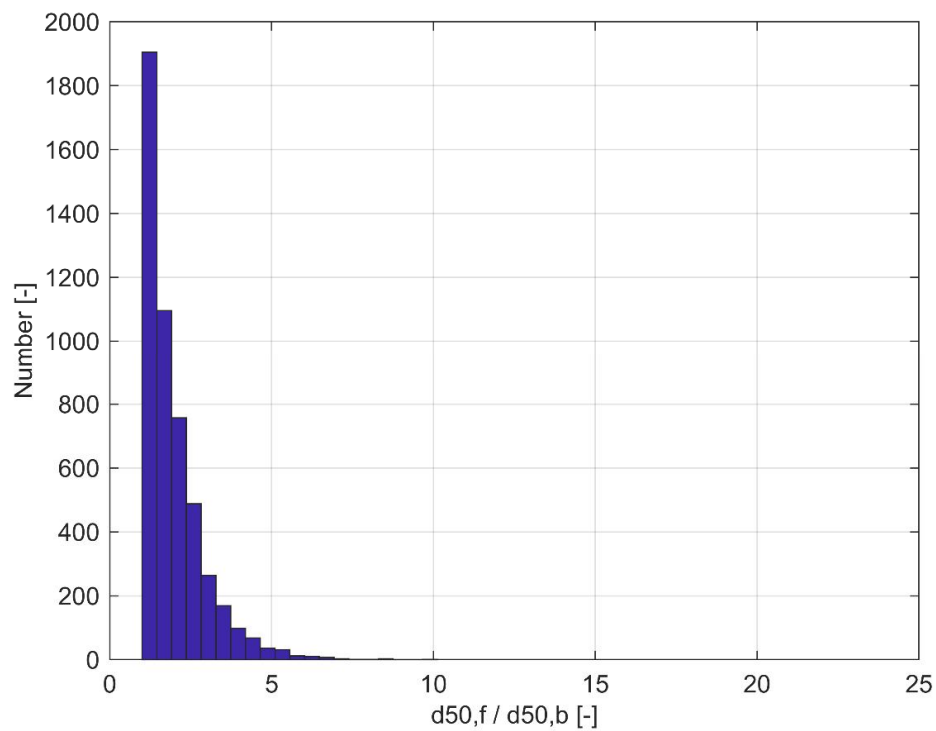
Figuur 5.21 Verhouding van $d_{15,f}$ en $d_{15,b}$ voor alle mogelijke combinaties van monsters waarvoor een korrelverdeling beschikbaar is. De combinatie van materialen wordt stabiel verondersteld wanneer $d_{15,f} / d_{15,b} < 20$

Het zou zo kunnen zijn dat het fijne zand al in het grove zand is gespoeld en dat dit de reden is waarom er voldaan wordt aan de filtercriteria. De filtercriteria zijn daarom ook getoetst op

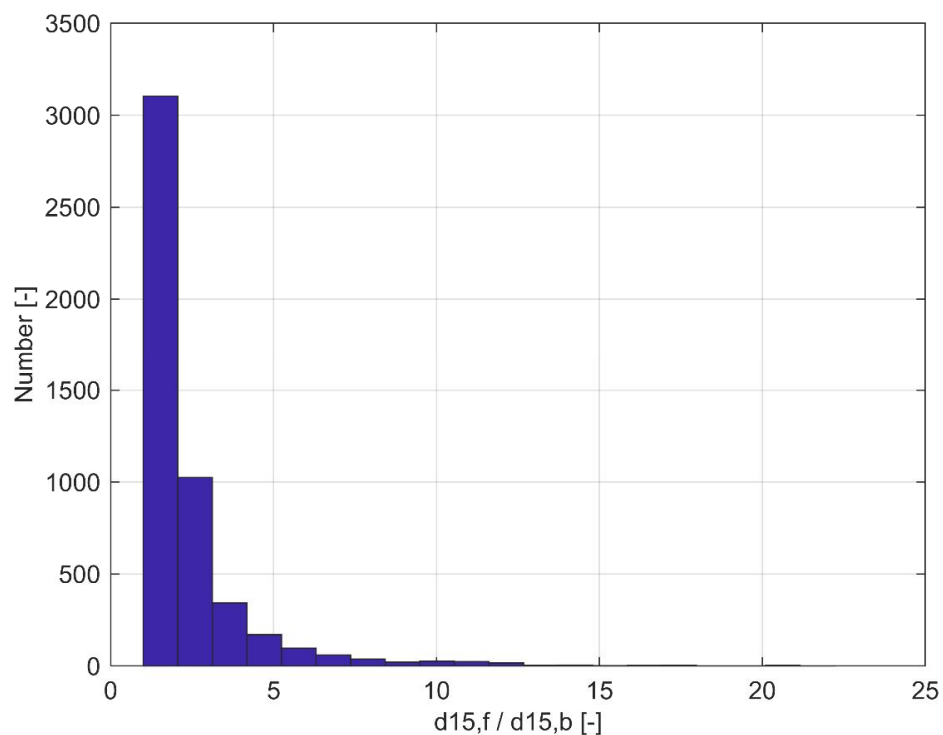
alle combinaties van materialen, waarbij voor het filtermateriaal (van de twee geselecteerde materialen) de maximaal ingespoelde fractie (al het materiaal $<d_{30}$) is verwijderd. Figuur 5.22 tot Figuur 5.24 laten zien dat zelfs dan nog bijna volledig aan de filter criteria wordt voldaan. Vijf combinaties van de totaal 4950 mogelijke combinaties voldoen dan net niet aan de eis voor $d_{15,f} / d_{15,b}$. In alle vijf gevallen gaat het hier om het materiaal B02-03-M015. De maximale ratio die wordt behaald is 22.2. Aangezien wel aan de andere twee criteria is voldaan, het onwaarschijnlijk is dat B02-03-M015 naadloos aansluit op een van de drie grovere materialen en dat exact 30% volumemateriaal is ingespoeld, terwijl de verwijderde d_{30} uit de grovere materialen (respectievelijk 0.382, 0.338, 0.363, 0.357, 0.332 mm, voor B08-01-M020, B09-04-M22, B10-01-M022, B02-02-M021 en B04-01-M022) groter is dan de d_{90} van B02-03-M015 (0.147 mm), lijkt er geen sprake te kunnen zijn van filterincompatibiliteit.



Figuur 5.22 Verhouding van $d_{15,f}$ en $d_{85,b}$ voor alle mogelijke combinaties van monsters waarvoor een korrelverdeling beschikbaar is en waarbij voor het filtermateriaal de fractie $<d_{30}$ is verwijderd. De combinatie van materialen wordt stabiel verondersteld wanneer $d_{15,f} / d_{85,b} < 4$



Figuur 5.23 Verhouding van $d_{50,f}$ en $d_{50,b}$ voor alle mogelijke combinaties van monsters waarvoor een korrelverdeling beschikbaar is en waarbij voor het filtermateriaal de fractie $<d_{30}$ is verwijderd. De combinatie van materialen wordt stabiel verondersteld wanneer $d_{50,f} / d_{50,b} < 25$



Figuur 5.24 Verhouding van $d_{15,f}$ en $d_{15,b}$ voor alle mogelijke combinaties van monsters waarvoor een korrelverdeling beschikbaar is en waarbij voor het filtermateriaal de fractie $<d_{30}$ is verwijderd. De combinatie van materialen wordt stabiel verondersteld wanneer $d_{15,f} / d_{15,b} < 20$

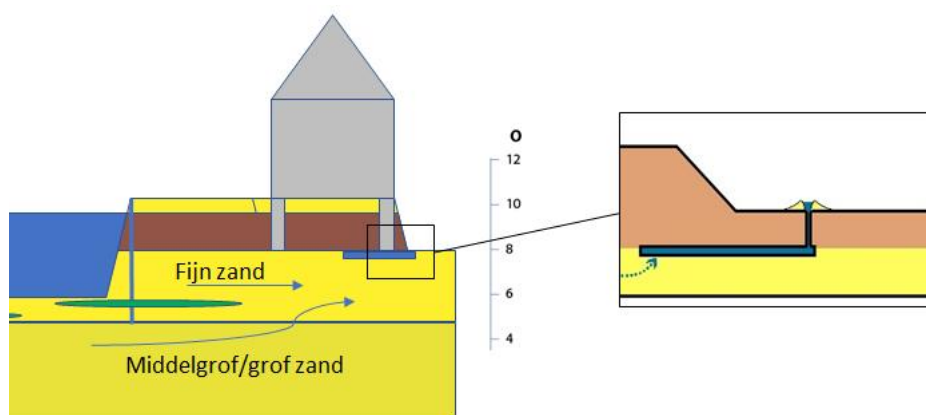
5.2.4 Terugschrijdende erosie

Terugschrijdende erosie is een vorm van interne erosie waarbij onder invloed van waterstroming zand afgevoerd wordt van onder een deklaag, en waarbij een ondiepe holle ruimte (pipe) wordt gevormd, die steeds verder doorgroeit in de richting van het buitenwater. Het zand wordt afgevoerd aan het oppervlak, in de vorm van een zandmeevoerende wel.

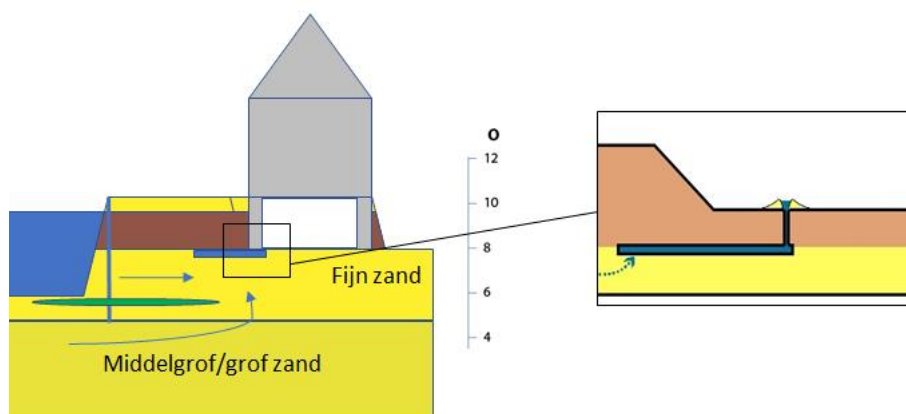
5.2.4.1 Schademechanisme

Het optreden van piping vergt de aanwezigheid van een uitstroompunt, een afsluitende laag waaronder de pipe kan ontwikkelen en een horizontaal verval over een bepaalde lengte (gradiënt) om de korrels in beweging te brengen. De ondergrond bij Kanaal Almelo - de Haandrik wordt gekenmerkt door een zandige bodem, met nabij het oppervlak een veenlaag. Indien de veenlaag ononderbroken is, kan deze een dak voor de pipe vormen.

Terugschrijdende erosie kan daardoor op twee manieren voor schade zorgen, ofwel door een uittreepunt in de kruipruimte of kelder van een woning (Figuur 5.26), ofwel door een uittreepunt in het achterland (Figuur 5.25). De pipe die onder de fundering ontstaat, kan voor verzakkingen zorgen.



Figuur 5.25 Terugschrijdende erosie met uittredepunt in het achterland



Figuur 5.26 Terugschrijdende erosie met uittredepunt in kelder of kruipruimte

5.2.4.2 Criteria

Wanneer er een deklaag en open uitstroom aanwezig is, kan met het model van Sellmeijer (Sellmeijer et al., 2011, Förster et al., 2012) worden vastgesteld of het verval voldoende groot is om een doorgaande pipe te laten ontstaan.

De regel van Sellmeijer voorspelt het kritiek verhang, het verhang waarbij een doorgaande pipe kan ontstaan. De regel van Sellmeijer gaat uit van een isotrope en homogene ondergrond. Het berekenen van het kritiek verhang voor een anisotrope meerlaagse ondergrond is mogelijk met D-Geo Flow. Dit levert een optimalisatie van het kritiek verhang (het kritiek verhang wordt hierdoor hoger). Deze regel is goed toepasbaar voor de situatie met uittredepunt in het achterland.

Het exact voorspellen van het aanvangen van pipe groei is lastig, maar aangezien beginnende pipes slechts een aantal korrels diep zijn, lijkt het aannemelijk dat er meer erosie moet hebben plaatsgevonden voor het optreden van schade dan alleen een beginnende pipe. Het hangt sterk van de situatie af of de regel van Sellmeijer een goede voorspeller is voor het starten van de pipe. Hoe meer de stroming zich concentreert naar een enkel punt, hoe lager het verval is waarbij een pipe kan starten, ten opzichte van de uitkomst van de regel. De regel van Sellmeijer is daarom slechts een eerste handvat voor het vaststellen van het verhang dat nodig is om een dergelijke pipe te veroorzaken en is niet sluitend om te beoordelen of een pipe daadwerkelijk kan starten.

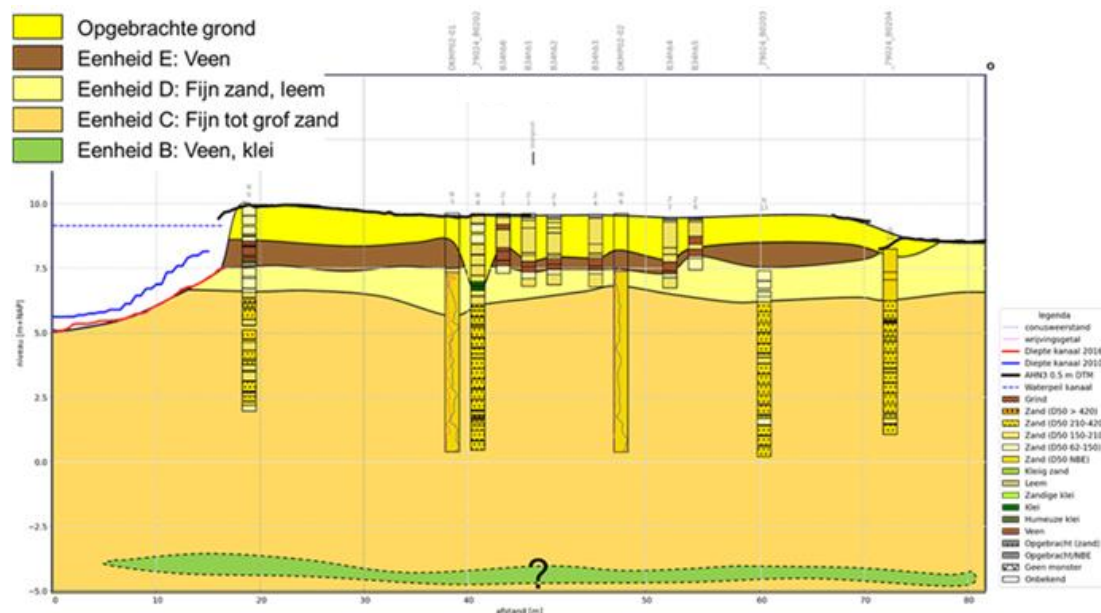
Daarom wegen met name in de situatie waarbij een beginnende pipe schade zou kunnen veroorzaken de observaties bij de woningen en de aanwezigheid van een uitstroompunt sterk mee. Er moet sprake zijn geweest van een kruipruimte of kelder. Bij sommige (bedrijfs-) panden is dit niet het geval en dan is een pipe onder de fundering uiteraard niet mogelijk. Daarnaast zou er sprake moeten zijn (geweest) van uitstromend water en zand in de kruipruimte of kelder. De verwachting is dat dit over het algemeen bij een kelder wel opgemerkt zou moeten zijn, omdat het om een ophoping van een aanzienlijke hoeveelheid zand gaat. Bij een kruipruimte zou een dergelijke observatie wellicht niet gezien kunnen zijn. Uitstromend water kan aanwezig zijn wanneer er opbarsten van de vloer heeft plaatsgevonden, maar door een scheur in de vloer komt vaak geen zand, tenzij de scheur erg groot is. Ook is het aannemelijk dat als er zakkingen plaatsvinden, dit vooral bij de voorgevel is in geval van een kruipruimte. Tenslotte mag de vloer van de kelder of kruipruimte niet veel hoger liggen dan de poer of strook: de verticale fluidisatie van zand vraagt een verticale gradiënt van 1 die niet waarschijnlijk is. Deze observaties zijn beschouwd in paragraaf 5.2.4.4.

5.2.4.3 Toepassing criteria

Met de regel van Sellmeijer kan het kritiek verhang worden bepaald waarbij een doorgaande pipe kan optreden. Voor het toepassen van de regel van Sellmeijer moeten een aantal invoerparameters bekend zijn: dikte, doorlatendheid en korrelgrootte (d_{70}) van het zandpakket en de kwelweglengte. Bij de dikte van het zandpakket kunnen ook diepere lagen een rol spelen.

Figuur 5.27 geeft een indicatie van de grondopbouw in het gebied. In alle raaien, met uitzondering van Pand 9 (waar terugschrijdende erosie dus niet voor kan komen), is veen aangetroffen in de ondergrond. De zandlaag daaronder neemt geleidelijk in grofheid toe. Op ca. 4 m-NAP kan een leemlaag voorkomen. Deze is niet overal aanwezig. Volgens REGIS is de top van de Breda klei op 65m-NAP te vinden. De maximale dikte van het zandpakket is daarmee ongeveer 72.5 m. In het regionale model is deze volledige diepte meegenomen. Boven 65 m-NAP ligt het Oosterhout zand, tot ca. 30-NAP. Tot 30m-NAP behoort tot de eenheid Peize Waalre. Deze twee zandpakketten hebben volgens REGIS een lage doorlatendheid 0.5-1 m/d en 2.5-5 m/dag. In het regionale model is rekening gehouden met een horizontale doorlatendheid van 30 m/d en een anisotropiefactor van 10. Gezien de hoge mate van anisotropie, de afname van doorlatendheid met de diepte en de beperkte afstand waarover de stijghoogte afloopt, is voor de berekening gekozen voor een dikte van 37.5 m en

doorlatendheid van 30 m/d. In geval van aanwezigheid van een leemlaag zou de dikte aanzienlijk kleiner zijn, wat tot veel hogere kritieke verhangen leidt.

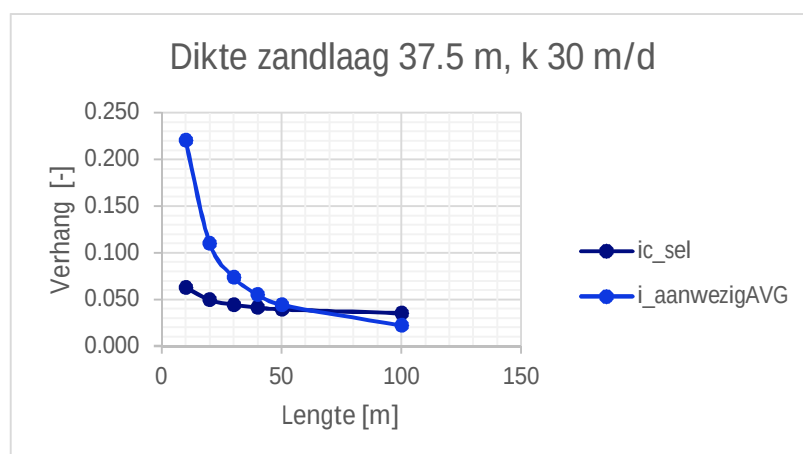


Figuur 5.27 Voorbeeld van grondopbouw in het gebied Almelo de Haandrik. De grondwaterstand ligt in veel gevallen net onder het veen

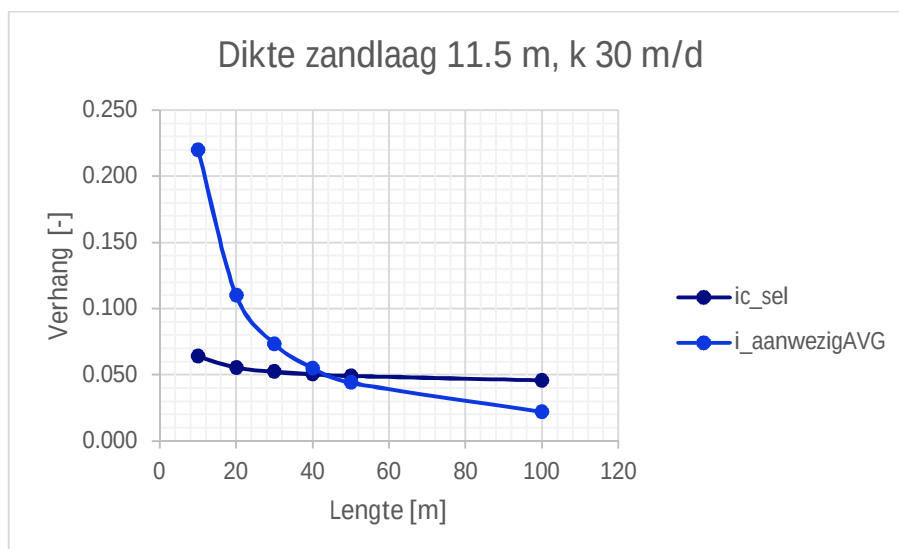
De korreldiameter van de top zandlaag is afgeleid op basis van de korrelverdelingen en is geschat op $1.1 \cdot 10^{-4}$ m.

De kwelweglengte is de afstand tussen het in- en uittredepunt. Het intredepunt is ter plaatse van het kanaal. Het uittredepunt kan ofwel ter plaatse van de kruipruimte zijn: de voorgevel van de panden is hiervoor als maatgevend aangehouden, ofwel in het achterland, waar het water uitstroomt naar het maaiveld. Het punt waar het veen is afgegraven lijkt hier een goed punt voor, hoewel dit niet in alle profielen eenduidig is vast te stellen (zie factsheets).

Het kritieke verhang neemt volgens de regel van Sellmeijer af met de kwelweglengte, maar het daadwerkelijke verhang neemt ook af met de kwelweglengte. Aangezien het maximale verval ca. 2 m bedraagt (verschil kanaalpeil – achterland) kan er sowieso geen piping optreden bij een kwelweglengte groter dan ca. 60 m (Figuur 5.28).



Figuur 5.28 Afname kritiek verhang met kwelweglengte volgens het model van Sellmeijer en de afname van het gemiddeld aanwezig verhang bij toenemende kwelweglengte voor een laagdikte van 37.5 m



Figuur 5.29 Afname kritiek verhang met kwelweglengte volgens het model van Sellmeijer en de afname van het gemiddeld aanwezig verhang bij toenemende kwelweglengte voor een laagdikte van 11.5 m

Bij een uitredepunt in het achterland is het ook mogelijk dat de kwelweglengte korter is en het lokale verhang hoger. Daarom worden de aanwezige horizontale verhangen onder het pand vergeleken met het kritieke verhang volgens Sellmeijer bij een lengte van 60 m (0.04), de laagste waarde volgens dit model. Zoals in paragraaf 5.1 beschreven zijn de gemeten horizontale verhangen ter plaatse van de panden aanzienlijk lager en zal er dus geen terugschrijdende erosie optreden. Met grondwatermodellen is vastgesteld of er in andere omstandigheden hogere verhangen kunnen optreden. Dit blijkt het geval te zijn wanneer er een lage weerstand is in kanaalbodembodem en damwand in combinatie met een ondoorlatende laag op geringe diepte. Een beperkte diepte zorgt er echter ook voor dat het kritiek verhang volgens Sellmeijer hoger is (maximaal 0.05). De maximaal berekende verhangen ter plaatse van de panden zijn in alle scenario's kleiner dan 0.05 (zie paragraaf 3.4).

Bij een uitredepunt in een kelder of kruipruimte is de afstand vaak korter dan 60 m. Tabel 5.6 geeft een overzicht van de afstand van de gevel tot het kanaal voor de onderzochte panden en bijbehorende kritieke verhangen volgens het model van Sellmeijer. Het kritiek verhang volgens het model van Sellmeijer is voor deze afstand in de ordegrootte van 0.05-0.06. Wanneer er een minder doorlatende laag op geringe diepte aanwezig is, is het kritiek verhang ca. 10% hoger. Zoals in paragraaf 3.4 beschreven zijn de gemeten horizontale verhangen ter plaatse van de panden aanzienlijk kleiner dan deze waarde, waarbij de gradiënt vermoedelijk ook nog afneemt in de richting van het pand. Met grondwatermodellen is vastgesteld of er in andere omstandigheden hogere verhangen kunnen optreden. Dat blijkt zo te zijn wanneer het kanaal volledig lek is, en er op kleine diepte een afsluitende laag aanwezig is. In alle gevallen is het verhang nabij de panden echter kleiner dan 0.05. In deze berekeningen is echter geen rekening gehouden met een lokaal uitstroompunt nabij het pand. Ook wordt benadrukt dat de kritieke gradiënt om een pipe te starten echter kleiner kan zijn dan wat door het model van Sellmeijer wordt voorspeld. Observaties zijn daarom een sterkere argumentatie dan de vergelijking van gemeten en berekende gradiënten met resultaten van het model.

Tabel 5.6 Afstand tussen kanaal en voorgevel voor de onderzochte panden

Meet-reeks	Straat	Nummer	Afstand kanaal - voorgevel [m]	Kritiek verhang Sellmeijer [-] dikte 37.5 m	Kritiek verhang Sellmeijer [-] dikte 11.5 m
1	Pand 20		19.2	0.050	0.056
1	Pand 5		19.3	0.050	0.056
2	Pand 12		26.5	0.046	0.053
2	Pand 6		21	0.049	0.055
10	Pand 4		13.4	0.056	0.060
10	Pand 1		13.4	0.056	0.060
10	Pand 21		14.6	0.055	0.059
10	Pand 19		13.6	0.056	0.060
9	Pand 14		12.8	0.057	0.060
9	Ca 100 m zuidelijk van pand 14		12.9	0.057	0.060
8	Pand 11		9.9	0.063	0.064
3	Pand 13		23.7	0.047	0.054
3	Pand 10		19.4	0.050	0.056
4	Pand 9		17.3	0.052	0.057
4	Pand 9		18.4	0.051	0.056
12	Pand 3		30.8	0.044	0.052
6	Ca. 50 m ten noorden van Pand 3		26.3	0.046	0.053
7	Pand 7		17.2	0.052	0.057
7	Pand 16		19.2	0.050	0.056
7	Pand 18		19.3	0.050	0.056
7	Pand 2		18.7	0.051	0.056
7	Ca. 30 m ten noorden van Pand 2		18.7	0.051	0.056
11	Tegenover Pand 15		24	0.047	0.054
11	Pand 15		23.5	0.047	0.054

5.2.4.4 Observaties

Indien terugschrijdende erosie heeft plaatsgevonden onder de fundering met uittredepunt bij een kruipruimte of kelder, en wel zodanig dat er schade aan panden is ontstaan, dan moet er ook sprake zijn geweest van een kruipruimte/kelder, uittredend zand en water en zakking aan de kant van de voorgevel/kelder. Nog niet alle pandinspecties zijn volledig uitgewerkt, maar tot dusver is er geen sprake van observaties van uittredend zand. Bij veel panden zijn er observaties van vocht en vernatting, maar dit duidt niet op terugschrijdende erosie. Bij een aantal panden is wel sprake (geweest) van water in de kelder/kruipruimte. Het zou natuurlijk mogelijk kunnen zijn dat de observatie van zand over het hoofd is gezien. Dit wordt voor deze panden nader geëvalueerd.

Bij Pand 20 is sprake van water in de kelder. Het lijkt niet waarschijnlijk dat er zand meegevoerd is naar deze kelder, waardoor er schade is ontstaan. Als er zand in de kelder is gestroomd zou dat waarschijnlijk opgemerkt zijn.

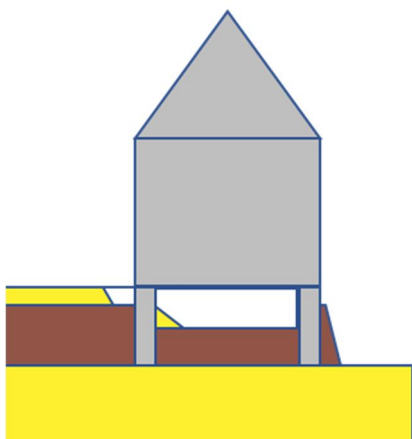
Bij Pand 14 staat er ook soms een waterlaagje in de kelder. Ten tijde van de inspectie was de kelder droog. De onderkant van de kelder ligt hoger dan de onderkant van de funderingsbalken. Er zou dus eerst verticale fluidisatie moeten optreden, voordat er onder de fundering zand wordt geërodeerd. Dit lijkt onwaarschijnlijk bij de lage verhangen die worden waargenomen. Daarnaast is de verwachting dat eventueel ingestroomd zand wel opgemerkt zou zijn.

Het is mogelijk dat er panden buiten de selectie om zijn waarbij wel de combinatie van uitstromend zand en water, kruipruimte of kelder tot funderingsdiepte en verzakking aan de kant van de kelder of kruipruimte optreedt. In die gevallen is piping niet uitgesloten. Voor de selectie van panden is deze combinatie echter niet waargenomen.

5.2.5 Erosie van zand naar kruipruimte of kelder

5.2.5.1 Schademechanisme

Figuur 5.30 illustreert hoe zand van nabij het maaiveld naar een kruipruimte kan migreren. De migratie van zand kan leiden tot verzakkingen van het maaiveld nabij de woning, soms plotseling. Omdat de fundering niet aangetast wordt door de migratie van zand, kan dit mechanisme alleen een verklaring zijn voor schades rondom het pand, maar niet voor verzakking van het pand.



Figuur 5.30 Migratie van zand naar kruipruimte of kelder

Het zand kan onder eigen gewicht migreren of worden geholpen door hydraulische gradiënten ten gevolge van een hoosbui. Er is geen relatie met het kanaal. Dit mechanisme is ook al besproken in (Deltares, 2020) in relatie tot veenoxidatie.

Om zand naar kruipruimtes te laten migreren moet er een vrije uitstroom van zand naar de kruipruimte zijn. Dit betekent dat er een gat of holte aanwezig moet zijn. Een dergelijke holte kan op verschillende manieren ontstaan en voor migratie van zand zorgen:

- De vloer van de kruipruimte of kelder is verzakt, waarna het zand in de kruipruimte stroomt.
- Er is ruimte ontstaan onder de fundering, wat vervolgens opgevuld wordt met zand.

Feitelijk is dit mechanisme geen oorzaak voor de waargenomen schades bij de panden: het is een gevolg van andere schade-oorzaken, die zetting van een keldervloer of ruimte onder de fundering veroorzaken.

5.3 Samenvatting analyse piping

Het onderzoek naar piping heeft zich gericht op terugschrijdende erosie, suffosie en filterincompatibiliteit. Het is ook mogelijk dat er zand in holle ruimtes stroomt, waardoor het maaiveld rondom de panden verzakt, maar hier moet altijd een andere schade-oorzaak aan ten grondslag liggen. De conclusies voor interne erosie zijn als volgt:

Suffosie:

- Uit het totaal van de 100 beschikbaar gekomen korrelverdelingen, zijn ca. 7 korrelverdelingen als intern instabiel (met massapercentage >5%) beoordeeld met de beschikbare criteria.
- Er zijn vijf monsters beproefd in een kolom, waarvan 2 monsters volgens de criteria niet intern stabiel waren. Na de analyse bleek echter dat er tijdens de preparatie fijne fractie verloren is gegaan bij de 2 suffosiegevoelige monsters, waardoor ook deze monsters volgens de criteria intern stabiel zijn. Volgens de proeven was geen van de monsters instabiel. De criteria worden bevestigd voor de niet-suffosiegevoelige monsters, maar zijn conservatief voor suffosiegevoelige monsters.
- De gemeten stijghoogtes en scenario's wijzen erop dat er geen hoge hydraulische gradiënten (horizontaal noch verticaal) zijn (geweest) bij de meeste panden
- De horizontale en verticale verhangen ter plaatse van de panden zijn veel kleiner dan waar de filtercriteria op gebaseerd zijn en welke zijn toegepast in de proeven.
- Aangezien het merendeel van de korrelverdelingen als intern stabiel is geclassificeerd, er bij de meeste panden (op dit moment) geen sprake lijkt te zijn van hoge hydraulische verhangen, en literatuurstudies laten zien dat zelfs bij fors massaverlies er weinig verandering is in het spanning-rek gedrag, lijkt het onwaarschijnlijk dat massaverlies of verminderd draagvermogen door suffosie een hoofdoorzaak is voor de opgetreden schades bij de panden.

Filterincompatibiliteit:

- Door het willekeurig combineren van de 100 korrelverdelingen, is er geen combinatie gevonden die ook maar in de buurt komt van criteria voor filterincompatibiliteit. Hierbij wordt bovendien benadrukt dat dit ontwerpcriteria zijn.
- De kolomproeven tonen aan dat volumeverlies mogelijk is als de filtercriteria ruimschoots worden overschreden en dat de filtercriteria aan de conservatieve kant zijn.
- Uit de boringen en geologische analyse volgt dat scherpe overgangen tussen fijn en grof materiaal niet vaak voorkomen, maar dat er vaak juist een geleidelijke overgang is van fijn naar grof. Het willekeurig combineren van monsters voor de beoordeling van filterincompatibiliteit is dus zeer conservatief.
- De gemeten stijghoogtes en scenario's wijzen erop dat er geen hoge hydraulische gradiënten (horizontaal noch verticaal) zijn (geweest) bij de meeste panden.

- Aangezien alle mogelijke combinaties van monsters als intern stabiel zijn geclassificeerd volgens ontwerpcriteria en er bij de meeste panden (op dit moment) geen sprake lijkt te zijn van hoge hydraulische verhangen, lijkt het onwaarschijnlijk dat massaverlies ten gevolge van filterincompatibiliteit een hoofdoorzaak is voor de opgetreden schades bij de panden.

Terugschrijdende erosie

Voor terugschrijdende erosie wordt onderscheid gemaakt tussen de situatie met uitstroompunt in het achterland en uitstroompunt in kruipruimte of kelder. In het eerste geval moet een pipe met significante lengte ontstaan, terwijl in het tweede geval een beginnende pipe onder de fundering al voor schade zou kunnen zorgen.

Uitstroompunt in het achterland:

- Er zijn geen waarnemingen van zandmeevoerende wellen in het achterland.
- De gemeten en berekende verhangen zijn in alle gevallen lager dan de kritieke verhangen op basis van het model van Sellmeijer.
- Gezien het gebrek aan observaties van afgezet zand en geen sprake lijkt te zijn van hoge hydraulische verhangen, lijkt het onwaarschijnlijk dat terugschrijdende erosie met uitstroompunt naar het achterland een hoofdoorzaak is voor de opgetreden schades bij de panden.

Uitstroompunt in kelder of kruipruimte:

- Er zijn geen observaties van uittredend zand en water (zandmeevoerende wellen) in kruipruimtes of kelders. Er zijn wel een aantal locaties waarbij er water in de kelder is waargenomen, maar bij die locaties lijkt het onwaarschijnlijk dat er sprake is van zandmeevoerende wellen.
- De gemeten (peilbuisdata) en berekende (scenario's) verhangen zijn in alle gevallen lager dan de kritieke verhangen op basis van het model van Sellmeijer, waarbij opgemerkt wordt dat korte pipes bij sterke concentratie van stroming al bij lagere verhangen kunnen ontstaan en berekeningen niet zijn uitgegaan van een lokaal uitstroompunt bij het pand.
- Gezien het gebrek aan observaties van afgezet zand en er bij de onderzochte panden geen sprake lijkt te zijn van hoge hydraulische verhangen, lijkt het onwaarschijnlijk dat terugschrijdende erosie met uitstroom naar kelder of kruipruimte een hoofdoorzaak is voor de opgetreden schades bij de panden.

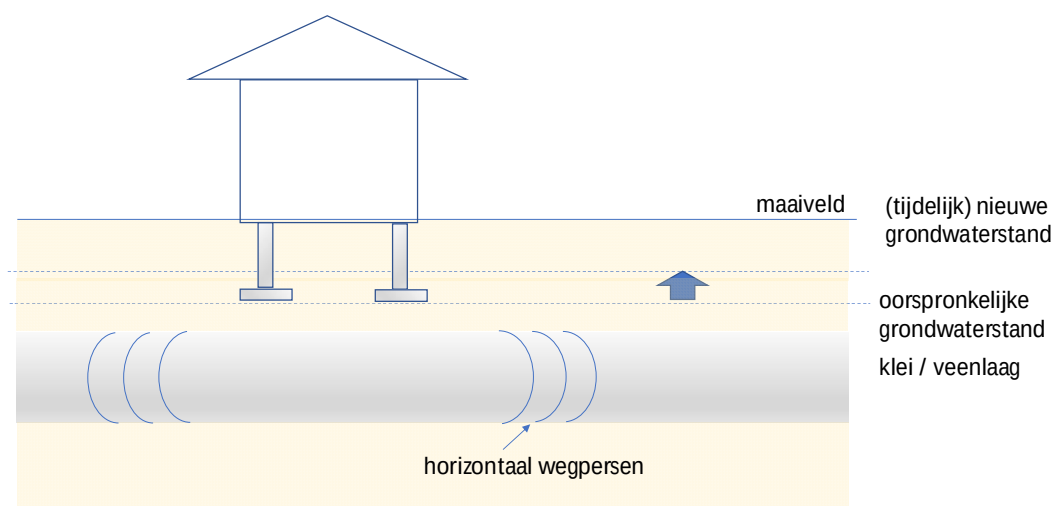
6 Analyse veen en ander samendrukbaar materiaal

6.1 Potentiële mechanismen m.b.t. samendrukbare lagen in de ondergrond

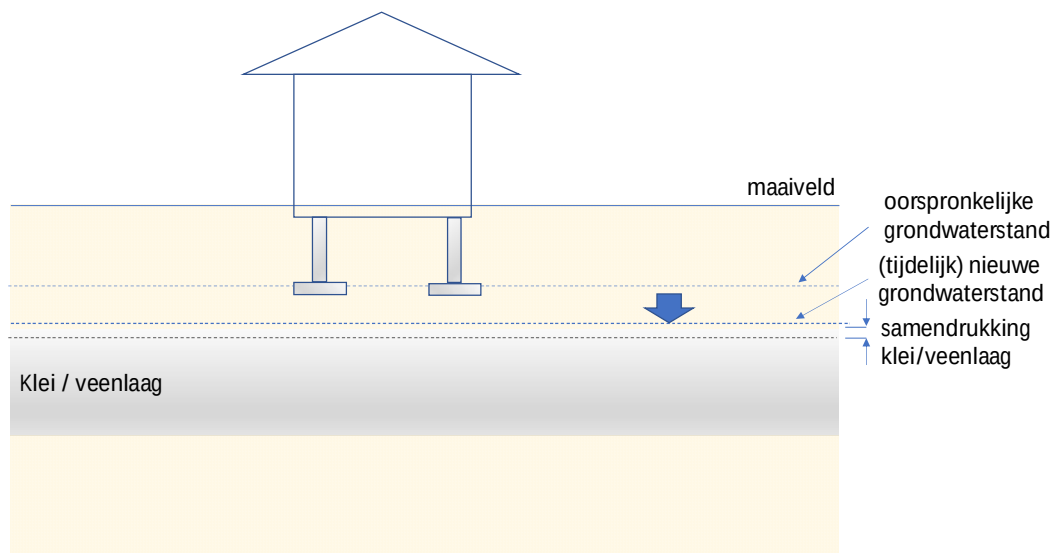
Volume verandering van de samendrukbare lagen in de ondergrond kan op verschillende manieren ontstaan. Daarvoor worden in de dagelijkse praktijk verschillende termen gebruikt. IN dit hoofdstuk worden de volgende termen toegepast:

- **Samendrukking:** Onder samendrukking wordt verstaan het optreden van een volume verandering van de grondlagen als gevolg van spanningen in de grondlaag.
- **Krimp:** Met de term krimp wordt verwezen naar een volume afname als gevolg van een afname in watergehalte van de grond. Opgemerkt wordt dat ondanks een afname in watergehalte de grond verzadigd kan blijven, dit is nader toegelicht in paragraaf 6.5.
- **Oxidatie:** Oxidatie treedt specifiek op bij veenlagen waarbij onder werking van zuurstof afbraak van organisch materiaal optreedt en daarmee het volume van de grondlaag afneemt.

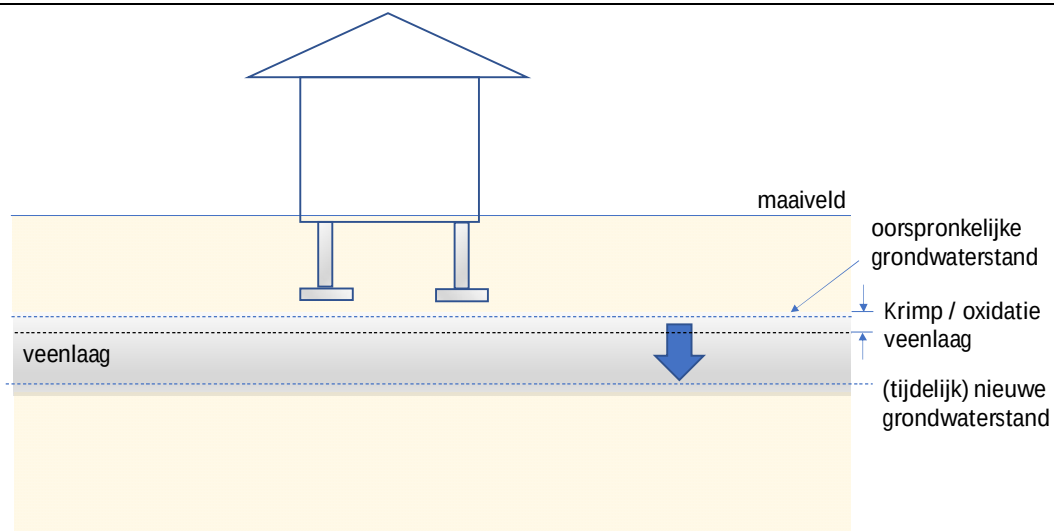
Indien samendrukbare lagen in de ondergrond, onder de panden aanwezig zijn, zijn er meerdere mechanismen te definiëren die de waargenomen schade kunnen verklaren. Ter ondersteuning van de gedachtevorming zijn de onderkende mechanismen in Figuur 6.1 schetsmatig weergegeven. De mechanismen worden daarna kort beschreven.



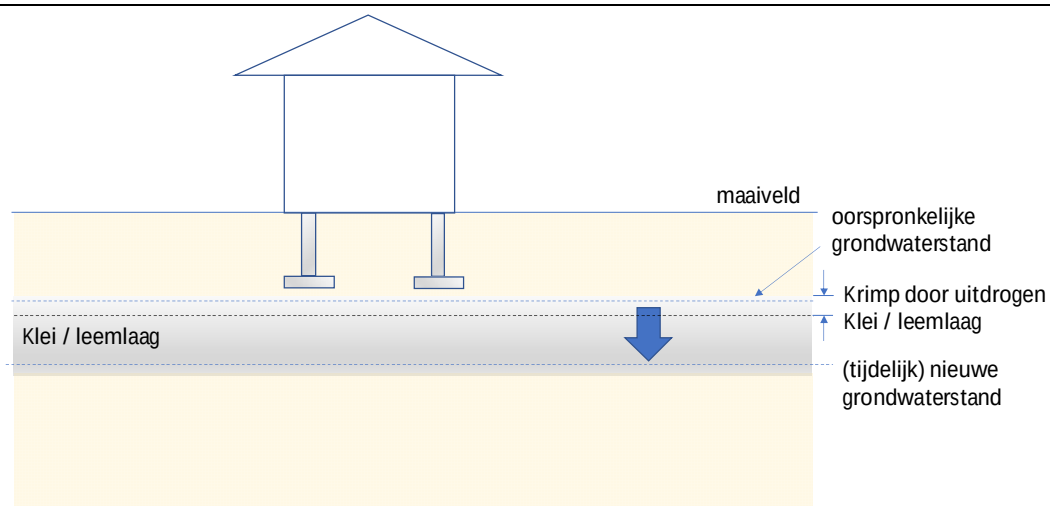
a) Overschrijden maximale funderingsdruk



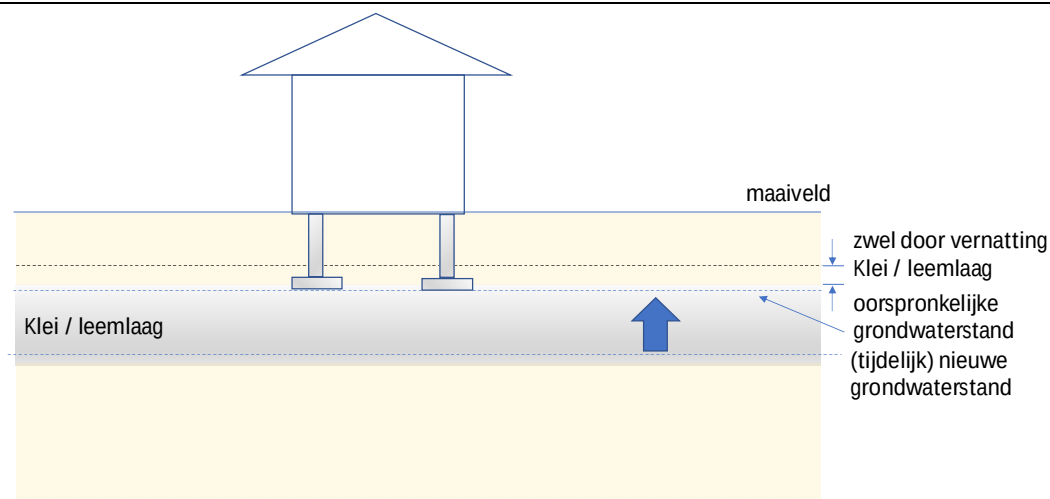
b) Samendrukking van klei, - of veenlaag als gevolg van verandering grondwaterstand



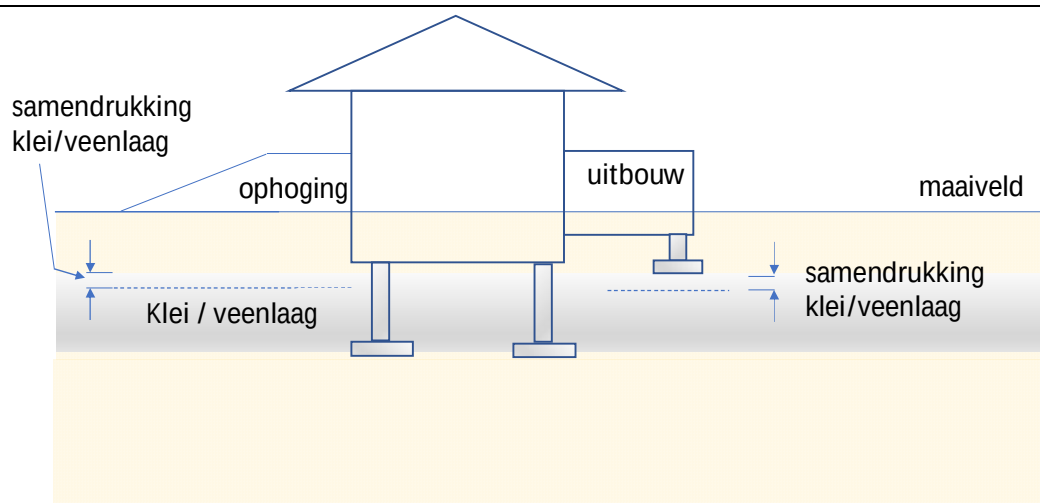
c) Krimp en oxidatie van veen als gevolg van uitdroging



d) Krimp in klei- of leemlaag als gevolg van uitdroging



e) Zwell klei- of leemlaag als gevolg van vernatting



f) Samendrukkingklei, of veenlaag als gevolg van (nieuwe) belasting op de laag.

Figuur 6.1 Potentiële mechanismen waarbij samendrukbare lagen in de ondergrond een rol spelen

6.1.1

A. Overschrijden maximale funderingsdruk

De funderingsdruk die maximaal door de ondergrond kan worden gedragen zonder dat er sprake is van bezwijken van de ondergrond is afhankelijk van de sterkte eigenschappen van de ondergrond en de spanningen in de ondergrond. Een verandering in grondwaterspanning kan een verandering in maximale funderingsdruk die de ondergrond kan dragen tot gevolg hebben. Voor situaties waarbij de marge tussen de aanwezig funderingsdruk en de maximaal door de ondergrond te dragen funderingsdruk gering is, kunnen veranderingen in grondwaterstand, stijging, leiden tot het bezwijken van de ondergrond en daarmee verzakkingen van het funderingselement, zie Figuur 6.1a.

Het beoordelen of een dergelijk mechanisme kan optreden is voor de situatie zonder samendrukbare lagen in de ondergrond niet anders dan voor de situatie met samendrukbare lagen in de ondergrond. Echter, samendrukbare lagen, zoals klei en veen, hebben over het algemeen lagere sterkte eigenschappen dan zandlagen. Voor situaties waarbij op geringe diepte onder de funderingselementen klei of veenlagen worden aangetroffen mag worden verwacht dat de funderingsdruk die door de ondergrond kan worden gedragen minder is dan voor situaties zonder klei- of veenlagen op geringe diepte onder de funderingselementen.

Opgemerkt wordt dat in bijlage H een nadere analyse van de maximale funderingsdruk die de ondergrond kan dragen en de aanwezige funderingsdruk wordt beschreven. Met betrekking

tot de sterkte van deze lagen kan onderscheid worden gemaakt in processen die zich in een korte tijdperiode afspelen en processen die zich op een langere termijn afspelen. Voor kortdurende processen kan gedacht worden aan een kortdurende fluctuatie in grondwaterstand. De sterkte van een klei- of veenlaag, in relatie tot de kortdurende belasting, kan met de ongedraineerde schuifsterkte, s_u , worden weergegeven. Zolang de grondwaterspanning niet aan de belastingssituatie is aangepast, zal de ongedraineerde schuifsterkte s_u niet veranderen. Indien de sterkte van de ondergrond, voordat de fluctuatie in grondwaterstand optrad, voldoende was om het gewicht van het pand te dragen zal dit ook het geval zijn tijdens de fluctuatie in grondwaterstand.

Bij een langdurige verandering in grondwaterstand zal de ongedraineerde schuifsterkte zich wel aanpassen. Indien, na de aanpassing de sterkte van de ondergrond niet voldoende is om het gewicht van het pand te dragen zal bezwijken van de grond onder het funderingselement optreden. Dergelijk type bezwijken is bij de beschouwde panden niet waargenomen. In dit hoofdstuk wordt mechanisme **A** dan ook niet verder uitgewerkt.

6.1.2 B. Samendrukking klei- en veenlaag als gevolg van verandering van de grondwaterstand

Een verlaging van de grondwaterstand zal over het algemeen leiden tot een verhoging van de korrelspanning. In samendrukbare lagen, zoals klei en veen, zal de verhoging van de korrelspanning gepaard gaan met een volume afname, samendrukking, van deze laag. De samendrukking van de laag zal zich uiten in zakkingen aan het maaiveld en ook in (ver)zakking van de funderingselementen.

Opgemerkt wordt dat in dit mechanisme de samendrukbare laag onder de grondwaterstand blijft, zie Figuur 6.1b. Er treedt alleen een verlaging in de grondwaterdruk op.

6.1.3 C. Krimp en oxidatie van veen als gevolg van uitdroging

Indien in de ondergrond veen aanwezig is en de grondwaterstand zodanig zakt dat de veenlaag geheel of gedeeltelijk boven de grondwaterstand komt te liggen, kan de veenlaag uitdrogen. Tijdens het uitdrogen zal het watergehalte afnemen. In het begin zal de afname in watergehalte gepaard gaan met een afname in porievolume en daarmee het veenvolume. Dit wordt aangeduid met krimp. In een later stadium zal lucht de poriën indringen. Door indringing van lucht, met name zuurstof, zal het organisch materiaal van de veenlaag oxideren. Dit kan leiden tot aanzienlijke volume verandering van de veenlaag en daarmee tot verzakking van het maaiveld.

Opgemerkt wordt dat dit mechanisme alleen tot verzakking van het funderingselement leidt indien de veenlaag zich onder het funderingselement uitstrekt en de uitdroging ook onder het funderingselement plaats vindt, zie Figuur 6.1c. Hierbij kan het voorkomen dat de oxidatie onder het funderingselement met name aan de rand van het funderingselement optreedt met scheefstand van het funderingselement tot gevolg. Als het veen zich niet onder de fundering bevindt kan krimp door uitdrogen en vervolgens oxidatie van veen wel voor zakking van de bodem in de kruipruimte leiden en van bestrating rond de panden.

6.1.4 D. Krimp in klei- of leemlaag als gevolg van uitdroging

Niet alleen veen, maar ook klei- en leemlagen kunnen een volumeverandering ondergaan bij uitdrogen. Net als bij mechanisme **C** geldt dat dit mechanisme alleen tot verzakking van het funderingselement kan leiden indien de uitdrogende laag tot onder het funderingselement uitstrekt, zie Figuur 6.1d. Hierbij kan het voorkomen dat uitdroging onder de rand van het funderingselement zich sneller voltrekt dan onder het midden, met scheefstand van het funderingselement tot gevolg.

Opgemerkt wordt dat de mate van krimp die een klei- of leemlaag bij uitdrogen ondergaat sterk kan verschillen. In hoeverre krimp van klei of leem de waargenomen verzakkingen kan verklaren, hangt niet alleen af van de mate waarin er verdroging is opgetreden maar ook van de eigenschappen van de aanwezige laag.

6.1.5 E. Zwel van klei- of leemlagen

Dit mechanisme kan worden gezien als het tegenovergestelde van mechanisme **D**. Indien onder het funderingselement zich een klei- of leemlaag bevindt dat enigszins is uitgedroogd, kan bij vernatting zwel optreden, zie Figuur 6.1e. Als gevolg van zwel zal het maaiveld omhoog komen. De zwel zal niet uniform optreden, mogelijk zal zwel aan de randen van het funderingselement zich sneller voltrekken dan aan het midden met scheefstand van de funderingselementen het gevolg zijn. Ook voor dit mechanisme geldt dat het alleen een verklaring voor de waargenomen schadebeelden kan zijn, indien de lagen zich tot onder het funderingselement uitstrekken.

6.1.6 F. Samendrukking klei- of veenlaag als gevolg van (nieuwe) belasting op de laag

Indien de samendrukbare laag wordt belast zal deze samendrukken met als gevolg dat het maaiveld zal zettingen. Als gevolg van kruip kunnen deze zettingen zich over een periode van tientallen jaren manifesteren. Indien later, na de oorspronkelijke bouw, een ophoging van tuin of erf wordt aangebracht of wanneer een aanbouw aan het pand wordt gerealiseerd of wanneer het pand zodanig wordt verbouwd dat het aanzienlijk zwaarder wordt, bijvoorbeeld bij het aanbrengen van een extra verdieping, zal de belasting op de samendrukbare laag, indien aanwezig, worden verhoogd en het zettingsproces zal opnieuw starten, met zakking van de funderingselementen tot gevolg. Indien er sprake is van een aanbouw verdient de wijze van fundering van de aanbouw nadere aandacht. Een verschil in funderingswijze en funderingsdiepte tussen de aanbouw en het oorspronkelijke pand kan leiden tot verschilzakking tussen beiden met scheurvorming van het pand tot gevolg, zie ook Figuur 6.1f. Ook indien het pand wordt verbouwd, zodanig dat het gewicht van het pand toeneemt, neemt de belasting op de samendrukbare laag toe, met mogelijk verzakking van het pand tot gevolg. Als gevolg van kruip van de samendrukbare lagen zullen de verzakkingen, als gevolg van het verhogen van de belasting op de laag, zich over een lange periode voordoen.

6.1.7 Samenhang / uitsluitel mechanismen

Naast de aanwezigheid van de samendrukbare lagen in de ondiepe ondergrond, speelt ook de verandering in grondwaterstand een rol. Opgemerkt wordt dat de mechanismen **A** en **E** door een verhoging van de grondwaterstand worden geïnitieerd, terwijl de mechanismen **B** tot en met **D** het gevolg zijn van een verlaging van de grondwaterstand. Hierdoor lijken de mechanismen **A** en **E** enerzijds en **B** tot en met **D** anderzijds elkaar tot op zekere hoogte uit te sluiten als verklaring voor de waargenomen schade. Hierbij wordt opgemerkt dat fluctuaties in waterstanden kunnen zijn opgetreden waardoor verschillende mechanismen na elkaar kunnen zijn geactiveerd. Een mogelijke voorbeeld hiervan is de mechanismen **D** en **E** die, als gevolg van seizoensinvloeden, beide kunnen voorkomen met zwel gedurende natte periode en krimp gedurende droge periode. In het activeren van mechanisme **F** speelt verandering van de grondwaterstand geen rol.

6.2 Toets aan de hand van het beschikbare onderzoek

Op een paar uitzonderingen na is in al het uitgevoerde grondonderzoek veen in de ondiepe ondergrond aangetroffen. Klei is alleen lokaal, met name in de noordelijke deel van het traject aangetroffen. In de meetraaien is ter hoogte van de kanaaldijk een veenlaag met een dikte van circa 1,0 tot 1,5 m dikte aangetroffen, uitzonderingen zijn Pand 9, meetraai 4, waar geen veen ter plaatse van de kanaaldijk is aangetroffen en tegenover Pand 15, meetraai 11, waar een veenlaagdikte tot 2 m is aangetroffen. Ter plaatse van de panden is in het algemeen een dunnere veenlaag aangetroffen.

Klei is slechts in zeer geringe mate aangetroffen. Alleen in meetraai 11, ter hoogte van Pand 15 en meetraai 12, ter hoogte van Pand 3 is klei van enige omvang in de ondiepe ondergrond aangetroffen.

Per pand is onderzoek gedaan naar de funderingswijze en funderingsdiepte. De resultaten zijn beschreven in hoofdstuk 7. In het funderingsonderzoek zijn de funderingswijze en de diepte van de funderingselementen vastgesteld. Op basis van de resultaten van het funderingsonderzoek kan worden vastgesteld in hoeverre er sprake is van aanwezigheid van klei- of veenlagen onder de funderingselementen. Uit dit onderzoek volgt een wisselend beeld.

Omdat het funderingsonderzoek laat zien dat een aantal panden geheel of gedeeltelijk op of boven de veenlaag is gefundeerd, wordt de aanwezigheid van samendrukbare lagen als verklaring van de waargenomen verzakkingen verder uitgewerkt. Dit geldt ook voor de panden die op de zandlaag zijn gefundeerd waarbij zakking van kruipruimte of keldervloer is waargenomen.

In de factsheets zijn de boorstaten van het uitgevoerde grondonderzoek ter plaatse van het pand en een geologische dwarsdoorsnede opgenomen. In de boorstaten is de tijdens de boring aangetroffen grondwaterstand ingetekend.

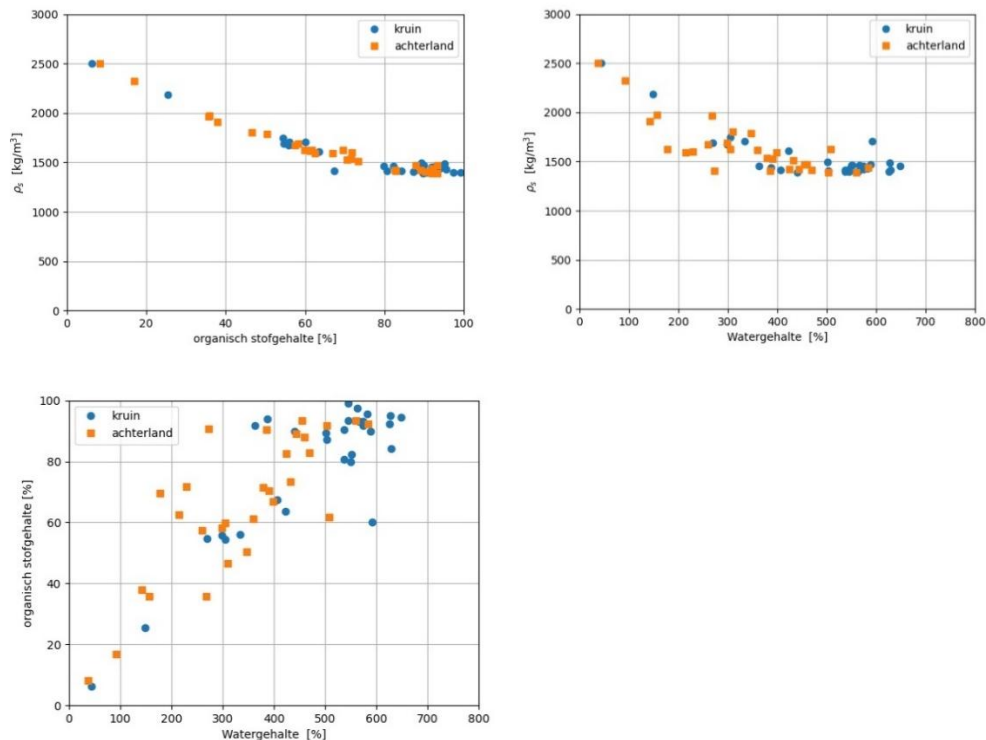
Het is opvallend dat de veenlaag grotendeels boven de grondwaterstand is aangetroffen. In een aantal gevallen is een deel van de veenlaag onder de grondwaterstand gelegen of ligt de grondwaterstand ter hoogte van de onderzijde van de veenlaag. Slechts in drie boringen is de veenlaag onder de grondwaterstand gelegen. Overigens fluctueert de waterstand, en kan het goed zijn dat die in de winter anders is. De grondwaterstanden die in de boorprofielen zijn gegeven komen goed overeen met de grondwaterstanden die met behulp van de peilbuizen zijn gemeten.

Opvallend is ook dat het veen, ondanks dat het boven de grondwaterstand is gelegen niet is ge-oxideerd. Dit is geconstateerd aan de hand van kleur en structuur van het veen. Dit is opgenomen in de laboratorium beschrijvingen van de boorkernen, die zijn opgenomen in de factsheets. Alleen in Boring B01-01, de boring ter plaatse van de kruin van de kanaaldijk in meetraai 1, ter hoogte van Pand 20, is de bovenste 4 cm van het veen beschreven als amorf (ge-oxideerd). In de andere boringen is dit niet aangetroffen. Verwacht mag worden dat bij indringen van lucht, met name zuurstof, oxidatiedirect optreedt. Dit is ook in het laboratorium waargenomen waar het opgeboorde veen, na het openmaken van de monsterbussen, in de loop van de tijd verkleurde. Uit het feit dat het veen weliswaar boven de grondwaterstand ligt, maar niet is verweerd, volgt de conclusie dat de toplaag het veen dusdanig afdekt dat toestroom van lucht, met name zuurstof, niet optreedt.

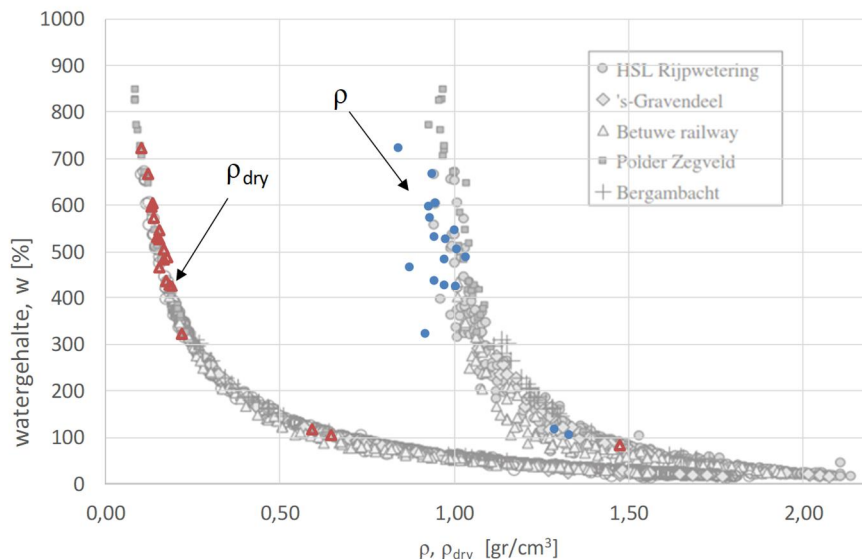
6.3 Nadere beschouwing veenlaag

Om een indruk te krijgen van de eigenschappen van het veen is van het opgeboorde materiaal het watergehalte, w , het organisch stof gehalte, OC en de dichtheid van de vaste stof, ρ_s , bepaald. Figuur 6.2 geeft een indruk van de resultaten. In deze grafieken is onderscheid gemaakt tussen monsters uit boringen die ter plaatse van de kade zijn uitgevoerd, aangeduid met kruin en de monsters uit boringen die tussen de panden zijn uitgevoerd, aangeduid met achterland. De grafieken laten zien dat er geen verschil is in watergehalte, dichtheid vaste stof en organisch stof gehalte van veen ter plaatse van de kade en het veen dat in de ondergrond tussen de panden is aangetroffen.

Figuur 6.2 toont een duidelijke relatie tussen organisch stofgehalte en dichtheid vaste stof. Voor laag organisch stofgehalte wordt een dichtheid gevonden die aansluit bij dichtheid van vaste stof voor klei en zand, $\rho_{s, \text{klei, zand}} = 2650 \text{ kg/m}^3$. Voor hoog organisch stofgehalte wordt gevonden $\rho_s = 1450 \text{ kg/m}^3$. Deze waarde sluit goed aan bij waarden die elders zijn gerapporteerd, bv Den Haan & Kruse (2007).



Figuur 6.2 Overzicht resultaten classificatieproeven, links boven: dichtheid vast stof, ρ_s versus organisch stofgehalte, OC, rechtsboven: dichtheid vaste stof, ρ_s , versus watergehalte, w, Onder: organisch stofgehalte, OC versus watergehalte, w



Figuur 6.3 Watergehalte als functie van de droge dichtheid, ρ_{dry} respectievelijk veldvochtige dichtheid, ρ , vergeleken met data uit Den Haan & Kruse (2007)

In een tweede serie proeven zijn de veldvochtige en droge dichtheden gemeten. Figuur 6.3 geeft een vergelijking tussen de meetdata die in dit onderzoek is verzameld en eerder gepubliceerde waarden uit Den Haan & Kruse (2007). Voor de droge dichtheid, ρ_{dry} , wordt een duidelijke relatie met het watergehalte gevonden die goed overeenkomt met de literatuurwaarden. Daarnaast is ook de dichtheid bepaald bij het actuele watergehalte. Deze dichtheid wordt hierna aangeduid met bulk dichtheid, ρ . Van enkele monsters is de bulk dichtheid lager dan die van water. Dit wordt verklaard door dat de monsters mogelijk niet volledig verzadigd waren op het moment van de meting.

De gemiddelde waarde en variatiecoëfficiënt van de classificatieparameters voor het veen zijn gegeven in Tabel 6.1.

Tabel 6.1 Samenvatting classificatie parameters veen

Parameter	Eenheid	Aantal metingen	Gemiddelde	Variatiecoëfficiënt
watergehalte, w	[%]	73	44,3	0,32
dichtheid vast stof, ρ_s	[g/cm ³]	55	1,54	0,10
organisch stof gehalte, OC	[%]	55	76,4	0,23
droge dichtheid, ρ_{dry}	[g/cm ³]	18 ^a (16) ^b	0,21 ^a (0,16) ^b	0,73 ^a (0,18) ^b
bulk dichtheid, ρ	[g/cm ³]	18	0,99	0,13

a) Eén monster met watergehalte, $w = 81$ % is geclassificeerd als klei en in de analyse niet meegenomen, maar wel wordt wel getoond in Figuur 6.3.

b) De waarde tussen haakjes worden gevonden indien twee monsters met watergehalte $w \leq 120$ % buiten beschouwing worden gelaten.

6.4 Samendrukking veenlaag door spanningsverhoging

6.4.1 Toelichting indicatieve berekeningen

Om een indruk te geven van de mate van samendrukking van de samendrukbare lagen in de ondergrond als gevolg van belastingen op die lagen zijn enkele indicatieve berekeningen uitgevoerd. Het doel van de berekeningen is een indruk te krijgen van de orde van grootte van de samendrukking en de daar uit volgende zakkings van het maaiveld en de panden.

Benadrukt wordt dat het indicatieve berekeningen betreft. De eventueel optredende zakkings van de panden als gevolg van samendrukking van lagen in de ondergrond is sterk afhankelijk van de specifieke situatie van de panden, zoals de funderingswijze en funderingsdiepte, gewicht van het pand, de exacte opbouw van de ondergrond etc. In dit hoofdstuk wordt aan de hand van de indicatieve berekeningen de orde van grootte aangegeven van de zakkings als gevolg van het belasten van samendrukbare lagen. In hoofdstuk 7 wordt aangegeven wat de berekende zettingen betekenen in relatie tot de waargenomen schade.

In de berekeningen is onderscheid gemaakt in twee situaties. De eerste situatie betreft zakkings van het maaiveld dat naast de funderingselementen optreedt. Hier speelt het gewicht van de panden geen rol. Het gaat om zakkings van het maaiveld als gevolg van ophogen van het terrein rondom de panden. Ook het (aan)vullen van kelders en kruipruimten valt hieronder. Dit is beschreven in paragraaf 6.4.2. De tweede situatie betreft de samendrukking van de samendrukbare lagen als gevolg van het gewicht van het pand zelf. De panden, die in dit rapport nader worden onderzocht zijn tientallen jaren oud. De indicatieve berekeningen geven een indruk in hoeverre kruip van de samendrukbare lagen nu nog een rol zou kunnen spelen. Daarnaast is bij sommige panden een uitbouw van meer recente datum aanwezig. Deze berekeningen zijn beschreven in paragraaf 6.4.4

6.4.2 Zetting als gevolg van grondwaterstandsverandering

Paragraaf 7.2.5 beschrijft de mogelijke grondwaterstandsveranderingen die zich in het recente verleden kunnen hebben voorgedaan. In deze paragraaf wordt nader ingegaan op de invloed van de grondwaterstandsverandering op de samendrukking van de samendrukbare lagen. Hierbij wordt alleen gekeken naar mogelijke grondwaterstandsverlagingen. Anders dan grondwaterstandsverhogingen zullen grondwaterstandsverlagingen leiden tot een toename van effectieve spanning en daarmee leiden tot samendrukking van samendrukbare lagen. Paragraaf 7.2.5 beschrijft dat een verlaging van de grondwaterstand als gevolg van het vervangen van de damwanden langs het kanaal maximaal 10 cm is. Een mogelijke grondwaterstandsverlaging als gevolg van droogte is maximaal 30 cm.

Met betrekking tot zetting als gevolg van grondwaterstandsverlaging kunnen 3 situaties worden onderscheiden:

- De grondwaterstandsverandering speelt zich boven de samendrukbare laag af.
- De grondwaterstandsverandering speelt zich in de samendrukbare laag af.
- De grondwaterstandsverandering speelt zich onder de samendrukbare laag af.

Deze drie situaties worden in de onderstaande tekst nader besproken.

De grondwaterstandsverlaging boven de samendrukbare laag gelegen

Uit het grondonderzoek is gebleken dat deze situatie zich niet voordoet. De aangetroffen ligging van de grondwaterstand is zodanig dat deze, gezien de relatief geringe verwachte fluctuaties van 10, respectievelijk 30 cm zich ook in het recente verleden niet boven de samendrukbare laag heeft gelegen.

Een grondwaterstandsverandering van de 30 cm in zand zal in de ondergelegen lagen leiden tot een toename in effectieve spanning van circa 2 kN/m². Paragraaf 6.4.2 beschrijft zettingsberekeningen als gevolg van het ophogen van het terrein met een halve meter zand, een spanningstoename van circa 8,5 kN/m². Op basis van de berekeningsresultaten uit paragraaf 6.4.3 kan worden gesteld dat de zettingen als gevolg van een 30 cm grondwaterstandsverandering, een spanningsverandering van 2 kN/m², gering tot verwaarloosbaar is.

De grondwaterstandsverlaging in de samendrukbare laag

Indien de samendrukbare laag uit veen bestaat zal de toename in effectieve spanning als gevolg van de grondwaterstandsverlaging nihil zijn. Dit is het gevolg van het lage volume gewicht van het veen dat praktisch gelijk is aan het volume gewicht van water, zie paragraaf 6.3. Hierdoor wordt, voor deze situatie, geen samendrukking als gevolg een verandering in effectieve spanningen verwacht. Wel kan door een verlaging in het watergehalte, als gevolg van de grondwaterstandsverlaging in de veenlaag, krimp van de veenlaag optreden. Zetting als gevolg van krimp wordt besproken in paragraaf 6.5.

Indien samendrukbare laag uit klei bestaat zal enig verandering van korrelspanning optreden. Afhankelijk van het volume gewicht van het veen zal in de orde van 2 à 3 kN/m² zijn. Ook hier geldt dat de zetting als gevolg van deze geringe toename van effectieve spanning gering tot verwaarloosbaar is.

De grondwaterstandsverlaging onder de veenlaag

De derde mogelijkheid is dat de grondwaterstandsverlaging zich onder de veenlaag afspeelt. Dit is de situatie die op de meeste locaties langs kanaal is aangetroffen. In dat geval zal de grondwaterstandsverlaging geen gevolgen hebben voor de effectieve spanningen in de veenlaag en daarmee niet de oorzaak zijn van samendrukking van de veenlaag.

Als een fundering onder de veenlaag is aangelegd zal bij een verlaging van de grondwaterstand de funderingsdruk wel toenemen. In paragraaf 7.2.5 wordt hierop ingegaan.

Geconcludeerd kan worden dat voor de grondwaterstandverlagingen zoals afgeleid in paragraaf 7.2.5 geen significante samendrukking van de samendrukbare lagen verwacht mag worden.

6.4.3 Zetting als gevolg van ophogingen van het terrein rond de panden

Belastingen op het maaiveld zullen spanningsveranderingen in de ondergrond tot gevolg hebben die leiden tot samendrukking van veen- of kleilagen. In hoeverre ter plaatse van de panden belastingsveranderingen in de ondergrond hebben voorgedaan zal per locatie verschillen. In deze paragraaf wordt een indicatie gegeven voor de orde van grootte van de zakking die een mogelijke belasting op het maaiveld tot gevolg kan hebben.

De samendrukking van de veenlaag vertaalt zich in zetting van het maaiveld. Boven de veenlaag is een zandige toplaag aanwezig. De stijfheid van deze zandige toplaag zal aanzienlijk groter zijn dan de stijfheid van de veenlaag. In de hierna beschreven analyse is de samendrukking van de grondlagen die boven de veenlaag aanwezig dan ook verwaarloosd.

De analyse richt zich op de zettingen die naast de funderingselementen optreden. Het betreft de zetting die zich in tuinen, erven, kruipruimte of kelders voordoet, indien daar een belastingstoename is opgetreden. In de berekening van de samendrukking speelt de initiële waarde van de effectieve spanning en de toename van de effectieve spanning een belangrijke rol. De initiële effectieve spanning wordt bepaald door de dikte en het gewicht van de toplaag en de veenlaag. Door alleen de samendrukking naast de panden in beschouwing te nemen speelt het gewicht van de panden geen rol. In de boringen varieert de dikte van de toplaag van enkele decimeters, zoals in boring B09-06 tot ruim 2 m in boring B11-03. De veenlaagdikte varieert van enkele decimeters, zoals in boring B08-03, tot ruim 1,5 m in enkele boringen zoals in boring B11-04. Op basis van de boringen is gekozen de volgende twee situaties te beschouwen:

- Situatie A, bestaande uit een toplaag van 1,5 m dik in combinatie met een veenlaag van 0,5 m. Deze situatie zal, voor een bepaalde belasting en grondeigenschappen een ondergrens van de verwachte zetting opleveren.
- Situatie B, bestaande uit een toplaag van 0,5 m dik in combinatie met een veenlaagdikte van 1 m. Deze situatie zal, voor een bepaalde belasting en grondeigenschappen een bovengrens van de verwachte zetting opleveren.

In het onderzoek zijn geen laboratoriumproeven uitgevoerd voor het bepalen van de stijfheidseigenschappen van de veenlaag. Om een indruk te krijgen van de stijfheid van veen is gebruik gemaakt van de database van resultaten van samendrukkingsproeven die in het Deltares laboratorium zijn uitgevoerd. In deze database zijn correlaties tussen de stijfheidsparameters en het watergehalte opgenomen. Op basis van het gemiddelde watergehalte uit Tabel 6.1 zijn de relevante stijfheidseigenschappen bepaald.

Naast laagdikte en stijfheidseigenschappen speelt belastinggeschiedenis een belangrijke rol in de bepaling van de samendrukking van de laag. De belastingsgeschiedenis wordt uitgedrukt in de grensspanning of de overconsolidatieratio, OCR, waarbij de OCR de verhouding geeft tussen de grensspanning en de actuele effectieve spanning. Er is geen informatie over de grensspanning of OCR bekend. Vanwege het feit dat het bebouwd gebied betreft en vanwege de lage grondwaterstand mag een relatief hoge grensspanning worden verwacht. In de analyses is een range van OCR-waarden tussen de 1,5 en 2,25 toegepast.

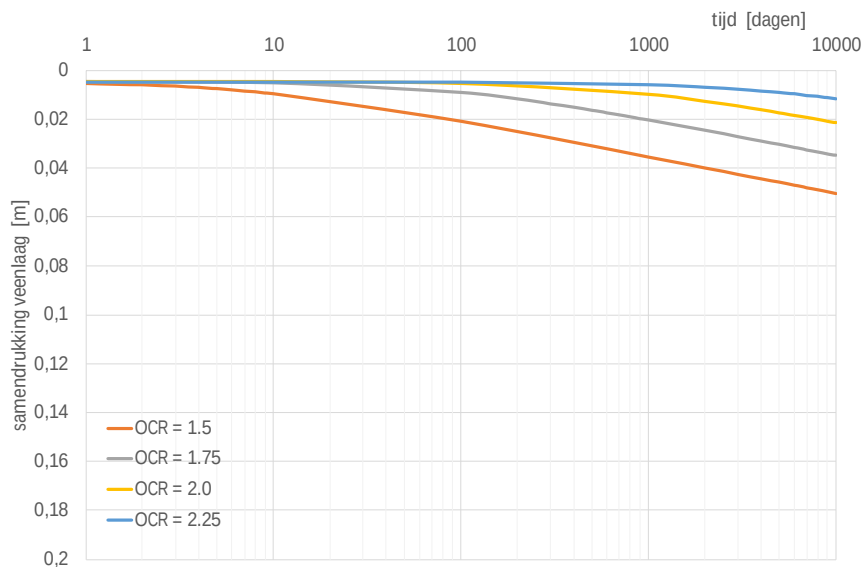
De samendrukking van de veenlaag is berekend met het isotachen model, zoals beschreven in Den Haan (1992), Den Haan & Sellmeijer (2000), Visschedijk (2010) en anderen. Hierbij is gebruik gemaakt van lineaire rek. Als belasting is $8,5 \text{ kN/m}^2$ aangehouden, dit komt overeen met een zandlaag van 0,5 m dik.

Tabel 6.2 Parameters toegepast in de indicatieve zettingsberekening.

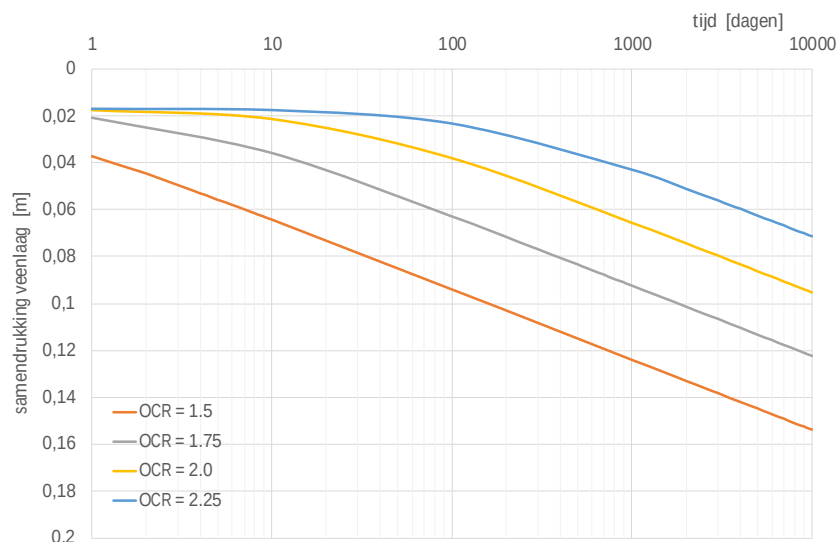
Parameter	Eenheid	Waarde
dikte toplaag, h_{toplaag}	[m]	1,5 – 0,5
dikte veenlaag, h_{veen}	[m]	0,5 – 1,0
volume gewicht toplaag, γ_{toplaag}	[kN/m ³]	17,0
volume gewicht veenlaag, γ_{veen}	[kN/m ³]	10,0
samendrukkingsratio, RR	[-]	0,08
samendrukkingsratio, CR	[-]	0,55
kruipparameter, C_{α}	[-]	0,03
overconsolidatieratio, OCR	[-]	1,5 - 2,25

Figuur 6.4 en Figuur 6.5 geven de resultaten van de indicatieve zettingsberekeningen. De zettingen zijn berekend voor een periode van 10 000 dagen, circa 27 jaar. In de berekeningen is consolidatie niet in beschouwing genomen omdat ten eerste de veenlaag het grootste deel van de tijd boven de grondwaterstand ligt en ten tweede omdat het in rekening brengen van de consolidatie geen of slechts een zeer geringe invloed heeft op de zettingsgrootte na 27 jaar.

Voor situatie A in combinatie met een initiële OCR = 2,25 volgt een totale zetting na 10 000 dagen in de orde van 0,01 m. Voor situatie B, in combinatie met een initiële OCR = 1,5 volgt een totale zetting na 10 000 dagen in de orde van 0,15 m. Zoals aangegeven worden de situaties A en B als redelijke onder -, en bovengrens beschouwd.



Figuur 6.4 Indicatieve zettingsberekening voor situatie A en een belasting van $8,5 \text{ kN/m}^2$



Figuur 6.5 Indicatieve zettingsberekening voor situatie B en een belasting van 8,5 kN/m²

Behalve naar de totale zetting is ook gekeken naar de zettingssnelheden die optreden tijdens het zettingsproces. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 6.3. Benadrukt wordt dat het hier gaat om indicatieve berekeningen die een orde van grootte weergeven, uitgaande van een belasting op het maaiveld van een halve meter opgebracht zand, 8,5 kN/m². Tabel 6.3 geeft alleen de waarde die is bepaald voor een OCR = 2,0.

Tabel 6.3 Indicatieve zettingssnelheden, voor situatie A en B, bij een belasting van 8,5 kN/m² en initiële OCR = 2,0.

	A [mm/jaar]	B [mm/jaar]
na 5 jaar	2,57	0,90
na 10 jaar	1,29	0,53
na 15 jaar	0,86	0,38
na 20 jaar	0,65	0,29
na 27 jaar (10 000 dagen)	0,47	0,22

6.4.4 Zettingen als gevolg van het gewicht van de panden

De funderingselementen van de panden leiden tot hogere spanningen in de ondergrond dan de ophoging die in de vorige paragraaf is beschreven. Deze hogere spanningen zijn geconcentreerd over een kleiner oppervlak, het oppervlak van de poer of funderingsstrook. Aan de hand van resultaten van de inventarisatie van de panden, zoals beschreven in hoofdstuk 7, zijn enkele kenmerkende funderingsdiepten, afmetingen van funderingselementen en grondopbouw vastgesteld. Hierbij is specifiek gekeken naar situaties waar samendrukbare lagen een rol spelen. Voor die situaties waar de panden op een zandlaag zijn gefundeerd en ook op enige diepte daaronder geen samendrukbare lagen zich voordoen, zal de zakking nihil zijn. De toegepaste schematisaties zijn in de onderstaande tabellen weergegeven. Opgemerkt wordt dat in de inventarisatie, funderingselementen zowel boven de veenlaag als onder de veenlaag zijn aangetroffen. Beide opties zijn in de berekeningen meegenomen.

In de vorige paragraaf is alleen samendrukking van de veenlaag in beschouwing genomen. In deze paragraaf is ook de zakking beschouwd van panden waarvan de funderingselementen op een dunne laag siltig, kleiig zand staat, dan wel in een zandlaag

boven een kleilaag staat. Tabel 6.4 geeft de gehanteerde samendrukkingsindices van deze lagen. De eigenschappen van het veen zijn gelijk gehouden aan de waarden die in de vorige paragraaf zijn toegepast. Voor klei en siltig, kleiig zand is wederom gebruik gemaakt van de Deltares database.

Tabel 6.4 Toegepaste eigenschappen voor de verschillende samendrukbare lagen

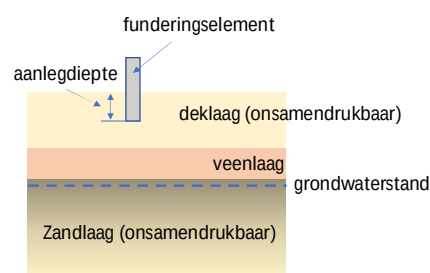
Parameter	Eenheid	Veen	Klei	Siltig, kleiig zand
samendrukkingsindex herbelasten, RR	[-]	0,08	0,020	0,0073
samendrukkingsindex, CR	[-]	0,55	0,250	0,0511
kruipparameter, C_α	[-]	0,03	0,015	0,0020
volume gewicht, γ	[kN/m ³]	10	15	17 (onverzadigd) 20 (verzadigd)

In de pandbelasting is onderscheid gemaakt in panden die bestaande uit een enkele bouwlaag en panden die bestaan uit een dubbele bouwlaag.

Aan de hand van de inventarisatie van de panden, zoals beschreven in hoofdstuk 7, zijn vier karakteristieke situaties bepaald. Hieronder volgen de resultaten van de indicatieve berekeningen per situatie.

Situatie 1, Funderingselement, bestaande uit een strokenfundering boven de veenlaag

De onderstaande tabellen geven de resultaten van de indicatieve zettingsberekening. In de berekeningen is gevarieerd met funderingsdiepte, belastingtype, dikte van de deklaag en dikte veenlaag. De zetting is berekend voor 10 000 dagen, circa 27 jaar, na aanleg en 36 500 dagen, 100 jaar, na aanleg. Ter illustratie is voor enkele van de berekende situaties de gemiddelde zakkingsnelheid over het laatste jaar weergegeven. De grondwaterstand is aangehouden op mv – 2 m.



Figuur 6.6 Schets situatie 1

Tabel 6.5 Resultaten indicatieve zettingsberekening, berekende zakking van het pand in [mm] na 27 jaar, waarbij de funderingselementen boven de veenlaag staan

Belastingtype		Enkele bouwlaag		Dubbele bouwlaag	
aanlegdiepte [mv m]		- 0,5	-1,0	- 0,5	-1,0
dikte deklaag [m]	dikte veenlaag [m]				
1,5	0,50	60	78 ^a	93	125
	0,75	80	98	127	135 ^d
	1,00	97	112	157	197 ^e
2,0	0,50	38	34 ^b	62	69
	0,75	54	45	88	95
2,5	0,25	13	8 ^c	22	21
	0,50	24	14	42	38

^a gemiddelde zakkingsnelheid in het laatste jaar is 0,24 mm/jaar

^b gemiddelde zakkingsnelheid in het laatste jaar is 0,23 mm/jaar

^c gemiddelde zakkingsnelheid in het laatste jaar is 0,08 mm/jaar

^d gemiddelde zakkingsnelheid in het laatste jaar is 0,36 mm/jaar

^e gemiddelde zakkingsnelheid in het laatste jaar is 0,48 mm/jaar

Tabel 6.6 Resultaten indicatieve zettingsberekening, berekende zakking van het pand in [mm] na 100 jaar, waarbij de funderingselementen boven de veenlaag staan

Belastingtype		Enkele bouwlaag		Dubbele bouwlaag	
aanlegdiepte [mv m]		- 0,5	- 1,0	- 0,5	-1,0
dikte deklaag [m]	dikte veenlaag [m]				
1,5	0,50	68	86 ^a	101	133
	0,75	93	111	14	147 ^d
	1,00	114	128	174	214 ^e
2,0	0,50	47	42 ^b	71	77
	0,75	66	57	101	108
2,5	0,25	17	11 ^c	26	25
	0,50	32	20	50	46

^a gemiddelde zakkingsnelheid in het laatste jaar is 0,065 mm/jaar

^b gemiddelde zakkingsnelheid in het laatste jaar is 0,065 mm/jaar

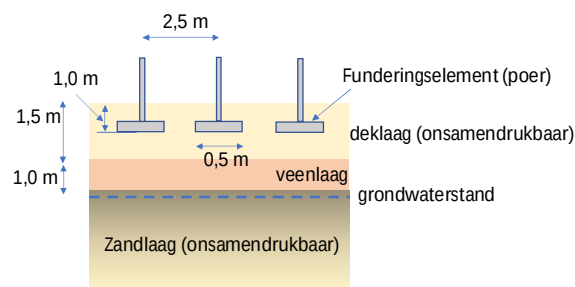
^c gemiddelde zakkingsnelheid in het laatste jaar is 0,030 mm/jaar

^d gemiddelde zakkingsnelheid in het laatste jaar is 0,098 mm/jaar

^e gemiddelde zakkingsnelheid in het laatste jaar is 0,131 mm/jaar

Situatie 2, Funderingselement, bestaande uit poeren, boven de veenlaag

In de tweede variant gaat uit van een fundering op poeren, met afmetingen $0,5 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$ en hart op hart afstand van $2,5 \text{ m}$. Met betrekking tot de grondopbouw is uitgegaan van een $1,5 \text{ m}$ dikke deklaag en een veenlaag dikte van $1,0 \text{ m}$. De grondwaterstand is aangehouden op $\text{mv} - 2,5 \text{ m}$. Tabel 6.7



geeft de totale zetting in cm, Tabel 6.8 de gemiddelde zakkingsnelheid over het laatste jaar in mm/jaar. De gepresenteerde zakkingsnelheden zijn het gevolg van de optredende kruip in de veenlaag. De optredende kruip is onafhankelijk van de opgelegde belasting. Om die reden wordt dezelfde zakkingsnelheid voor de poer gevonden als voor het maaiveld tussen de poeren en worden dezelfde zakkingsnelheden voor beide belastingtypen gevonden. *Figuur 6.7 Principeschets situatie 2*

Tabel 6.7 Resultaten indicatieve zettingsberekening, zetting in [mm], voor een fundering op poeren

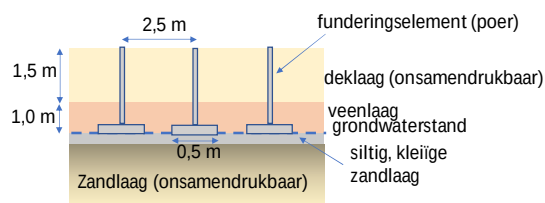
Belastingtype	Enkele bouwlaag		Dubbele bouwlaag	
tijd na aanleg [dagen]	10 000	36 500	10 000	36 500
zakking poer	170	187	230	240
midden tussen de poeren	53	71	63	80

Tabel 6.8 Resultaten indicatieve zettingsberekening, gemiddelde zettingssnelheid van het laatste jaar in [mm/jaar], voor een fundering op poeren

Belastingtype	Enkele bouwlaag		Dubbele bouwlaag	
tijd na aanleg [dagen]	10 000	36 500	10 000	36 500
zakking poer	0,48	0,13	0,48	0,13
midden tussen de poeren	0,47	0,13	0,48	0,13

Situatie 3, Fundering bestaande uit poeren op siltige zandlaag

Op sommige locaties langs het onderzochte traject is onder de veenlaag een sterk siltige / sterk kleiige zandlaag aangetroffen. Vanwege de siltige en kleiige bijmengsel in het zand is deze zandlaag enigszins samendrukbaar. Voor deze situatie is de ondergrond geschematiseerd met een $1,5 \text{ m}$ dikke deklaag, gevolgd door 1 m dikke veenlaag met daaronder de siltig, kleiige zandlaag met een dikte van $0,25$ respectievelijk $0,50 \text{ m}$. De funderingspoeren hebben een afmetingen van $0,5 \times 0,5 \text{ m}$ met een hart op hart afstand



van 2,5 m resp. 1,25 m. Het aanlegniveau van de poeren is mv – 2,5 m.

Figuur 6.8 Principeschets situatie 3

De grondwaterstand is aangenomen op mv – 2,5 m. De onderstaande tabellen laten zien dat de berekende zakking van de poeren aanzienlijk geringer is dan de berekende zakking van het maaiveld tussen de poeren. Dit verschil in berekende zakking tussen de poeren en het maaiveld tussen de poeren wordt veroorzaakt door de veenlaag. De veenlaag ligt boven de funderingsdiepte van de poeren, zie Figuur 6.8 en draagt wel bij aan de zakking van het maaiveld tussen poeren, maar draagt niet bij aan de zakking van de poeren.

Tabel 6.9 Resultaten indicatieve zettingsberekening, zetting in [mm], voor een fundering op poeren op siltige, kleiige zandlaag h.o.h. afstand 2,5 m

Dikte siltige, kleiige zandlaag [m]	0,25				0,50			
	enkele bouwlaag		dubbele bouwlaag		enkele bouwlaag		dubbele bouwlaag	
belastingtype	10 000	36 500	10 000	36 500	10 000	36 500	10 000	36 500
tijd na aanleg [dagen]	12	12	15	15	22	22	27	27
zakking poer [mm]	38	55	38	55	38	55	38	55
maaiveld midden tussen de poeren [mm]								

Tabel 6.10 Resultaten indicatieve zettingsberekening, gemiddelde zettingssnelheid van het laatste jaar in [mm/jaar], voor een fundering op poeren op siltige, kleiige zandlaag

Dikte siltige, kleiige zandlaag [m]	0,25				0,50			
	enkele bouwlaag		dubbele bouwlaag		enkele bouwlaag		dubbele bouwlaag	
belastingtype	10 000	36 500	10 000	36 500	10 000	36 500	10 000	36 500
tijd na aanleg [dagen]	0,1	0	0	0,1	0,1	0	0,1	0
zakking poer [mm]	0,46	0,13	0,46	0,13	0,46	0,13	0,46	0,13
maaiveld midden tussen de poeren [mm]								

Tabel 6.11 Resultaten indicatieve zettingsberekening, zetting in [mm], voor een fundering op poeren op siltige, kleiige zandlaag h.o.h. afstand 1,25 m

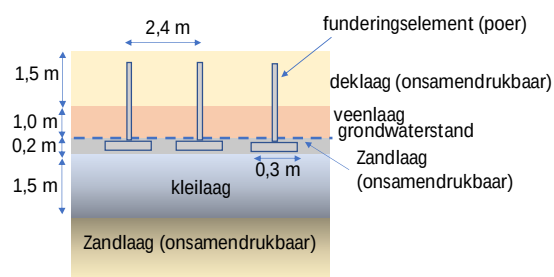
Dikte siltige, kleiige zandlaag [m]	0,25				0,50			
	belastingtype							
	enkele bouwlaag	dubbele bouwlaag	enkele bouwlaag	dubbele bouwlaag	enkele bouwlaag	dubbele bouwlaag	enkele bouwlaag	dubbele bouwlaag
tijd na aanleg [dagen]	10 000	36 500	10 000	36 500	10 000	36 500	10 000	36 500
zakking poer [mm]	9	9	11	11	16	16	20	20
maaiveld midden tussen de poeren [mm]	38	55	38	55	38	55	38	55

Tabel 6.12 Resultaten indicatieve zettingsberekening, gemiddelde zettingssnelheid van het laatste jaar in [mm/jaar], voor een fundering op poeren op siltige, kleiige zandlaag

Dikte siltige, kleiige zandlaag [m]	0,25				0,50			
	belastingtype							
	enkele bouwlaag	dubbele bouwlaag	enkele bouwlaag	dubbele bouwlaag	enkele bouwlaag	dubbele bouwlaag	enkele bouwlaag	dubbele bouwlaag
tijd na aanleg [dagen]	10 000	36 500	10 000	36 500	10 000	36 500	10 000	36 500
zakking poer [mm]	0,1	0	0	0,1	0,1	0	0,1	0
maaiveld midden tussen de poeren [mm]	0,32	0,13	0,32	0,13	0,32	0,13	0,32	0,13

Situatie 4, Fundering bestaande uit poeren op een kleilaag

In de laatste variant zijn de poeren op een zandlaagje onder de veenlaag gefundeerd, maar volgt onder het zandlaagje nog een kleilaag. De ondergrond is opgebouwd uit een 1,5 m dikke deklaag, gevolgd door een 1 m dikke veenlaag, 0,2 m dikke zandlaag en vervolgens 1,5 m dikke kleilaag. De grondwaterstand is gelegen op mv – 2,5 m. De funderingsdiepte is mv -2,65 m. De poeren hebben een afmeting van 0,3 × 1,4 m en een hart op hart afstand van 2,4 m. Deze situatie is alleen doorgerekend voor een belastingstype met een dubbele bouwlaag.



Figuur 6.9 Principeschets situatie 4

Tabel 6.13 Resultaten indicatieve zettingsberekening, voor funderingspoeren op een kleilaag

	Zetting [mm]		Zettingssnelheid laatste jaar [mm/jaar]	
	10 000	36 500	10 000	36 500
tijd na aanleg [dagen]	10 000	36 500	10 000	36 500
zakking poer [mm]	226	239	0,4	0,1
midden tussen de poeren [mm]	88	116	0,8	0,2

De vier berekende situaties geven een indruk van de orde van grootte van de zetting die als gevolg van de aanleg van het pand zelf is opgetreden in de loop der tijd. Benadrukt wordt dat het hier om indicatieve berekeningen gaat, bedoeld om een orde van grootte te kunnen bepalen. De totaal opgetreden zetting als gevolg van het gewicht van de panden zelf ligt in de orde van enkele centimeters. Wanneer de panden boven de samendrukbare laag zijn gefundeerd kan de zetting in de loop der tijd zijn opgelopen tot een orde grootte van enkele decimeters. De actuele resterende zettingssnelheid als gevolg van de aanleg van de panden is in de orde van enkele tienden van millimeters per jaar. Benadrukt wordt dat indien de grond opnieuw belast wordt, bijvoorbeeld bij de realisatie van een uitbouw van een pand het zettingsproces ter plaatse van de uitbouw opnieuw start. Hierdoor kunnen zettingsverschillen tussen de aanbouw en het pand zelf ontstaan, met zettingsschade tot gevolg.

De indicatieve berekeningen laten ook zien dat voor die situaties waar de funderingspoeren onder een veenlaag staan er een zettingsverschil optreedt tussen de poeren zelf en het maaiveld tussen de poeren, zie bijvoorbeeld Tabel 6.9 en

Tabel 6.11. Dit verschil kan verklaring geven voor verzakkingen in kelders en kruipruimten van panden die zelf weinig zakking ondergaan. De consequenties van de indicatieve zettingsberekeningen voor de situaties bij de verschillende panden is besproken in hoofdstuk 7.

6.5 Volumeverandering veenlaag door krimp of oxidatie

Als gevolg van uitdroging zal het watergehalte in veen afnemen. Indien, bij volledig verzadigd veen, het porievolume eveneens afneemt, omdat er geen lucht kan toetreden, zal het volume van het veen afnemen. In dit onderzoek wordt deze volume afname aangeduid met krimp. Het verschil tussen krimp en oxidatie is dat bij oxidatie organisch materiaal wordt afgebroken onder inwerking van zuurstof en dat het veen niet meer verzadigd is. Bij krimp blijft het materiaal verzadigd en neemt het porievolume af met afnemend watergehalte.

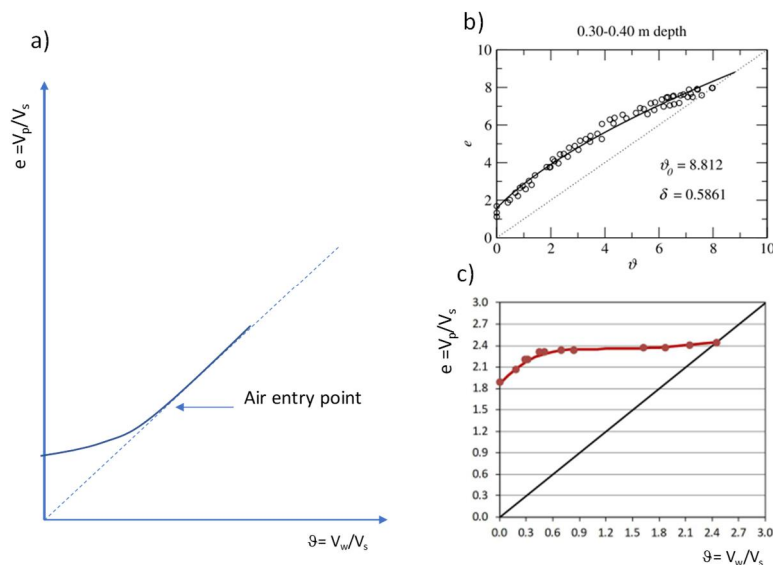
In de internationale vakliteratuur is relatief veel gepubliceerd over krimp van kleisoorten. Over krimp van veen is minder bekend. Het krimpgedrag kan met een krimpcurve, shrinkage curve, worden weergegeven. Figuur 6.10a geeft een principeschets van een krimpcurve. Het is gebruikelijk om in een dergelijke curve de void ratio uit te zetten tegen het watergehalte. Hier wordt veelal het volumetrisch watergehalte, $\mathcal{G}$, voor gebruikt:

$$\mathcal{G} = \frac{V_w}{V_s}$$

Waarin:

$\mathcal{G}$ = volumetrisch watergehalte.
 V_w = volume water.
 V_s = volume vaste stof.

Zolang het monster verzadigd blijft zullen de actuele e en $\mathcal{G}$ combinaties op de 1:1 lijn in Figuur 6.10a zijn gelegen, immers de afname in porievolume is direct gerelateerd aan een afname in watergehalte. Het verlagen van het watergehalte door uitdroging gaat gepaard met een toename van zuigspanning in de grond. Bij een bepaalde zuigspanning zal lucht binnenkomen. Dit wordt aangeduid met het *air entry point*. Vanaf dit punt zal in de krimpcurve in Figuur 6.10a de e en $\mathcal{G}$ combinaties af gaan wijken van de 1:1 lijn. In Figuur 6.10b en c zijn voorbeelden van krimpcurven voor veen weergegeven.



Figuur 6.10 Krimpcurve voor veen, a) principeschets, b) meetdata voor veen, Camporese et al. (2006) c) meetdata veen (Bijlage I: Verbreding Wilhelminakanaal Tilburg; Onderzoek naar krimp van veen en leemlagen en oxidatie van veenlagen. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 2826)

Bij het uitdrogen van initieel verzadigd veen zal eerst krimp optreden en pas nadat een bepaalde mate van uitdroging is bereikt zal het veen oxideren. Omdat oxidatie van veen beter herkenbaar is dan een porievolumenafname als gevolg van krimp wordt in deze paragraaf eerste oxidatie besproken en daarna krimp.

Zodra veen in contact komt met lucht, met name zuurstof, zal het veen oxideren. De organische componenten van het veen zullen oxideren en er treedt een grote volumeverandering van het veen op. In de eerste stadium van verwerking zal het veen verkleuren en zwart worden. Vervolgens zullen de plantenresten worden afgebroken tot er een zwarte amorfe substantie ontstaat waarin geen herkenbare plantenresten meer aanwezig zijn.

Zoals in paragraaf 6.3 aangegeven is in de boringen geen ge-oxideerd veen aangetroffen. De enige uitzondering is boring B01-01. In deze boring, die in de kruin van de kade uitgevoerd is, is de bovenste 4 cm omschreven als amorf (ge-oxideerd) veen. In geen van de andere boringen, ook in de handboringen en gutsboringen is ge-oxideerdveen aangetroffen.

Dat er geen ge-oxideerdveen is aangetroffen, is verrassend omdat de veenlaag grotendeels boven de nu gemeten grondwaterstand is gelegen. Dit is zichtbaar in de veldbeschrijvingen van de boringen, waar een indicatie van de grondwaterstand is opgenomen, maar volgt ook uit de peilbuiswaarnemingen. Uit de geohydrologische analyse volgt dat de grondwaterstand het grootste deel van het jaar op het nu gemeten niveau of lager ligt.

Zoals mag worden verwacht, trad in de schouwruimte, waar het opgeboorde materiaal is uitgelegd en beschreven, wel oxidatie van het veen op. Uit het feit dat in het veld het veen wel boven de grondwaterstand is gelegen, maar niet is ge-oxideerd, volgt de hypothese dat de toplaag dusdanig afdekt en afsluit dat er geen lucht, met name zuurstof, tot de veenlaag kan toetreden. Daarnaast kan, als gevolg van capillaire werking het veen wel verzadigd blijven met water.

Hoewel in Figuur 6.10b en c de nadruk ligt op het gedrag na het air entry point, is voor dit onderzoek het gedrag voor het air entry point, waarbij de optredende combinaties van e en θ met de 1:1 lijn worden weergegeven, relevant. Immers er is geen verwerking van het veen aangetroffen ondanks dat het boven de grondwaterstand is gelegen. Vanwege het ontbreken van de verwerking ligt het niet voor de hand dat het *air entry point* zal zijn bereikt.

Om na te gaan in hoeverre krimp van veen een verklaring zou kunnen zijn voor de opgetreden schade van de panden zijn de metingen van het watergehalte nader geanalyseerd. Krimp van de veenlaag zal zich met name aan de bovenzijde van de veenlaag voordoen. Door uitdroging van de toplaag, bv als gevolg van klimatologische ontwikkelingen, zal poriewater uit de veenlaag naar de toplaag worden gezogen. Dit zal resulteren in een lager watergehalte aan de top van de veenlaag.

Figuur 6.11 toont het diepteverloop van het gemeten watergehalte. Hierbij is de diepte uitgezet ten opzichte van de bovenkant van de veenlaag. Alleen resultaten van boringen waarin meerdere metingen in de veenlaag zijn uitgevoerd zijn hier weergegeven. Op die manier kan worden nagegaan of er een trend in het diepteverloop van het watergehalte aanwezig is. Het zijn voornamelijk de boringen die ter plaatse van de kruin zijn uitgevoerd waarin meerdere metingen over de diepte zijn uitgevoerd. In totaal zijn er 11 boringen

beschikbaar waarin er meerdere metingen van het watergehalte over de veenlaag beschikbaar zijn. In 7 van deze boringen geeft de hoogst gelegen waarneming een lagere waarde dan de waarnemingen daaronder. In drie boringen is de hoogst gelegen waarneming hoger dan de daaronder gelegen waarneming. In één boring, B01-01, is het watergehalte min of meer uniform over de hoogte van de veenlaag.

Om een indruk te krijgen van de orde grootte van verschil in (porie)volumen die met de verschillende watergehaltes wordt weergegeven is watergehalte, w , omgerekend naar void ratio, e . De omrekening is uitgevoerd conform vergelijking (6.1). Het probleem dat zich hierbij voordoet is dat van de punten die in Figuur 6.11 zijn gegeven wel het watergehalte en dichtheid vaste stof, ρ_s bekend is, maar dat de droge dichtheid, ρ_d is bepaald op andere monsters. Deze punten zijn gegeven in Figuur 6.3. Figuur 6.3 is dan ook gebruikt om een relatie te leggen tussen watergehalte, w , en droge dichtheid, ρ_d .

$$e = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d} \quad (6.1)$$

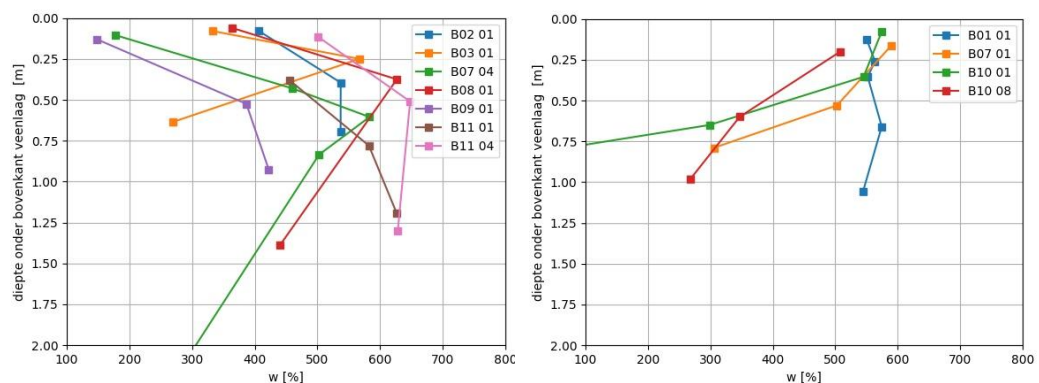
Waarin:

e = void ratio.

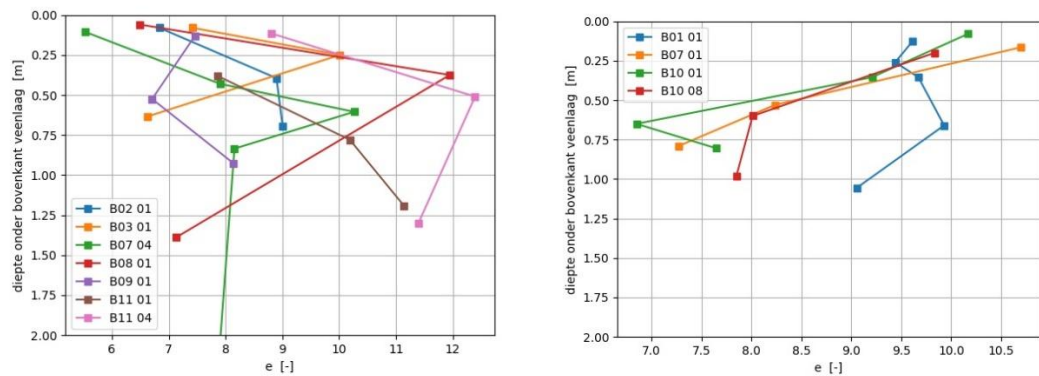
ρ_s = dichtheid vaste stof, bepaald in het laboratorium.

ρ_d = droge dichtheid bepaald aan de hand van Figuur 6.3.

Aan de hand van de gemeten dichtheden is het watergehalte, w omgerekend naar void ratio, e . Opgemerkt wordt dat in boring B09-01 de top van de veenlaag is omschreven als detritus, waarbij, als gevolg van een hogere dichtheid, een relatief laag watergehalte niet leidt tot een lage void ratio.



Figuur 6.11 Watergehalte ten opzichte van de diepte onder de bovenkant van de veenlaag, links: resultaten waar de hoogste in het veenlaag gemeten watergehalte lager is dan het daaronder gemeten watergehalte. Rechts: de situaties waarin dat niet het geval is



Figuur 6.12 Void ratio, e , berekend uit het watergehalte, ten opzichte van de diepte onder de bovenkant van de veenlaag, links: resultaten waar de hoogste in het veenlaag gemeten watergehalte lager is dan het daaronder gemeten watergehalte. Rechts: de situaties waarin dat niet het geval is

Figuur 6.11a laat zien dat de hoogste meetwaarde van het watergehalte en daarmee van de void ratio, e , op circa een halve meter onder de bovenzijde van de veenlaag is gelegen. Een indruk van de orde van grootte van de potentiële volume verandering die opgetreden zou kunnen zijn, wordt verkregen uit het verschil in void ratio, Δe in de bovenste halve meter. Hierbij wordt aangenomen dat de hoge waarde die op een halve meter onder de bovenzijde van de veenlaag is gevonden de originele waarde weergeeft. De relatie tussen void ratio en de rek volgt uit de definitie van de void ratio, e en de rek, ε ; $\varepsilon = \Delta e / (1 + e_0)$, waarin e_0 de initiële void ratio weergeeft. De verandering in void ratio, Δe over de bovenste halve meter veen ligt in de orde van 2,5 tot 5. Indien aangenomen wordt dat de void ratio die wordt gevonden op een halve meter onder de bovenzijde van de veenlaag de initiële waarde, e_0 weergeeft, wordt gevonden dat e_0 varieert tussen 9 en 12. Hieruit volgt een rek die varieert tussen de 20 en 30%. Voor de halve meter toplaag komt deze volume verandering overeen met 0,1 tot 0,15 m zakking van het maaiveld.

In een aantal boringen wordt ook aan de onderzijde een afname van het watergehalte aangetroffen. Dit zou eveneens het gevolg van uitdrogen kunnen zijn waar bij een voldoende lage waterstand kan de veenlaag ook aan de onderzijde poriewater kwijtraken. In dat geval kan de hierboven genoemde zakking van het maaiveld worden verdubbeld.

Benadrukt wordt dat de hierboven genoemde getallen zeer indicatief zijn. Recent onderzoek naar bodemdaling (van Asselen et al. 2020) laat zien dat een deel van de gemeten bodembeweging het gevolg is van volumeverandering van het verzadigde veen. Dit past bij het hier waargenomen verloop in watergehalte in Figuur 6.11. Echter, het bodemdalingsonderzoek laat zien dat bodembewegingen seizoensgebonden zijn, rijzing van het maaiveld in natte periode en daling in droge periode. De waarden van het watergehalte in Figuur 6.11 zijn een moment opname het is niet bekend in hoeverre seizoensinvloeden hier een rol spelen. Daarnaast zal het veen een natuurlijke heterogeniteit in watergehalte kennen als gevolg van variabiliteit in botanische oorsprong van het veen. Ook is niet bekend wat de invloed is van belasting op het krimpgedrag van het hier aangetroffen veen.

Wageningen Environmental Research heeft onderzoek uitgevoerd naar vergelijkbare problematiek in Tilburg, (WER, 2017). Er is gekeken naar de maaiveld zakking die zal optreden bij krimp en oxidatie van een veenlaag als gevolg van een grondwaterstandsverlaging. Uit het onderzoek bleek dat de afdekkende laag een belangrijke rol speelt. Hoe dikker de afdekkende laag hoe minder de veenlaag zal uitdrogen en daarmee hoe geringer de optredende krimp en oxidatie zal zijn. Ook zal het organisch stofgehalte in de afdekkende laag een beperkende factor zijn op de ontwikkeling van oxidatie in de onder liggende

veenlaag. Immers, zuurstof dat zich door de afdekkende laag infiltreert zal eerste reageren met het organisch stof in de afdekkende laag en zo de veenlaag niet bereiken. Hoe hoger het organisch stofgehalte in de afdekkende laag hoe beter de onderliggende veenlaag beschermt is tegen oxidatie.

Het onderzoek in Tilburg, (WER, 2017) omvat laboratoriumproeven en numerieke simulaties. Deze proeven en simulaties zijn specifiek voor die locatie opgesteld. Het gaat om het type veen, de dikte van de afdekkende laag, circa 2 m, en het organisch stofgehalte van de deklaag. Dit maakt dat de berekeningsresultaten van de situatie bij Tilburg niet direct kan worden toegepast op de situatie langs het Kanaal Almelo – den Haandrik. Wel geeft het aan dat de hierboven afgeleide waarden aan de hand van de verschillen in watergehalte kunnen worden gezien als een bovengrens.

De waargenomen fluctuatie in watergehalte is waargenomen in de boringen die naast de panden zijn uitgevoerd. Onder de panden zal de krimp minder zijn. Immers door het gewicht van het pand heeft zich door mechanische samendrukking al een porievolumen afname voorgedaan. Op basis van expert judgement is ingeschat dat de krimp onder panden de helft is van de krimp die zich voordoet in onbelaste situatie.

Daarnaast treden fluctuaties op als gevolg van de seizoensinvloeden. Ook een grondwaterstandverandering als gevolg van het vervangen van lekke damwanden kan worden gezien als een fluctuatie, immers de lekke damwanden waren oorspronkelijk niet lek. En het vervangen van damwanden brengt de oorspronkelijke situatie terug. Op basis van expert judgement kan worden gesteld dat krimp als gevolg van een herhaalde verlaging van de grondwaterstand 25% van de krimp in een eerste droge fase is. De krimp die als gevolg van fluctuaties in grondwaterstand kan zijn opgetreden langs het Kanaal Almelo – De Haandrik volgt dan uit de waargenomen fluctuatie in watergehalte, gecorrigeerd voor de aanwezigheid van bebouwing en het feit dat een deel van de krimp irreversibel is, de seizoensinvloeden. De krimp naast de panden op basis van variaties in watergehalte is 0,10 à 0,15 m. Gecorrigeerd voor de aanwezigheid van bebouwing is dit 0,05 à 0,075 m. Wanneer aangenomen wordt dat in de laatste jaren alleen of voornamelijk het reversibele deel van de krimp is opgetreden en dat deze heeft bijgedragen aan de waargenomen schade wordt dit 0,0125 à 0,018 m. In hoofdstuk 7 wordt verder toegelicht welke rol deze krimpvervormingen in de waargenomen schadebeelden zouden kunnen hebben.

De aldus berekende waarden zijn een bovengrens; de waarden zijn aanmerkelijk groter dan de waarden die de modelberekeningen van de WER geven. In het huidige onderzoek wordt deze bovengrens gehanteerd voor de krimp van de veenlaag.

6.6 Samenvatting en conclusies met betrekking tot samendrukbaar materiaal in de ondergrond

In paragraaf 6.1 zijn 6 potentiële mechanismen beschreven die het waargenomen schadebeeld zouden kunnen verklaren en zijn gerelateerd aan samendrukbare lagen in de ondergrond, zie Figuur 6.1 **A** tot en met **F**. Het eerste mechanisme, mechanisme **A**, heeft betrekking op de sterkte van de samendrukbare lagen en wordt besproken in hoofdstuk 7.

Uit het grondonderzoek blijkt dat slechts in enkele boringen klei van enige omvang is aangetroffen. Deze kleilagen zijn onder de grondwaterstand aanwezig. Mede gezien de resultaten van het hydrologisch onderzoek, zie Bijlage J (Rapport grandwateranalyses en scenario's) lijken de kleilagen geen relevante rol te spelen. Mechanismen **D** en **E** zijn dan ook niet nader uitgewerkt.

In de boringen is geen ge-oxideerd veen aangetroffen, met uitzondering van boring B01-01, waar de bovenste 4 cm is beschreven als amorf, ge-oxideerd, veen. Ook in de guts -, en

handboringen is geen ge-oxideerdveen aangetroffen. Hiermee kan ook mechanisme **C** worden uitgesloten.

Een opmerkelijke uitkomst van het grondonderzoek is dat de nu gemeten grondwaterstand op de meeste onderzochte locaties onder de, niet ge-oxideerde, veenlaag is gelegen. Uit het geohydrologisch onderzoek blijkt dat de grondwaterstand het grootste deel van het jaar op het nu gemeten niveau of lager ligt. Dat de veenlaag niet ge-oxideerd is en toch boven de grondwaterstand is gelegen kan worden verklaard door de afdekkende werking van de toplaag.

Uit de geohydrologische beschouwing blijkt niet dat recent, bijvoorbeeld als gevolg van de werkzaamheden aan het kanaal, de grondwaterstand is gezakt tot onder de veenlaag. Om die reden is de mechanisme **B**, zetting als gevolg van een verlaging van de grondwaterstand, niet nader uitgewerkt. Indien er wel sprake is van een lagere grondwaterstand kunnen de resultaten van paragraaf 6.4.2 worden gebruikt waarbij een grondwaterstands daling dient te worden omgerekend naar een verhoging van de effectieve spanning. Bijvoorbeeld 0,5m lagere grondwaterstand komt overeen met $0,5 \cdot (17-10) = 3,5$ kPa hogere belasting.

De orde van grootte van zettingen door samendrukking van de veenlaag als gevolg van een belasting op het maaiveld is aan de hand van indicatieve berekeningen bepaald. In de indicatieve berekeningen is uitgegaan van een belasting van $8,5 \text{ kN/m}^2$. Dit komt overeen met het gewicht van een halve meter zand. In dit kader wordt ook gewezen op het stutten van de panden, waar bij sommige panden direct naast de funderingen relatief zware constructies zijn gezet en tot samendrukking van de veenlaag kunnen leiden. Op basis van het grondonderzoek zijn twee schematisaties van de grondopbouw bepaald. De schematisaties kunnen worden beschouwd als onder-, respectievelijk bovengrens. Vervolgens is een variatiestudie met betrekking tot de overconsolidatieratio uitgevoerd. Hieruit volgde een zakking van het maaiveld variërend van 1 tot 15 cm in een periode van 10 000 dagen, circa 27 jaar. Voor het laatste jaar wordt voor een gemiddelde OCR van 2,0 een zettingsnelheid van 0,22 tot 0,47 mm/jaar gevonden. Een zetting van de grond naast de panden kan door wrijving een extra belasting (soort negatieve kleef) geven op de fundering. Hierdoor kan niet worden uitgesloten dat belastingen op het maaiveld een bijdrage leveren aan de waargenomen schade. Om een meer exacte waarde van de zettingen als gevolg van belasting op het maaiveld te geven, is meer detail informatie over de specifieke locaties nodig.

Gebaseerd op de resultaten van de pandinspecties zijn voor enkele karakteristieke situaties de zetting als gevolg van het gewicht van de panden berekend. Het betreft dan specifiek die situaties waarin onder de funderingselementen samendrukbare lagen zijn aangetroffen. Ook hier betreft het indicatieve berekeningen bedoeld om een indruk van de orde van grootte te verkrijgen. De berekende, indicatieve, zettingen variëren van praktisch nihil tot circa 0,2 m, in het 27^e jaar tot maximaal 0,48 mm/jaar en het 100^e jaar tot maximaal 0,13 mm/jaar.

Oxidatie van het veen is niet waargenomen. Oxidatie van het veen wordt dan ook niet gezien als de verklaring voor de waargenomen verzakking. Wel is de mogelijkheid dat krimp van het veen optreedt nader onderzocht. Bij het optreden van krimp neemt het watergehalte van het veen af, als gevolg van uitdroging, zonder dat lucht de poriën binnentreedt. In paragraaf 6.5 is een nadere analyse van het gemeten watergehaltes gepresenteerd. De waargenomen variatie in watergehalte kan, onder andere als gevolg van natuurlijke variatie in het veen, met de huidige kennis en inzichten niet eenduidig worden gekoppeld aan de waargenomen zakkingen.

Zoals hierboven aangegeven, is de veenlaag niet ge-oxideerd. Echter, gezien het feit dat de veenlaag voornamelijk boven de grondwaterstand ligt, is niet uit te sluiten dat in de toekomst

wel oxidatie op zal treden, wanneer, bijvoorbeeld onder invloed van droogte alsnog lucht, met name zuurstof, het veen binnendringt. Indien dit optreedt zijn nog aanzienlijke verzakkingen van het maaiveld, in de orde van meerdere decimeters, te verwachten.

7 Synthese per pand

In dit hoofdstuk wordt invulling gegeven aan stap 3 uit het onderzoek (zie Figuur 2.1): het vaststellen van de schade-oorzaken voor de onderzochte panden. De basis hiervoor is de werkwijze zoals geschetst in Hoofdstuk 2.2. De data die relevant is voor de panden is vastgelegd in factsheets (Bijlage K). Deze bevatten de feitelijke informatie met betrekking tot onder andere de werkzaamheden aan het kanaal, uitgevoerd grondonderzoek, geologie, geohydrologie, informatie uit pandopnames en inspecties. In hoofdstuk 7.2 is de werkwijze ten aanzien van de pandanalyses aangegeven. Daarin wordt de stappen beschreven die doorlopen worden om tot oorzaken te komen die de opgetreden schade kunnen verklaren. In deze werkwijze zullen specifiek enkele gebeurtenissen, zoals werkzaamheden aan het kanaal en droogte, worden benoemd. In hoofdstuk 7.3 is de werkwijze met betrekking tot de satellietmetingen behandeld. Tot slot worden in hoofdstukken 7.4 t/m 7.18 per pand de relevante resultaten en conclusies gegeven.

7.1 Inspecties

In aansluiting op alle beschikbare informatie rondom eerder uitgevoerde inspecties, opnamen en metingen aan panden en voor sommige panden een onderzoek van TNO uitgevoerd in 2020, zijn in juni en juli 2021 pandinspecties uitgevoerd door TNO in aanwezigheid van Deltares. Ook is, op geselecteerde locaties, de fundering geïnspecteerd door middel van het graven van een put ter plaatse. De inspecties zijn afgestemd op de beschikbaarheid van de bewoners. In Tabel 7.1 zijn de inspecties weergegeven.

Tabel 7.1 Uitgevoerde inspecties

Adres	Pandinspectie	Funderingsinspectie	Aantal putten
Pand 20	10 juni	16 juni	2
Pand 5	10 juni	16/17 juni	1
Pand 12	11 juni	-	-
Pand 17	11 juni	17 juni	1
Pand 6	11 juni	17 juni	2
Pand 13	23 juli	23 juli	1
Pand 10	25 juni	18 juni	1
Pand 8	15 juni	2 juli	1
Pand 9	15 juni	-	-
Pand 3	Geen medewerking aan onderzoek		
Pand 7	14 juni	18 juni	2
Pand 16	14 juni	-	-
Pand 18	23 juli	18 juni	1
Pand 2	16 juni	25 juni	3
Pand 11	Geen medewerking aan onderzoek		
Pand 14	15 juni	12 juli	1
Pand 4	15 juni	12 juli	1
Pand 1	23 juli	-	-
Pand 21	16 juni	Geen toestemming	-

Adres	Pandinspectie	Funderingsinspectie	Aantal putten
Pand 19	14 juni	-	-
Pand 15	25 juni	25 juni	1

De adressen Pand 3 en Pand 11 hebben geen medewerking verleend aan dit onderzoek en zijn daarom geen onderdeel zijn van dit verdiepend onderzoek.

Pand 21 heeft geen toestemming gegeven voor funderingsinspectie.

7.2 Werkwijze analyse

In dit hoofdstuk wordt de invulling gegeven aan stap 3 (Zie Figuur 2.1) ten behoeve van conclusies per pand.

7.2.1 Vraag 3a: Komt de schade door ongelijkmatige zakking, trillingen of bouwkundige oorzaken van het pand?

Bij alle panden is eerst een bureaustudie uitgevoerd, waarbij zoveel mogelijk historische en recente informatie over de panden is verzameld en beoordeeld. Hierin zijn, bij toestemming van de bewoners, ook eerdere schade opnamen door bouwkundige bureaus opgenomen. Deze gegevens vormen de basis voor het onderzoek per pand waarin deskundigen van Deltares en TNO de constructie en de kruipruimte van de panden hebben geïnspecteerd.

In het kader van het huidige Verdiepend onderzoek is door TNO per pand een rapportage gemaakt met een analyse van de geconstateerde schade. Indien er door TNO al een rapportage in 2020 was gemaakt is er ten behoeve van het huidige onderzoek een addendum op die rapportage gemaakt. In Tabel 7.2 is een overzicht gegeven van de rapportages.

Tabel 7.2 TNO rapportages.

Deze tabel is om privacy redenen niet opgenomen.

Bij de analyse van de oorzaak/oorzaken van scheuren c.q. cluster van scheuren wordt gebruik gemaakt van de methodiek die is omschreven in TNO rapport 2011-02980 “*Methodiek voor onderzoek naar de oorzaak van gebouwschade - versie 2*”. Dat betekent dat op basis van informatie over het verloop van de (wijde van de) scheuren, de bouwkundige opbouw van de gescheurde bouwdelen en de optredende belastingen in het pand, in eerste instantie wordt vastgesteld of de schade veroorzaakt kan zijn door één of meer van de volgende hoofdeffecten:

- A. Belastingen.
- B. Verhinderde dan wel opgelegde vervormingen.
- C. Ongelijkmatige zettingen in de ondergrond.

Omdat het onderhavige onderzoek er mede op is gericht om na te gaan of er een relatie is tussen de werkzaamheden in of aan het kanaal en de schade aan de panden, is de bovengenoemde indeling in tweede instantie verder gespecificeerd. Dit is als volgt gedaan:

Hoofdeffect A:

- De werkzaamheden in of aan het kanaal kunnen hebben geresulteerd in een dusdanig hoge trillingsbelasting op de panden dat daardoor schade aan de panden is ontstaan. Als dit het geval is geweest, wordt die schade-oorzaak ingedeeld in de categorie “*Trillingen*”.

- Als schade is ontstaan door een andere belasting, wordt die schade-oorzaak ingedeeld in de categorie “Overige bouwkundige oorzaken”.

Hoofdeffect B:

- Schade als gevolg van verhinderde dan wel opgelegde vervormingen heeft geen relatie met werkzaamheden in of aan het kanaal. Die schade-oorzaak wordt ingedeeld in de categorie “Overige bouwkundige oorzaken”.

Hoofdeffect C:

- Op basis van de uitgevoerde onderzoeken kan worden vastgesteld of schade ontstaan kan zijn door ongelijkmatige zettingen. Als dit het geval is, wordt die schade-oorzaak ingedeeld in de categorie “Ongelijkmatige zettingen”.

Op deze wijze is het mogelijk vast te stellen of ongelijkmatige zettingen, trillingen, en/of bouwkundige oorzaken aan de orde zijn.

Als bij een pand wordt vastgesteld dat er sprake is van schade als gevolg van ongelijkmatige zakkingen wordt het schade-onderzoek geïntegreerd met het onderzoek van Deltares, waarbij de kennis van de opbouw van de bodem en de kenmerken van de fundering worden ingebracht. De volgende schademechanismen kunnen dan aan de orde zijn:

- Piping.
- Veen of ander samendrukbaar materiaal onder de fundering.
- Andere oorzaken.

7.2.2 Vraag 3b: Kan de zakking zijn veroorzaakt door piping?

Op basis van de resultaten in Hoofdstuk 5 is voor piping vastgesteld dat er geen aanwijzingen zijn dat piping in dit gebied een belangrijk actief mechanisme is. Het wordt daardoor zeer onwaarschijnlijk geacht dat piping een rol heeft kunnen spelen bij het optreden van de schades bij het pand.

7.2.3 Vraag 3c: kan de zakking zijn veroorzaakt door veen of ander samendrukbaar materiaal?

De aanwezigheid van veen of ander samendrukbaar materiaal wordt afgeleid uit boringen, sonderingen, gutsboringen en de funderingsinspectie. De funderingsinspectie geeft tevens informatie over het funderingsniveau, opbouw en conditie van de fundering. Uit het onderzoek bij de panden kunnen drie gevallen worden onderscheiden:

- Er is geen veen of ander samendrukbaar materiaal aanwezig.
- Er is veen of ander samendrukbaar aanwezig maar boven het aanleg niveau van de fundering.
- Er is veen of ander samendrukbaar materiaal onder de fundering aanwezig.

In het geval dat veen of andere samendrukbare lagen aanwezig zijn **onder** het funderingsniveau is er een scala van mogelijke oorzaken van de zakking van het pand, zoals samendrukking, kruip, krimp en oxidatie in geval van veen. Deze oorzaken kunnen worden verergerd door ophogingen nabij het pand en verhoging van de belasting vanuit het pand of kruipruimte (vraag 3d) of verlaging van de grondwaterstand (vraag 3e). Opgemerkt wordt dat uit Hoofdstuk 6 blijkt dat er geen aanwijzingen voor oxidatie van veen zijn.

In het geval dat veen of andere samendrukbare lagen aanwezig zijn **boven** het funderingsniveau zijn er dezelfde mogelijke oorzaken van de zakking in de kruipruimte, vloeren die direct op de ondergrond liggen en maaiveldzakkingen rondom het pand. Deze

oorzaken kunnen worden verergerd door ophogingen rondom het pand (vraag 3d) of verlaging van de grondwaterstand (vraag 3e). Schade aan de panden zelf is in dit geval minder waarschijnlijk.

7.2.4 Vraag 3d: wat is de schade oorzaak of combinatie van schade oorzaken per pand

Deze stap omvat de synthese van de voorafgaande bevindingen uit het schade-onderzoek aan de panden. Per pand wordt op basis van een vergelijking van hetgeen aangetroffen of vanuit bouwtekeningen afgeleide funderingsniveau, en op locatie uitgevoerd grondonderzoek vastgesteld of veen en/of andere samendrukbare lagen een oorzaak kunnen zijn.

Veen onder fundering

In Hoofdstuk 6 zijn voor diverse situaties voor funderingstype, aanlegniveau fundering, aantal woonlagen en ondergrondsamenstelling indicatieve berekeningen uitgevoerd om vast te stellen welke orde grootte zetting van de fundering kan optreden. Eventuele andere belastingen (ophogingen, interne belastingsveranderingen in panden, grondwaterstandsverlagingen) kunnen leiden tot extra zettingen. Door een vergelijking van een bij een pand aanwezige fundering met de indicatieve berekening kan een inschatting worden verkregen van de verwachte zetting door gebouwbelasting en/of maaiveldbelasting (bijvoorbeeld na vulling van kruipruimtes). De aanwezigheid van veen en/of ander samendrukbaar materiaal zorgt altijd voor extra zettingen ten opzichte van de aanwezigheid van alleen zand. Bij aanwezigheid van samendrukbaar materiaal zal deze het grootste aandeel hebben in het optreden van zakkingen van fundering, kruipruimte en/of vloeren. De verhouding tussen draagkracht en belasting zal naar verwachting klein zijn. Op basis van het gegeven dat de funderingen nog steeds functioneren zal de veiligheid zich rond de 1 bevinden.

Zand onder fundering

Is de aanwezigheid van veen of andere samendrukbare lagen niet aan de orde als verklaring voor de schade dan kan de fundering in het zand verder beoordeeld worden. De grootte van de zakking van een fundering wordt, wanneer uitsluitend sprake is van een gebouwbelasting, bepaald door de volgende aspecten:

- Uitvoeringszakking. Dit is de zakking die door de uitvoeringswijze en omstandigheden wordt bepaald. De verwachting is voor het overgrote deel van dit type funderingen destijds als gevolg van de lastige omstandigheden, diep ontgraven (2-2,5 m), aanwezigheid van veen en grondwater, dat deze zakking groter zal zijn dan wat tegenwoordig voor een strook of poerenfundering mag worden verwacht.
- Zakking door schuifvervorming om draagkracht te mobiliseren. Het funderingselement zal onder zijn belasting schuifkrachten willen mobiliseren in het zand. Deze zakkingen zijn doorgaans klein (mm's) maar kunnen beduidend groter worden (cm's) als de veiligheid rond de 1 zit. Deze zakkingen zijn niet goed te berekenen.
- Samendrukking van grondpakket onder de fundering door de gebouwbelasting. Lokaal zijn onder stroken of poeren hogere drukken aanwezig waardoor de grond eronder kan samendrukken.

Ter beoordeling van aspect 'zakking door schuifvervorming' zijn in Bijlage H resultaten van indicatieve draagkrachtberekeningen voor verschillende funderingstypen, aanlegdiepten, afmetingen, belastingen en grondwaterstanden gepresenteerd voor funderingen van buitenmuren. Op basis van deze resultaten wordt vastgesteld dat voor een aantal funderingstypen in zand mogelijk al een lage veiligheid aanwezig is waardoor meer dan gebruikelijke zakkingen zijn opgetreden onder normale belastingen.

Ter beoordeling van het aspect 'samendrukking van grondpakket onder de fundering door de gebouwbelasting' zijn in Hoofdstuk 6 voor diverse mogelijke situaties voor funderingstype, aanlegniveau fundering, aantal woonlagen en ondergrondsamenstelling indicatieve

berekeningen uitgevoerd om vast te stellen welke orde grootte zetting van de fundering kan optreden. Bij deze berekeningen is ook rekening gehouden met het feit dat de zandlaag onder de fundering vaak siltig is en soms zelfs siltlagen bevat.

Andere oorzaken

Andere oorzaken die kunnen leiden tot schade zijn per pand beoordeeld op mogelijk optreden ervan. De te beschouwen andere schade-oorzaken zijn gebaseerd op de beschreven short-list uit het Definitief rapport Desk research, Diepere analyse van de gegevens en Onderzoeksplan [44]. Het gaat om de volgende oorzaken:

Mechanisme	Oordeel
Schade door vernatting c.q. verhoging van de grondwaterstand	In bijlage H zijn resultaten van indicatieve draagkrachtberekeningen voor verschillende funderingstypen, aanlegdiepten, afmetingen, belastingen en grondwaterstanden gepresenteerd. Op basis van deze resultaten zullen conclusies per pand worden getrokken en wordt vastgesteld of en in welke mate bij veranderingen van omstandigheden dit kan leiden tot extra zakkingen (zie stap 3e)
Schade door droogte c.q. verlaging van de grondwaterstand	In Hoofdstuk 6 zijn resultaten van indicatieve zettingsberekening gegeven waarbij ook grondwaterstandsverlaging wordt beschouwd. Op basis van deze resultaten zullen conclusies per pand worden getrokken en wordt vastgesteld of en in welke mate bij veranderingen van omstandigheden dit kan leiden tot extra zakkingen (zie stap 3e)
Bezwijken of sterk vervormen van damwanden	In [1] (Deltares 2020 onderzoek) is vastgesteld dat omdat de afstand tussen damwand kanaal en de panden dusdanig groot is dat mechanismen als 'Zetting door uitspoelen zand', 'Meezakken van het materiaal achter de vervormende damwand' en 'Instabiliteit van de grond achter de damwand in het geval van extreme vervormingen' niet waarschijnlijk zijn. Er is geen nieuwe informatie die de conclusies van toen veranderen. Er zijn geen bovendien geen aanwijzingen geweest van schade als gevolg van deze mechanismen tussen kanaal en pand.
Schade door intrillen damwanden en eventueel uittrillen damwanden en ankers	Deze schade bestaat uit: directe trillingsschade in de vorm van scheurvorming of indirecte zakking door verdichting van zandlagen onder de fundering. Zie Hoofdstuk 7.2.5 ad. 3
Verzakkingen door uitklappen van klapankeers	In [1] (Deltares 2020 onderzoek) is vastgesteld waar klapankeers zijn toegepast en welke afmetingen en dieptes van toepassing zijn. Op basis van een conservatief model zijn zakkingen berekend die een fundering zou kunnen beïnvloeden. Alleen als de fundering in de zakkingstrog van de klapankeers staat is niet uit te sluiten dat schade kan optreden. Voor de huidige beoordeelde panden is deze situatie niet aan de orde.
Verzakkingen door verbreding weg op kanaaldijk. Dit kan het geval zijn indien zich samendrukbare lagen bevinden onder de funderingen.	Per pand is kwalitatief nagegaan of dit aan de orde is. In [1] (Deltares 2020 onderzoek) was geconcludeerd dat werkzaamheden als het vervangen van veen door zand, herprofilering van het wegdek en de aanleg van verkeersdrempels de belasting verhogen op de ondergrond. Dit kan zettingen van de veenlaag veroorzaken. De zettingen op het niveau van de poeren- of strokenfundering ter plaatse van de gevels zijn naar verwachting zodanig klein dat schade door ongelijkmatige zettingen niet waarschijnlijk is. Alleen in specifieke gevallen, bijvoorbeeld bij ligging van de weg dichtbij de gevel van het pand en/of aanwezigheid van een verkeersdrempel voor het pand, kan er een invloed zijn.
Verzakkingen door ophogingen rond panden of drainage van de ophooglaag	Per pand zal worden nagegaan of dit aspect aan de orde kan zijn.
Verzakking kruipruimte door aanvullingen van kruipruimten	Per pand zal worden nagegaan of dit aspect aan de orde kan zijn

Mechanisme	Oordeel
Verbouwingen van panden of plaatsing van aanbouwen aan panden	Per pand wordt geïnventariseerd of hier sprake van is.
Interne mechanismen in panden (temperatuurwerking, vochtwerking, krimp bouwmaterialen, corrosie van stalen onderdelen)	Dit volgt uit de TNO analyse.
Schade bestaande uit verzakking van de bestrating om de panden	Per pand zal worden nagegaan of dit aspect aan de orde kan zijn. Dit leidt echter niet tot schade aan panden, vloeren of kruipruimten.
Schade door vervormingen van de poerfunderingen door diverse oorzaken	Dit volgt uit lokale inspecties.
Slechte kwaliteit metselwerk funderingsmuren en bogen	Dit volgt uit de waarneming in de ontgravingen van de funderingen

7.2.5 Vraag 3e: Wat is de invloed van werkzaamheden aan het kanaal en invloed van natte en droge perioden

De werkzaamheden aan het kanaal en de invloeden van natte en droge periode betreffen de werkzaamheden of gebeurtenissen zoals weergegeven in Figuur 2-1. Werkzaamheden of gebeurtenissen die van belang zijn voor stap 3e betreffen:

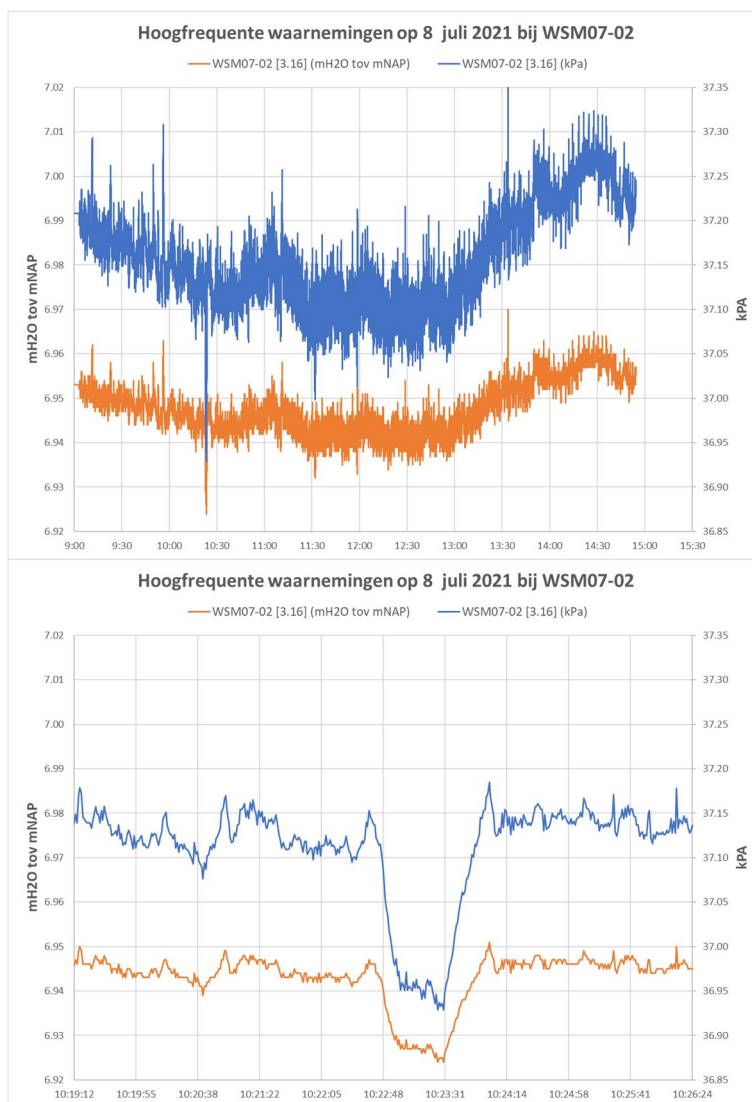
- Invloed van het baggeren.
- Invloed van vervanging damwanden (boordconstructies) aan de oever van het kanaal.
- Invloed van scheepvaart.
- Invloed van natte en droge perioden, vegetatie.

De exacte kwantificering van de bijdrage van de werkzaamheden aan het kanaal (het baggeren, het vervangen van damwanden) en van de wijziging in grondwaterstand tijdens natte en droge periodes blijkt niet mogelijk op grond van de beschikbare gegevens. Enerzijds is er sprake van combinaties van oorzaken voor de opgetreden schades, anderzijds kunnen uit de veelal beperkte beschikbare monitoringsgegevens van de situatie voor, tijdens en na de werkzaamheden aan het kanaal, geen kwantificeerbare bijdrage worden bepaald. Omdat kwantificering van de invloed van de werkzaamheden toch van groot belang is, zijn rekenkundige exercities uitgevoerd om de verschillende bijdragen qua orde van grootte te bepalen. Daartoe zijn in scenario-analyses de effecten op de grondwaterstanden kwantitatief geduid en vervolgens zijn deze effecten door vertaald naar de bijdragen aan de zakking door de werkzaamheden. Deze bijdragen zijn vermeld in de tabel 7.3 en pretenderen niet meer dan een orde van grootte aan te geven. Ook voor exacte berekening ontbreken de gegevens.

De hierboven genoemde werkzaamheden of gebeurtenissen hebben een relatie met de volgende mechanismen:

1. Beïnvloeding schade gebouw door **grondwaterstandsverhoging** veroorzaakt door het baggeren van het kanaal.
2. Beïnvloeding schade gebouw door **grondwaterstandsverlaging** veroorzaakt door:
 - a. Vervanging damwandconstructies langs de oever van het kanaal.
 - b. Droogte in 2018/2019, mogelijk een extra invloed van grote vegetatie
3. Beïnvloeding schade gebouw door het veroorzaken van **trillingen** tijdens het vervangen van de boordconstructies en door overige werkzaamheden/gebeurtenissen.

Uit de metingen in de peilbuizen blijkt dat er geen noemenswaardige invloed is van de scheepvaart op de grondwaterstand. Er zijn gedurende 5 dagen hoogfrequente metingen uitgevoerd op verschillende locaties van het kanaal. Al deze metingen laten zien dat de waterspanningen niet tot nauwelijks veranderen door scheepvaart. Het effect ligt in de orde van enkele cm (zie oranje lijn in Figuur 7.1). Dit bevestigt de metingen die tijdens het onderzoek in 2019 zijn uitgevoerd.



Figuur 7.1 Hoogfrequente meting van waterspanningen, waterspanningsmeter onder de kanaalbodem bij Pand 18. Boven: meting van 9-13 uur. Onder: detail tijdens scheepspassage tussen 10.22 en 10.23 uur

Ad 1.

In onderstaande figuur is de gebeurtenissenboom weergegeven voor het mogelijke effect van het baggeren van het kanaal. Het betreft een tijdelijke **grondwaterstandsverhoging** in de watervoerende grondlagen bij de panden.



Figuur 7.2 Gebeurtenissenboom bij tijdelijke grondwaterstandsverhoging door het baggeren van het kanaal

Een verhoging van de grondwaterstand bij de bebouwing kan invloed hebben op de spanningen in de ondergrond. De maximale funderingsdruk is afhankelijk van de sterke eigenschappen en de spanningen in de ondergrond. Een verhoging van de grondwaterspanning kan leiden tot een afname van de schuifsterkte van de grond en daarmee van de draagkracht van een fundering. Voor situaties waarbij de marge tussen de aanwezige funderingsdruk en de maximaal door de ondergrond te dragen funderingsdruk gering is, kunnen relatief geringe toenames in grondwaterstand leiden tot het bezwijken van de ondergrond en daarmee verzakkingen van het funderingselement.

Het beoordelen of een dergelijk mechanisme kan optreden is voor de situatie zonder samendrukbare lagen in de ondergrond niet anders dan voor de situatie met samendrukbare lagen. Wel hebben samendrukbare lagen, zoals klei en veen, over het algemeen lagere sterke eigenschappen dan zandlagen. Voor situaties waarbij op geringere diepte onder de funderingselementen klei- of veenlagen worden aangetroffen, zal de maximale draagkracht van een fundering minder zijn dan voor situaties zonder deze klei- of veenlagen op geringe diepte onder de funderingselementen. Naast de diepte van de fundering en de opbouw van de ondergrond onder de fundering, zijn ook afmetingen van de fundering van belang.

Ook is het van belang of er een kelder aanwezig is onder het pand. Stap 5b geeft aan dat een grondwaterstandsverhoging kan leiden tot het opdrijven van de kelder wegens de verhoging van de waterdrukken onder de keldervloer. Bij opdrijven van een kelder, die zich gedeeltelijk (of eventueel geheel) in het grondwater ligt, is er sprake van het (deels) omhoogkomen van de keldervloer of de gehele kelder. Een (eventueel) tijdelijke verhoging van de grondwaterstand kan dus er toe leiden dat de keldervloer of de gehele kelder omhoog komt en op het grondwater gaat drijven. Of opdrijven van de kelder daadwerkelijk heeft plaatsgevonden is afhankelijk van de specifieke omstandigheden met betrekking tot constructieve aspecten van de kelder en diepteligging van keldervloer en waterstand. Naast het opdrijven van de kelder, kan er ook sprake zijn van het opbarsten van de keldervloer. In dat geval zal de keldervloer bezwijken door de opwaartse waterdruk. Dit fenomeen is vermoedelijk bij de achterste bedrijfsruimte van Pand 20 niet aangetroffen bij de beschouwde panden langs het kanaal opgetreden.

In de rapportage over grondwaterstand (Bijlage J) is dit scenario, waarbij baggeren de bodemweerstand weghaalt en een grondwaterstandsverhoging in de omgeving veroorzaakt, beschouwd. In dit scenario is een belangrijk uitgangspunt de snelheid waarmee de bodemweerstand zich herstelt na het baggeren. Op basis van expert kennis en beschikbare peilbuiswaarnemingen in 2012, wanneer baggeren heeft plaatsgevonden, is een inschatting gemaakt van de snelheid van dichtslibben. De scenarioberekeningen tonen aan dat het effect van baggeren op de grondwaterstand beperkt blijft tot een tijdelijke stijging van enkele decimeters.

Voor de beoordeling van dit effect op de zakking van een fundering zal gebruikt worden gemaakt van een conservatieve grondwaterstijging van 0,3 m boven de historisch hoogste grondwaterstand.

In bijlage H (Draagkracht stroken en poeren en beïnvloeding ervan door grondwaterstand) zijn resultaten van indicatieve draagkrachtberekeningen voor verschillende onder een buitenmuur aanwezig funderingstypen, aanlegdiepten, afmetingen, belastingen en grondwaterstanden gepresenteerd. Op basis van deze resultaten wordt per pand vastgesteld of de genoemde grondwaterstijging kan leiden tot extra zakkingen. Een negatief effect op de draagkracht en dus een waarschijnlijke toename van de zakking treedt op voor een aantal situaties. Door vergelijking van werkelijk aangetroffen funderingen met de indicatieve berekening blijkt dit te gelden voor:

- Panden 4 en 1, aanbouw.
- Pand 14.
- Pand 13.

In mindere mate geldt het ook voor:

- Panden 10 en 8.

Opdrijven van kelders is beoordeeld per pand op basis van wat er bij de inspectie aan schade is geconstateerd gekoppeld aan de mogelijke grondwaterstandsverhoging.

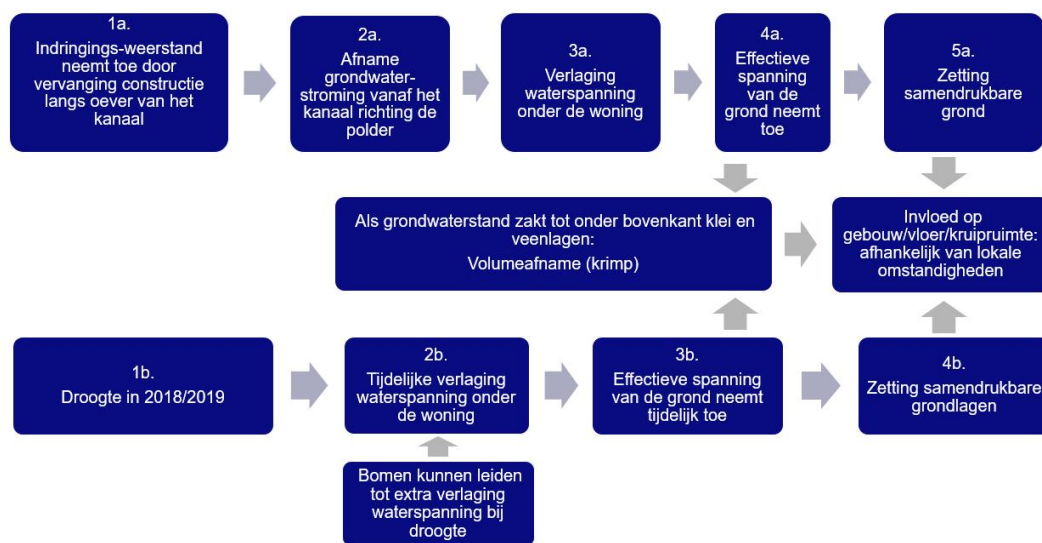
Als gevolg van de tijdelijke grondwaterstandsstijging is er, met name als deze gelijktijdig in een natte periode optreedt, een grotere kans op het optreden van extra grondwateroverlast in tuinen en kelders.

Ad 2.

In Figuur 7.3 is de gebeurtenissenboom weergegeven voor de gebeurtenissen, die kunnen hebben geleid tot een **grondwaterstandsverlaging**.

Grondwaterstandsverlaging door:

- Vervanging betonnen wand kanaal door stalen damwand (permanente situatie)
- Droogte in 2018/2019 (tijdelijke situatie)



Figuur 7.3 Gebeurtenissenboom bij verlaging grondwaterstand door plaatsing stalen damwand langs het kanaal en door droogte

De geohydrologische weerstand van de nieuwe stalen damwand is groter dan de oude betonnen wand. Na plaatsing van de nieuwe stalen damwand kan achter de damwand, en dus ter plaatse van aanwezige panden, een permanente grondwaterstandsverlaging ontstaan. In de rapportage over grondwateranalyses en scenario's (Bijlage J) is dit scenario beschouwd. In de situatie waar zich in de zandlaag tussen kanaalbodem en grofweg NAP geen slecht doorlatende lagen voorkomen, heeft het vervangen van de betonnen, 4 m lange, damwand door een stalen, 9 m lange, damwand een verwaarloosbare invloed op de grondwaterstand (orde millimeters tot een enkele centimeter). In het geval dat een dergelijke slecht-doorlatende laag er wel is en deze laag strekt zich uit over de volledige kanaal breedte en over een aanzienlijke lengte langs het kanaal dan zal de grondwaterstandsverlaging bij de panden maximaal 25 cm aan de voorzijde en 20 cm aan de achterzijde bedragen. De eventuele aanwezigheid van een dergelijk uitgestrekte slecht-doorlatende laag blijkt in dit gebied niet uit het grondonderzoek. In geval van slecht-doorlatende lagen met een beperkte laterale verspreiding zal de invloed van het vervangen van de damwand veel beperkter zijn (orde 1 centimeter grondwaterstandsverlaging). Per locatie kan beoordeeld worden of een slecht-doorlatende laag aanwezig is. Zonder uitvoerig aanvullend onderzoek naar de laterale verspreiding en 3D berekeningen is een vaststelling van de beïnvloeding niet mogelijk. Op basis van de resultaten van de uitgevoerde berekeningen wordt de verlaging daarom in de orde van 1 tot 10 centimeter geschat. Het effect van baggeren op de omgeving zal aanzienlijk minder zijn dan de hierboven is benoemd. De aanwezigheid van dergelijke lagen is alleen ter plaatse van Pand 15 relevant, voor de overige pandlocaties is de slecht doorlatende laag niet aanwezig.

Ook droogte kan leiden tot een extra tijdelijke verlaging van de grondwaterstand. De invloed van vegetatie, met name bomen, kan dit effect versterken tijdens deze droogte, wanneer de verdamping van water per boom flink zal toenemen. In de rapportage over grondwateranalyses en scenario's (Bijlage J) is het scenario droogte beschouwd waarbij de

meest droge periode van de laatste 10 jaar is doorgerekend, de periode van 1 april tot en met 31 oktober 2018. De scenarioberekeningen tonen aan dat de grondwaterstand ook in extreem droge situaties niet heel ver uitzakt. De aanvulling van het grondwater door lekkend kanaalwater verhindert verdere uitzakking van de grondwaterstand, ook als de bodemweerstand en damwandweerstand relatief hoog zijn. Dat wordt bevestigd door enkele in het gebied aanwezige peilbuizen. Een verlaging van circa 0,3 meter onder de historisch laagste grondwaterstand wordt verwacht. Deze waarde zal worden toegepast in de beoordeling van dit effect op de zakking van een fundering.

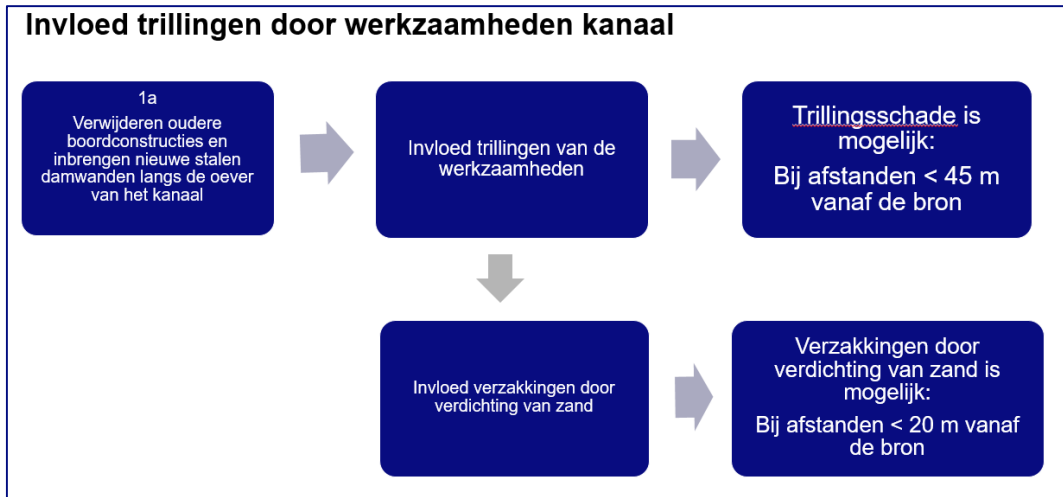
Een verlaging van de grondwaterspanning zal over het algemeen leiden tot een verhoging van de effectieve spanning in de grond. In samendrukbare lagen, zoals klei en veen, kan de verhoging van de effectieve spanning gepaard gaan met een volume afname, samendrukking, van deze lagen. Er kan sprake zijn van samendrukking van grondlagen door de toename van gewicht van de grond, die droog valt. Een afname van volume kan ook veroorzaakt worden door krimp van klei- en met name veenlagen als de grondwaterstand onder de bovenkant van deze samendrukbare lagen komt te liggen. In dat geval zal de veenlaag verder uitdrogen en krimpen. Op den duur kan oxidatie optreden, wat kan leiden tot aanzienlijke volumeverandering van veenlagen, dat is echter op dit moment in de boringen niet aangetroffen. De samendrukking van de samendrukbare laag kan zich uiten in zettingen aan het maaiveld en daarmee ook (ver)zakking van funderingselementen. Opgemerkt wordt dat dit mechanisme alleen tot verzakking van het funderingselement leidt indien deze samendrukbare lagen zich onder het funderingselement uitstrekt en de uitdroging ook onder het funderingselement plaats vindt.

Oxidatie van het veen, door een verlaging van de grondwaterspanning, is in het veld nauwelijks waargenomen. Oxidatie van het veen wordt dan ook niet gezien als de verklaring voor de waargenomen verzakkingen van de bebouwing. Wel is de mogelijkheid dat krimp van het veen zal toenemen, zie Hoofdstuk 6. De grootte van deze toename is niet gekwantificeerd. Paragraaf 6.4.2 geeft een beschouwing van de mogelijke zetting als gevolg van de hierboven genoemde grondwaterstandsveranderingen. Geconcludeerd is dat de zettingen als gevolg van de verwachte grondwaterstandsverandering gering tot verwaarloosbaar is.

Na droogte zal de grondwaterspanning weer toenemen, waardoor de drooggevalen samendrukbare grondlagen weer in volume zullen toenemen. Maar de opgetreden zakking, door consolidatie in klei- en veenlagen, zal nauwelijks herstellen door de toename in grondwaterspanning. Door samendrukking van grond boven de onderkant van de fundering kan een extra neerwaartse belasting worden uitgeoefend via negatieve kleef op poeren en funderingsmuren. Dit kan leiden tot een toename van de belasting op de fundering.

Ad 3.

In Figuur 7.4 is de gebeurtenissenboom weergegeven voor de mogelijke beïnvloeding van trillingen tijdens het inbrengen van damwanden langs de oevers van het kanaal.



Figuur 7.4 Gebeurtenissenboom beïnvloeding trillingen door werkzaamheden aan het kanaal

In het rapport [1] zijn trillingen beschouwd in relatie tot de kans op schade bij de panden. Daaruit zijn de volgende conclusies getrokken:

- *Scheepvaartverkeer.* In de veronderstelling dat in het pand nog enige versterking kan optreden, is het aannemelijk dat de passage van zwaardere schepen kan worden gevoeld in de panden. Echter conform de SBR richtlijn A voor schade is geen schade te verwachten aan de panden als gevolg van de scheepvaart. Hieruit lijkt het onwaarschijnlijk dat de trillingsbron “scheepvaartverkeer” schade veroorzaakt of heeft veroorzaakt.
- *Wegverkeer.* Al hoewel uit de metingen blijkt dat het zware verkeer dusdanige trillingen genereren dat deze voelbaar zijn, is de conclusie dat de rekenwaarden voor de gemeten trillingen een factor 4 onder de grenswaarde conform de SBR richtlijn A voor schade blijven. Het is daarom onwaarschijnlijk dat de trillingsbron “zwaar verkeer” schade veroorzaakt of heeft veroorzaakt.
- *Installatie damwanden en ankers.* Op basis van de trillingsmetingen tijdens het installeren van de damwanden en boordvoorzieningen in 2011 en 2012 blijkt dat tijdens het installeren van de damwanden en dan met name de ankers, de grenswaarden uit de SBR richtlijn overschreden zijn, en niet kan worden uitgesloten dat hierdoor schade is opgetreden aan nabijgelegen panden.

In 2019 zijn metingen uitgevoerd bij vergelijkbare installatie van damwanden. Uit de metingen is een empirische curve voor de 95% bovengrens van de trillingssnelheid afgeleid. De uitgangspunten daarbij zijn dat als gevolg van installatie van damwanden en ankers er een kans op schade is. De grens voor de kans op schade is door trillingen en zakking door trillingen is gelegd op 0,5%. De SBR hanteert 1% als grenswaarde; in verband met onzekerheden is gekozen voor een veiliger niveau. Bij de gevonden waarden bestaat dus 0,5% kans op schade door trillingen. Dit heeft geleid tot de volgende criteria:

Schade door trillingen kan op basis van deze metingen en de afgeleide empirische curve tot 45 m vanaf de bron optreden met een kans van 0,5%. Op kleinere afstanden neemt de kans op trillingsschade toe. Voor zakking als indirect gevolg van de trillingen ligt deze grens op 20 m van bron tot object.

7.2.6 Toekomst verwachting

Gegevens die aangeven hoe (onderdelen van) het pand zich gedraagt qua vervormingen kunnen helpen om oorzaken aan te geven maar ook om verwachtingen voor de toekomst te geven. Hiervoor zal in eerste instantie gebruik worden gemaakt van de scheurwijdtemeters die in panden geplaatst zijn en daarnaast ook van InSAR metingen. De scheurwijdtemeters zijn in de periode 2019-2020 geplaatst op bepalende scheuren in de panden, op advies van adviseurs van de Provincie. Deze scheurwijdtemeters zijn periodiek afgelezen.

Met betrekking tot de gebiedsbrede toepassing van InSAR wordt verwezen naar Hoofdstuk 4, analyse van satelliet metingen. Specifiek voor de panden is daarnaast ingezoomd op deze locaties. In paragraaf 7.3 zijn de uitgangspunten voor het gebruik van de satellietmetingen toegelicht.

Voorspelling van de toekomstige zakkingen is niet goed mogelijk op basis van de InSAR-metingen. Deze zijn voor individuele panden niet betrouwbaar genoeg om te kunnen extrapoleren naar langere termijn en een voorspelling van het toekomstige zakkingsgedrag te geven.

Uit het onderzoek blijkt dat de schade oorzaak niet bij alle panden hetzelfde is; dat betekent dat ook de toekomst verwachting verschillend is. De onderstaande verwachting is gebaseerd op alle gegevens die tijdens het onderzoek zijn verzameld met betrekking tot de funderingen en het zakkingsgedrag tot nu toe.

Funderingen die boven het veen zijn aangelegd zullen ook in de toekomst blijven zakken. Ondanks dat veel funderingen al tientallen jaren bestaan zal de zakking doorgaan, waarbij vooral tijdens droge zomers een toename van de zakking zal zijn te zien. Dit geldt voor de panden, die op een fundering boven het veen staan en voor (beton) vloeren die op een aanvulling boven het veen zijn aangelegd en voor de kruipruimten. De toename in de toekomst zal qua orde van grootte vergelijkbaar zijn met de zakking in de laatste jaren, afhankelijk van het voorkomen van extreem droge zomers.

Funderingen die onder het veen zijn aangelegd zijn over het algemeen minder gezakt en de verwachting is dat deze ook in de toekomst weinig zullen zakken. Droge zomers hebben bij deze panden ook minder zakking tot gevolg.

7.3 Toepassing INSAR op pandniveau

Er is door SkyGeo een op-maat lokale InSAR processing uitgevoerd op bestaande radarbeelden van de Envisat en Radarsat-2 satelliet. De Envisat data beslaat een periode van december 2003 tot en met september 2010. Deze data is met een lage resolutie (3,85x19,17m). In deze periode zijn 68 beelden beschikbaar (1x36 dagen gemiddeld). De Radarsat-2 beelden met hoge XF resolutie gebruikt voor de analyse zijn beschikbaar voor de opgaande en neergaande baan (asc en dsc) en beslaan een periode vanaf juni 2015 tot april 2021. De nauwkeurigheid van de beelden is hoger dan van de Envisat (2,35x4,37m) en ook de frequentie is hoger (1x24 dagen). Door de nauwkeurigere positionering is onderscheid tussen pand en maaiveld beter te maken.

Er is ook gekeken naar de InSAR beelden van de bodemdalingskaart.nl. Deze zijn gebaseerd op data van een andere satelliet, de Sentinel 1 met een lagere resolutie (13 x 13,5m) maar een hogere frequentie (eenmaal per zes dagen plus een combinatie van verschillende tracks, gemiddeld één beeld per 1,4 dagen). Met de bodemdalingskaart is het alleen mogelijk beweging van grote vlakken vast te stellen, zoals grote schuren of het maaiveld. Individuele woningen kunnen hier minder goed mee worden beschouwd. De bodemdalingskaart beelden zijn wel meer geschikt voor het analyseren van seizoensinvloeden, omdat er meer

meetpunten in de tijd zijn, maar daarvan is dus minder goed bekend op welke locatie deze zich bevinden.

Voor alle punten is door SkyGeo een kwaliteitsindex toegevoegd van 0 tot 1. Deltares heeft alleen punten gebruikt met een minimale kwaliteit van 0,55. Punten met een lagere kwaliteit worden als niet betrouwbaar genoeg gekwalificeerd. Voor de figuren in de pandrapportages zijn punten met een kwaliteit hoger dan 0,65 gebruikt. Voor de individuele analyses ook punten vanaf 0,55. Voor panden waar een niet continue trend wordt gevonden kan het zijn dat een daadwerkelijke verandering van de zakkingsnelheid door de filtering wordt beschouwd als “onbetrouwbaar” en het punt daarom een lagere kwaliteit krijgt terwijl in werkelijkheid de beweging overeenkomt met de werkelijke beweging van het pand. Er zijn ook meetpunten die een zogenaamde “fasesprong” hebben, dit komt voor als de zakking groter is dan de fase van de satelliet. Dit kan alleen worden beschouwd door per pand de punten individueel en in samenhang te beoordelen.

Voor alle punten geldt dat deze zijn gemeten in de baan van de satelliet (Line of Sight, LoS). Voor de analyse is ervan uitgegaan dat er geen significante horizontale vervorming is opgetreden dus dat de LoS metingen als zakking worden beschouwd.

Onzekerheid InSAR interpretatie per pand

Uit de interpretatie op pandniveau is gebleken dat een grove trend goed uit de datapunten is te halen. Daarbij moet goed opgelet worden of het punt zich op een pand bevindt. Er is enige onnauwkeurigheid in de plaatsbepaling. De gegevens Point Height en High res DEM Height geven de indicatie hiervoor. Als punten beduidend hoger liggen dan maaiveld (ca > 2,5 m verschil tussen beide) dan zijn die veelal gesitueerd op het pand, deze punten zijn bij voorkeur gebruikt en aangeduid met “hoge punten”. Lage punten zijn naar waarschijnlijkheid eerder gesitueerd op het maaiveld of op de rand van gebouw en maaiveld (hoekreflecties) en zijn minder betrouwbaar voor de deformatie van de panden.

Omdat de variatie in ‘zakking’ soms de fase van de satelliet benadert kunnen fasesprongen voorkomen. In de metingen is het gevolg van een fasesprong een toename van de zakking. Het is niet mogelijk een automatische interpretatie te maken van het al dan niet optreden van fase sprongen. Een toename van de zakking kan logisch zijn indien er een aanleiding is, zoals een lokale belastingverhoging, extreme droogte, specifieke werkzaamheden. Echter de geconstateerde fasesprongen kunnen niet altijd worden verklaard omdat die informatie niet overeenkomt met metingen of schade constatering aan het pand of er geen aanleiding bekend is. Ook wordt soms gezien dat bij een pand verschillende punten een sprong laat zien op verschillende momenten. Dit houdt in dat geïdentificeerde sprongen niet altijd realistisch zijn.

Voorgaande maakt dat het resultaat van de InSAR interpretatie per pand een behoorlijke onzekerheid kan hebben waar rekening mee moet worden gehouden.

7.4 Samenvatting pandanalyse

7.4.1 Samenvatting in tabelvorm

Tabel 7.3 geeft een samenvatting gemaakt van de pandanalyse, die is uitgevoerd. In deze tabel worden de volgende aspecten per pand weergegeven:

- Type zakking.
- Type fundering.
- Oorzaak van de zakkingen.
- Bijdrage zakking door het vervangen van de bestaande betonnen wand door een stalen damwand langs het kanaal (vervanging na 1995).
- Bijdrage trillingsschade door het inbrengen van de stalen damwanden (na 1995).
- Bijdrage door het optreden van extreme droogte in 2018/2019.
- De invloed van de verlaging van de grondwaterstand door droogte én door de vervanging van de betonnen wand door een stalen damwand.

In Bijlage N is een uitgebreide versie van de tabel weergegeven, waarbij onder andere funderingsgegevens, de datum van de schademeldingen, de datum van de vervanging van de betonnen wanden langs het kanaal en de berekende grondwaterstandsverlagingen als gevolg van de vervanging van lekkende wanden langs het kanaal en als gevolg van droogte zijn weergegeven.

In paragraaf 7.4.2 wordt nader uitleg gegeven over de invulling van de tabel.

Tabel 7.3 Samenvatting analyse invloed panden, voor de toelichting op de tabel wordt verwezen naar paragraaf 7.4.2. De nummering in de bovenste regel is vermeld in de paragraaf bij de toelichting

Tabel 7.3 is om privacy redenen niet opgenomen.

Figuur 7.5 Schademeldingen en belangrijkste gebeurtenissen langs de westzijde van het kanaal

Figuur 7.5 is om privacy redenen niet opgenomen.

Figuur 7.6 Schademeldingen en belangrijkste gebeurtenissen langs de oostzijde van het kanaal

Figuur 7.6 is om privacy redenen niet opgenomen.

7.4.2 Uitleg Tabel 7.3

In deze paragraaf wordt nader uitleg gegeven over de analyse die heeft plaatsgevonden voor het opstellen van Tabel 7.3.

7.4.2.1 Opgetreden zakking, zie 1 in de tabel

Bij de classificatie van de opgetreden zakkingsverschillen aan de panden langs het kanaal is gebruik gemaakt van de in Tabel 7.4 weergegeven classificatie.

Tabel 7.4 Classificatie van de opgetreden zakkingsverschillen aan de panden

1) Classificatie zakkingsverschil op basis van de lintvoeg waterpassing	cm
klein	< 2
matig klein	2 tot 4
matig	4 tot 6
matig groot	6 tot 9
groot	>9

7.4.2.2 Bijdrage zakking baggeren kanaal, zie 2) in de tabel

Er wordt vanuit gegaan dat het baggeren bij de panden kan hebben geleid tot een tijdelijke verhoging van de grondwaterstand van maximaal 0,2 tot 0,3 m boven de historisch hoogste waarde.

Dit kan in sommige gevallen zakking van de fundering veroorzaken, als gevolg van tijdelijke afname van de draagkracht. In alle gevallen, waar de fundering boven de veenlaag staat, heeft een verhoging van de grondwaterstand in de veenlaag geen invloed op de draagkracht. De veenlaag kan wel tot gevolg hebben dat de draagkracht gering is, maar een hogere grondwaterstand in het veen verlaagt deze sterkte niet verder omdat de (ongedraineerde) sterkte van de veenlaag niet verandert door de (tijdelijke) grondwaterstandverhoging.

Bij de panden met een fundering onder de veenlaag kan verhoging van de grondwaterstand zakking veroorzaken als de veiligheid (marge tussen belasting en grondmechanische draagkracht) klein is. Uit de berekeningen in bijlage H blijkt, dat de veiligheid van strook funderingen groot is. Bij poer funderingen hangt het af van afmetingen van de fundering, de belasting en de weerstand van de funderingslaag. Omdat deze factoren alleen in beperkte mate kunnen worden vastgesteld (de funderingsinspecties zijn meestal op 1 locatie uitgevoerd) is er gekozen voor de "observational" method; dit wil in dit geval zeggen dat als de zakkingsverschillen klein (< 2 cm) zijn de fundering kennelijk voldoende marge heeft en een verhoging van de grondwaterstand geen zakking tot gevolg zal hebben gehad.

In gevallen waar het zakkingsverschil groter was dan 2 cm, wordt er van uitgegaan dat dit werd veroorzaakt door een lage marge tussen belasting en draagkracht en dat deze funderingen dus gevoelig zijn voor verhoging van de grondwaterstand. De berekening van de (orde van) grootte van de zakking in deze gevallen kan niet door middel van gangbare berekeningsmethoden zoals EEM worden uitgevoerd omdat daarvoor de invoergegevens ontbreken en dit soort modellen voor het berekenen van zakkingen in situaties met een lage veiligheid onbetrouwbaar zijn. Voor een kwantitatieve beoordeling van de invloed van baggeren wordt gebruik gemaakt van de resultaten van proefbelastingen op funderingen op staal. Het blijkt dat bij grotere zakkingen (meer dan 2 á 3% van de funderingsbreedte) de zakking lineair toeneemt met de belasting, zie bijvoorbeeld (FHWA-RD-97-068 , Nov 1997). In bijlage H blijkt dat de veiligheid van de funderingen (met lage veiligheid) bij een verhoging van de grondwaterstand met 0,3 m tussen de 5 en 10% afneemt. Dit is equivalent aan een belasting toename van 5 á 10%. Uit bovenstaande volgt dan dat de zakkingen als gevolg van deze grondwaterstand verhoging ook tussen de 5 á 10% kunnen zijn toegenomen ten opzichte van de zakkingen door eigen gewicht van het pand.

Omdat het niet zeker is of de veiligheidsmarge van de fundering in werkelijkheid niet veel groter was en het dus mogelijk is dat er geen zakking van de fundering is geweest, wordt aanbevolen om alleen met deze extra zakking rekening te houden als er een schade melding is geweest te tijden van het baggeren waarbij ook andere schade dan wateroverlast werd gemeld.

7.4.2.3 Bijdrage door vervangen bestaande wand door stalen wand, zie 3) in de tabel

a. Uit geohydrologische berekeningen van de verschillende scenario's blijkt dat het vervangen van een 4 m lange betonnen wand, zoals deze nu nog bij de Schoolstraat staat, door een langere stalen wand geen invloed heeft op de grondwaterstanden. Dit komt enerzijds omdat de betonnen wand daar goed waterkerend is en anderzijds omdat het grondwater dat nu onder de kortere betonnen wand stroomt zonder veel extra drukverlies onder de langere stalen wand doorstroomt.

b. In de scenario berekeningen is berekend dat het vervangen van een korte betonnen damwand door een lange stalen damwand een verlaging van de grondwaterstand bij de panden veroorzaakt van maximaal 0,3 m, indien zich tussen de onderkant van de betonnen wand en de onderkant van de stalen wand over een groter gebied aan weerszijde van het kanaal een afsluitende laag bevindt. Voor situaties met lokale afsluitende lagen wordt met maximaal 0,1 m verlaging rekening gehouden.

c. Verder is berekend dat, als wordt uitgegaan van een betonnen wand zoals nu 100 m ten zuiden van Pand 14 wordt aangetroffen, de grondwaterstand achter de damwand gelijk is aan het kanaalpeil maar dat op enkele meters afstand van de damwand de grondwaterstand ca 1,5 m lager staat. Het blijkt dat de lengte van de veenlaag (gemeten vanaf de damwand) bepalend is voor het verloop van de grondwaterstand. In de situatie zoals bij de Pand 20, waar de veenlaag tot ca 50 m van de damwand doorloopt, zou in het geval van een volledig lekke damwand, de grondwaterstand over grotere afstand (tot 10 m van de damwand) boven de veenlaag liggen en bij grotere afstand tot de damwand in de veenlaag. Bij de voorgevel van het pand, in dit geval op ca 20 m afstand van het kanaal kan de grondwaterstand nog ca 0,3 m hoger liggen dan in geval met een dichte wand.

Bij de Panden 2, 16 en 18 is de lengte van de veenlaag ca 10m en is het effect van een lekke wand op de grondwaterstand bij de panden ca 0,1 m; bij een lengte van de veenlaag van 25 m is de invloed bij de panden ca 0,2 m.

Deze verlaging van de grondwaterstand heeft zich echter in het verleden ook voorgedaan, namelijk toen de oorspronkelijke houten beschoeiingen werden vervangen door betonnen wanden; deze betonnen wanden waren immers in aanvang ook dicht, zoals nu ook nog het geval is bij de omgeving van de Panden 2, 16 en 18.

Het vervangen van een lekke betonnen door een dicht beton wand leidt dus, afgezien van hetgeen beschreven is in 2.2, niet tot lagere grondwaterstanden bij de panden dan na het aanbrengen van de betonnen wanden het geval is geweest.

De verlaging van de grondwaterstand door het vervangen van de lekke betonnen wand door de stalen wand heeft dus voor een herbelasting gezorgd.

Het lastige is dat niet bekend is hoe “waterdicht” de betonnen wanden waren toen ze werden vervangen. In de beoordeling van de invloed van het vervangen van bestaande damwanden wordt met de worst case rekening gehouden, dat het vervangen van de lekke betonnen wand door een stalen wand bij de voorgevels heeft geresulteerd in een 0,3 m lagere grondwaterstand.

Zoals in paragraaf 6 aangegeven heeft verlaging van de grondwaterstand in het veen nagenoeg geen invloed op de spanningen in de veenlaag en veroorzaakt dit dus niet meer samendrukking. Krimp als gevolg van droogte kan hierdoor wel een grotere rol zijn gaan spelen. Krimp van de veenlaag kan dus voor funderingen die boven de veenlaag zijn aangelegd een bijdrage leveren aan de zakking. Op de bepaling van de bijdrage door krimp wordt hieronder verder ingegaan.

Deze grondwaterstand verlaging speelt zich boven en in de veenlaag af. Uit geohydrologische berekeningen blijkt dat de verlaging van de stijghoogte in de zandlaag onder de veenlaag ca 0,1 m is, tenzij er conform 2.2 aaneengesloten afsluitende lagen onder de betonnen wand aanwezig zijn dat is de verlaging eveneens 0,3 m. Krimp van eventuele siltige lagen onder de veenlaag en onder de fundering speelt geen rol om dat uitdroging op die diepte niet waarschijnlijk is. Deze grondwaterstand verlaging in de siltige zandlaag van 0,1 respectievelijk 0,3 m betekent een toename van 2 tot 6% van de samendrukking ten gevolge van het eigen gewicht. Dit volgt uit de natuurlijke logaritme van de verhouding tot de spanningstoename ten gevolge van de funderingsdruk en de ten gevolge van de grondwaterstand verlaging.

7.4.2.4 Krimp en droogte (zie 4) in de tabel

In hoofdstuk 6 is de benadering voor de bijdrage van krimp aan de zakking aangegeven. Daarin wordt betoogd dat op basis van de vochtgehalten in het veen de totale krimp onder de bebouwing in de loop van de tijd 0,05 a 0,075 m kan zijn geweest.

Het aanbrengen van damwanden en droogte zullen in de loop van de tijd een bijdrage hebben geleverd aan deze zakking door krimp. Het vervangen van damwanden en de droogte die elke paar jaar optreedt, betekent een herhaalde grondwaterstand verlaging. De krimp door deze herhaalde grondwaterstandverlaging is veel kleiner in de orde van 25% van de “maagdelijke” krimp.

In de tabel wordt daarom de zakking door krimp van funderingen die boven het veen staan door het vervangen van de damwanden op 0,005 m ingeschat, (grondwaterstand verlaging van 0,3 m die al eerder optrad). Voor de extreme droogte van 2018 en 2019 wordt ervan uitgegaan dat de helft van de grondwaterstand verlaging in die periode onder de historisch laagste waarde uitkwam en dus voor dat gedeelte wordt met “maagdelijke” krimp gerekend. De grondwaterstand verlaging door de droogte is 0,3 m en wordt gesuperponeerd op de

verlaging die het gevolg is van vervanging van lekkende damwanden; dit levert een totale maximale grondwaterstand daling van 0,6 m en een zakking door krimp van de funderingen die boven het veen zijn aangelegd van 2 cm.

Voor de stijghoogte in de zandlaag onder het veen geldt dat de droogte ook tot een verlaging van 0,3 m leidt maar hierbij moet 0,1 m worden opgeteld van het vervangen van een lekkende wand.

Zakking van funderingen onder het veen door krimp is nihil en door consolidatie ten gevolg van afname van de opwaartse druk is 2% door de vervanging van de damwand en 6% door de droogte van 2018 en 2019, in het totaal dus 8%. Bij Pand 15 is de totale bijdrage 12% omdat het effect van de damwand op de stijghoogte in de zandlaag daar ook 0,3 m is; samen met de droogte is levert dat 0,6 m.

7.5 Analyse van de schade-oorzaken per pand

De analyse van de schade-oorzaak is vanwege privacy redenen niet in dit rapport opgenomen.

8 Effect verlaging kanaalpeil

8.1 Vraagstelling

De Provincie heeft Deltares in de vierde onderzoeksvraag gevraagd om na te gaan:

- Hoe effectief verlaging van het waterpeil op het kanaal is als mitigerende maatregel tegen piping.
- Welke andere effecten de ingreep heeft.

De aanname die aan de voorgestelde maatregel ten grondslag ligt, is dat lek uit het uitgediepte kanaal de oorzaak is van piping die verzakking van panden veroorzaakt (ook wel aangeduid als suffosie oftewel interne erosie met uitspoeling van fijne delen uit de zandlaag, waarop de panden zijn gefundeerd). Vernatting, door stijging van de grondwaterstand, kan een bijeffect zijn waardoor de draagkracht van funderingen af kan nemen. Overigens kan een peilverlaging in het kanaal een tijdelijke maatregel zijn (bijvoorbeeld gedurende 2 jaar) totdat andere maatregelen zijn getroffen, bijvoorbeeld door het aanbrengen van een bodemafdichting in het kanaal als definitieve oplossing, indien nodig.

In de beantwoording is alleen ingegaan op de effecten die volgen uit de maatregel met peilverlaging die voorgesteld is voor het kanaaldeel tussen sluis Aadorp en sluis de Haandrik, om de gebouwschade langs het kanaal tegen te gaan. Het kanaaldeel van de Vecht naar Coevorden wordt niet beschouwd. De korte aftakking naar het Zwolse kanaal zit wel in de scope. Hierna is eerst ingegaan op de effectiviteit van de voorgestelde maatregel. Vervolgens bevat het tweede deel van de onderzoeksvraag de effecten van de ingreep. In bijlage E is de inventarisatie van effecten van het kanaalpeil uitgebreid beschreven.

8.2 De effectiviteit van peilverlaging tegen piping

Uit onderzoek van Deltares is af te leiden dat de drie verschillende vormen van piping (terugschrijdende erosie, suffosie en filterincomptabiliteit) in de onderhavige toestand van ondergrond en grondwater niet voorkomen. Uit de metingen van grondwaterstanden komt als resultaat dat naast het kanaal ter plekke van de woningen geen groot verhang in het grondwater voorkomt. Een peilverlaging op het kanaal om het verhang in het grondwater te verminderen zal daarom geen belangrijke betekenis hebben om de verschillende vormen van piping te reduceren. Uit een korte historische studie blijkt dat het kanaalpeil al vanaf de realisatie van het kanaal een hoog niveau heeft gehad, mogelijk altijd het huidige peil.

8.3 Aanpak van de analyse

8.3.1 Opzet in een stappenplan

Voor de vierde vraag van het onderzoek wordt nagegaan welke effecten van een verlaging van het kanaalpeil aan de orde kunnen zijn. Omdat sprake is van een langgerekt kanaal waarlangs vele belangen voorkomen en de effecten daarop goed moeten worden afgewogen, is een aanpak van grof naar fijn voorgesteld, overeenkomstig het volgende stappenplan:

- 1 Eerste stap is om overeenstemming te vinden over de te beschouwen effecten van de voorgestane uitvoeringsmethode (verlaging van het kanaalpeil).
- 2 Volgens een gebruikelijke opzet van een risico-inventarisatie worden mogelijke onderwerpen, mechanismen en de risicovolle objecten benoemd.

- 3 In de volgende stap worden de mogelijke risico's kwalitatief beschreven, geklasseerd (kans x gevolg in kwalitatieve schaal) en geordend.
- 4 Daarna worden de belangrijkste risico's gekwantificeerd, indien deze nadere onderbouwing is gewenst.
- 5 Op basis van de uitkomsten van de risico-inventarisatie kan men besluiten hoe met de voorgestelde uitvoeringsmethode moet worden omgegaan en worden zo nodig beheersmaatregelen voor de negatieve effecten gedefinieerd.

In overleg met de opdrachtgevers van de Provincie is besloten om de analyse te beperken tot stap 1, 2 en het eerste deel van stap 3, als kwalitatieve beschrijving van de risico's.

8.3.2 Beschouwde effecten van kanaalpeilverlaging

De volgende effecten komen naar voren uit een voorlopige, globale risicobeschouwing (eerste aanzet voor stap 1 in het stappenplan):

- 1 Scheepvaart (capaciteit).
- 2 Waterbeheersing oppervlaktewater.
- 3 Waterkwaliteit.
- 4 Grondwaterbeheersing.
- 5 Bebouwing.
- 6 Waterkeringen (vervorming en stabiliteit van damwanden).
- 7 Waterbouwkundige constructies (sluizen en stuwen).
- 8 Infrastructuur wegen en bruggen.
- 9 Infrastructuur riolering, kabels en leidingen.
- 10 Landbouw.
- 11 Natuur en ecologie.
- 12 Waterwinning.
- 13 Overige belangen, zoals bedrijfsbelangen en recreatie.

Bij de uitvoering van het stappenplan voor dit onderdeel van het onderzoek zijn stappen 1, 2 en het eerste deel van 3 doorlopen. Dat wil zeggen dat de vraagarticulatie is doorgenomen en de inventarisatie van onderwerpen, mechanismen en de risicovolle objecten plus de kwalitatieve beschrijving van mogelijke effecten. De informatie voor de inventarisatie en effectbeschrijving is aangeleverd door de belangrijkste informatiehouders:

- Onderdeel 1, 6, 7, 8, 9 en 13 – Provincie Overijssel.
- Onderdelen 2, 3 en 4 - Provincie en het Waterschap Vechtstromen.
- Onderwerp 5 – Deltares.
- Onderdelen 10 en 11 en 12 – Deltares, wat betreft effecten die voortkomen uit grondwater beïnvloeding van het kanaal, en Waterschap - Informatie over omgeving.

Hierna zijn van de diverse effecten de informatie en risico-inventarisatie beschreven. De kostenconsequenties zijn in de inventarisatie niet uitgewerkt.

8.4 Samenvatting van effecten van peilverlaging

Bijlage E.4.2 en E.4.3 geven een toelichting op het gebruik van het kanaal als vaarweg en de rol in het waterbeheer. In dit deel van het onderzoek is ingegaan op de effecten van een eventuele verlaging van het kanaalpeil. Uit de uitgevoerde risico-inventarisatie blijken de hierna beschreven effecten relevant te zijn. Voor de uitgebreide beschrijving wordt verwezen naar bijlage E.5.

8.4.1 Effect 1: Scheepvaart (capaciteit)

Een verlaging van het kanaalpeil van 0,5 m vermindert de kanaaldiepte met ca. 15%. Daarmee neemt de toegankelijkheid voor schepen met afmetingen volgens klasse CEMT II af. Dit zal leiden tot noodzakelijke vermindering van de beladingsgraad en/of inzet van kleinere schepen. Dit doet afbreuk aan het feit dat het transport over het kanaal afgelopen jaren na de opwaardering juist is toegenomen en bedrijven daarvan afhankelijk zijn. Bij inzet van kleinere of minder beladen schepen zal het aantal scheepsbewegingen toenemen. Gevolgen daarvan zijn: meer verbruik van brandstof, meer uitstoot, hogere transportkosten, economische gevolgen voor bedrijven die van het transport afhankelijk zijn, toename van bediening van sluizen en bruggen, langere transporttijden, meer tijd nodig voor laden en lossen, toename van het transport over de weg, verkeersoverlast (filevorming), verkeersonveiligheid, nogmaals groter energieverbruik en milieubelasting.

Vanwege de peilverlaging op het kanaal en daardoor een permanent peilverschil dat met de Vecht ontstaat, zal Sluis De Haandrik gesloten moeten worden. In dat geval zal schutten overlast en kosten voor de scheepvaart en de daarvan afhankelijke bedrijven gaan betekenen. Hoewel het transport meest naar de betonfabriek in Hardenberg plaatsvindt, zal vooral transport naar Coevorden onder langere schuttijden gaan lijden. Dit alles kan leiden tot afname van de rol van de scheepvaart in regionaal transport.

De waterdiepte boven de drempel in de sluizen wordt door kanaalpeilverlaging bovendien zodanig verkleind dat een te geringe ruimte aanwezig is voor passage van volbeladen schepen met afmetingen volgens klasse CEMT II.

8.4.2 Effect 2: Waterbeheersing

Wat het waterbeheer in deze regio betreft heeft het kanaal een belangrijke functie in de aanvoer en afvoer van water. Omdat het kanaalpeil lager wordt dan het stuwpeil op de Vecht is permanent gebruik van de schutsluis De Haandrik nodig in plaats van gedeeltelijke inzet bij hoogwater op de Vecht. Het huidige kanaalpeil en het stuwpeil op de Vecht zijn opgenomen in een geldend internationaal verdrag. Aanpassing van het peil is derhalve niet toelaatbaar. Een aanpassing dient met andere buitenlandse overheden te worden besproken. Vanwege het peilverschil dat permanent met de Vecht zal gaan gelden, zal bij De Haandrik een gemaal en omloopleiding naar het Coevorden - Vechtkanaal moeten worden aangelegd om wateropvoer naar Zuid-Oost Drenthe te kunnen garanderen. Verder zal het bij het begin van het droogteseizoen nodig zijn om bij gesloten sluis via een leiding water vanuit de Vecht op het kanaal te leiden of de aanvoer via sluis Eefde eerder te starten.

Het omliggend gebied is afhankelijk van watertoevoer vanuit 17 inlaten vanuit het kanaal, vooral in tijden van watertekort, waartoe water vanuit het Twentekanaal wordt aangevoerd. Verplichtingen zijn opgenomen in het Waterakkoord. Watertoevoer vanaf het Twentekanaal blijft bij laag kanaalpeil mogelijk. Aan waterbeheersing zal wel meer aandacht moeten worden besteed bij een lager kanaalpeil omdat bij schutten in Aadorp bij een groter verval en meer passages van kleinere schepen een onbalans kan ontstaan in de waterdoorlaat.

Bij peilverlaging op het kanaal zijn de bestaande inlaten vanwege te hoge drempelhoogten echter zeer waarschijnlijk niet meer geschikt om de wateraanvoer naar het achterland te kunnen garanderen. Aanpassing van alle inlaten of plaatsing van (tijdelijke) pompinstallaties is noodzakelijk om watertekorten in de landbouw en waardevolle hoogveen-natuurgebieden te kunnen voorkomen.

8.4.3 Effect 3: Waterkwaliteit

De waterkwaliteit zal bij een lager kanaalpeil waarschijnlijk slechts in geringe mate een rol spelen omdat het kanaal niet druk bevaren wordt en zwevend slib bij een verwachte, licht toenemende stroming zal worden afgevoerd.

8.4.4 Effect 4: Grondwaterbeheersing

De grondwaterstand nabij het kanaal zal bij een peilverlaging van 0,5 m kunnen dalen; volgens grondwatermodellering is de verlaging van grondwaterstand nabij het kanaal naar verwachting 5 tot maximaal 25 cm, afhankelijk van de hydraulische weerstand van kanaalbodem en wanden. Het effect op enige afstand is waarschijnlijk nihil.

8.4.5 Effect 5: Bebouwing

Grondwaterstands daling vanwege de kanaalpeilverlaging kan leiden tot schade aan gebouwen langs het kanaal door zetting voor zover deze panden boven samendrukbare lagen zijn gefundeerd. Vanwege de ouderdom van gebouwen in deze regio kan dat wel voorkomen. Vooral wanneer uitbouwen op andere fundering of grondslag zijn gerealiseerd zal dit kunnen leiden tot gebouwschade.

8.4.6 Effect 6: Waterkeringen en damwanden

De waterkering langs het kanaal heeft geen formele status. In die zin worden de kaden ingedeeld in de categorie overige keringen. Het te beoordelen effect betreft vooral de boordvoorzieningen (damwanden). Door 0,5 m peilverlaging wordt de stabiliteit van de damwanden nadelig beïnvloed. De stabiliteit van boordvoorzieningen met damwanden waar nu al te weinig veiligheid bestaat, zal door kanaalpeilverlaging nog slechter worden. De afname van veiligheid kan vooral een groot risico inhouden voor de stabiliteit van betonnen damwanden die over geruime lengte aanwezig zijn.

Daarnaast kan langs enkele trajecten de stabiliteit van stalen damwanden die nu al te geringe veiligheid hebben, negatief worden beïnvloed. Controles met enkele steekproeven wijzen uit dat voor die plekken de inventarisatie en risicokaart van de Provincie een juist beeld geeft. Volgens de uitgevoerde beperkte steekproef is er geen reden om aan de risicokaart te twijfelen. Bij peilverlaging wordt de urgentie van vervanging van (met name betonnen) damwand groter. Op één locatie vormt de stabiliteit een risico omdat hier nu al overbelasting aan de orde is. De situatie bij de insteekhaven Hardenberg is niet gecontroleerd omdat deze buiten het beheergebied van de Provincie ligt.

8.4.7 Effect 7: Waterbouwkundige constructies

Verwezen wordt naar eerdere opmerkingen over noodzakelijke aanpassingen bij sluizen (omloopleiding), sluisdeuren en inlaten. Deze behoeven aanpassing. Opdrijven van zinkers of onderleiders onder het kanaal bij peilverlaging vormt geen risico. Steigers en aanlegvoorzieningen bij wachtplaatsen, niet alleen voor de beroepsvaart maar ook voor recreatief gebruik, remmingwerken en aanslagen zullen moeten worden aangepast. Ook alle uittredevoorzieningen voor redding van te water geraakte fauna zullen moeten worden aangepast of er moeten tijdelijke voorzieningen worden ingezet.

8.4.8 Effecten 8 en 9: Wegen en bruggen en Infrastructuur kabels en leidingen

Als gevolg van lokaal dalende grondwaterstand bij kanaalpeilverlaging kan langs het kanaal zettingsschade ontstaan aan wegen, nutsvoorzieningen en huisaansluitingen. Tevens kan door damwandervorming aan de landzijde van de damwand een horizontale grondvervorming ontstaan. Dan komt het gebruik van de weg op de kanaalkaden verder in gevaar. Provincie heeft op sommige wegen langs het kanaal nu reeds beperkingen aan de aslasten van het verkeer ingesteld vanwege marginale stabiliteit van de damwanden.

De omvang van het gebied waar beperkingen aan de aslasten van het verkeer nodig zijn, zal toenemen. Op betreffende locaties moet dan ook worden gecontroleerd of er kans op schade ontstaat aan panden die op korte afstand van het kanaal staan.

Betonnen funderingen van de bruggen over het kanaal worden nauwelijks beïnvloed door een lager peil. Wel zal de waterstand onder de betonnen aanbruggen zakken waardoor zich hier vuil kan gaan ophopen.

8.4.9 Effecten 10 en 11: landbouw, natuur en ecologie

Vanuit de inlaten in de oevers van het kanaal en de doorvoer naar het noorden via Sluis De Haandrik worden landbouw- en natuurgebieden van water voorzien, vooral in perioden met watertekort. Deze wateraanvoer moet worden gehandhaafd, ook als het kanaalpeil wordt verlaagd, aangezien de aanvoer voor een omvangrijke oppervlakte van belang is en enkele hoogveengebieden (Engbertsdijksvenen, Bargerveen) met zeer zeldzame en kwetsbare natuur beschermd moeten worden.

De ecologie van de oevers zal waarschijnlijk wel een achteruitgang ondervinden door kanaalpeilverlaging, enerzijds omdat dit waterplanten aan de oevers kan beïnvloeden en omdat bij hogere ligging van de boordvoorziening bij fauna-uittrede-plaatsen ten opzichte van waterpeil de toegankelijkheid voor fauna zal afnemen. Aangezien er voor de Vecht en het kanaal als KRW-waterlichaam doelen worden vastgesteld die niet ingaan op peilverlaging, zal dit nader moeten worden beschouwd.

8.4.10 Effect 12: Waterwinning

Handhaving van de bestaande aanvoer via inlaat uit het kanaal naar het gebied rond drinkwaterwinning Hammervliet is van belang om de nadelige verdrogingseffecten van de grondwateronttrekking te compenseren. Bij de aanpassing van het kanaalpeil moet rekening worden gehouden met de toekomstige uitbreiding van deze drinkwaterwinning binnen de bestaande vergunning.

8.4.11 Overige belangen, bedrijfsbelangen en recreatie

Met name bedrijven in Hardenberg en Coevorden zullen nadelen ondervinden van effecten op transporten via de scheepvaart. Wellicht zullen bedrijven een nadeelcompensatie vragen als hun transportkosten stijgen. Een kanaalpeilverlaging frustreert verder mogelijke economische ontwikkelingen in de toekomst, zoals voor de industrie in Hardenberg en Coevorden.

8.4.12 Afweging van effecten

Zelfs zonder kwantificering van de effecten uit te voeren, kan worden gesteld dat de effecten van verlaging van het kanaalpeil en mogelijke kosten van compenserende maatregelen zeer omvangrijk zullen zijn. Deze effecten moeten worden afgezet tegen het effect van de kanaalpeilverlaging.

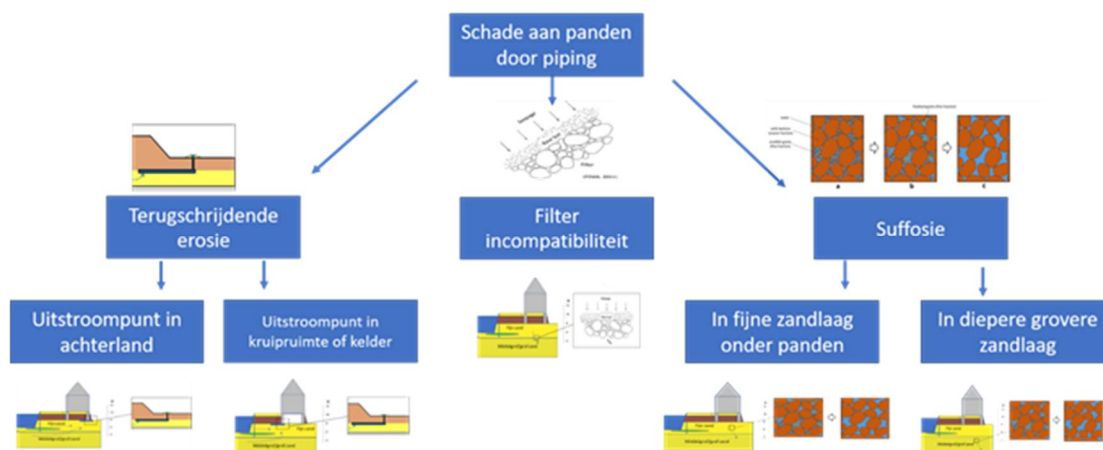
8.5 Conclusie m.b.t. peilverlaging

Deltares heeft een kwalitatieve beschrijving van de effecten van peilverlaging gegeven, die zijn aangevuld door deskundigen van de Provincie en het waterschap. De onderzochte effecten zijn niet verder kwantitatief beoordeeld. Omdat het onderzoek piping uitsluit als waarschijnlijke oorzaak van schades aan de panden is dit deel van het onderzoek stopgezet.

9 Conclusies individuele hoofdvragen

9.1 Onderzoeksvraag 1: Is piping een verklarend mechanisme?

Is piping een verklarend mechanisme voor de schade aan de panden? Zoals in de bureaustudie (Deltares, 2021) beschreven, is voor het onderzoeken van het fenomeen piping¹⁴ als oorzaak voor de schades bij Kanaal Almelo – De Haandrik gekeken naar verschillende vormen van interne erosie: terugschrijdende erosie, suffosie en filterincompatibiliteit. Daarnaast is de erosie van zand beschouwd van maaiveld naar kruipruimte of kelder. Hoewel dit niet onder interne erosie valt, kan dit wel tot schade leiden.



Figuur 9.1 Verschillende vormen van interne erosie zijn bekeken om te achterhalen of schade aan de panden langs het kanaal door piping kan worden veroorzaakt.

In het onderzoek naar piping wordt naast de klassieke beschouwing van piping (pipe-vorming in zand onder slecht-doorlatende lagen gepaard gaand met zandmeevoerende wellen aan het binnendijkse maaiveld) gekeken naar suffosie (het uitspoelen van fijnere deeltjes uit een grover korrelskelet) en filtercompatibiliteit (het uitspoelen van fijnere lagen naar grovere lagen). Of deze mechanismes relevant kunnen zijn geweest, hangt af van korrelgrootteverdelingen van het materiaal en eventuele grondwaterstroming. Voor suffosie en voor filtercompatibiliteit hebben we criteria gebruikt uit de literatuur die op basis van korrelverdelingen voorspellen of er korrelmateriaal uit kan spoelen. Daarnaast hebben we op grond van metingen en berekeningen van de grondwaterstroming afgeleid hoe groot de verhangen zijn en kunnen worden. De conclusies ten aanzien van piping als oorzaak voor de schades aan panden zijn:

- Deltares heeft geen afzettingen van zand in het veld waargenomen. Ook is er bij de panden geen sprake (geweest) van hoge hydraulische verhangen. Er zijn daarmee geen aanwijzingen dat terugschrijdende erosie hier een belangrijk actief mechanisme is. Daarom beschouwen we het onwaarschijnlijk dat klassieke piping een hoofdoorzaak is voor de opgetreden schades bij de onderzochte panden.
- Op grond van de in de literatuur voorgestelde criteria voor suffosie wordt het merendeel van de korrelverdelingen als intern stabiel geclassificeerd. Zoals hierboven al opgemerkt is er bij de panden daarbij geen sprake (geweest) van hoge hydraulische verhangen. We

¹⁴ Piping is een faalmechanisme waarbij de waterstroom in de ondergrond zo sterk is en andere omstandigheden zodanig zijn dat zandkorrels kunnen worden weggespoeld.

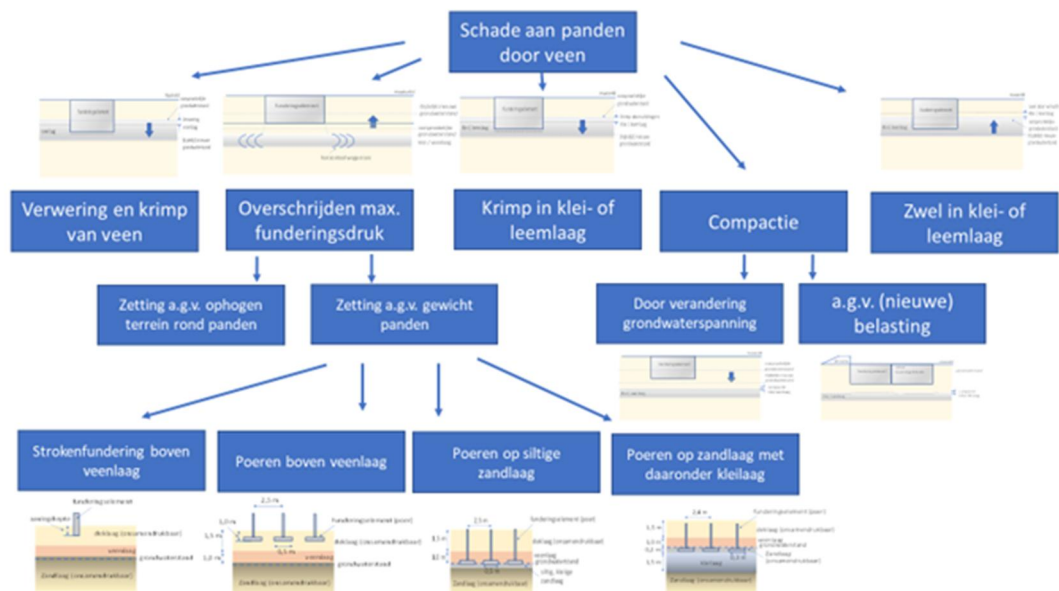
beschouwen het daarom als onwaarschijnlijk dat massaverlies of verminderd draagvermogen door suffosie een oorzaak is voor de opgetreden schades bij de panden.

- Volgens ontwerpcriteria worden alle mogelijke combinaties van monsters als intern stabiel geïnclassificeerd voor filterincompatibiliteit, dit is met behulp van laboratorium onderzoek getoetst. In combinatie met de afwezigheid van hoge hydraulische verhangen, beschouwen we het daarom als onwaarschijnlijk dat volumeverlies ten gevolge van filterincompatibiliteit een oorzaak is voor de opgetreden schades bij de panden.

Piping is daarmee geen verklarend mechanisme voor de opgetreden schade.

9.2 Onderzoeksvragen 2 en 3: Welke rol speelt veen en zijn er mogelijk nog andere schade-oorzaken

Is veen of ander samendrukbaar materiaal een schade oorzaak? Welke mogelijke andere schade-oorzaken zijn er? In het onderzoek naar de mogelijke invloed van veen en ander samendrukbaar materiaal in de ondergrond op de waargenomen schade zijn vooraf potentiële mechanismen vastgesteld die de waargenomen schade aan panden kunnen verklaren.



Figuur 9.2 Analyse van de mogelijke rol van veen en schade aan panden vooraf.

Veen en andere samendrukbare lagen als schade-oorzaak

In het uitgevoerde grondonderzoek is met name veen aangetroffen. Andere samendrukbare lagen komen slechts lokaal voor (klei- of siltlagen). Door de beperkte aanwezigheid van deze klei- en leemlagen en het feit dat de aangetroffen lagen onder de grondwaterstand liggen, is geconcludeerd dat zwel en krimp in de klei- of leemlaag geen verklaring voor de waargenomen schade kunnen zijn.

Uit de geohydrologische beschouwing blijkt dat het veen grotendeels boven de grondwaterstand ligt. Om die reden is het mechanisme samendrukking als gevolg van een verlaging van de grondwaterstand geen belangrijke schade-oorzaak. Er blijven twee potentiële mechanismen, met betrekking tot de aanwezigheid van samendrukbare lagen in de ondergrond over, die een bijdrage kunnen leveren aan de waargenomen schade. Deze zijn:

- Samendrukking van veen of andere samendrukbare lagen als gevolg van de gebouwbelasting, inclusief eventuele verhoging of verandering daarvan door verbouwingen, aanbouwen alsmede door belasting zoals ophogingen naast of in het pand. Er zijn enkele indicatieve zettingsberekeningen uitgevoerd. De berekende, indicatieve, zettingen variëren van praktisch nihil tot een orde van grootte van 0,2 m.
- Krimp van veen, waarbij het veen verzadigd blijft. Een verlaging van het watergehalte van het veen waarbij (nog) geen lucht het veen indringt, leidt tot volume afname van het veen en daarmee zakking van het maaiveld. Dit mechanisme kan zowel optreden in geval van een verlaging van de grondwaterstand ter plaatse van de panden als bij verdroging.

In het uitgevoerde grondonderzoek is onder een deel van de funderingen met name veen aangetroffen. Andere samendrukbare lagen komen slechts lokaal voor (klei- of leemlagen). Door de beperkte aanwezigheid van deze klei- en leemlagen en het feit dat de aangetroffen lagen onder de grondwaterstand liggen, is geconcludeerd dat zwel en krimp in de klei- of leemlaag geen verklaring voor de waargenomen schade kunnen zijn. Er is nagenoeg geen ge-oxideerd veen (veen dat aan de lucht is blootgesteld) aangetroffen in het uitgevoerde grond- en laboratoriumonderzoek. Hieruit is geconcludeerd dat oxidatie van veen de waargenomen schade niet kan verklaren. Uit de geohydrologische beschouwing blijkt dat het veen grotendeels boven de grondwaterstand ligt. Om die reden is het mechanisme samendrukking van de veenlaag als gevolg van een verlaging van de grondwaterstand geen belangrijke schade-oorzaak, maar krimp als gevolg van verlaging van de grondwaterstand heeft wel een bijdrage aan de zakkingen geleverd.

De grootte van de krimp bij verlaging van de grondwaterstand is bepaald op basis van variatie in het watergehalte van het veen in de boringen naast de panden. Op basis van ervaring en specialistisch onderzoek is ingeschat dat de krimp onder de panden de helft is van de krimp die zich voordoet naast de panden.

Daarnaast varieert de grondwaterstand met de seizoenen en door de vervanging van beschoeiingen en damwanden. In de jaren '70 is krimp opgetreden omdat de grondwaterstand daalde na vervanging van de houten beschoeiing door de eerste waterkerende damwanden. Op basis van ervaring en specialistische kennis is gesteld dat krimp als gevolg van de latere vervanging van de damwanden en verlaging van de grondwaterstand daardoor 25% bedraagt van de eerste krimp na vervanging van de houten beschoeiing. De orde grootte van de aldus berekende zakking door krimp van de panden bij vervanging van damwanden is minder dan 0,01 m en kan in combinatie met een extreem droge zomer oplopen tot maximaal ca 0,02 m. Dit is een bovengrens.

Veranderingen in de situatie van het grondwater

De grondwatersituatie bij het kanaal kan in de loop der tijd veranderd zijn door:

- Veranderingen in of direct langs het kanaal.
- Verandering in de regionale waterhuishouding.
- Verandering van het klimaat, van zowel natte als droge perioden.

Onderstaande bevindingen zijn gebaseerd op alle metingen en berekeningen, die voor dit onderzoek zijn uitgevoerd. Daarbij zijn ook historische meetreeksen beschouwd.

Hierna worden eerst de relevante veranderingen in en bij het kanaal benoemd. Vervolgens is aangegeven hoe dit gerelateerd is aan de schade.

- **Het aanleggen van waterkerende damwanden.** Dit betreft een blijvende verandering. Vóór het plaatsen van waterkerende damwand was de grondwaterstand in de bodem

direct naast het kanaal nagenoeg gelijk aan het waterpeil in het kanaal. Dat houdt in dat er naast het kanaal grondwater boven het veen aanwezig was. Door de veel lagere stijghoogte van het grondwater onder het veen werd het water boven het veen deels naar beneden getrokken en stroomde het deels boven het veen in de richting van de panden. Naarmate de afstand tot het kanaal toeneemt, werd de grondwaterstand boven het veen steeds lager, totdat die onder de bovenkant van het veen zakte. Afhankelijk van de aanwezigheid en de dikte van veenlagen in de bodem direct naast het kanaal en de ononderbroken verbreiding van die veenlagen richting de panden, was de grondwaterstand bij de panden voor aanleg van de damwanden 10 tot 30 cm hoger dan daarna. De bijbehorende stijghoogte van het grondwater in de zandlaag onder het veen is door de aanleg van de damwanden bij de panden 8 tot 12 cm omlaag gegaan. Op plekken waar het veen zich ononderbroken tot achter de panden uitstrekt, zijn de dalingen relatief het grootst. Na aanleg van de damwanden was er geen sprake meer van grondwater boven het veen. Op meerdere plekken is de grondwaterstand direct naast het kanaal tot onder de onderkant van de veenlaag gezakt.

- **Het baggeren van het kanaal.** Dit betreft een tijdelijke verandering, waardoor de grondwaterstand tijdelijk omhoog gaat. Direct na het baggeren is de hydraulische weerstand van de kanaalbodem zo laag dat het kanaalwater met relatief grote snelheid de bodem in kan stromen. Dat wordt veroorzaakt door het grote verschil tussen kanaalwaterstand en grondwaterstand. Na het baggeren bevat het kanaalwater veel zwevend zeer fijn slibmateriaal. Dit fijne slib wordt met het water mee de bodem ingetrokken en zorgt ervoor dat de overwegend zandige kanaalbodem weer snel dichtslibt, waardoor de hydraulische weerstand van de kanaalbodem zich weer herstelt. Dit alles zorgt ervoor dat na het baggeren een tijdelijke stijging van de grondwaterstand bij de panden kan optreden van maximaal 20 tot 30 cm. Uit het onderzoek (bijlage J) blijkt dat deze tijdelijke stijging na een week al weer grotendeels is verdwenen.
- **Regionale waterhuishouding.** Dit betreft een blijvende verandering. De aanwezige drainage in de wijde omgeving rond het kanaal heeft een afwateringsniveau dat momenteel 2 tot 3 m lager is dan het kanaalpeil. Dat zorgt ervoor dat de grondwaterstand bij de panden 1,5 tot 2 m onder kanaalpeil ligt. In de afgelopen tientallen jaren is de drainage van deze regio langzaam maar zeker intensiever geworden. Dit heeft in de afgelopen 40 jaar geleid tot een geleidelijke daling van de regionale grondwaterstand van enkele decimeters.
- **Klimaat.** De trend in de afgelopen tientallen jaren duidt erop dat enerzijds droge perioden langer zijn geworden en anderzijds meer extreme neerslag is gevallen. Langere droge perioden zorgen voor een sterkere verlaging van de grondwaterstand. Meer extreme neerslag zorgt voor meer wateroverlast. In de droge zomers van 2018 en 2019 is de grondwaterstand in de regio 20 tot 30 cm lager geweest dan gemiddeld in de zomer. In het verleden is dit echter wel vaker voorgekomen en vlakbij het kanaal zakt de grondwaterstand in het algemeen iets minder uit doordat dit deels wordt aangevuld met infiltrerend kanaalwater. Meer extreme neerslag kan met name in de lager gelegen achtertuinen bij de panden vaker leiden tot wateroverlast, door direct afstromend neerslagwater en door stijgend grondwater.

De hoogfrequent metingen in de peilbuizen geven aan dat er geen noemenswaardige invloed is van de scheepvaart op de grondwaterstand.

Een daling in de grondwaterstand kan hebben geleid tot zetting van in de bodem aanwezige veenlagen. Dat kan echter alleen als deze veenlagen zich geheel of gedeeltelijk onder de grondwaterstand bevinden. De enige kanaalingreep, die tot daling van de grondwaterstand kan hebben geleid, is het plaatsen van waterkerende damwanden geweest. Deze ingreep heeft ertoe geleid dat de grondwaterstand bij de panden 10 tot 30 cm omlaag is gegaan. Deze ingreep heeft echter al midden jaren '70 van vorige eeuw plaatsgevonden. Herstellen

van inmiddels lekgeraakte damwanden, waardoor de grondwaterstand bij de panden weer is gestegen, geeft een herhaling van deze daling.

Een stijging van de grondwaterstand kan leiden tot wateroverlast. De enige kanaalingreep, die tot stijging van de grondwaterstand kan hebben geleid, is het baggeren van het kanaal. Deze ingreep heeft ertoe geleid dat de grondwaterstand bij de panden 20 tot 30 cm omhoog kan zijn gegaan. Stijging van de grondwaterstand door baggeren is echter tijdelijk van aard en moet dan net samenvallen met een natte periode om tot wateroverlast te leiden.

Ontstaan van schade aan de panden

Het ontstaan van schade aan een pand is een samenspel van pandfundering, belasting vanuit het gebouw, ondergrond en (wisseling van) grondwaterstanden. In het verdiepend onderzoek zijn de schade-oorzaken van de onderzochte individuele panden duidelijk geworden. De schade-oorzaken zijn per pand gerapporteerd. Uit het grond- en pandonderzoek komt een onderscheidend beeld naar voren tussen panden met kleine en met grote zakkingsverschillen:

- Er zijn 7 panden met grote tot matig grote zakkingsverschillen (groter dan 6 cm): soms alleen in de kruipruimte, soms alleen de betonvloeren, soms het hele pand. In het laatste geval is veen of andere samendrukbaar materiaal onder de fundering de oorzaak van de zakkingen, in de andere gevallen gaat het om veen of ander samendrukbaar materiaal boven de fundering.
- Er zijn 6 panden met kleine tot matig kleine zakkingsverschillen (kleiner dan 4 cm). In dat geval is de fundering onder het veen aangelegd. Soms is de top van de onderliggende zandlaag erg siltig waardoor er extra zakkingsverschillen zijn opgetreden.
- Er zijn 5 panden die daar tussen in vallen.

De bijdrage van de werkzaamheden aan de schade is gekwantificeerd:

- Bij 7 van de onderzochte panden is er een mogelijke bijdrage door baggerwerkzaamheden van het kanaal. Bij 4 van deze panden kan de draagkracht van de fundering tijdelijk zijn afgenomen en daardoor kan een zakking in de orde van 5 a 10% van de totale zakking van deze panden zijn opgetreden. Bij één pand kan scheurvorming in kelder vloeren zijn veroorzaakt door het baggeren.
- Bij 10 van de onderzochte panden levert het vervangen van damwanden door langere stalen damwanden een bijdrage aan het ontstaan van zakkingschade. De orde van grootte van de extra zakking varieert per pand en is tussen 2% en 8% van de totale zakking van deze panden.
- In 7 gevallen is er sprake van trillingsschade door het aanbrengen van een damwand. De andere gevallen bevinden zich op grotere afstand uit het kanaal of er is ter plaatse geen damwand vervangen. Ter plaatse van de onderzochte panden zijn nergens klapankers toegepast.

Daarnaast zijn er bij 11 panden verschijnselen waargenomen bij funderingen kruipruimtes of betonvloeren waar droogte een rol kan hebben gespeeld. De toename van de zakking van de panden door droogte varieert per pand en is in de orde van 10% tot 30% van de totale zakking van deze panden.

Uit de satellietmetingen volgt dat de zakkingsnelheid van de panden gebiedsbreed toeneemt met toenemende dikte van het veen in de ondergrond. Ook de analyse van de schade-oorzaken van de panden wijst op veen als belangrijke schakel in het faalmechanisme. Dat de schademeldingen vooral uit de zone nabij het kanaal komen, heeft dus een logische verklaring. Veen komt het meeste voor nabij het kanaal; de dikte van de

veenlaag is het grootst dichtbij het kanaal en neemt door de ontginning in het verleden sterk af met toenemende afstand van het kanaal.

Dat de schademeldingen vooral uit de zone nabij het kanaal komen, is te verklaren uit de aanwezigheid van veen nabij het kanaal, en de rol die veen speelt bij het faalmechanisme.

9.3 Onderzoeksvraag 4: Effecten verlaging van het kanaalpeil

Is verlaging van het kanaalpeil effectief tegen piping en welke andere gevolgen heeft deze maatregel? Deltares heeft een kwalitatieve beschrijving van de effecten van peilverlaging gegeven, die zijn aangevuld door deskundigen van de Provincie en het waterschap. De onderzochte effecten zijn niet verder kwantitatief beoordeeld. Omdat het onderzoek piping uitsluit als waarschijnlijke oorzaak van schades aan de panden is dit deel van het onderzoek stopgezet.

10 Toelichting op de resultaten (synthese en eindconclusie)

10.1 Eindconclusie

In het verdiepend onderzoek zijn de (combinaties van) oorzaken van de schades van de onderzochte panden per pand duidelijk geworden. Ook komt vanuit de metingen en analyses een onderscheidend beeld tussen panden met kleine en met grote zakkingsverschillen naar voren. Op basis van dit verdiepend onderzoek is geconcludeerd dat piping geen verklarend mechanisme is voor de schade aan de panden. Wel zijn er samendrukbare lagen (veen, klei, silt) onder de fundering, onder vloeren en onder kruipruimtes van diverse panden aangetroffen. We achten het waarschijnlijk dat vervorming en samendrukking van deze lagen onder de panden geleid heeft tot verzakkingen en daarmee tot schade aan de panden. Vervormingen in deze samendrukbare lagen zijn versterkt door droogte en grondwaterstandsveranderingen tijdens en na de werkzaamheden aan het kanaal.

De exacte kwantificering van de bijdrage van de autonome processen (bodemdaling, droogte, extreme neerslag, etc.) en de veranderingen (baggeren, vervanging damwanden en wijziging in grondwaterstand die dat tot gevolg gehad kan hebben) in en na de periode van de werkzaamheden aan het kanaal blijkt niet mogelijk op grond van de beschikbare (monitorings) gegevens. Er is sprake van combinaties van oorzaken voor de opgetreden schades. Uit de beschikbare gegevens van de situatie in de periode van voor en tijdens de werkzaamheden aan het kanaal, is dit niet meer te onderscheiden. In scenario-analyses zijn de effecten op de grondwaterstanden kwantitatief geduid en vervolgens zijn deze effecten doorvertaald naar orde van grootte van de bijdragen aan de zakking door de werkzaamheden.

Met dit verdiepende onderzoek is veel inzicht in de schade-oorzaken verkregen. Een combinatie van oorzaken ligt naar ons inzicht aan de basis van de opgetreden schades. Door de beperkte hoeveelheid aan basisgegevens over de periode tijdens en voor de werkzaamheden aan het kanaal, achten we het onwaarschijnlijk dat meer onderzoek aan de onderzochte panden meer inzicht in de oorzaken zal opleveren.

10.2 Context van veranderingen van het Nederlands water en bodemsysteem

Het Nederlands water en bodemsysteem is niet stationair, maar onderhevig aan veranderingen zoals klimaatverandering en het daarmee extremer worden van natte en droge periodes. Ook bodemdaling als autonoom proces door inklinking van slappe lagen speelt een rol in de verandering. Daarnaast wordt bodemdaling vaak veroorzaakt door menselijk handelen: bijvoorbeeld door de onttrekking van delfstoffen of grondwater, of drainage van slappe klei- en veengronden. In veel gevallen draagt een combinatie van verschillende factoren bij aan de totale bodemdaling. De bodem beweegt op de ene plek dan ook anders of sneller dan op de andere. Het water en bodemsysteem wordt steeds intensiever gebruikt door infrastructuur, bebouwing, landbouw et cetera. Daarmee wordt het totale bodem- en watersysteem in Nederland, gegeven die veranderingen en het intensievere gebruik steeds gevoeliger voor ingrepen. Ingrepen die steeds vaker leiden tot schade of risico's op schade. Projecten uitvoeren op of in de Nederlandse ondergrond wordt daarmee steeds complexer en de risico's groter. Kennis over de opbouw van de ondergrond, het

grond- en oppervlaktewater, de eigenschappen van de ondergrond en de staat van objecten zijn allemaal van belang om de risico's goed in te schatten. Een voorbeeld van toepassing van deze kennis is de Deltares studie naar de impact van droogte op funderingen van huizen [78].

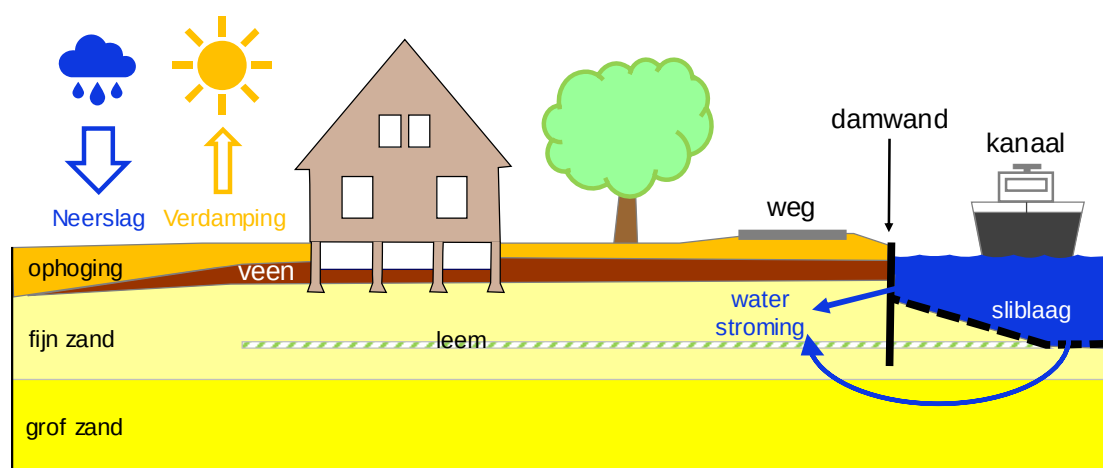
Langs het Kanaal Almelo de Haandrik zijn in de (vroeg) 20ste eeuw veel huizen gebouwd aan de landzijde van de kade, in een tijd waarin ons water- en bodemsysteem minder intensief gebruikt werd en grote veranderingen een kleinere rol speelden. Dit was ook een tijd dat het ontwerp en de uitvoering van funderingen op andere wijze werd uitgevoerd dan nu. Een deel van de woningen is in de loop van de tijd uitgebreid. In het gebied zijn verschillende bouwwijzen toegepast voor woningen en uitbreidingen. Inzicht in de technische staat van deze panden en funderingen, ondergrond en waterhuishouding is nodig om effecten van ingrepen in de omgeving inzichtelijk te krijgen. Dit om schade te voorkomen dan wel inzicht te krijgen in het ontstaan van schade.

Voor de schades per pand speelt dus een veelheid aan aspecten in meer of mindere mate een rol en dat over een lange tijdsperiode. De belangrijkste vraag is in hoeverre de meest recente ingrepen aan en langs het kanaal, naast die andere veranderingen en aspecten, hebben bijgedragen aan de schades en of er nog vervolgschade te verwachten is. Dat betekent een diversiteit aan te beschouwen aspecten waarbij voor de analyse per pand een goed inzicht nodig is van de lokale condities.

De volgende paragraaf gaat nader in op de wijze waarop de verschillende aspecten bijdragen aan de schade aan de panden.

10.3 Synthese

In dit verdiepend onderzoek zijn die lokale condities en de technische staat (funderingswijze en staat van de fundering) en bouwwijzen in kaart gebracht voor 21 specifieke panden. Om de schade-oorzaak te onderzoeken is eerder gebiedsbreed gekeken. Voor dit onderzoek is lokaal gekeken. Voor alle panden is een uitgebreide analyse gedaan naar de oorzaken van de schade aan deze panden. De analyse van de schade-oorzaken heeft zich in eerste instantie gericht op het mogelijk optreden van piping en de aanwezigheid van veen en andere samendrukbare lagen.



Figuur 10.1 Schematische doorsnede van de situatie van de panden en het kanaal met relevante factoren voor de analyse van de schade-oorzaken

Uitgangspunt voor het onderzoek naar de schade-oorzaken is de volgende indeling die TNO hanteert in het schade-onderzoek:

- Schade door ongelijkmatige zakkings.
- Schade door trillingen.
- Overige schade met oorzaak in de constructiewijze van het pand.

Per pand is vastgesteld of er sprake is van schade als gevolg van zakkingsverschillen of schade die niet het gevolg is van zakkingsverschillen (schade door trillingen of constructiewijze pand). Vervolgens zijn voor het ontstaan van schade de specifieke afmetingen van de fundering van belang (en of die wel of niet op de veenlaag of zandlaag staan en wat er verder wel of niet aan belastingen rondom het pand zijn aangebracht). Door het verdiepend onderzoek zijn de (combinaties van) oorzaken van de schades van de specifieke onderzochte panden duidelijk geworden. De schade-oorzaken zijn per pand gerapporteerd. Uit het grond- en pandonderzoek komt een onderscheidend beeld naar voren tussen panden met kleine en met grote zakkingsverschillen:

- Er zijn 7 panden met grote tot matig grote zakkingsverschillen (groter dan 6 cm): soms alleen in de kruipruimte, soms alleen de betonvloeren, soms het hele pand. In het laatste geval is veen of andere samendrukbaar materiaal onder de fundering de oorzaak van de zakkings, in de andere gevallen gaat het om veen of ander samendrukbaar materiaal boven de fundering.
- Er zijn 6 panden met kleine tot matig kleine zakkingsverschillen (kleiner dan 4 cm). In dat geval is de fundering onder het veen aangelegd. Soms is de top van de onderliggende zandlaag erg siltig waardoor er extra zakkingsverschillen zijn opgetreden.
- Er zijn 5 panden die daar tussen in vallen.

Alle onderzochte panden vertonen scheuren en verschijnselen die als 'bouwkundig van aard' zijn aangemerkt. De werkzaamheden aan het kanaal kunnen een bijdrage hebben gehad aan het verergeren van schades.

Het ontstaan van schade aan een pand is een samenspel van pandfundering, belasting vanuit het gebouw, ondergrond en (wisseling van) grondwaterstanden. Verlaging van de grondwaterstand verergert de zakkings veroorzaakt door veen of andere samendrukbare lagen. Een verhoging van de grondwaterstand kan tot zakking leiden als de belasting de draagkracht van de fundering benadert. Het onderzoek heeft de gevolgen van veranderingen in de grondwaterstand beschouwd als gevolg van:

- Tijdelijke verhoging van de grondwaterstand tijdens het baggeren als gevolg van verhoogde lekkage door het verwijderen van de sliblaag.
- Verlaging van de grondwaterstand door het vervangen van een lekkende damwand/beschoeiing door een langere dichte damwand.
- Natte en droge perioden.
- Versterking van de invloed van droge perioden op de grondwaterstand door de aanwezigheid van grote vegetatie (bomen).

De hoogfrequent metingen in de peilbuizen geven aan dat er geen noemenswaardige invloed is van de scheepvaart op de grondwaterstand.

Uit het eerdere onderzoek van Deltares bleek reeds dat de marge tussen belasting en draagkracht bij veel van dit soort funderingen laag was. Veranderingen kunnen daarmee schade tot gevolg hebben. Tijdelijke verhoging of verlaging van de grondwaterstand door werkzaamheden aan het kanaal bovenop autonome processen (bodemdaling, droogte,

extreme neerslag) in zo'n situatie (mede) een oorzaak zijn waardoor extra zakking gaat optreden.

- Bij 7 van de onderzochte panden is er een mogelijke bijdrage door baggerwerkzaamheden in het kanaal. Bij 4 van deze panden kan de draagkracht van de fundering tijdelijk zijn afgenomen en daardoor kan een zakking in de orde van 5 a 10% van de totale zakking van deze panden zijn opgetreden. Bij één pand kan scheurvorming in kelder vloeren zijn veroorzaakt door het baggeren.
- Bij 10 van de onderzochte panden levert het vervangen van damwanden door langere stalen damwanden een bijdrage aan het ontstaan van zakkingschade. De orde van grootte van de extra zakking varieert per pand en is tussen 2% en 8% van de totale zakking van deze panden.
- In 7 gevallen is er sprake van trillingsschade door het aanbrengen van een damwand. De andere gevallen bevinden zich op grotere afstand uit het kanaal of er is ter plaatse geen damwand vervangen. Ter plaatse van de onderzochte panden zijn nergens klapankers toegepast.

Daarnaast zijn er bij 11 panden verschijnselen waargenomen bij funderingen kruipruimtes of betonvloeren waar droogte een rol kan hebben gespeeld. De toename van de zakking van de panden door droogte varieert per pand en is in de orde van 10% tot 30% van de totale zakking van deze panden.

De satellietmetingen geven aan dat de zakkingsnelheid van de panden gebiedsbreed toeneemt met toenemende dikte van het veen in de ondergrond. Ook de analyse van de schade-oorzaken van de panden wijst op veen als belangrijke schakel in het faalmechanisme. Dat de schademeldingen vooral uit de zone nabij het kanaal komen heeft dus een logische verklaring. Veen komt het meeste voor nabij het kanaal; de dikte van de veenlaag is het grootst dichtbij het kanaal en neemt door de ontginning in het verleden sterk af met toenemende afstand van het kanaal.

Uit het onderzoek blijkt dat de schade-oorzaak niet bij alle panden hetzelfde is; dat betekent dat ook de toekomst verwachting verschillend is. Voorspelling van de toekomstige zakkings is niet goed mogelijk op basis van de InSAR satellietmetingen. Deze zijn voor individuele panden niet betrouwbaar genoeg om te kunnen extrapoleren naar langere termijn en een voorspelling van het toekomstige zakkingsgedrag te geven.

De onderstaande verwachting is gebaseerd op alle gegevens die tijdens het onderzoek zijn verzameld met betrekking tot de funderingen en het zakkingsgedrag tot nu toe.

Funderingen die boven het veen zijn aangelegd zullen ook in de toekomst blijven zakken. Ondanks dat veel funderingen al tientallen jaren bestaan zal de zakking doorgaan, waarbij vooral tijdens droge zomers een toename van de zakking zal zijn te zien. Dit geldt voor de panden, die op een fundering boven het veen staan, voor (beton)vloeren die op een aanvulling boven het veen zijn aangelegd en voor de kruipruimten. De toename in de toekomst zal qua orde van grootte vergelijkbaar zijn met de zakking in de laatste jaren, afhankelijk van het voorkomen van extreem droge zomers.

Funderingen die onder het veen zijn aangelegd zijn over het algemeen minder gezakt en de verwachting is dat deze ook in de toekomst weinig zullen zakken. Droge zomers hebben bij deze panden ook minder zakking tot gevolg.

10.4 Slotopmerking

Langs het Kanaal Almelo - De Haandrik hebben we alle tot onze beschikking staande onderzoeksmethoden ingezet om de schade-oorzaken te achterhalen om bewoners en

provincie duidelijkheid te geven over de interactie van water en ondergrond met de panden en de omgeving. Met dit onderzoek is echt de diepte ingegaan en zijn de grenzen wat mogelijk is qua onderzoek opgezocht. Details zijn in kaart gebracht: op pandniveau en zelfs tot op “korrelniveau” van de bodem. Doordat de combinatie van schadeoorzaken sterk verschilt per pand, kunnen gebiedsbreed de schade-oorzaken niet één op één worden doorvertaald naar andere niet onderzochte panden.

Met dit onderzoek hopen we aan de bewoners en provincie wel dieper inzicht te hebben gegeven in de schade-oorzaken als bijdrage aan de besluitvorming door de provincie over de schade-afhandeling en toekomstige ontwikkelingen in het gebied.

11 Referenties

- [1] Deltares (2020). Gebiedsbreed schade onderzoek aan panden Almelo de Haandrik kanaal. Definitief rapport 11203512-005-GEO-0015, 17 maart 2020.
- [2] Deltares (2021). Definitief Plan van Aanpak voor verdiepend onderzoek naar de schade langs het Kanaal Almelo – De Haandrik. 4 juni 2021.
- [3] COB (2012). Aanbevelingen voor het ontwerp van bouwkuipen in stedelijke omgeving. COB rapport F530-ER-12-49785.
- [4] Van Baars, S. (2021). Piping bij Kanaal Almelo - De Haandrik. Rapport, 26 maart 2021.
- [5] SBR-CUR (2017). Omgevingsbeïnvloeding inbrengen en trekken van damwanden – Praktijkrichtlijn. SBRCURnet, Delft.
- [6] TNO (2019). 19 04 17 Uitvraag schadeopname. Notitie met beschrijving systematiek van schade-opnamen, Delft.
- [7] Bligh, W.G. (1915). Dams and Weirs - an analytical and practical treatise on gravity dams and weirs; arch and buttress dams; submerged weirs; and barrages. American Technical Society.
- [8] Burenkova, V.V. (1993) Assessment of Suffusion in Non-Cohesive and Graded Soils. Proceedings of the 1st International Conference “Geo-Filters”, Karlsruhe, 20-22 October 1992, 357-360.
- [9] Graauw, A. de, Meulen, T. van der, Does, M. van der (1983). Design criteria for granular filters. Waterloopkundig Laboratorium Publication no. 287.
- [10] U.S. Army Corps of Engineers (2000). Engineering and Design - Design and Construction of Levees
- [11] Federal Emergency Management Agency (2011). Filters for Embankment Dams - Best Practices for Design and Construction.
- [12] Förster, U., Ham, G. van den, Calle, E., Kruse, G. (2012). Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen. Deltares rapport 1202123-003-GEO-0002.
- [13] ICOLD International Committee on Large Dams (1994). Embankment Dams Granular Filters and Drains - Review and recommendations. ICOLD Bulletin 95.
- [14] ICOLD International Committee on Large Dams (2015). Internal Erosion of Existing Dams, Levees and Dikes, and their Foundations. ICOLD Bulletin, 1(164).
- [15] Indraratna, B., Raut, A.K. & Khabbaz, H. (2007). Constriction-Based Retention Criterion for Granular Filter Design. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133(3), pp.266–276
- [16] Istomina, V.S. (1957). Filtration stability of soils (in Russian). Gostroizdat, Moscow, Leningrad.
- [17] Ke, L. and Takahashi, A. (2014). Triaxial erosion test for evaluation of mechanical consequences of internal erosion, Geotech. Test. J., 37 (2), 347-364.
- [18] Ke, L, Ouyang, M., Horikoshi, K., Takahashi, A. (2015). Soil deformation due to suffusion and its consequences on undrained behaviour under various confining pressures. Japanese Geotechnical Society Special Publication, 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.
- [19] Kenney, T.C., & Lau, D. (1985). Internal Stability of Granular Filters. Canadian Geotechnical Journal, 22, p215-225.
- [20] Kodieh A., Gelet, R., Marot, D., Fino, A.Z. (2020). A study of suffusion kinetics inspired from experimental data: comparison of three different approaches. Acta Geotechnica (2021) 16:347–365 <https://doi.org/10.1007/s11440-020-01016-5>
- [21] Koenders, M.A. (1978). Aspecten van filters. Laboratorium voor Grondmechanica CO-406413/7.
- [22] Kovacs, G. (1981). Seepage Hydraulics. Elsevier Scientific Publishing Company.

- [23] LaFleur, J. Mlynarek, J. & Rollin, A.L. (1989). Filtration of Broadly-graded Cohesionless Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE. Vol. 115.
- [24] Lambe, T.W. & Whitman, R., 1969. *Soil Mechanics*, John Wiley and Sons Inc.
- [25] Lubochkov. E.A. (1965). Graphical and Analytical methods for the Determination of the properties of Non-cohesive Soils Characterizing Suffusion (in Russian). *Izvestia VNIIG*, No. 78.
- [26] Redlinger, C., Robbins, B., Pabst, M. (2016). *Filter Design: The Why, When, and Where*.
- [27] Robertson, P. K. (2010, May). Soil behaviour type from the CPT: an update. In 2nd International symposium on cone penetration testing (Vol. 2, pp. 575-583).
- [28] Rönqvist, H. and Viklander, P. (2014) On the Kenney-Lau Approach to Internal Stability Evaluation of Soils. *Geomaterials*, 4, 129-140.
<http://dx.doi.org/10.4236/gm.2014.44013>
- [29] Rosenbrand, E. (2017). Literatuurstudie Filtercriteria ten behoeve van grondzandbarriere. Deltares memo 11200952-003-GEO-001.
- [30] Sellmeijer J.B., López de la Cruz J., Van Beek V.M., Knoeff J.G. (2011). Fine-tuning of the piping model through small-scale, medium-scale and IJkdijk experiments. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 15(8): 1139-1154.
- [31] Skempton, A.W. & Brogan, J.M. (1994). Experiments on piping in sandy gravels. *Géotechnique*, 44(3), pp.449–460.
- [32] Terzaghi, Karl. 1922. Der Grundbruch an Stauwerken Und Seine Verhütung. *Die Wasserkraft* 17 (24): 445–449.
- [33] United States Department of Agriculture (2017). *National Engineering Handbook*, Part 633 Soils Engineering, Ch. 26 Gradation Design of Sand and Gravel Filters.
- [34] Vrijling, J.K., Kok, M., Calle, E.O.F., Epema, W.G., Van der Meer, M.T., Van den Berg, P., Schweckendiek, T. (2010). Piping - Realiteit of Rekenfout? Technical report, Dutch Expertise Network on Flood Protection (ENW).
- [35] Wan, C.F. & Fell, R. (2008). Assessing the Potential of Internal Instability and Suffusion in Embankment Dams and Their Foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 134, No. 3, March 1, pp. 401-407.
- [36] Yerro, Alba & Rohe, Alexander & Soga, Kenichi. (2017). Modelling Internal Erosion with the Material Point Method. *Procedia Engineering*. 175.
10.1016/j.proeng.2017.01.048.
- [37] RHDHV (2011). Verkennend kwelonderzoek Kanaal Almelo - De Haandrik – Upgraden Kanaal Almelo – De Haandrik tot 700 tons schepen. Concept rapport 9W0044.B6/R001/902953/LM/stee, 2 november 2010.
- [38] ArcGIS (2021). Bodemkaart van Nederland.
<https://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?useExisting=1&layers=de58bafde7284c99836a54519fa9f3cd> Laatst geraadpleegd 7 mei 2021.
- [39] Jones L.D., Jefferson I.F. (2012). Expansive soils. In: ICE manual of geotechnical engineering. Volume 1, geotechnical engineering principles, problematic soils and site investigation. Chapter 5, ed. Burland, DOI 10.1007/978-3-319-12127-7_118-1
- [40] Royal Haskoning (2008). Regionale keringen Kanaal Almelo-De Haandrik - Toetsing op Veiligheid op overstroming. Rapport 9T0411.AO/R0004/600451/JEBR/Nijm
- [41] Royal Haskoning (2013). Regionale keringen Kanaal Almelo - De Haandrik - Toetsing op veiligheid (2e ronde). Rapport BC3768/R0001/414320/VVDM/Nijm
- [42] Provincie Overijssel (2021). Offertevraag verdiepingsonderzoek Kanaal Almelo-De Haandrik. 8 april 2021.
- [43] Begeleidingscommissie Verdiepend onderzoek Kanaal Almelo – De Haandrik (2021). Opm Begeleidingscommissie 2021-05-17. Notitie, 17 mei 2021.
- [44] Deltares (2021). Verdiepend onderzoek naar de schade rond het Kanaal Almelo – De Haandrik – Definitief rapport Desk research, Diepere analyse van de gegevens en Onderzoeksplan. Rapport 11207155-002-GEO-0001, versie 3.0, 11 juni 2021.

- [45] Busschers, F.S., Kasse, C., Van Balen, R.T., Vandenberghe, J., Cohen, K.M., Weerts, H.J.T., Wallinga, J., Johns, C., Cleveringa, P., Bunnik, F.P.M., 2007. Late Pleistocene evolution of the Rhine-Meuse system in the southern North Sea basin: imprints of climate change, sea-level oscillation and glacio-isostasy. *Quaternary Science Reviews* 26, 3216-3248.
- [46] Stouthamer, E., Cohen, K.M., Hoek, W.Z., 2020. De vorming van het land: geologie en geomorfologie. Perspectief Uitgevers, 8e geheel herziene druk, Utrecht.
- [47] FEMA (2011) *Filters for Embankment Dams - Best Practices for Design and Construction*. Federal Emergency Management Agency.
- [48] de Graauw, A., van der Meulen, T. and van der Does de Bye, M. (1983) *design criteria for granular filters*. Delft Hydraulics Laboratory - publication no. 287.
- [49] ICOLD (2017) *Internal Erosion of existing Dams, Levees and Dikes, and their Foundations*. International Commission on Large Dams - bulletin 164.
- [50] Lambe, T. W. and Whitman, R. . (1969) *Soil Mechanics*. John Wiley and Sons Inc.
- [51] Rönqvist, H. and Viklander, P. (2014) 'On the Kenney-Lau Approach to Internal Stability Evaluation of Soils', *Geomaterials*, 04(04), pp. 129–140. doi: 10.4236/gm.2014.44013.
- [52] USACE (2000) *Design and Construction of Levees*. U.S. Army Corps of Engineers - EM 1110-2-1913.
- [53] Den Haan E.J. (1992) The formulation of virgin compression of soils *Géotechnique*, vol 42, p 465-483
- [54] Den Haan E.J., Kruse G.A.M. (2007) Characterisation and engineering properties of Dutch peats in: *Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils – Tan, Phoon, Hight & Leroueil (eds)* Taylor & Francis Group, London
- [55] Den Haan E.J. & Sellmeijer H.J.B. (2000) Calculation of soft ground settlement with an isotache model in: *Soft ground technology Hanson & Termaat (eds)*, ASCE geotechnical special publication no 112
- [56] Visschedijk M. (2010) Isotachen berekeningen op een sigarendoosje, *Geotechniek*, juli 2010, p 30 -33
- [57] Camporese M., Putti M., Ferraris S., Salandin P. (2006) Hydrological modeling in swelling / shrinking peat soils *Water Resources Research* Vol. 42 W06420 doi:10.1029/2005WR004495
- [58] Smolders, A. (1989). De geschiedenis van de Overijsselse kanalen, geschiedenis van de N.V. Overijsselsche Kanalisatie Maatschappij en haar rechtsopvolger de N.V. Maatschappij Overijsselsche Kanalen. Rijkswaterstaat uitgave 50.
- [59] Rijkswaterstaat (2021). https://www.rijkswaterstaat.nl/apps/geoservices/geodata/dmc/waterstaatskaart/geogegevens/raster/eerste_editie/28%20Almelo-1.jpg .Bewerkt 1884.
- [60] Rijkswaterstaat (2021). https://www.rijkswaterstaat.nl/apps/geoservices/geodata/dmc/waterstaatskaart/geogegevens/raster/edit_1bis/Blad_28%20Almelo-4.jpg , 1924.
- [61] Rijkswaterstaat (2020). Richtlijnen vaarwegen 2020. <https://standaarden.rws.nl/>
- [62] Provincie Overijssel (2016). Vaststelling verkeersbesluit maximum diepgang en afmetingen vaartuigen Kanaal Almelo – De Haandrik. Gedeputeerde Staten, kenmerk 2013/0001582, d.d. 8 januari 2013, gepubliceerd op 1 juli 2016 <https://decentrale.regelgeving.overheid.nl/cvdr/XHTMLoutput/Actueel/Overijssel/CVDR601885.html>
- [63] Provincie Overijssel (2019). Opwaardering Kanaal Almelo – De Haandrik 700 ton. Memo, opgesteld D. Jansen 20190117.
- [64] Provincie Overijssel (2019). Kanaal Almelo – De Haandrik: Provinciale projecten aan/nabij het kanaal (2010-2018). 180531_a activiteiten opwaardering en meldingen.pdf.
- [65] Provincie Overijssel (2018). Maatschappelijke kostenbatenanalyse opwaardering vaarweg Almelo-Coevorden. Document PS/2018/995.

- [66] Provincie Overijssel (2011). V77 Kanaal Almelo – Coevorden ged. Almelo – de Haandrik, Definitief Ontwerp, kanaalupgrade 700 ton, Situatie baggerwerk, 700 ton enkel- en tweestrooksvakken, Tekeningen 2323-113 t/m 120.
- [67] Royal Haskoning DHV (2015). Stabiliteit boordvoorzieningen Almelo – de Haandrik, BD4245_R002_D0.1_Stabiliteit boordvoorzieningen AdH. Rapport met bijlagen, 11 maart 2015.
- [68] Witteveen+Bos (2016). Inventarisatie Oeverconstructies. Kenmerk ZL505-70, 21 juni 2016.
- [69] Provincie Overijssel (2010). Prioriteit V77 boordvoorzieningen. GIS KAART KADH incl beton.pdf. Beleidsinformatie Provincie Overijssel, nr 200019_prio, 7 mei 2020.
- [70] Beens (2020). Uitgangspuntennota Boordvoorzieningen Kanaal Almelo – De Haandrik. Kenmerk 218015_NOT01.
- [71] Provincie Overijssel (2021). Spoelgaten Kanaal Almelo - De Haandrik sinds 2015 d.d. 30-06-2021.xlsx.
- [72] RHDHV (2008). Regionale Keringen Kanaal Almelo-De Haandrik, Toetsing op Veiligheid op overstroming. Definitief rapport, 9T0411 .AO/L0003/MBO/MJANS/Nijm, 27 maart 2008.
- [73] Aveco de Bondt (2017) Geohydrologische analyse Geerdijk. Briefrapport RB/024/172355, 3 november 2017
- [74] RHDHV, 2011, Aanvullend kwelonderzoek Kanaal Almelo – De Haandrik en monitoringsplan, referentie: 9W0044.B6/R003/902953/LM/Stee, d.d. 9 maart 2011 (concept rapport).
- [75] RHDHV , 2015: “Regionale keringen Kanaal Almelo - De Haandrik, Toetsing op veiligheid naar aanleiding van verdieping van de vaarweg”, Definitief rapport, BD4245-103-100/R001-D2/414320/NVW/Gron, d.d. 28 januari 2015
- [76] STOWA 2007, “Leidraad toetsen op veiligheid regionale keringen”
- [77] WER (2017). Verbreding Wilhelminakanaal Tilburg; onderzoek naar krimp van veen- en leemlagen en oxidatie van veenlagen, Wageningen Environmental Research (WER) rapport nr 2826, ISSN 1566-7197
- [78] Deltares (2020). Impact droogte op funderingen. Rapport 11205026-002, 9 september 2020.

A Tijdslijn werkzaamheden en schademeldingen

- **Tijdslijn werkzaamheden en schademeldingen:** zeven kaarten tussen 7 en 16 km langs het kanaal waarop de werkzaamheden en het jaar waarin deze plaatsvonden worden vergeleken met het jaar waarin voor het eerst schade werd gemeld aan een pand. (Bijlage A).

Bijlage A is om privacy redenen niet opgenomen.

B Tijdlĳn InSAR trendbreuk en schademeldingen

- **Tijdlĳn InSAR trendbreuk en schademeldingen** zeven kaarten tussen 7 en 16 km langs het kanaal waarop het jaar van een trendbreuk in de InSAR tijdreeksen (dus een plotselinge daling of stijging van het InSAR punt) wordt vergeleken met het jaar waarin voor het eerst schade werd gemeld aan een pand. (Bijlage B).

Bijlage B is om privacy redenen niet opgenomen.

C Overzicht InSAR trends

- **Overzicht InSAR trends:** zeven kaarten tussen 7 en 16 km langs het kanaal waarop de lineaire trend van InSAR punten gegeven is. (Bijlage C).

Bijlage C is om privacy redenen niet opgenomen.

D Suffosie en tijdsduur

Bijgevoegd in apart bestand.

E Effecten verlaging kanaalpeil

Bijgevoegd in apart bestand.

F Damwanden langs het Kanaal Almelo – De Haandrik

Bijgevoegd in apart bestand.

G Samenvatting gebiedsbreed schade-onderzoek

Bijgevoegd in apart bestand.

H Draagkracht stroken en poeren en beïnvloeding ervan door grondwaterstand

Bijgevoegd in apart bestand.

I Interne erosieproeven Kanaal Almelo de Haandrik, Factual Report

Bijgevoegd in apart bestand: Deltares rapport 11207155-007-GEO-0005.

J Grondwateranalyses en scenario's

Bijgevoegd in apart bestand: Deltares rapport: 1207155-011-GEO-0002.

K Factsheets per pand

Bijlage K is om privacy redenen niet opgenomen.

L Pandrapporten TNO

Bijlage L is om privacy redenen niet opgenomen.

M Samenvatting eerdere analyses kwel en toetsing

Bijgevoegd in apart bestand.

N Samenvatting bevindingen pand analyse

Bijlage N is om privacy redenen niet opgenomen.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl

Bijlage D Suffosie en tijdsduur

In (Luo *et al.*, 2013) is het effect van de tijdsduur van de belasting op het suffosie proces onderzocht. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen:

- Korte duur proeven, waarbij het verval langzaam wordt verhoogt in stappen van ca. 15-30 min.
- Lange duur proeven waarbij het verval in 1 stap wordt aangebracht en vervolgens constant wordt gehouden totdat voldaan wordt aan de volgende criteria:
 - de hydraulische gradiënt over het monster is minstens 200 min constant.
 - de gemiddelde erosie snelheid (verhouding: massa van geërodeerd materiaal/tijdsduur) is kleiner dan 0.001 g/min.

In de studie wordt onderscheid gemaakt tussen de:

- Kritieke hydraulische gradiënt voor suffosie i_{cr} . Dit is de gradiënt waarbij de eerste fines uit het monster gespoeld worden.
- Hydraulische gradiënt bij bezwijken i_f dit is de gradiënt waar de massa (meer dan enkele korrels – enkele grammen) geërodeerd wordt.

In de korte duur proeven worden i_{cr} en i_f bepaald. Vervolgens worden de lange duur proeven uitgevoerd waarbij verschillende vervallen worden aangebracht. De verhangen in de lange duur proeven zijn allemaal hoger zijn dan i_{cr} uit de korte duur proeven.

Bij de lange duur proeven wordt geconstateerd dat de gradiënten waarbij gesteld werd dat het monster bezwaken was door suffosie in de lange duur proeven lager waren dan in de korte duur proeven. Dit werd geweten aan (een combinatie van) mogelijke factoren, zoals het snelle aanbrengen van het verval in deze proeven, de gelijkelijke toename van het verhang in het monster bij constant verval ten gevolge van verstoppingen in het monster. Er zijn geen lange duur proeven gedaan bij verhangen van i_{cr} of lager. De auteurs hebben dus alleen gekeken naar het effect van lange duur belasting voor situaties waarbij er wel fines uit het monster eroderen, en vonden daar dat het proces bij een lange duur belasting anders verloopt dan wanneer het verval stapsgewijs wordt verhoogd. Er is niet gekeken naar het effect van lange duur belasting voor situaties waar de fines niet uit het monster kunnen eroderen.

De meeste proeven gaan niet expliciet in op de tijdstuur van de belasting. Onderstaande tabel vat samen wat over de duur van de belastingstappen/duur van de proef is gerapporteerd.

Publicatie	Maximale duur belasting
(Skempton and Brogan, 1994)	Proeven voor suffosie. Totale duur experiment was ca. 1.5 uur vanaf verzadiging van het monster.
(Wan and Fell, 2008)	Proeven voor suffosie. Duur van de proef op basis van criteria: totdat er geen fines meer uit het monster spoelen, en de stijghoogte in het monster en het debiet constant waren.
(Rönnqvist and Viklander, 2014), (Kenney and Lau, 1985)	Proeven voor suffosie. Over de proeven van Kenney en Lau: proeven duurden minstens 30 uur en totdat er geen korrels meer uit het monster spoelden. Maximale proef duur was 100 uur.
(Tomlinson and Vaid, 2000)	Proeven voor filter incompatibiliteit. Verval werd in stappen (van 2 cm waterkolom) aangebracht en 10 min constant gehouden. Totale proefduur tot het monster bezwaken was of totdat het maximale verval dat de opstelling aan kon brengen was bereikt.
(Marot <i>et al.</i> , 2009)	Proeven voor suffosie (zand kaoliniet mengsel). Duur van proeven is niet gerapporteerd, maar grafieken met resultaten

Publicatie	Maximale duur belasting
	lopen tot 400 seconden. Op basis van of er erosie van fines uit het monster is geconstateerd (gewogen in mg/s) wordt i_{cr} gerapporteerd.
(Ke <i>et al.</i> , 2015)	Proeven voor suffosie. De duur van de proeven voor suffosie is ca. 3 uur. Vervolgens worden de monsters beproefd voor vervorming.
(Rochim <i>et al.</i> , 2017)	Proeven voor suffosie. Verschillende belastingspaden worden gevolgd. Paden waarbij de belasting in stappen van 10 min wordt verhoogd (toename van gradiënt per stap is 0.1 initieel tot gradiënt 2 en dan stappen van 0.5. En voor een ander pad toename van 1 per stap). Ook is een pad waarbij de belasting in stappen die 12 uur duren wordt verhoogd met 0.5 per stap. Tot slot wordt er een proef gedaan met een constante belasting, gradiënt 4. De langste proef in deze studie was 1440 min. De meeste proeven duurden korter dan 300 min. In de langste proef met een lage gradiënt neemt de doorlatendheid van het monster geleidelijk af, wat te wijten lijkt aan filtratie van fines in het monster zelf. Door het verhogen van het verval neemt de doorlatendheid weer iets toe.
(Liang <i>et al.</i> , 2017)	Proeven voor suffosie. Verhang is verhoogd in stappen van 0.05 per 10 min om i_{cr} te bepalen.

Referenties

- Ke, L. *et al.* (2015) 'Soil deformation due to suffusion and its consequences on undrained behavior under various confining pressures', *15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ARC 2015: New Innovations and Sustainability*, pp. 368–373. doi: 10.3208/jgssp.JPN-083.
- Kenney, T. C. and Lau, D. (1985) 'Internal stability of granular filters', *Canadian Geotechnical Journal*, 22, pp. 215–225.
- Liang, Y. *et al.* (2017) 'Onset of suffusion in gap-graded soils under upward seepage', *Soils and Foundations*. Japanese Geotechnical Society, 57(5), pp. 849–860. doi: 10.1016/j.sandf.2017.08.017.
- Luo, Y. long *et al.* (2013) 'Hydro-mechanical experiments on suffusion under long-term large hydraulic heads', *Natural Hazards*, 65(3), pp. 1361–1377. doi: 10.1007/s11069-012-0415-y.
- Marot, D. *et al.* (2009) 'Internal flow effects on isotropic confined sand-clay mixtures', *Soil and Sediment Contamination*, 18(3), pp. 294–306. doi: 10.1080/15320380902799524.
- Rochim, A. *et al.* (2017) 'Effects of Hydraulic Loading History on Suffusion Susceptibility of Cohesionless Soils', *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(7), p. 04017025. doi: 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001673.
- Rönqvist, H. and Viklander, P. (2014) 'On the Kenney-Lau Approach to Internal Stability Evaluation of Soils', *Geomaterials*, 04(04), pp. 129–140. doi: 10.4236/gm.2014.44013.
- Skempton, A. W. and Brogan, J. M. (1994) 'Experiments on piping in sandy gravels', *1Géotechnique*, 44(3), pp. 449–460.
- Tomlinson, S. S. and Vaid, Y. P. (2000) 'Seepage forces and confining pressure effects on piping erosion', *Canadian Geotechnical Journal*, 37, pp. 1–13.

Wan, C. F. and Fell, R. (2008) 'Assessing the Potential of Internal Instability and Suffusion in Embankment Dams and Their Foundations', *JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING*, 134(3), pp. 401–407. Available at:
<http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/T10-070>.

Bijlage E

In deze bijlage zijn namen van betrokkenen, adressen van onderzochte panden en andere privacygevoelige informatie geanonimiseerd of verwijderd.

Effecten van kanaalpeilverlaging

E.1 Inleiding

De Provincie heeft Deltares in de vierde onderzoeksvraag gevraagd om na te gaan:

- Hoe effectief verlaging van het waterpeil op het kanaal is als mitigerende maatregel tegen piping.
- Welke andere effecten de ingreep heeft.

De aanname die aan de voorgestelde maatregel ten grondslag ligt, is dat lek uit het uitgediepte kanaal de oorzaak is van piping die verzakking van panden veroorzaakt (ook wel aangeduid als suffosie oftewel interne erosie met uitspoeling van fijne delen uit de zandlaag, waarop de panden zijn gefundeerd). Vernatting, door stijging van de grondwaterstand, kan een bijeffect zijn waardoor de draagkracht van funderingen af kan nemen. Overigens kan een peilverlaging in het kanaal een tijdelijke maatregel zijn (bijvoorbeeld gedurende 2 jaar) totdat andere maatregelen zijn getroffen, bijvoorbeeld door het aanbrengen van een bodemafdichting in het kanaal als definitieve oplossing, indien nodig.

In de aanpak wordt alleen ingegaan op de effecten die volgen uit de maatregel met peilverlaging die voorgesteld is voor het kanaaldeel tussen sluis Aadorp en sluis de Haandrik, om de gebouwschade langs het kanaal tegen te gaan. Het kanaaldeel van de Vecht naar Coevorden wordt niet beschouwd. De korte aftakking naar het Zwolse kanaal zit wel in de scope. Navolgend is eerst ingegaan op de effectiviteit van de voorgestelde maatregel. Vervolgens bevat het tweede deel van de onderzoeksvraag de effecten van de ingreep.

E.2 Effectiviteit van peilverlaging

In betreffende delen in dit rapport van Deltares is het antwoord gegeven op de eerste vraag omtrent de effectiviteit van kanaalpeilverlaging als maatregel tegen piping op basis van het grondonderzoek en het grondwateronderzoek. Hier wordt kort een samenvatting gegeven van het resultaat van het onderzoek naar piping.

Er bestaan verschillende soorten piping:

1. De eerste soort is terugschrijdende erosie die het gevolg is van een horizontale hydraulische gradiënt van het grondwater. Uit het grondwateronderzoek komt naar voren dat de gradiënt ter plekke van de panden langs het kanaal erg klein is. Op basis van die waarneming stelt Deltares dat dit type piping niet optreedt. Er zijn ook geen zand-meevoerende wellen geconstateerd. Voor mitigatie van dit type piping heeft peilverlaging derhalve geen zin.
2. De tweede soort is piping bij filterincompatibiliteit. Dit is het doorlaten van fijne deeltjes door een grove laag heen als gevolg van grondwaterstroming. Hiervoor is een analyse gemaakt van korrelverdelingen uit de verschillende grondlagen met beschouwing van de spreiding van korrelgrootten in die verdelingen. Er blijkt sprake van een geleidelijke overgang van grof naar fijn en daarom is het onwaarschijnlijk dat fijne deeltjes uitspoelen. De verticale gradiënt in de grondwaterstroming is mogelijk alleen van betekenis juist onder het kanaal maar is ter plekke van de panden daarentegen zeer klein.
3. Het derde type piping is suffosie. Dit is uitspoeling van fijne deeltjes uit een zandlaag die uit grof en fijn materiaal bestaat waarbij volumeverlies optreedt. Dit mechanisme wordt op dit moment nog getest in het laboratorium met monsters uit het grondonderzoek.

E.3 Aanpak van de analyse

E.3.1 Opzet in een stappenplan

Voor de vierde vraag van het onderzoek wordt nagegaan welke effecten aan de orde kunnen zijn van een verlaging van het kanaalpeil. Omdat sprake is van een langgerekt kanaal waarlangs vele belangen voorkomen en de effecten daarop goed moeten worden afgewogen, is een aanpak van grof naar fijn voorgesteld, overeenkomstig het volgende stappenplan:

1. Eerste stap is om overeenstemming te vinden over de te beschouwen effecten van de voorgestane uitvoeringsmethode (verlaging van het kanaalpeil).
2. Volgens een gebruikelijke opzet van een risico-inventarisatie [79] worden mogelijke onderwerpen, mechanismen en de risicovolle objecten benoemd.
3. In de volgende stap worden de mogelijke risico's kwalitatief beschreven, geklasseerd (kans x gevolg in kwalitatieve schaal) en geordend.
4. Daarna worden de belangrijkste risico's gekwantificeerd, indien deze nadere onderbouwing is gewenst.
5. Op basis van de uitkomsten van de risico-inventarisatie kan men besluiten hoe met de voorgestelde uitvoeringsmethode moet worden omgegaan en worden zo nodig beheersmaatregelen voor de negatieve effecten gedefinieerd.

In overleg met de opdrachtgevers van de Provincie is besloten om de analyse te beperken tot stap 1, 2 en het eerste deel van stap 3, als kwalitatieve beschrijving van de risico's.

E.3.2 Beschouwde effecten van kanaalpeilverlaging

De volgende effecten komen naar voren uit een voorlopige, globale risicobeschouwing (eerste aanzet voor stap 1 in het stappenplan):

1. Scheepvaart (capaciteit).
2. Waterbeheersing oppervlaktewater.
3. Waterkwaliteit.
4. Grondwaterbeheersing.
5. Bebouwing.
6. Waterkeringen (vervorming en stabiliteit van damwanden).
7. Waterbouwkundige constructies (sluizen en stuwen).
8. Infrastructuur wegen en bruggen.
9. Infrastructuur riolering, kabels en leidingen.
10. Landbouw.
11. Natuur en ecologie.
12. Waterwinning.
13. Overige belangen, zoals bedrijfsbelangen en recreatie.

Bij de uitvoering van het stappenplan voor dit onderdeel van het onderzoek zijn inmiddels stappen 1, 2 en het eerste deel van 3 doorlopen. Dat wil zeggen dat de vraagarticulatie is doorgenomen en de inventarisatie van onderwerpen, mechanismen en de risicovolle objecten plus de kwalitatieve beschrijving van mogelijke effecten. De informatie voor de inventarisatie en effectbeschrijving is aangeleverd door de belangrijkste informatiehouders:

- Onderdeel 1, 6, 7, 8, 9 en 13 – Provincie Overijssel.
- Onderdelen 2, 3 en 4 - Provincie en het Waterschap Vechtstromen.
- Onderwerpen 5 – Deltares.
- Onderdelen 10 en 11 en 12 – Deltares, wat betreft effecten die voortkomen uit grondwater beïnvloeding van het kanaal, en Waterschap - Informatie over omgeving.

Hierna is van de diverse effecten de informatie en risico-inventarisatie beschreven. De kostenconsequenties zijn in de inventarisatie niet uitgewerkt.

E.4 Toelichting op de situatie van het kanaal

E.4.1 Historisch overzicht van de aanleg

Het kanaal (ook aangeduid als vaarweg V77) ligt tussen sluis Aadorp en sluis De Haandrik en heeft een lengte van circa 32 km en een breedte variërend van veelal 20 m tot maximaal 40 m. Km0 ligt ter plekke van de onderleider net ten zuiden van sluis Aadorp.

Het kanaal is midden 19e eeuw aangelegd, o.a. op basis van plannen van Stieltjes, om de Overijsselse Kanalen van water te voorzien, slechts ten dele voor de industriële ontwikkeling in de Twentse regio maar vooral voor transport, met name de afvoer van veen en turf dat in het omliggende hoogveengebied werd ontgonnen [73]. In de concessie volgens Koninklijk Besluit van 13 oktober 1850 staat vermeld: “Het graven van een kanaal van de Regge naar Daarle en van daar naar de Vecht boven den Hardenbergh met de nodige sluizen, bruggen en eene stuw in de rivier de Vecht, voor eene opstuwing van ongeveer acht ellen¹ (8) boven A.P.”.



Figuur E.1 Aanleg van de Overijsselse kanalen, omslag van RWS-uitgave over OKM en MOK [Smolders]

Door de Overijsselsche Kanalisatie Maatschappij werd het kanaal van Almelo naar Zwolle gerealiseerd, waarbij ook een tak van Vroomshoop naar de Haandrik werd aangelegd. In 1858 werd het kanaal opengesteld. Op de waterstaatskaart van 1884 is een kanaalpeil van AP+9,30m aangegeven [77]. Op de waterstaatskaart van 1924 is een waterstand van NAP+9,10 m aangegeven [78]. Het verschil in referentie tussen NAP en AP houdt mogelijk verband met verbeterde nauwkeurigheds-waterpassingen. In de praktijk wordt momenteel het peil gestuurd op een waterstand die in de zomer iets hoger is, namelijk NAP+9,15 m.

In de periode na de eerste wereldoorlog ontstonden plannen om het Twentekanaal aan te leggen. Het duurde tot 1953 tot de aansluiting van het Twentekanaal naar Almelo gereed was. Voor de bevordering van de scheepvaart op het traject Almelo-Coevorden is het kanaal in 1965 verdiept. In de jaren tachtig en negentig werd het kanaal verbeterd. In Aadorp werd in 1987 een nieuwe sluis gebouwd en zijn de bruggen vernieuwd. Volgens bestek 9706 is de vaargeul in het kanaal bij verruiming tot 400 ton gebaggerd tot NAP+5,45 à 5,7 m.

¹ In 1820 werd een el gelijk gesteld aan een meter.

Vanwege stimulering van transport over water is rond 2010 besloten om het kanaal op te waarderen om grotere schepen in klasse CEMT II met belading tot circa 700 ton toe te kunnen laten (type verlengde Kempenaar), conform de daarvoor geldende richtlijnen [72]. Volgens het verkeersbesluit van Gedeputeerde Staten [59] geldt dat de standaard maximum afmetingen voor het Kanaal Almelo – De Haandrik zijn vastgesteld op:

- Lengte: 55 meter (en schepen tot 67 meter, inclusief actieve kopbesturing).
- Breedte: 6,60 à 7,40 meter (afhankelijk van de diepgang).
- Diepgang: 2,60 resp. 2,40 meter (afhankelijk van de breedte).

Tussen het tweede deel van 2010 en de zomer van 2016 werd de opwaardering van het kanaal uitgevoerd waarbij volgens een memo van Provincie Overijssel [61] de volgende werkzaamheden hebben plaatsgevonden (zie ook Figuur E.2):

- Vervangen van 5 beweegbare bruggen (Hoogenweg, Bergentheim, Kloosterdijk, Emtenbroekerdijk, Beerzerveld) om de doorvaart te verbreden naar 9,5 à 10,5 m.
- Aanpassen en realiseren van wachtplaatsen.
- Aanleg van voorzieningen voor scheepvaart, bedrijven en fauna-uittrede.
- Baggerwerken.

Tevens is in Geerdijk een nieuwe zinker aangelegd.

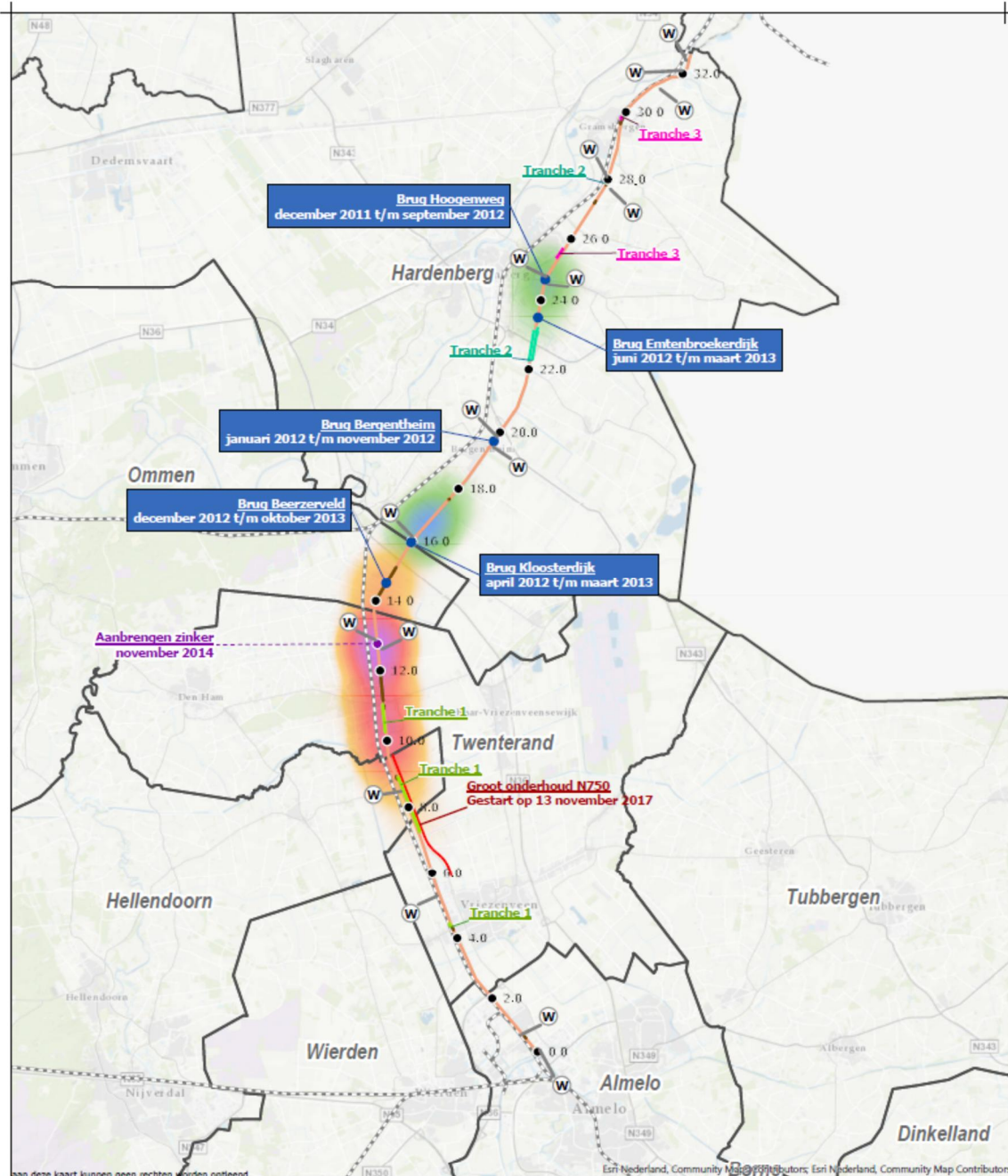
De investering voor de opwaardering van het kanaal naar schepen met belading van 700 ton bedroeg circa 20 miljoen euro [62]. De vaargeul van het kanaal is verbreed en het aantal wachtplaatsen vergroot (zie locaties aangeduid met W in Figuur E.2). Daarbij zijn ook boordvoorzieningen (damwanden) vernieuwd. De wachtplaatsen zijn nodig omdat het verkeer met grote schepen over het grootste deel van het kanaal slechts enkelstrooks kan plaatsvinden. De wachtplaatsen zijn tevens bedoeld om te wachten voor opening van een sluis of een beweegbare brug.

Het baggerwerk is in de periode oktober 2011 tot februari 2014 uitgevoerd om een grotere waterdiepte te realiseren. Daarbij is het onderwaterprofiel verbreed naar een trapeziumvormig profiel (horizontale bodem en flauwe taluds) in plaats van een V-profiel. Bij het baggeren is een onderhoudsdiepte (waterdiepte) van 3,60 m gerealiseerd, iets meer dan de diepte die is aangegeven in principeprofielen 3,50 m (zie Figuur E.3).

Ter plekke van NGE verdachte locaties is aanvullend baggerwerk verricht tussen medio 2015 en maart 2016. Op enkele plekken met kabels en leidingen was geen baggerwerk mogelijk. Volgens mededeling van experts van de Provincie is uit multibeam-peilingen van Heuvelman Ibis die zijn uitgevoerd in een reeks van jaren, af te leiden dat na het baggeren de waterdiepte van de vaargeul al weer is afgenomen. De oorzaak en aard van de verondieping (slib of zand) is niet bekend. Hier doet de Provincie momenteel onderzoek naar. De meeste wachtplaatsen waar geen maatregelen zijn getroffen bij de opwaardering, voldoen niet aan de benodigde waterdiepte voor schepen met een diepgang van 2,60 m. Daarnaast voldoen ook enkele opgewaardeerde wachtplaatsen niet geheel aan de waterdiepte van 3 meter.

E.4.2 Actuele situatie voor de scheepvaart

Overwegend is Kanaal Almelo – De Haandrik nu op verschillende kanaaldelen geschikt voor enkelstrooksverkeer, afgewisseld met trajecten waar een krap profiel tweestrooksverkeer is ingericht (zie Bijlage E.6: 8,890 km krap 2-strooks en 22,510 km enkelstrooks vaarweg) [58].

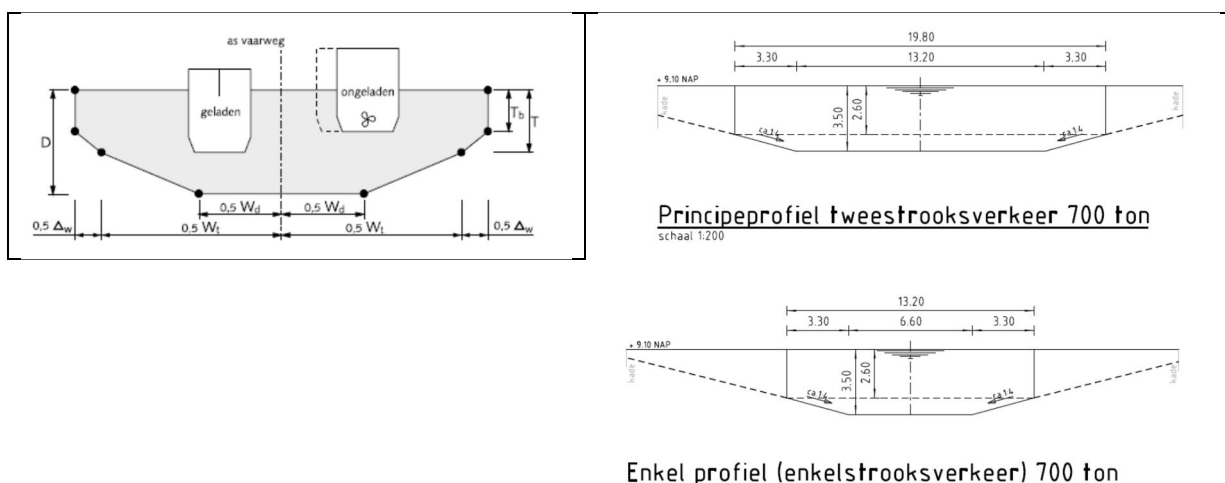


Figuur E.2 Uitgevoerde werken bij de opwaardering van Kanaal Almelo – De Haandrik in de periode 2010-2018 met aanduiding van uitgevoerde werken, meldingen en kilometrering langs het kanaal [60]

Volgens figuur 8 en tabel 18 uit de Richtlijnen Vaarwegen 2020 gelden voor CEMT II de volgende afmetingen, geïmplementeerd zoals in Tabel E.1 Afmetingen van vaarweg in klasse CEMT II [Richtlijnen vaarwegen 2020, tabel 18] en Figuur E.3.

Tabel E.1 Afmetingen van vaarweg in klasse CEMT II [Richtlijnen vaarwegen 2020, tabel 18]

Minimum Vaarweg afmetingen CEMT II	Waterdiepte vaargeul D [m]	Vaargeul breedte Wd [m]	Totale breedte Wt [m]	Onderwater taluds	Zijwind toeslag $\square W$ [m]
Enkelstrooks verkeer	3,3-3,4	6,6	13,2	1:4	ntb
Krap tweestrooks verkeer	3,3-3,4	13,2	19,8	1:4	4

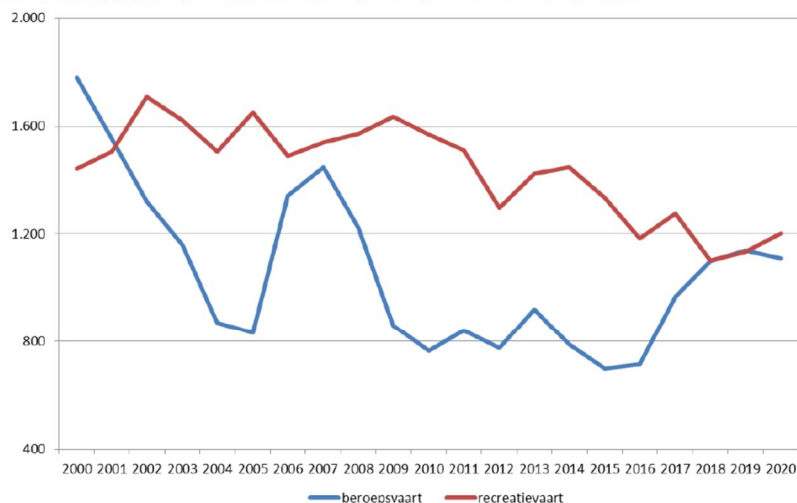


Figuur E.3 Links: Minimum vaarweg profiel [bron: [72] Richtlijnen Vaarwegen 2020, figuur 8], Rechts: implementatie volgens bestek baggerwerk [bron: [61] principe profielen, tekening 9W0044.A0/2323-803]

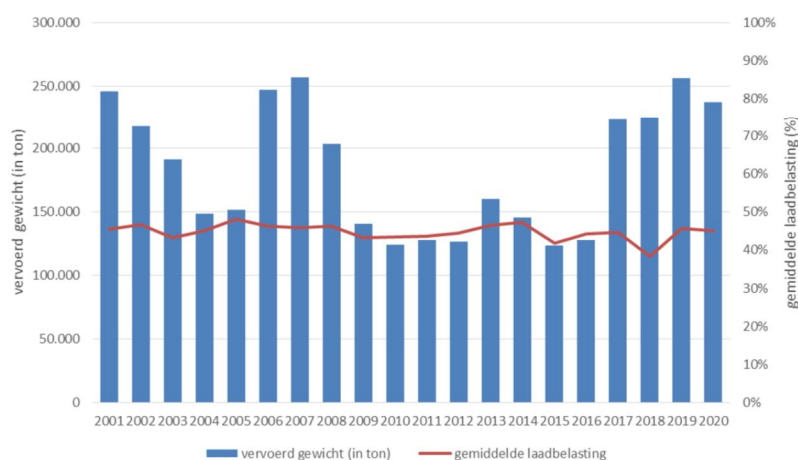
Uit scheepvaarttellingen van de Provincie Overijssel [63] is af te leiden dat in 2020 de Sluis Aadorp is gepasseerd door ruim 1100 schepen in de categorie beroepsvaart en 1200 in de categorie recreatievaart. De variatie over de periode 2000 tot 2020 is groot. Vanaf 2000 is eerst sprake van een afname, onderbroken door enkele jaren opleving en in de laatste 5 jaar neemt de omvang weer toe (zie Figuur E.4, boven).

Provincie Overijssel registreert tevens data van het vervoerd gewicht (zie Figuur E.4, onder). De maximum capaciteit van 100% die in Figuur E.4 is aangegeven houdt verband met de maximale beladingscapaciteit van een schip. De stijging in de beroepsvaart na 2016 kan worden toegeschreven aan transport naar Betonfabriek Diamant die heeft besloten om meer grondstoffen over water te vervoeren.

Grafiek 3: Aantal passages Sluis Aadorp voor beroepsvaart en recreatievaart 2000-2020



Grafiek 4: Vervoerd gewicht (ton) en gemiddelde laadbelasting sluis Aadorp per jaar



Figuur E.4 Aantal scheepvaartbewegingen en beladingsgraad van beroepsvaart op Kanaal Almelo - De Haandrik in de periode 2000 tot 2020

Op basis van de aantallen kan gesproken worden van een zeer rustige vaarweg [72]². Op basis van de verkeersintensiteit die aan de orde is, kan met enkelstrooksprofiel of krap profiel voor tweestrooksverkeer worden volstaan.

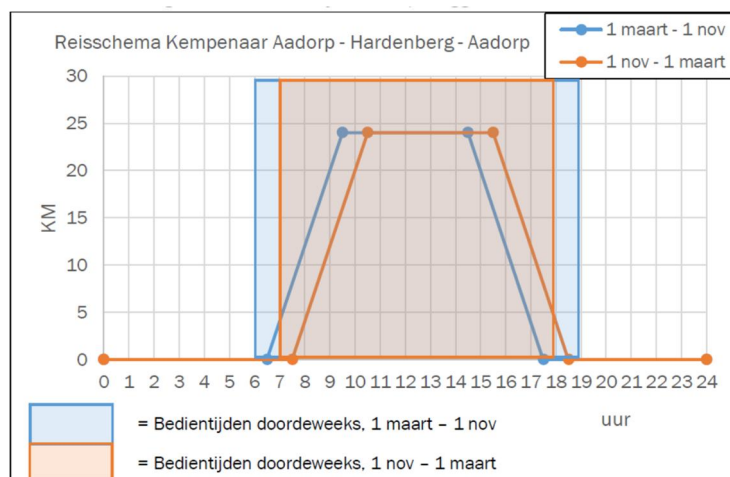
Volgens een uitgevoerde MKBA van DECISIO [55] kunnen op het huidige kanaal maximaal 10 ladingen van 700 ton per week worden vervoerd gedurende 8 maanden en 5 ladingen per week in de wintermaanden. De maximale capaciteit van het kanaal is dan circa 303.800 ton per jaar uitgaande van het aangegeven vaarschema op een grotendeels enkelstrooks kanaal. Volgens DECISIO ligt het gebruik van het kanaal nu met circa 240.000 ton/jaar op 80% van de maximum capaciteit.

Er is aangegeven dat volledige inzet van schepen met belading tot 700 ton een optimale benutting van de huidige capaciteit kan opleveren, maar ook dat door verkeersmanagement en verruiming van bedientijden van sluizen en bruggen nog een hoger rendement kan worden behaald. Enkele conclusies van de MKBA van DECISIO over verdere opwaardering van het kanaal zijn in Bijlage E.6 opgenomen.

² Richtlijnen Vaarwegen 2020, tabel 13, Rijkswaterstaat, juli 2020

Het grootste deel van het vervoerd gewicht (circa 90%) is bestemd voor Betonfabriek Diamant in Hardenberg. Circa 10% van het transport heeft Coevorden als bestemming. In 2017 trad een sterke stijging op van het vervoerd gewicht. Terwijl het aantal schepen is gestegen met 35%, is het vervoerd gewicht toegenomen met 75%. Dit houdt verband met een combinatie van het feit dat het kanaal is opgewaarderd en een grotere vraag naar bouwstoffen (aantrekken van de bouwmarkt).

In tijden van droogte en lage rivierstanden daalt de laadbelasting (Figuur E.4, jaar 2018). Dat is af te lezen uit de data van de droge periode van 2018 waarin het vervoerd volume toenam met 1% terwijl 14% meer scheepsbewegingen plaatsvonden ten opzichte van 2017.



Figuur E.5. Vaarschema van Kempenaar op traject Aadorp-Hardenberg-Aadorp op een doordeweekse dag inclusief bedientijd van sluis en bruggen [55]

Het huidige getransporteerde volume zand en grind met als bestemming betonfabriek Diamant in Hardenberg is merendeels afkomstig van de Beneden-Rijn. Het vaarschema wordt bepaald door de afstand, de capaciteit van het kanaal, bedieningstijden van sluizen en bruggen en loscapaciteit aan de kade. Volgens DECISIO (p.16/17) is de totale reistijd Aadorp – Hardenberg – Aadorp plus lostijd voor CEMT II klasse schip uitvoerbaar in 11 uur (zie Figuur E.5). De vaartijd op het kanaal wordt bepaald door de maximumsnelheid van 6 km/uur voor geladen schepen en 9 km/uur voor ongeladen schepen [57]. Met bedientijden van sluizen en bruggen mee is de reis in het seizoen net binnen een dag uitvoerbaar, maar in 4 maanden van het winterseizoen met krappere bedientijden is de reistijd langer dan een dag.

E.4.3 Waterbeheer

Kanaal Almelo - De Haandrik vormt een hydrologische verbinding van de IJssel via het Twentekanaal naar de Vecht. Het kanaal sluit bij de Vecht aan op het Coevorden - Vecht-kanaal. Het peil in het Twentekanaal is NAP+10 m en in het Kanaal Almelo - De Haandrik en in het Kanaal Vecht - Coevorden is het streefpeil volgens het grensverdrag [75] NAP+9,10 m waarbij in het waterakkoord een marge van 0,10 m is vermeld. Het peil kan licht variëren door waterafvoer (voor voeding van omliggend gebied) en hoogwater op de Vecht.³

³ In het waterakkoord [71] staat een vast streefpeil van 9.10 met een marge van 10 cm, met de volgende voetnoot: "Op het Kanaal Almelo – De Haandrik kan, in afwijking van het vermelde streefpeil van NAP + 9,10 m en rekening houdende met de weersomstandigheden, gedurende zomerperioden ten behoeve van de watervoorziening tijdelijk een peil van NAP + 9,15 m worden ingesteld. Het moment van overgang naar het tijdelijke peil NAP + 9,15 m. evenals het moment van herstel van het streefpeil wordt door de kanaalbeheerder aangegeven. De kanaalbeheerder informeert hierover alle waterbeheerders die kunnen inlaten vanuit het kanaal traject Almelo – Coevorden."

Het peil op De Vecht wordt beheerst middels de stuw in de Vecht bij De Haandrik. Normaliter staat het peil in de Vecht op NAP+9,10m en staan de sluisdeuren bij Sluis De Haandrik en de Coevordersluis open. Bij hoge afvoer en hoge waterstand op de Vecht worden Sluis De Haandrik en Coevordersluis gesloten en wordt geschut voor de scheepvaart op de sluisen.

Via het kanaal vindt zowel waterinlaat plaats naar achterliggend gebied als ook afwatering vanuit het achterliggende gebied naar het kanaal. De voorkomende inlaten en aflaten zijn vermeld in Bijlage E.7.

In het Waterakkoord [71] tussen RWS, Provincie en Waterschappen voor het bereiken van doelen volgens de Europese Kaderrichtlijn Water, Natura 2000 en het Nationaal Bestuursakkoord Water is (in artikel 2) de verdeling van water via het kanaal beschreven. Water uit de IJssel wordt via de Twentekanal en door het Kanaal Almelo - De Haandrik in de richting van de Overijsselse Vecht aangevoerd. Via deze aanvoer worden delen van Salland, Noord-Oost-Overijssel (Engbertsdijkvenen) en Zuid-Drenthe van water voorzien. In de sluis Eefde wordt daartoe water opgevoerd vanuit de IJssel naar het Twentekanaal en bij de Sluis Aadorp doorgelaten naar het kanaal Almelo de Haandrik.

In het waterakkoord, pagina 34, staat vermeld: *“Kanaal Almelo - De Haandrik wordt afgelaten met een maximale doorlaatcapaciteit van 8 m³/s. Via deze aanvoerweg worden delen van Salland, noordoost en zuidwest Overijssel, de Gelderse Achterhoek, Twente en Zuid-Drenthe van water voorzien. (De maximum doorlaatcapaciteit van 8 m³ /s geldt in een situatie dat er tegelijkertijd scheepvaartverkeer plaatsvindt. Gedurende de nacht, als het scheepvaartverkeer stil ligt, kan de doorlaatcapaciteit tijdelijk worden vergroot tot maximaal 10 m³ /s).”*

Het peil op het Twentekanaal is NAP+10 m zodat voeding naar het Kanaal Almelo - De Haandrik met een peil van circa NAP+9,10 m onder vrij verval met een doorlaat kan plaatsvinden. De maximale doorlaatcapaciteit bedraagt 8 m³/s. In extreem droge jaren (2018 en 2019) is deze hoeveelheid niet genoeg. De hoeveelheid van 8 m³/s is ook al eerder nodig dan in een extreem droog jaar [74]. De levering is in een situatie waarbij ook scheepvaart plaatsvindt. In nachtelijke uren zonder verkeer kan de doorlaatcapaciteit worden vergroot tot maximaal 10 m³/s.

Het kanaal vervult een belangrijke rol in de waterverdeling in de regio. In het Waterakkoord is aangegeven dat de doorlaatcapaciteit bij de sluis Almelo mogelijk nog vergroot moet worden om aan de waterbehoefte van gebruikers te kunnen voorzien.

Vanuit sluis De Haandrik kan water worden doorgevoerd naar Coevordersluis voor waterlevering aan het noordelijk gebied via kanaal Vecht Coevorden. Maximaal wordt volgens Waterakkoord circa 2,5 m³/s doorgelaten.

Bij wateroverschot in het achterland vindt afwatering van delen van Overijssel en Gelderland plaats via aflaten naar het Kanaal Almelo - De Haandrik en van daaraf naar het IJsselmeer via het Zwolse kanaal en de Vecht. Bij wateroverschot is sluis Aadorp de waterscheiding.

De aan- en afvoer van water via het kanaal leidt nauwelijks tot fluctuatie van de waterstand. De fluctuatie in de waterstand op het kanaal is klein, volgens Waterakkoord 10 cm.

Het waterakkoord geeft aan dat bij droogte door Rijkswaterstaat de aanvoer van water vanuit het Twentekanaal kan worden gestaakt indien besluitvorming volgens de Verdringingsreeks daartoe aanleiding geeft. De besluitvorming volgens de verdringingsreeks houdt wel in dat de stabiliteit van keringen niet in gevaar mag komen.

Tijdens de opwaardering van het kanaal rond 2015 is behalve voor de scheepvaart ook een aantal aanpassingen ten behoeve van de waterhuishouding doorgevoerd, onder meer door renovatie van een enkele onderleider en een gemaal. Daarnaast heeft aanpassing van pompcapaciteit in de sluis te Eefde in het Twentekanaal plaatsgevonden. Voor de waterbeheersing van omliggend gebied zijn in de wal van het kanaal een 17-tal inlaten en aflaten aanwezig. De locaties met functie en positie langs het kanaal en de gebieden waarheen water wordt aangevoerd, zijn aangegeven in Bijlage E.7. Veel van de inlaten zijn uitgevoerd als vaste of regelbare overlaat waarmee onder vrij verval water naar de omliggende lokale watergangen kan worden overgelaten. De maximale capaciteit van de inlaten is gesommeerd bijna 6,8 m³/s. Het vermelde debiet betreft een piekafvoer die geldt voor een droogtesituatie met een overschrijdingsfrequentie van 1/10 jaar. Waterschap Vechtstromen bepaalt de benodigde debieten van de inlaten en aflaten. De waterinlaat is benodigd ter stabilisatie van de balans in een droge periode van 20 dagen in de zomer. De inlaathoeveelheid wordt bepaald volgens gebiedskentallen variërend van 0,2 tot 0,59 liter/seconde/hectare afhankelijk van de cultuurtechnische situatie in het gebied.

De droogte in 2018 heeft bij het waterbeheer betrokken partijen in Oost-Nederland duidelijk gemaakt dat meer nadruk moet worden gelegd op de waterbeheersing. Het project Zoetwatervoorziening Oost-Nederland (ZON) [74] is een regionale uitwerking van het landelijke Deltaplan zoetwater en bevat een strategie die is opgesteld voor de zoetwatervoorziening. Hiermee willen partijen de nadelige gevolgen van watertekorten beperken. De kern van deze driepuntenstrategie is: sparen-aanvoeren-aanpassen. Ook bestrijding van verdroging staat centraal, onder andere door waterspaarmaatregelen. De Europese Kaderrichtlijn Water KRW [76] is met het oog op biodiversiteit leidend en hieruit volgen voorschriften voor het realiseren van een goede ecologische en chemische waterkwaliteit. Uit de KRW is af te leiden dat voor het stellen van doelen aan het kanaal natuurvriendelijke inrichting, het verminderen van de watervervuiling en gebiedsgerichte samenwerking met de landbouw wenselijk is. In de veenontginningen die rond het kanaal vooral van belang zijn, is wateraanvoer nodig maar omdat geen sprake mag zijn van verontreiniging of verdunning van verontreiniging wordt bij wateraanvoer ook de waterkwaliteit in de gaten gehouden.

Het kanaalpeil is in grote delen van het gebied hoger dan grondwaterstand en waterstand in de watergangen naast het kanaal, op andere delen grenst het kanaal aan hoge gronden. In het onderzoeksdeel over de regionale modellering van het grondwater is de inzijging vanuit het kanaal naar de ondergrond beschouwd. Daarbij spelen de weerstand van slib en van de bodem van en onder het kanaal, evenals de damwanden langs het kanaal een grote rol.

E.5 Inventarisatie van de effecten van peilverlaging

E.5.1 Effect 1: Scheepvaart (capaciteit)

De Provincie Overijssel is bij het beheer van het kanaal en de sluizen verantwoordelijk voor de scheepvaart. Over de scheepvaartaspecten van het kanaal is in juni verschillende malen afstemming geweest met deskundigen van Provincie Overijssel.

Het streefpeil in het kanaal is circa NAP +9,1 m. De kanaalbodem van de vaargeul is verdiept tot NAP +5,5 m, wat overeenkomt met een waterdiepte van 3,6 meter. Een verlaging van het kanaalpeil vermindert de kanaaldiepte en daarmee de toegankelijkheid voor schepen en de mate van belading.

De toegestane schepen met een maximale (geladen) diepgang van 2,60 hebben in het kanaal conform de Richtlijn Vaarwegen [72] een minimale waterdiepte nodig van 3,38 meter (2,60 x 1,3) bij enkelstrooks of krap profiel uitgaande van een factor 1,3. Deze minimale waterdiepte wordt de nautische diepte genoemd. Dit is een algemene norm die wordt

gehanteerd voor de minimale diepte die een schip nodig heeft, gebaseerd op de kielspeling van een schip. Deze kielspeling is nodig, omdat een schip een retourstroom opwekt tijdens het varen door een kanaal. Dit leidt tot een waterspiegeldaling naast het schip. Het schip daalt mee met de waterspiegel (inzinking) en komt dan dicht bij de bodem.

Bij een kanaalpeilverlaging van 0,50 meter neemt de diepte van de vaargeul af tot 3,1 m, afgezien van mogelijke aanslibbing of verzanding. Daarnaast neemt ook de diepte van de aanloopgebieden naar afmeervoorzieningen af van 3 meter naar 2,50 m.

Hiermee wordt niet meer voldaan aan de nautische diepte voor CEMT II. In feite is scheepvaart in categorie CEMT II dan niet meer mogelijk, in ieder geval niet met volledige belading. Gesteld dat met gedeeltelijke belading kan worden gevaren, dan is naar schatting een beladingsgraad van 80% haalbaar. In plaats van volle belading van 700 ton op een verlengde kempenaar zal dan naar schatting slechts 560 ton worden vervoerd.

Echter, door bij een kanaalpeilverlaging over te gaan op een geringere beladingsgraad zal de scheepvaart ook ernstig worden gehinderd. Als er schepen met een grotere diepgang worden toegelaten dan volgens de norm past kan er schade ontstaan. Bij te weinig waterdiepte neemt de zuigende werking toe, waardoor een schip minder goed stuurbaar wordt. Dit kan er toe leiden dat een schip, bijvoorbeeld bij veel wind, uit positie raakt met mogelijke schade aan oevers of aanvaringen met kunstwerken of passerende schepen tot gevolg. Verder kan er schade aan de schroef van een schip kunnen optreden. Ook zal door de toenemende retourstroom onder en langs het schip de inzinking groter zijn en de belasting van de kanaalbodem en oevers toenemen, mogelijk met erosie als negatief effect.

Bij een waterdiepte van 3,1 m zou het kanaal nog net geschikt zijn voor schepen in klasse CEMT I. Omdat volgens onderstaande Tabel E.2 Kenmerken van maatgevende motorvrachtschepen, tabel 2 uit [72] uit [72] bij CEMT I de diepgang echter niet veel minder is dan bij CEMT II, komt men ook bij die klasse met de belading in de problemen. Volgens globale schatting kan hooguit 330 ton per spits (90% belading) worden vervoerd. Men zou dan nog kunnen overgaan op 2 gekoppelde spitsen met 90% belading (circa 80 m lengte).

Overgaan op vervoer in CEMT I met enkele spitsen of duwboot met voorspanbak biedt echter weinig soelaas. Niet alleen omdat dat een flinke reductie van mogelijk transport en hogere kosten tot gevolg heeft, maar ook omdat dit volgens DECISIO (p.16) vanwege de laadtijd bij de zandwinlocaties (en de lostijd) niet goed inpasbaar is in het vaarschema.

Tabel E.2 Kenmerken van maatgevende motorvrachtschepen, tabel 2 uit [72]

CEMT-klasse	breedte (m)	lengte (m)	diepgang (m)		strijkhogte (m)	laadverm. (ton)	motorverm. (kW)	boegschroef (kW)
			geladen	leeg				
I	5,05	38,5	2,5	1,2	4,25	365	175	100
II	6,6	50 - 55	2,6	1,4	5,25	535 - 615	240 - 300	130
III	8,2	67 - 85	2,7	1,5	5,35	910 - 1250	490 - 640	160 - 210
IV	9,5	80 - 105	3,0	1,6	5,55	1370 - 2040	750 - 1070	250
Va	11,4	110 - 135	3,5	1,8	6,40	2900 - 3735	1375 - 1750	435 - 705
Vla	17,0	135	4,0	2,0	8,75	6000	2400	1135

Uit de informatie volgt dat bij wijzigen van het waterpeil problemen kunnen ontstaan voor de scheepvaart. Bijgevolg zou het verkeersbesluit moeten worden aangepast. Om een veilige en vlotte doorvaart te kunnen garanderen, zou men moeten overgaan op inzet van minder beladen of kleinere schepen. Het gevolg zal meer scheepsbewegingen zijn voor zover niet

gelimiteerd door de capaciteit van het kanaal. Mogelijk kan dan aan het gevraagde transport niet meer worden voldaan.

Met betrekking tot het effect van kanaalpeilverlaging op de scheepvaart zijn de volgende aspecten uit de situatie van het kanaal afgeleid:

- Bij verlaging van het kanaalpeil voldoet de diepte van het kanaal niet meer aan de eisen volgens het minimum vaarwegprofiel voor klasse CEMT II als in tabel 18 in [72], nog zonder rekening te houden met ruimte voor aanslibbing.
- Strikt volgens de richtlijnen is alleen gebruik van de vaarweg mogelijk als dat binnen het profiel passend is. Geringere kanaaldiepte zal dan leiden tot gebruik van minder beladen en/of kleinere schepen met geringere diepgang. Afwijken van de richtlijn is met goede onderbouwing eventueel wel mogelijk. Daarvoor kan de Provincie een aangepaste vergunning formuleren, mits dit gebruik acceptabel en veilig is.
- Bij geringere kanaaldiepte is inzet van schepen van een kleinere klasse nodig maar dan moet wel van schepen met een kleinere diepgang gebruik worden gemaakt want vol beladen schepen met maximale afmetingen in klasse CEMT I passen niet binnen de resterende waterdiepte.
- Om afname van beladingsgraad per schip op te vangen zullen meer scheepsbewegingen nodig zijn, 25% meer bij gedeeltelijk beladen schepen in klasse CEMT II tot meer dan 2 keer zo veel schepen bij inzet van gedeeltelijk beladen schepen in klasse CEMT I.
- Bij gebruik van schepen in klasse CEMT II met gedeeltelijke beladingsgraad gaan de transportkosten circa 25% omhoog. Toenemende transportkosten hebben economische gevolgen voor de bedrijven die gebruik maken van watervervoer over water.
- Transport met een klasse kleinere vaartuigen is per ton nog eens in de orde van 25% duurder. Inzet van kleinere schepen zou dus nog grotere economische gevolgen hebben voor de bedrijven die gebruik maken van vervoer over water.
- Inzet van meer schepen zal meer tijdbesteding vergen aan laden en lossen.
- Meer scheepsbewegingen leiden tot een toename van bediening van sluizen en bruggen. Dat brengt kosten met zich mee voor de Provincie.
- Inzet van meer schepen kan de nautische situatie onveiliger maken.
- Indien schepen in klasse CEMT II met geringere belading of CEMT I worden ingezet, zal de capaciteit van het kanaal met overwegend enkelstrooks vaart mogelijk een probleem gaan vormen. In het seizoen worden tot 10 ladingen per week van 700 ton vervoerd. Dat zouden dan 12 tot 13 vaarten worden. Dan zal meer gebruik van wachtplaatsen moeten worden gemaakt. Daardoor zal de vaartijd toenemen.
- Bij verlaagd kanaalpeil en gehandhaafde peilbeheersing op de Vecht zal de Sluis De Haandrik gedurende het hele jaar bediend moeten worden. Dat is een verandering ten opzichte van de huidige situatie waarin deze sluis en de Coevordersluis in principe het hele jaar open staan behalve bij hoogwater op de Vecht. Bij kanaalpeilverlaging zal meer gesloten moeten worden wat leidt tot tijdverlies, meer verbruik van energie en dus hogere kosten. Dit heeft gevolgen voor transporten naar Coevorden.
- Bij afname van de beladingsgraad en inzet van kleinere schepen wordt transport over water minder concurrerend met transport over de weg. Dat kan tot toename van het wegverkeer leiden, daarmee tot verkeersoverlast (filevorming), verkeersonveiligheid, groter energieverbruik en milieubelasting. Per tonkilometer hebben schepen 2 maal minder emissie dan vrachtverkeer.⁴ Uit de tabellen van DECISIO blijkt dat wegverkeer circa 5 euro per ton meer kost dan watertransport als alle nadelige aspecten worden beschouwd.
- Afwijken van het verkeersbesluit, waarbinnen de afmetingen voor maatgevende schepen voor het kanaal zijn vastgelegd, is mogelijk, maar kan tot aanspraak op nadeelcompensatie door betrokken vervoerders en bedrijven leiden.

⁴ Handboek milieuprijzen, CE Delft 2017

- Op basis van voorgaande punten wordt geconcludeerd dat een verlaging van het kanaalpeil de capaciteitsvergroting voor de scheepvaart op het kanaal die enige jaren geleden bij de opwaardering van het kanaal is ingezet, mogelijk deels te niet zal doen.
- Een kanaalpeilverlaging frustreert mogelijke economische ontwikkelingen in de toekomst, zoals impulsen voor de bouwindustrie in Hardenberg en Coevorden, transport van bulkgoederen voor agro-industrie en mesttransport ten behoeve van een nieuwe fabriek voor biogasproductie.
- Tenslotte zal inzet van meer schepen met kleinere beladingsgraad leiden tot meer bediening van bruggen, wat hinder voor het wegverkeer zal inhouden.

E.5.2 Effect 2: Waterbeheersing oppervlaktewater

Het gevolg van het verlagen van het waterpeil op kanaal Almelo de Haandrik is dat in Sluis Aadorp door toenemend verval en schutten van een groter aantal schepen een grotere instabiliteit kan ontstaan in de wateraanvoer. De afspraken volgens waterakkoord kunnen in het geding komen. Schut en spuiedrijf zijn momenteel al niet goed afgestemd. Pas na de realisatie van de nieuwe omloopleiding is dat mogelijk. Door Witteveen + Bos [80] is een voorziening ontworpen voor een nieuwe omloopleiding bij Sluis Aadorp. In samenwerking met de waterschappen wordt deze leiding gerealiseerd.

In verband met de verplichtingen volgens het Waterakkoord moet Sluis De Haandrik water spuien naar het Kanaal Vecht - Coevorden. Echter, bij peilverlaging op het kanaal is dit niet meer mogelijk omdat het peil op de Vecht dan hoger ligt. Sluis de Haandrik moet dan worden gesloten. Aanvullende maatregelen zijn nodig om dan toch nog afdoende spuicapaciteit te kunnen garanderen. Concreet betekent dit:

- Bouw van een gemaal met bijkomende energiekosten, beheer en onderhoud.
- Waarborging van aanvoer van water in het begin van het droogteseizoen ofwel vanuit de Vecht naar het kanaal (bijvoorbeeld door een omloopleiding of rinketten) of door eerdere start van levering via sluis Eefde (inclusief bediening en energie).

Wat betreft de inlaten langs het kanaal moeten bij de overweging omtrent de effecten van verlaging van het peil op het kanaal de niveaus van de overlaten worden beoordeeld. Een consequentie kan zijn om de levering van in het waterakkoord vermelde hoeveelheid water te kunnen blijven garanderen dat de inlaten moeten worden aangepast of dat gemalen nodig zijn indien inlaat onder vrij verval niet langer mogelijk is (inclusief energie met daarbij komende negatieve milieubelasting, bediening en onderhoud).

Indien onvoldoende inlaat van water vanuit het kanaal ontstaat zal dat kunnen resulteren in negatieve effecten op de lokale beschikbaarheid van oppervlaktewater in het achterland, een lagere grondwaterstand, en meer risico op verdroging van het achterland. Ook dit aspect zal zo goed mogelijk worden meegenomen in de grondwatermodellering.

Indien de aanbeveling van Van Baars wordt opgevat als peilregulering alleen op het vak Aadorp - Sluis De Haandrik dan zal de doorvoer van water via het kanaal waarschijnlijk niet sterk veranderen. Wel zal bij peilverlaging de sluis bij de Haandrik het volledige jaar moeten worden bediend en water moeten worden opgevoerd via Sluis De Haandrik naar de Vecht en het kanaaldeel naar Coevorden. Peilaanpassing in de Vecht en het kanaal naar Coevorden is niet wenselijk vanwege onder andere de grensoverschrijdende effecten op de Vecht en de bijbehorende grondwaterstandsdeling in een aanzienlijk effectgebied, met tal van invloeden op aanwezige belangen en bebouwing.

De omloopleiding bij Sluis Aadorp kan onder vrij verval functioneren. Bij Sluis De Haandrik zal het water omhoog moeten worden gevoerd. Voor de waterdoorvoer naar het kanaal Vecht Coevorden zal een gemaal nodig zijn om het water een halve meter op te voeren. De hoeveelheid volgens Waterakkoord is 2,5 m³/s. Op basis van de gegevens van het

Waterschap moet worden nagegaan welke omvang van pompinstallatie nodig is om het afvoerdebiet in stand te houden.

Bij afnemende waterdiepte door peilverlaging (circa 14%) ontstaat een effect van toename van stroomsnelheden (circa 25% op een smal kanaaldeel) als dezelfde debieten moeten worden doorgevoerd. Hoewel de snelheidsverandering gering is (0,48 km/u naar 0,62 km/u) kan dit lokaal enig effect hebben op scheepvaart (varend met snelheden van 6 tot 8 km/u), erosie en stabiliteit van damwanden.

Ondanks het feit dat nog niet alle gegevens van de inlaten beschikbaar zijn voor beoordeling, zullen waarschijnlijk alle 17 inlaat- en aflaatpunten moeten worden aangepast om voldoende inlaat te kunnen leveren bij verlaagd waterpeil. Bij aanpassing kan sprake zijn van een nieuwe constructie van de inlaat met een lagere overlaat, of van een tijdelijke oplossing met een pompinstallatie.

In perioden met wateroverschot wordt water vanuit het achterland naar de Vecht en het Zwols kanaal afgelaten. Daarin heeft het kanaal Almelo – De Haandrik geen rol.

E.5.3 Effect 3: Waterkwaliteit en ecologische kwaliteit

Het waterschap Vechtstromen is verantwoordelijk voor de waterkwaliteit in het kanaal Almelo – De Haandrik. Het Waterschap monitort de waterkwaliteit en geeft de data door aan Rijkswaterstaat die de doorstroming naar en de kwaliteit van ontvangende wateren (IJssel en IJsselmeer) controleert.

Het waterlichaam Vechtstromen Kanalen is een vastgesteld KRW waterlichaam waarvoor doelen zijn vastgesteld. De KRW-doelen liggen op dit moment voor de 3^e periode ter inzage [76] en worden vastgelegd voor de komende 6 jaar (zie ook de opmerkingen in vorige aspect van waterbeheersing).

Het doel van sterk veranderde en kunstmatige waterlichamen is het Goed Ecologisch Potentieel. Maatregelen moeten een haalbaarheidstest doorstaan waaruit blijkt dat er geen significant negatieve effecten zijn op gebruiksfuncties en geen negatieve effecten op milieu in brede zin. Bij zeer kostbare maatregelen is doelverlaging mogelijk. Voor de sloten en kanalen zijn in de huidige versie van KRW 2022-2027 geen herinrichtingsmaatregelen voorzien. De doelen voor sloten en kanalen zijn in die versie aangepast naar de huidige toestand (technische doelaanpassing).

Een fysische ingreep zoals peilverlaging moet in de afweging omtrent KRW-doelen worden meegenomen. Dit aspect is nu niet meegenomen in de watersysteemanalyse voor dit kanaal. Indien een besluit tot peilverlaging wordt genomen, is vertaling van de effecten wel nodig omdat de doelen voor dit waterlichaam eind dit jaar worden vastgesteld.

Voor de Vechtstromen Kanalen is vooral de huidige staat ten aanzien van nutriënten (totN en totP) matig en is een reductieopgave voor nutriënten van belang. De situatie hangt zeer sterk af van aanvoer van water vanaf het Twentekanaal (afhankelijk van Rijksbeleid) en aflaat van water uit gebieden rond het kanaal (lozingen in de landbouw).

Voor de mogelijke effecten van kanaalpeilverlaging voor de huidige situatie geldt het volgende. In perioden met watertekort in de hoge gebieden in Drenthe en Twente wordt water vanuit de IJssel via het Twentekanaal naar het Kanaal Almelo - De Haandrik verpompt. De waterkwaliteit op het kanaal is dus afhankelijk van de waterkwaliteit op de IJssel en het Twentekanaal en in enige mate van de aflaat vanuit omliggend gebied. De toevoer en doorspoeling hangt samen met het peilverschil tussen het Twentekanaal en het kanaal Almelo de Haandrik. Bij toename van het peilverschil tussen de kanalen zal het debiet

gereguleerd worden en de doorspoeling niet veel veranderen. Bij peilverlaging van 0,5 m is op basis van de nu bekende normaal voorkomende grondwaterstanden waarschijnlijk nog steeds sprake van inzijging van water. Vanwege de afname van het potentiaalverschil van iets meer dan 1 m naar iets meer dan 0,5 m zal de inzijging mogelijk de helft minder worden. Omdat uit de grondwatermodellering blijkt dat de bodemweerstand van het kanaal groot is, is het debiet van de inzijging gering. Bij afname van de inzijging zal de waterkwaliteit op het kanaal waarschijnlijk nauwelijks veranderen en zeker niet slechter worden.

Afhankelijk van de vraag welke schepen nog door het kanaal kunnen varen bij geringere waterdiepte, zal bij een toenemende diepte van de kiel ten opzichte van de kanaalbodem meer opwoeling van slib plaatsvinden. Uitgangspunt is een veilige en vlotte scheepvaart en dimensionering van de vaarweg conform de Richtlijnen vaarwegen. Dat betekent dat geen grotere schepen kunnen worden toegelaten dan in het profiel passend is. Door meer opwoeling van slib kan sprake zijn van een negatief effect op de ecologische kwaliteit. Mogelijk vraagt dat om een grotere doorspoeling.

Verder merken wij hierbij op dat met betrekking tot het KRW streefbeeld de lokaal ondiepe oeverzones van het kanaal van belang kunnen zijn, vooral voor waterplanten en vis. Bij verlagen van het kanaalpeil zullen de oevers droger worden, zeker waar natuurvriendelijke oevers of faunapassages aanwezig zijn. Dat houdt derhalve in dat de ecologische kwaliteit ten gevolge van kanaalpeilverlaging achteruit zal gaan.

In het hele kanaal zullen vanwege toename van de hoogte van boordvoorzieningen boven het waterpeil de oevers moeilijker bereikbaar worden voor te water geraakte dieren.

Om de waterkwaliteit en ecologische kwaliteit op de Vecht te handhaven is een peilverlaging bij de stuw en tussen de sluis De Haandrik en de Coevordersluis ook niet gewenst. Het effect van kanaalpeilverlaging op de KRW-doelen zal nader moeten worden getoetst.

E.5.4 Effect 4: Grondwaterbeheersing

De relatie tussen het grondwater en het kanaal is een onderdeel dat in dit onderzoek separaat is gerapporteerd (hoofdstuk 5.1). Hier wordt slechts ingegaan op modelleringsresultaten met betrekking tot het effect van peilverlaging op het kanaal als maatregel om piping tegen te gaan.

Het gebruikte grondwatermodel is opgezet op basis van regionale geologische en hydrologische informatie en gekalibreerd op lokale grondwaterstanden. De lokale situatie rond het kanaal is belangrijk maar het aantal meetpunten is zeer beperkt en in het kader van het onderzoek uitgevoerde metingen zijn nog maar net beschikbaar. Dat betekent dat er op dit moment nog enkele vrijheidsgraden zijn in het model die de effecten rond het kanaal beïnvloeden maar nog niet volledig doorgrond kunnen worden. Dit geldt dan voor de lokale doorlatendheid van de ondiepe ondergrond (tot NAP-10m), de sliblaag in het kanaal en de lek door de kanaalwanden. De bodemweerstand kan liggen in een range van 10 tot 1.000 dagen en de wandweerstand tussen 1 en 10.000 dagen, afhankelijk van het type wand. Voor die ranges van parameterwaarden in het grondwatermodel zijn verschillende stromingsberekeningen gemaakt waarin het effect op de grondwaterstand wordt getoond als gevolg van kanaalpeilverlaging. Bij de berekeningen is er van uitgegaan dat alleen het kanaalpeil wordt verlaagd met 0,5 meter maar dat de watervoorziening in het achterland op het oude niveau wordt gehandhaafd.

De volgende resultaten zijn getoond in de volgende figuren:

1. Minimaal effect bij een situatie met maximale stromingsweerstand van kanaalbodem en wand.

2. Waarschijnlijk effect in een situatie met verwachtingswaarden voor stromingsweerstand van kanaalbodem en wand.
3. Maximaal effect in een situatie met minimale stromingsweerstand van kanaalbodem en wand.
4. Ter vergelijking is een vierde berekeningsresultaat toegevoegd waarin de damwand doorlatend is gehouden (bijvoorbeeld zoals het geval kan zijn met betonnen wand) en de kanaalbodem dicht.

Uit de scenarioberekeningen komt naar voren dat zowel de bodemweerstand als de wandweerstand belangrijke factoren zijn in het effect van peilverlaging op grondwaterstand (zie Figuur E.6 en Figuur E.7).

Het kanaalpeil is circa 1 à 1,5 meter hoger dan de grondwaterstand. Vanwege het waterstandverschil vindt inzijging plaats van water uit het kanaal naar het grondwater, naar rato van de aanwezige hydraulische weerstand van de kanaaloevers met wand en de waterbodem. Een verlaging van het kanaalpeil zal de huidige inzijging in enige mate doen afnemen. Daardoor zal de grondwaterstand kunnen dalen.

Uit de grondwatermodellering wordt geconcludeerd dat het effect van een kanaalpeilverlaging is dat de grondwaterstand rond het kanaal naar verwachting met 5 centimeter zal dalen tot een wellicht maximaal mogelijke lokale daling van 25 centimeter, bij de huidige situatie met lange strekkingen betonnen wanden langs het kanaal. Het gebruikte raster in het eindige differentiemodel iMod is tamelijk grofmazig. Gemonitorde dwarsraaien geven de lokale, grondwaterstandsituatie weer. Vanwege de risico's van verdroging en zetting in de omgeving moet een verlaging van de grondwaterstand als negatief worden beoordeeld.

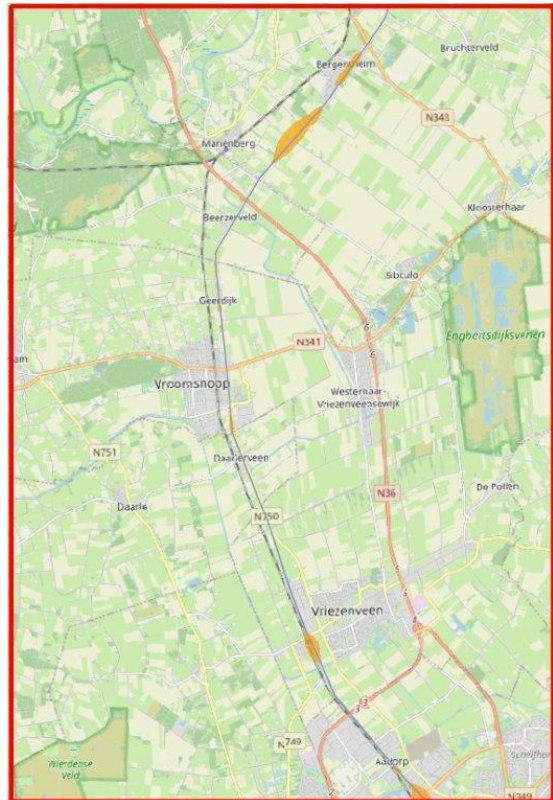
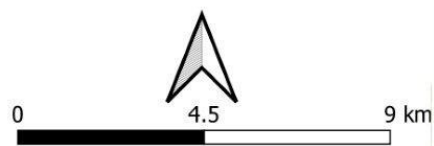
kanaalpeilverlaging 50 cm

bij weerstanden van:
bodem 100 d
damwand 10000 d

effect op grondwaterstand

- verlaging 50 - 100 cm
- verlaging 25 - 50 cm
- verlaging 10 - 25 cm
- verlaging 5 - 10 cm
- verlaging 1 - 5 cm
- verandering < 1 cm
- verhoging

— kanaal
— modelrand



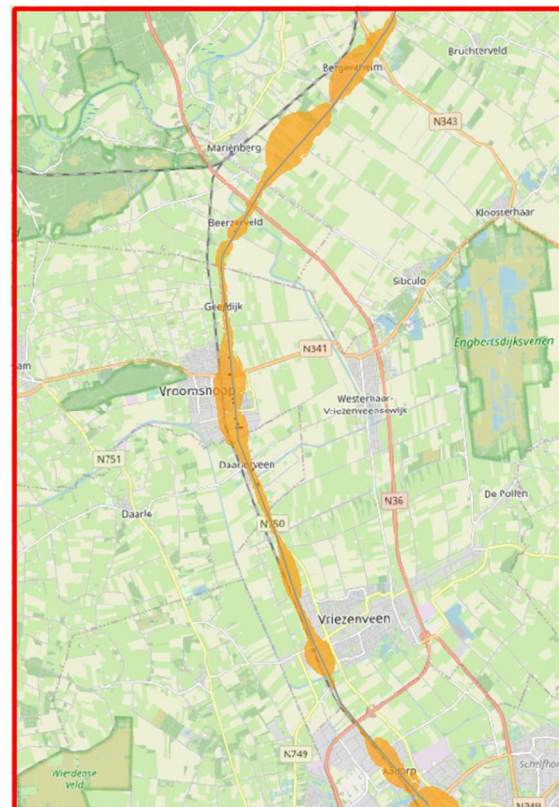
kanaalpeilverlaging 50 cm

bij weerstanden van:
bodem 100 d
damwand 100 d

effect op grondwaterstand

- verlaging 50 - 100 cm
- verlaging 25 - 50 cm
- verlaging 10 - 25 cm
- verlaging 5 - 10 cm
- verlaging 1 - 5 cm
- verandering < 1 cm
- verhoging

— kanaal
— modelrand



Figuur E.6. Grondwaterdaling door kanaalpeilverlaging in scenario's met bodem en wandweerstand volgens maximale grootte en volgens verwachting met redelijke wand

kanaalpeilverlaging 50 cm

bij weerstanden van:

bodem 1 d

damwand 1 d

effect op grondwaterstand

verlaging 50 - 100 cm

verlaging 25 - 50 cm

verlaging 10 - 25 cm

verlaging 5 - 10 cm

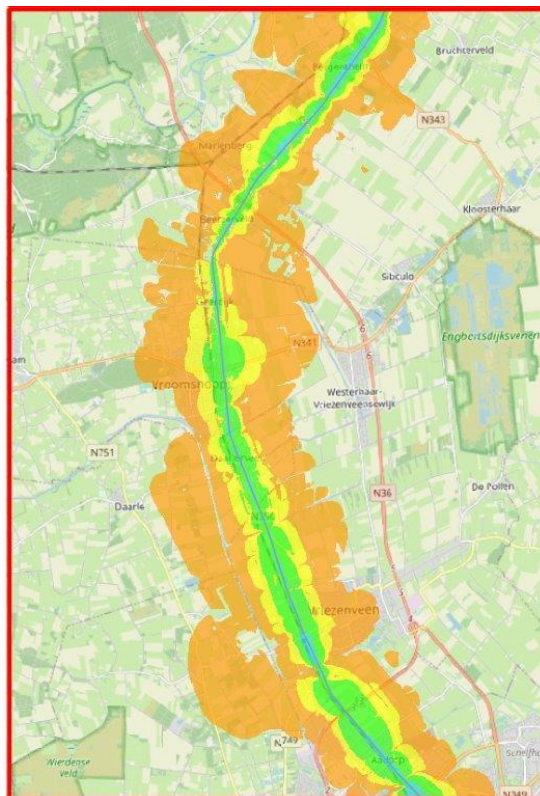
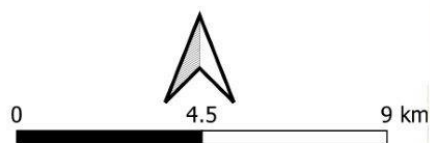
verlaging 1 - 5 cm

verandering < 1 cm

verhoging

kanaal

modelrand



kanaalpeilverlaging 50 cm

bij weerstanden van:

bodem 1000 d

damwand 1 d

effect op grondwaterstand

verlaging 50 - 100 cm

verlaging 25 - 50 cm

verlaging 10 - 25 cm

verlaging 5 - 10 cm

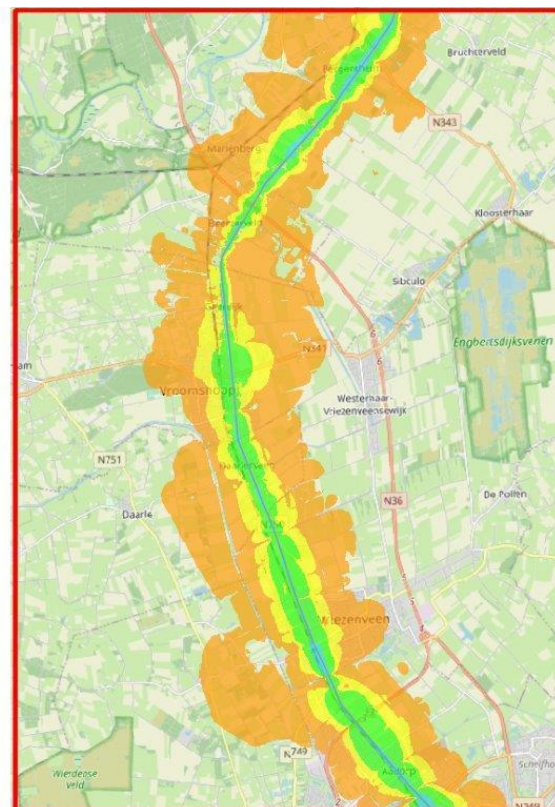
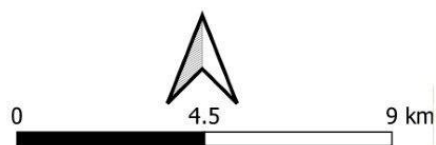
verlaging 1 - 5 cm

verandering < 1 cm

verhoging

kanaal

modelrand



Figuur E.7. Grondwaterdaling door kanaalpeilverlaging in scenario's met bodem en wandweerstand volgens minimale grootte en volgens verwachting met doorlatende wand

E.5.5 Effect 5: Bebouwing

In de bebouwde kom van de dorpen en daarbuiten staan langs het kanaal gebouwen, met en zonder schade. Het betreft voor het merendeel panden die uit metselwerk zijn opgetrokken. Er komen gebouwen voor van zeer uiteenlopende ouderdom. Uit uitgevoerde inspecties blijkt dat er gebouwen zijn met funderingen op staal, waaronder met spaarbogen op poeren. Er komen enkele rijks- en gemeentelijke monumenten voor.

De uitgevoerde grondwatermodellering geeft aan dat als gevolg van de wijziging van het kanaalpeil een verandering van de grondwaterstand kan optreden. Als gevolg daarvan zal de grondwaterdruk onder de fundering veranderen.

Indien onder de fundering samendrukbare lagen zoals veen of klei voorkomen, kan er consolidatie, kruip, krimp en veenoxidatie van die lagen optreden met zetting tot gevolg. Deze mechanismen zijn eventueel beperkt door de duur van peilverlaging als een tijdelijke maatregel. Wanneer zettingsverschillen optreden kan gebouwschade optreden. Omdat de samenstelling van de ondergrond (veenvoorkomens, afzettingen in de Bortel Formatie met leemlenzen) heterogeen is, ontstaat als gevolg van kanaalpeilverlaging een reëel risico dat nabij het kanaal gelegen panden schade als gevolg van verschilzettingen kunnen ondervinden.

Informatie over funderingswijze en -diepten en de geologie kan meer uitsluitsel geven welke gebouwen voor peilverandering gevoelig voor zijn. De analyse van de schade aan panden is gerapporteerd in hoofdstuk 7.

E.5.6 Effect 6. Damwanden in de waterkering

E.5.6.1. Situatie

Op 7 juni is aanvullende informatie verkregen over de beoordeling van damwanden in de keringen langs het kanaal tijdens een gesprek met een specialist van Provincie Overijssel. Op 29 juni zijn data voor te maken controleberekeningen ontvangen.

De eerste kaden langs het kanaal zijn aangelegd in de negentiende eeuw en vormen de waterkeringen langs het kanaal. Het kanaal is waarschijnlijk eerst als een ontgraving in V-vorm gerealiseerd waarbij de oevers door houten beschoeiingen werden beschermd. In afgelopen anderhalve eeuw is het kanaal waarschijnlijk (beperkt) verbreed waarbij langs de oevers van het kanaal boordvoorzieningen (damwanden) zijn aangelegd. In de jaren '70 zijn over lange trajecten korte betonnen damwanden geplaatst. Uit informatie van Provincie (zie hierna) blijkt dat in de loop van de tijd een deel van de betonnen damwanden zijn vervangen door langere stalen damwanden. In 2012 zijn bij een aantal wachtplaatsen stalen damwanden geïnstalleerd. De oudere damwanden ontworpen voor 2010 zouden mogelijk een toetsing van de damwand volgens de regels met inachtneming van de Eurocode niet doorstaan. Vanaf 2019 worden een deel van de betonnen damwanden van de betonnen wanden vervangen door stalen damwanden. Er resteert nu volgens de interpretatie van Witteveen + Bos en revisie door aannemer Beens nog circa 11 km betonwand aan oostzijde en 16 km aan westzijde.

De waterkering bestaat uit het grondlichaam waar de weg op ligt langs het kanaal en op sommige locaties ook uit de damwanden langs de vaarweg.

De keringen langs het Kanaal Almelo - de Haandrik waren tot 1 december 2019 aangewezen als regionale keringen. In 2018 zijn de regionale waterkeringen in Overijssel op basis van de landelijke methodiek opnieuw aangewezen en genormeerd door Provinciale Staten. De status van de keringen langs het Kanaal Almelo - de Haandrik als regionale keringen is daarmee komen te vervallen vanwege de geringe gevolgen die kunnen optreden als deze

kering bezwijkt (PS besluit PS/2018/559). In 2019 is dit verwerkt in de provinciale verordening; de wijziging trad per 1 december 2019 in werking. Het waterschap heeft de mogelijkheid deze keringen aan te wijzen als overige keringen. Momenteel hebben deze keringen geen formele status als waterkering (overige keringen). De aanwijzing van deze keringen als overige kering door het waterschap is in afwachting van afspraken met betrekking tot de overdracht van het operationeel peil- en keringbeheer van het kanaal van Provincie Overijssel naar Waterschap Vechtstromen.

Volgens het waterakkoord mag het kanaalpeil niet te veel fluctueren, vanwege onder andere de stabiliteit van de waterkeringen en damwanden. Ter vergelijking kan worden vermeld dat bij bestrijding van effecten van droogte (bijvoorbeeld door waterverdeling of peilhandhaving) het belang van stabiliteit van waterkeringen bovenaan staat bij de selectie van maatregelen (categorie 1 in de verdringsreeks) (), dus de hoogste prioriteit moet hebben (zie paragraaf E.5.2 over het effect van peilverlaging op de rol van het kanaal in het waterbeheer).

Ook in het Ontwerp integraal waterbeheersplan Overijsselse Vecht, Meppelerdiep, Kanaal Almelo - De Haandrik [70] staat vermeld dat peilhandhaving noodzakelijk is ter voorkoming van onomkeerbare klink en om de stabiliteit van waterkeringen te waarborgen.

De informatie over de damwanden langs het kanaal is opgenomen in verschillende documenten (Royal Haskoning [66], Witteveen+Bos [81], Provincie [64], Beens [53]). Volgens de geraadpleegde specialist van Provincie Overijssel (gesprek 7 juni 2021) geeft de informatie van Witteveen + Bos met inspectie in 2016 de actuele situatie het beste weer. De informatie van Royal Haskoning DHV is volgens de specialist van Provincie Overijssel niet volledig (damwandtype, -lengte en aanlegdatum) en op meerdere punten onjuist (afwijkende situaties).

Zoals aangegeven is over grote delen sprake van betonnen damwand. Deze betonnen wanden zijn voor een belangrijk deel kort (4 meter) en volgens toelichting door de specialist soms in matige of slechte staat. De betonwanden vertonen ook lekken omdat zwellassen die moeten zorgen voor afdichting rond de waterlijn vergaan zijn. Achter de damwand is dan de grondwaterstand vrijwel gelijk aan kanaalpeil, terwijl in het watervoerende pakket in de omgeving de grondwaterstijghoogte dieper staat.

Bij de opwaardering van het kanaal zijn enkele nieuwe wachtplaatsen gemaakt en de bestaande verbeterd. Waar een grotere waterdiepte nodig was vanwege de grotere diepgang van de schepen, zijn damwanden vervangen. De stalen damwand die bij de wachtplaatsen is toegepast, heeft een lengte van circa 8 meter.

Bij de werkzaamheden aan damwanden in 2011/2012 (zowel verbeteren van trajecten als aanpassingen bij de realisatie van wachtplaatsen) is veelal verankering met klapankers toegepast. Gegevens daarover staan in de inventarisatielijst van Witteveen + Bos en in de revisielijst van aannemer Beens. In Bijlage E.8 is een lijst opgenomen van de trajecten waar damwanden zijn toegepast, vervanging van damwand heeft plaatsgevonden of gaande is.

Door kanaalpeilverlaging zal de waterdruk vanuit het kanaal op de damwand afnemen. Het evenwicht tussen de waterdruk aan de kanaalzijde van de constructie en de gronddruk aan de landzijde van de constructie zou daardoor kunnen veranderen. Ondanks het feit dat het netto effect op de belasting van de wand maar gering is (enkele kPa), kan een vervorming in de richting van het kanaal ontstaan, of de constructieve veiligheid van de wand bedreigd worden, in het bijzonder waar korte betonnen damwanden aanwezig zijn en de situatie kritisch is ten aanzien van stabiliteit.

Tevens is over de aanwezige loswallen informatie gevraagd aan Provincie Overijssel. De volgende situatie is volgens mondelinge mededeling van de deskundige van de Provincie aan de orde:

- De insteekhaven in Hardenberg is geen eigendom van de Provincie maar van de gemeente. Kades zijn van lokale bedrijven. Mogelijk wordt de loswal nu al overbelast.
- De kade bij de fabriek van Diamant Beton in Hardenberg is een belangrijk element. Het leeuwendeel van het transport van bouwstoffen vindt plaats ten behoeve van deze fabriek. De kade is eigendom van de Provincie. Voor de wand treedt vaak verondieping op als gevolg van mors bij overslag van zand en grind. Met de kraan wordt voor de damwand de ondiepte weggehaald. Dat leidt mogelijk tot een te diep profiel.

E.5.6.2. Uitgevoerde controles

Langs het kanaal staan diverse damwandtypen. Een groot aantal van deze damwandconstructies is in het verleden door ingenieursbureaus berekend.

De damwandanalyses zijn terug te vinden in verschillende brondocumenten:

- De doorsneden die door Witteveen +Bos zijn berekend (9 stuks).
- De doorsnede bij de betonfabriek (berekend door CLAFIS Ingenieurs).
- Doorsneden van 4 bestaande wachtplaatsen; deze zijn in 2011 door Haskoning geanalyseerd. Bij deze doorsneden is in 2012 aan de damwand niets verbeterd.
- Doorsnede ter plekke van de insteekhaven van de Gemeente: geen informatie.

Uit de beschikbare inventarisatie is een beperkte set van maatgevende doorsneden geselecteerd voor de bepaling van het effect van kanaalpeilverlaging.

Tabel E.3 Overzicht van mogelijk te beschouwen maatgevende damwanden langs het kanaal

Vak	Zijde	km	Lengte vak [m]	Materiaal	Verankerd ja/nee	Prioriteit
18	west	4,35-4,51	158	staal	nee	hoog
10	oost	4,33-4,51	174	staal	nee	laagst
16	oost	7,20-8,93	1727	beton	ja	hoog
34	west	10,23-11,05	820	staal	nee	hoog
44	west	13,3-14,4	1100	beton	ja	middel
33	oost	13,9-14,0	100	beton	ja	laagst
62	west	20,25-21,57	1325	staal	nee	laagst
66-67	west	22,2-23,15	950	staal	nee	middel
79	west	27,87-28,0	125	staal	nee	middel
wp1	west	0.825	circa 100 m	staal	nee	wp
wp3	west	8.73	circa 100 m	staal	nee	wp
wp6	oost	19.52	circa 100 m	staal	nee	wp
wp7	west	19.87	circa 100 m	staal	nee	wp
Insteekhaven	west	23.2	circa 800 m	?	?	

Vak	Zijde	km	Lengte vak [m]	Materiaal	Verankerd ja/nee	Prioriteit
Diamant	west	24.9	100	beton	ja	

Niet alle aangegeven doorsneden zijn beoordeeld. De vetgedrukt doorsneden zijn in een eerste steekproef meegenomen en doorgerekend. De uitgevoerde controle betreft één doorsnede met betonnen damwand bij de betonfabriek, één onverankerde stalen damwand met hoge prioriteit volgens het overzicht van de provincie, één wachtplaats met onverankerde damwand van staal. De steekproef is voor 2 doorsneden (betonwand en stalen damwand nagegaan wat het effect is van peilverlaging en voor de derde doorsnede is alleen de beoordeling van de damwanden in de huidige toestand beschouwd. Bij die laatste gold dat er van uit mag worden gegaan dat de doorsnede bij peilverlaging niet voldoet als deze in de huidige toestand ook al niet voldoet.

In het navolgende wordt het oordeel over de uitgevoerde berekeningen gegeven.

Damwand bij de betonfabriek de Diamant in Hardenberg (km 24.9 west)

De damwand is een verankerde betonnen damwand. De kade wordt door de Firma Diamant beton als loskade gebruikt. Van de damwand en verankering zijn de afmetingen en wapeningsgegevens bekend. De damwand is met een stalen staaf verankerd aan betonnen schotten. De lengte van de ankerstang is 6 meter.



Figuur E.8. Kade met verankerde betonnen damwand bij betonfabriek Diamant

Voor deze betonnen damwand heeft CLAFIS Ingenieurs [54] in opdracht van de provincie Overijssel een berekening gemaakt. Voor de beschrijving van de ondergrond is gebruikt gemaakt van een 40 meter diepe boring. Deze laat zien dat de ondergrond geheel uit zand bestaat. De damwand is berekend voor CUR veiligheidsklasse 1. De resultaten van de berekening zijn in een memo vermeld. Uit de berekening volgt dat de momentcapaciteit van de damwand met 28% wordt overschreden.

In de memo is niet vermeld met welke bovenbelastingen en grondparameters is gerekend.

Deltares heeft berekeningen gemaakt met ingeschatte bovenbelastingen van 5 kPa over de eerste 1,75 m naast de damwand en 17 kPa (1 meter zand) over het gedeelte van 4 tot 10 meter achter de damwand. De berekeningen zijn uitgevoerd voor de Eurocode klasse RC1.

In de berekening zonder bovenbelasting wordt de momentcapaciteit van de damwand met 49% overschreden. Als de bovenbelasting wordt meegenomen is de overschrijding van de momentcapaciteit 75 %. Als het kanaalpeil met 0,5 m wordt verlaagd neemt de overschrijding toe tot 88 %. In deze laatste berekening is aangehouden dat de grondwaterstand ook met 0,5 zakt.

In alle berekeningsgevallen vloeit de ankerstaaf. De overall stabiliteit is in de huidige situatie net voldoende. Bij verlaging van het kanaalpeil is dit net onvoldoende. In alle berekeningsgevallen is de stabiliteit van het ankerschot (Kranz-stabiliteit) onvoldoende.

Stalen damwanden bij wachtplaats 6 (oost; km 19.52)

Bij wachtplaats 6 zijn 2 verschillende damwandprofielen aanwezig. Het gaat om een Wendel profiel Z225 en een PAZ4460. De profielen zijn onverankerd.

Royal Haskoning heeft de damwanden berekend. Deltares heeft de berekeningen van het Wendel profiel beoordeeld. Deltares is het eens met de gehanteerde uitgangspunten voor de grondopbouw, grondparameters, waterstanden en geometrie. Royal Haskoning [65] heeft de damwandconstructie in de veiligheidsklasse RC0 ingedeeld. Dit is de laagste veiligheidsklasse. Omdat er bij schade aan de constructie enige economische schade te verwachten is (bijvoorbeeld de wachtplaats kan niet meer worden gebruikt) is de hogere veiligheidsklasse RC1 meer passend.

Deltares heeft de damwanden beoordeeld voor veiligheidsklasse RC1. De damwanden voldoen ook voor deze veiligheidsklasse. Als het kanaalpeil met 0,5 m wordt verlaagd neemt het buigend moment in de damwand met circa 10% toe. De horizontale verplaatsing neemt toe van circa 31 mm tot 38 mm. De damwandconstructie blijft echter ruimschoots voldoen aan de eisen.

Stalen damwand (vak 34 west km 10.7)

Witteveen+Bos [82] heeft deze damwand beoordeeld en berekend. Volgens Provincie Overijssel is de prioriteit om de damwand aan te pakken hoog. Het profiel is DWU 5400. De damwand is niet verankerd. Deltares heeft de uitgangspunten van de berekening beoordeeld en geen bijzonderheden ontdekt. Het is niet duidelijk of het effect van scheve buiging in rekening is gebracht. Dit is wel noodzakelijk omdat het U-profielen zijn.

Uit de berekeningen van Witteveen+Bos volgt dat de damwand niet stabiel is; de passieve grondweerstand is onvoldoende. Daarnaast zijn het buigend moment en de dwarskracht te hoog. De berekende vervorming is in de BGT 178 mm. Dit is ver boven de eis van 50 mm.

E.5.6.3. Samenvatting van de beoordeling

Volgens de beoordeling is het deel met betonwanden het meest kwetsbaar. De provincie heeft op basis van de beoordeling een risicokaart [64] met een prioriteitstelling voor vervanging van de boordvoorzieningen opgesteld. Volgens de beperkte steekproef is er geen reden om aan de risicokaart te twijfelen. Bij verlaging van kanaalpeil zal de situatie echter verslechteren.

De provincie heeft op sommige wegen langs het kanaal nu reeds beperkingen aan de aslasten van het verkeer ingesteld vanwege marginale stabiliteit van de damwanden. Als de veiligheid van de damwanden in de huidige situatie al niet in orde is, zal de stabiliteit van de wanden bij kanaalpeilverlaging nog verder teruglopen.

Door damwandvervorming kan aan landzijde van de damwand een horizontale grondvervorming ontstaan. Dan komt het gebruik van de weg op de kanaalkaden verder in gevaar. De omvang van het gebied waar beperkingen aan de aslasten van het verkeer nodig zijn, zal toenemen. Op betreffende locaties moet dan ook worden gecontroleerd of er kans op schade ontstaat aan panden die op korte afstand van het kanaal staan.

E.5.7 Effect 7: Waterbouwkundige constructies

Kanaal Almelo - De Haandrik is op te delen in 2 panden, begrensd door Aadorpschutsluis, sluis De Haandrik en de Coevordersluis. Tussen sluis De Haandrik en Coevordersluis ligt de kruising met de Vecht.

De sluis Aadorp aan de zuidzijde wordt gebruikt om water vanaf zijkanaal van Twentekanaal naar Almelo van NAP+10 m te overbruggen naar het kanaal op circa NAP +9,10 m. Het peil aan de noordzijde van het kanaal is veelal gelijk met het peil in de Overijsselse Vecht, waardoor Sluis De Haandrik en Coevordersluis normaliter open kunnen blijven staan. De sluisdeuren worden gesloten om te dienen als waterkering als het peil op de Vecht stijgt boven circa NAP +9,20 m.

De volgende informatie over de twee sluizen in het Kanaal Almelo - De Haandrik is ontleend aan de Waterkaart⁵ en vermelde tekeningen:

Schutsluis Aadorp bij Almelo (bestekstekening RWS, SS 1127, 1985, blad 4):

- Situatie in 1987 vernieuwd.
- Schutsluis tussen Kanaal Almelo - De Haandrik en het Twentekanaal.
- Sluis met puntdeuren.
- Breedte: 8,5 meter, lengte: 67,5 meter maximaal in verband met bediening sluisdeuren.
- Kanaalpeil beneden: NAP +9,10 m Kanaal Almelo - De Haandrik.
- Kanaalpeil boven: NAP +10 m Twentekanaal.
- Drempeldiepte beneden/buiten: NAP +5,6 m (3,5 m ten opzichte van kanaalpeil).
- Drempeldiepte boven/binnen: NAP +5,6 m (3,5 m ten opzichte van kanaalpeil).

Schutsluizen De Haandrik (bestekstekening RWS, SH-I-140, 1988):

- Schutsluis tussen Kanaal Almelo - De Haandrik en Vecht.
- Aansluiting op de Vecht en doorvaart naar het Coevorden-Vechtkanaal.
- Sluis met puntdeuren die (in het algemeen) openstaan.
- Breedte: 8,5 meter, lengte: 71,55 meter tussen de stopstrepen.
- Kanaalpeil boven: NAP +9,10 m Vecht behalve bij hoge afvoer.
- Kanaalpeil beneden: NAP +9,10 m Kanaal Almelo - De Haandrik.
- Drempeldiepte beneden/buiten: NAP +5,6 m (3,5 m t.o.v. kanaalpeil).
- Drempeldiepte boven/binnen: NAP +5,6 m (3,5 m t.o.v. kanaalpeil).

Bij het verlagen van het peil op het kanaal van Aadorp tot Sluis De Haandrik zal deze laatste standaard gesloten moeten worden om het peil voor de stuw in de Vecht te kunnen handhaven op NAP +9,1 m. Vanwege geldende internationale verdragen [75] over het waterbeheer op de Vecht is het niet mogelijk om het stuwpeil van de Vecht te wijzigen in verband met de afspraken omtrent het watersysteem in Duitsland.

Ter bepaling van het risico bij hoogwater op de Vecht zal moeten worden nagegaan of de sluisdeuren in Sluis De Haandrik het extra drukverschil van 0,5 m kunnen opvangen. De kerende hoogte bij hoogwater op de Vecht neemt dan toe.

⁵ <https://waterkaart.net/gids/sluis.php?naam=sluis-de-Haandrik>

Bij sluis De Haandrik zullen de schutvoorzieningen intensiever gebruikt moeten worden en is extra personele inzet nodig voor bediening en dagelijks onderhoud. Het schutproces zal de reistijd met circa 30 minuten verlengen. Ook het schutproces van de Aadorpschutsluis zal meer tijd gaan vergen als er meer kleinere of minder beladen schepen gaan varen.

Bij verlaging van het kanaalpeil met 0,5 meter wordt de drempeldiepte in de Sluis Aadorp bij de laagste stand 3 meter onder kanaalpeil en 3 meter in sluis de Haandrik. De drempeldiepte in sluizen is volgens tabel 34 in [72] voor schepen in klasse CEMT II 3,1 à 3,2 m en voor CEMT I 2,8 à 3,1 m.

De drempeldiepten in Sluis Aadorp en in Sluis De Haandrik worden bij peilverlaging met 0,5 m op het kanaal te gering voor vol beladen klasse CEMT II. Voor CEMT I is het wellicht net genoeg maar dat zal in detail beoordeeld moeten worden.

Voorgaande betekent dat voor transport van bouwstoffen kleinere of minder beladen schepen moeten gaan varen. Afhankelijk van de huidige situatie kan dit extra kosten inhouden voor de betreffende bedrijven. Waarschijnlijk wordt dit door deze bedrijven als bezwaarlijk ervaren. Waarschijnlijk zullen de kosten bij de overheid worden geclaimd als compensatie.

Langs het kanaal ligt een zeventiental inlaten en aflaten. De constructiehoogten van deze voorzieningen voor het waterbeheer moeten worden nagegaan om te controleren of de voorzieningen bij een 0,5 meter lager peil kunnen functioneren. Op basis van een korte navraag bij de gebiedsbeheerder van het Waterschap komt naar voren dat de inlaten voor het merendeel zijn vormgegeven als een doorvoer door de damwand langs het kanaal met watertoevoer naar een overlaat. Een aanpassing van de inlaatconstructies is waarschijnlijk wel nodig om de watervoorziening van landbouw- en natuurgebieden te verzekeren bij een lager kanaalpeil. Een alternatief is om tijdelijk gebruik te maken van een pompvoorziening. Bij aanpassing van de inlaten moet het effect op het achterland in de beschouwing worden meegenomen om introductie van nieuwe droogteproblemen te voorkomen.

Functioneren van bestaande inlaten bij kanaalpeilverlaging kan niet worden gegarandeerd maar moet verder worden onderzocht.

Onder het kanaal liggen zogenaamde onderleiders voor het waterbeheer van gebieden rond het kanaal. De afdekkingen op deze doorvoeringen liggen op niveau van NAP +5,7 à 6 m. Nagegaan moet worden of deze doorvoeren bij een lager kanaalpeil oprijfrisico hebben bij droogzetten van die leidingen voor onderhoud.

In het kanaal zijn zogenaamde fauna-uittrede-plaatsen (FUP's) en personen-uittrede-plaatsen (PUP's) aangelegd. De FUP's zijn onder andere natuurvriendelijke oevers maar ook voorzieningen aan de damwand en loopplanken. Buiten de bebouwde kom liggen deze FUP's op circa 1,5 km onderlinge afstand. Ze bestaan uit een dubbele damwand waarvan de voorste deels lager is weggezet tot op enkele decimeters onder de waterlijn. Tussen de damwanden zijn bestorte taluds aangebracht evenwijdig aan de damwand. Bij kanaalpeilverlaging moeten deze FUP's worden beoordeeld of toetreding door dieren dan nog mogelijk is. Indien niet meer functioneel zijn aanvullende voorzieningen nodig of moeten andere (misschien tijdelijke) oplossingen worden toegepast om verdrinking van te water geraakte dieren (meestal reeën) te voorkomen.

PUP's zijn ter plekke van reeds opgewaardeerde boordvoorzieningen uitgevoerd als stalen drenkelingelentrappen die om de honderd meter tot een diepte van 1,8 m beneden huidig kanaalpeil zijn geplaatst. Bij een halve meter peilverlaging zijn die PUP's mogelijk nog wel functioneel (tenzij hiervoor bijzondere regels gelden waardoor verlenging van de trappen nodig wordt).

De wachtplaatsen, afmeervoorzieningen, passantenhavens en laad- en losplekken zijn reeds eerder benoemd bij de waterkeringen. Ook aan deze constructies moeten waarschijnlijk aanpassingen worden aangebracht om functioneel te blijven. Houten constructiedelen (zoals meerpalen, beslag op sluisdeuren, hoogte van gordingen op remmingwerken bij de wachtplaatsen en alle bruggen en de sluizen, steigers) zullen eveneens moeten worden aangepast op de peilverandering.

Tenslotte moet nog worden opgemerkt dat plaatselijk sprake is van natuurlijke oevers (bijvoorbeeld aan de westkant bij km 22-23). Deze oevers zullen bij lager kanaalpeil waarschijnlijk opnieuw vormgegeven moeten worden.

E.5.8 Effect 8: Infrastructuur, wegen en bruggen

Langs het kanaal liggen lokale doorgaande wegen en fietspaden en enkele kruisende provinciale wegen. Delen ervan liggen in de bebouwde kom. Een aantal wegen zijn bij de kanaalverbetering mogelijk opnieuw verhard. Volgens de grondwatermodellering komt uit peilverlaging grondwaterstandverlaging voort. Daardoor kunnen zettingen van samendrukbare lagen optreden. Dit kan leiden tot zettingen van wegen en verschilzettingen door heterogeniteit van de ondergrond. Waar duikers onder de wegen liggen, kunnen door zettingen ook hoogteverschillen ontstaan.

Bij peilverandering moet nagegaan worden of de wegen kunnen worden beschadigd door horizontale vervormingen van de damwanden langs het kanaal (eventueel tijdens de duur van peilverlaging als een tijdelijke maatregel, door baggerwerk of door vervanging van damwand). Op dit moment is dit aspect nog niet verder uitgewerkt. Indien besloten wordt tot kanaalpeilverlaging zal dit aspect nader moeten worden onderzocht. Op basis van algemene empirische regels kan men stellen dat vervormingen zich slechts voordoen over een breedte die een factor is maal de kerende hoogte. Bij de hier voorkomende ondergrond met zand op klei en veraard veen over beperkte diepte is deze factor naar schatting 1 à 2. In dit geval is alleen de verandering van de kerende hoogte beschouwd. Schade door horizontale vervorming zou zich dan kunnen voordoen in de eerste meters vanaf de boordvoorziening.

Over het kanaal liggen in het traject van Almelo naar De Haandrik 22 bruggen. De locaties zijn vermeld in Bijlage E.9. Van de Provincie is beperkte informatie over de constructies van enkele bruggen verkregen. De oudste bruggen zijn nog uit jaren '50. Het toegepaste type funderingen is lastig uit de tekeningen [67] af te lezen. De oude tekening van de reeds vervangen brug Kloosterdijk is aangehouden als maatgevend voor de oudste bruggen. Zeer waarschijnlijk zijn betonpalen toegepast. De damwand die onder de aanbruggen doorloopt, is verankerd (zie Bijlage E.9).

Bij de nieuwe bruggen zoals Kloosterdijk loopt de damwand onder de ene aanbrug door en vormt de kelder onder de andere aanbrug ook de grondkering.

Bij peilverlaging zakt bij de oude bruggen het waterpeil onder de aanbrug uit en komen de paalkoppen in het zicht. Dat is bij de nieuwe bruggen niet aan de orde. Het is niet waarschijnlijk dat de betonnen funderingen schade zullen ondervinden van de peilverandering. Peilverlaging zal op betonnen fundering nauwelijks impact hebben maar wel op de damwand onder de constructie en op houten elementen (zoals remmingwerken en schampstroken). Het risico bestaat dat door peilverlaging de landhoofden van de ouderwetse ophaalbruggen enkele millimeters naar elkaar toe bewegen. In het slechtste geval zou het brugdek niet goed meer sluiten, maar er is een marge voor temperatureffecten. De fundering is echter voorzien van schoorpalen zodat horizontale vervormingen goed weerstaan kunnen worden. Derhalve verwachten wij dat het effect van horizontale vervorming van brughoofden verwaarloosbaar is.

Door peilverlaging zou drijvend zwerfvuil onder de aanbruggen kunnen gaan ophopen.

E.5.9 Effect 9: Infrastructuur riolering, kabels en leidingen

Binnen de bebouwde kom van de dorpen langs het kanaal liggen onder de wegen rioleringen, kabels en leidingen. Deze leidingen kruisen op enkele plekken het kanaal. De dekking op deze leidingen zou 1,5 m onder kanaalbodem moeten zijn.

Tevens liggen diverse onderleiders en leidingen onder het kanaal. Een overzicht met diepteligging is opgenomen in Bijlage E.7. Nagegaan is of onderleiders onder het kanaal bij een halve meter lager kanaalpeil en een geringe inwendige druk bij droogzetten van de onderleider voor onderhoud deze omhoog kunnen komen en daardoor mogelijk defect kunnen raken. Dit blijkt niet het geval te zijn.

Indien langs het kanaal maaiveldzakkingen optreden (eventueel tijdens de duur van peilverlaging als een tijdelijke maatregel) kunnen vervormingen optreden aan de leiding-infrastructuur. Zettingsverschillen kunnen aanleiding geven tot schades of lekkages van huisaansluitingen, leidingen of riolering. Indien peilverlaging wordt overwogen is aanvullend overleg met de betreffende gemeenten nodig.

Het is niet duidelijk wie juridisch verantwoordelijk is voor schade aan infra door peilverlaging. Deze kwestie zal nader moeten worden onderzocht indien inderdaad wordt besloten tot peilverlaging.

E.5.10 Effect 10: Landbouw

Indien de grondwaterstand daalt op grotere afstand van het kanaal als gevolg van afname van de inlaat van water door de peilverandering, kan er opbrengstderving optreden van de landbouwgewassen. In het gebied rond het Kanaal Almelo - De Haandrik is sprake van een divers landgebruik van zowel grasland als akkerbouw. De grondwaterstand op enige afstand van het kanaal wordt slechts in beperkte mate bepaald door de aanvulling vanwege inzijging vanuit het kanaal naar het grondwater.

Door verdroging van de bodem en daling van de grondwaterstand in droge perioden bij onvoldoende levering van water via de inlaten kan de grondwaterstand dalen. Als gevolg daarvan kunnen maaiveldzakkingen optreden. Dat kan ook leiden tot schade aan leidingen en drainagesystemen.

In een rapport van TAUW [74] is het effect van verdroging door watertekort als gevolg van klimaatverandering beschouwd. Vooral het areaal grasland in Oost Nederland met diepe grondwaterstanden kan door verdroging flinke schade oplopen.

Er moet vanuit worden gegaan dat de inlaat vanuit het kanaal ondanks een voorgenomen peilverlaging in stand moet blijven met gelijk debiet.

Bij onvoldoende inlaat van water uit het kanaal in het oppervlaktewatersysteem in de omgeving kan een watertekort optreden waardoor het gewas gevoeliger wordt voor verdroging.

Indien aanpassing van de inlaten aan verlaagd peil in het kanaal niet mogelijk is om de aanvoer te garanderen zullen andere maatregelen in het gebied getroffen moeten worden, zoals waterconservering (vasthouden), voor zover mogelijk, of beregening vanuit grondwater, voor zover toelaatbaar vanwege beleid in het kader van verdrogingsbestrijding. Waarschijnlijk is dan aanvullend overleg met de betreffende lokale LTO-afdeling nodig.

E.5.11 Effect 11: Natuur en ecologie

In de oostelijke regio liggen arealen vochtige en droge heide en hoogveen, die grote waarde hebben en sterk bedreigd worden door klimaatverandering. Vooral de veengebieden in Drenthe zoals Bargerveen zijn bekend. Maar ook in Twente liggen gebieden die afhankelijk zijn van wateraanvoer vanuit het kanaal.

Hoogveen is zeer gevoelig voor grondwaterstanddaling en vochttekort. Vanaf Vriezenveen wordt water uit het kanaal geleverd in de richting van natuurgebied Engbertsdijkerven. Engbertsdijkerven is als laatste restant van het oorspronkelijke hoogveengebied een Staatsnatuurmonument en Natura 2000-gebied van 1.000 ha met een kleine kern van 17 ha niet verveend terrein met nog de oorspronkelijke veendikte van circa 4 tot 7 m. Het is van belang dat dit gebied nat blijft omdat afbraak van het veen door verdroging voorkomen moet worden. Het gebied ligt wel op geruime afstand van het kanaal zodat naar verwachting niet de daling van de grondwaterstand nagegaan moet worden maar vooral de levering van oppervlaktewater.

Continuering van de wateraanvoer is noodzakelijk, ook bij eventuele verlaging van het peil in het kanaal Almelo de Haandrik.

Het Wierdense Veld maakt, net als de overige hoogveenrestanten in Nederland, deel uit van een speciaal type hoogveen. Het Wierdense Veld ligt noordoostelijk van Nijverdal in het dal naast de stuwwal. Het belang van Nederlandse hoogvenen binnen Europa is erg groot. Daarom heeft het Wierdense Veld de Natura 2000-status gekregen. In het Wierdense Veld is levend hoogveen aanwezig. Het veenlandschap vormt een leefomgeving voor specifieke plant- en diersoorten die zure en natte omstandigheden nodig hebben.

Indien de grondwaterstand daalt kan er schade door verdroging van het natuurgebied ontstaan. Er is geen wateraanvoer naar dit gebied vanuit het kanaal, vanuit de Veneleiding of de Regge. Het gebied ligt echter erg ver van het kanaal om van grondwatereffecten door peilverlaging in het kanaal te lijden te hebben.

Het Zandstuvebos is een relatief jong natuurgebied dat in de tijd is omgevormd van stuifzand tot productiebos en van productiebos tot een natuurlijker bos met heide en een rijk dieren- en plantenleven. Ter plekke is een bodemprofiel met droge hoogliggende zandgronden aanwezig. Deze gronden zijn minder gevoelig voor daling van de grondwaterstand of vochttekort hoewel wel een verschraling van de vegetatierijkdom kan optreden, vooral van heide.

Met betrekking tot natuurdoelen volgens KRW is een beschrijving opgenomen bij het effect op waterkwaliteit.

E.5.12 Effect 12: Waterwinning

Bij Vroomshoop wordt via de inlaat 0,2 m³/s ingelaten naar het gebied van Vitens winning Nijverdal aan de westkant van het kanaal. De winning bevindt zich iets westelijk van Nijverdal aan de rand van de stuwwal. Ter plekke is een bodemprofiel met droge hoogliggende zandgronden aanwezig.

Bij Geerdijk wordt een deel van 0,2 m³/s van de inlaat uit het kanaal aangevoerd naar het gebied van Vitens winning Hammervliet aan de westkant van het kanaal. Ter plekke is een bodemprofiel met relatief gelegen vochtige zandgronden aanwezig. Op dit moment loopt een onderzoek naar mogelijke uitbreiding van winning Hammervliet van 1,5 miljoen m³/jaar naar 5 miljoen m³/jaar. Volgens informatie van het Waterschap zal voor deze uitbreiding de wateraanvoer vanuit het kanaal worden vergroot.

Naar vermelde gebieden wordt water aangevoerd vanaf het kanaal ter compensatie van de verlagingen van het grondwater door de winning. Het effect op de aanvoer wordt onderzocht in het deel betreffende de waterbeheersing en in het deel betreffende grondwater.

Bij eventuele vermindering van de inlaat als gevolg van kanaalpeilverlaging zal de winning geen gevaar lopen omdat er voldoende grondwater beschikbaar is maar kan de omvang van het intrekgebied toenemen. Daardoor zullen de omgevingseffecten van de winningen groter worden en kan de waterbeschikbaarheid onder de druk komen te staan. In dat geval ontstaan conflicten met de vergunningsvoorwaarden van de winningen.

Handhaving van de bestaande wateraanvoer is van belang voor de beperking van verdrogingschade als gevolg van de drinkwaterwinning.

E.5.13 Effect 13. Overige belangen, zoals bedrijfsbelangen en recreatie

Langs het kanaal zijn diverse activiteiten die verband houden met de vaarweg. In de studie van DECISIO zijn alle bedrijven in de regio vermeld. Kort samengevat volgens onze eigen visuele beoordeling van kaartmateriaal liggen de volgende bedrijfsmatige en recreatieve belangen direct nabij het kanaal:

1. Aadorp/Almelo:
 - Ligplaats bij de sluis Aadorp.
2. Vriezenveen:
 - Ligplaats en loswal bij bedrijventerrein.
 - Recyclingbedrijven en bouwmaterialen langs kanaalweg Noord en Daarlerveenseweg.
3. Bedrijven in Vroomshoop:
 - Recyclingbedrijf Total demolition; aan- en afvoer van sloopmateriaal.
 - Passantenhaven.
4. Bedrijven in de haven van Hardenberg:
 - Loswal gemeente Hardenberg.
 - Bouwstoffenfabriek Morssinkhof Groep Hardenberg; aanvoer van zand, cement en andere bouwstoffen.
 - Oranje Arkenbouw; overkapte werf.
 - Firma Bruins; aanvoer van kunstmest.
 - Filiaal WAVIN; buismaterialen.
 - Betoncentrale Diamant.
5. Gramsbergen:
 - Roeivereniging Salland en passantenhaven Gramsbergen.
 - Bierbrouwerij Mommeriete, gevestigd in monumentaal schipperscafé.
 - Aanlegplek en botenloods voor toeristische vaartocht in historische Vechtezomp.

Vanwege peilverlaging zouden de kaden, losplaatsen en aanmeervoorzieningen en houten aanslagen langs de kaden moeten worden aangepast.

Verder moet worden vermeld dat waterverkeer van en naar Coevorden plaatsvindt, gericht op de lokale bouwstoffenbedrijven, scheepswerf en een kunstmestdistributiebedrijf.



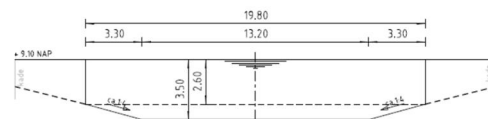
Figuur E.9 Vechtesompe nabij schipperscafé en brouwerij Mommeriete

E.6 Situatie kanaal voor de scheepvaart

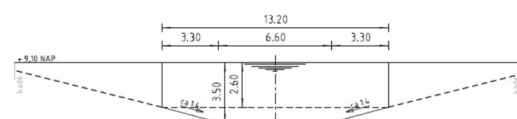
Bijlage bij Bijlage E

Situatie en afstanden in m vanaf Sluis Aadorp volgens beschikbare tekeningen van Provincie⁶. De gebaggerde diepte is 3,6 m (en niet de 3,5 m in de principeprofielen).

Trajecten Kanaal opwaardering 700 ton	Begin [m]	Eind [m]	Lengte [m]	Breedte vaargeul [m]
Krap 2-strooks	0	510	510	19,80
enkelstrooks	510	820	310	13,20
Krap 2-strooks	820	2980	2160	19,80
enkelstrooks	2980	7220	4240	13,20
Krap 2-strooks	7220	8590	1370	19,80
enkelstrooks	8590	16200	7610	13,20
Krap 2-strooks	16200	17550	1350	19,80
enkelstrooks	17550	17650	100	13,20
Krap 2-strooks	17650	19380	1730	19,80
enkelstrooks	19380	20060	680	13,20
Krap 2-strooks	20060	21830	1770	19,80
enkelstrooks	21830	31400	9570	13,20
Totaal				
Krap 2-strooks			8890	
enkelstrooks			22510	



Principeprofiel tweestrooksverkeer 700 ton
schaal 1:200



Enkel profiel (enkelstrooksverkeer) 700 ton

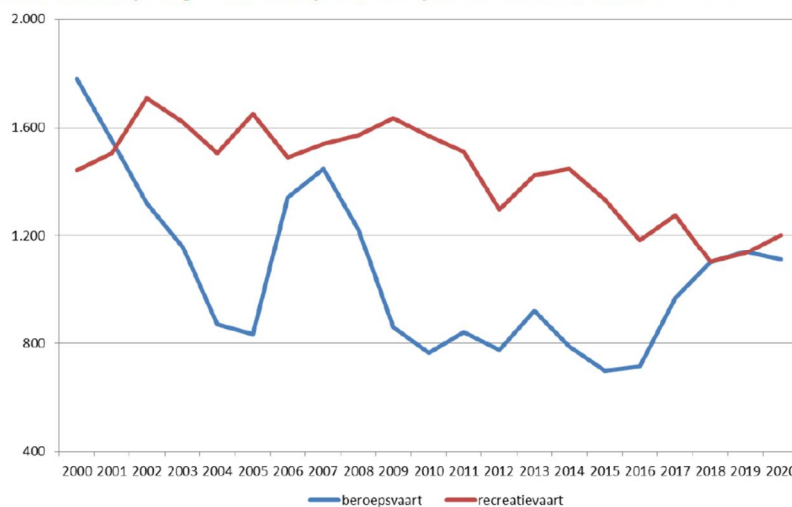
Gerenoveerde en nieuwe wachtplaatsen	Afstand langs kanaal [m]
1	800
2	5200
3	8700
4	12600
5	13000
6	19500
7	19900
8	24500
9	24800
10	27700
11	28100

⁶ Provincie Overijssel, V77 kanaal Almelo – Coevorden ged. Almelo – de Haandrik, Definitief Ontwerp, kanaal-upgrade 700 ton, Situatie baggerwerk, 700 ton enkel- en tweestrooksvakken, Tekeningen 2323-113 t/m -120

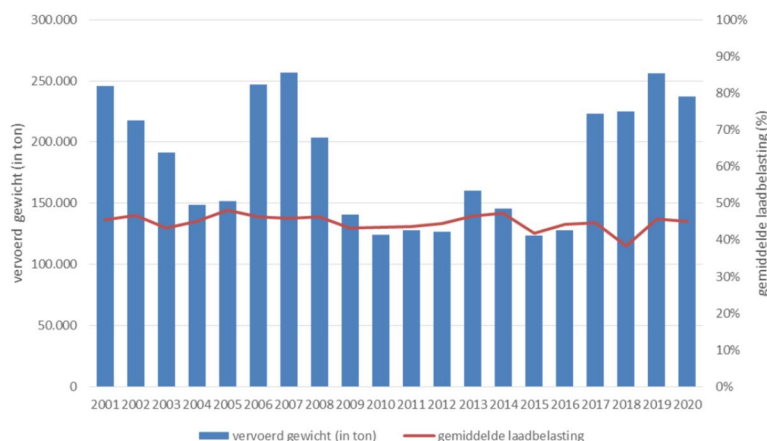
Overwegend is Kanaal Almelo – De Haandrik nu op verschillende kanaaldelen geschikt voor enkelstrooksverkeer, afgewisseld met trajecten waar een krap profiel tweestrooksverkeer is ingericht.

Provincie Overijssel registreert data van het vervoerd gewicht (zie hieronder).

Grafiek 3: Aantal passages Sluis Aadorp voor beroepsvaart en recreatievaart 2000-2020



Grafiek 4: Vervoerd gewicht (ton) en gemiddelde laadbelasting sluis Aadorp per jaar



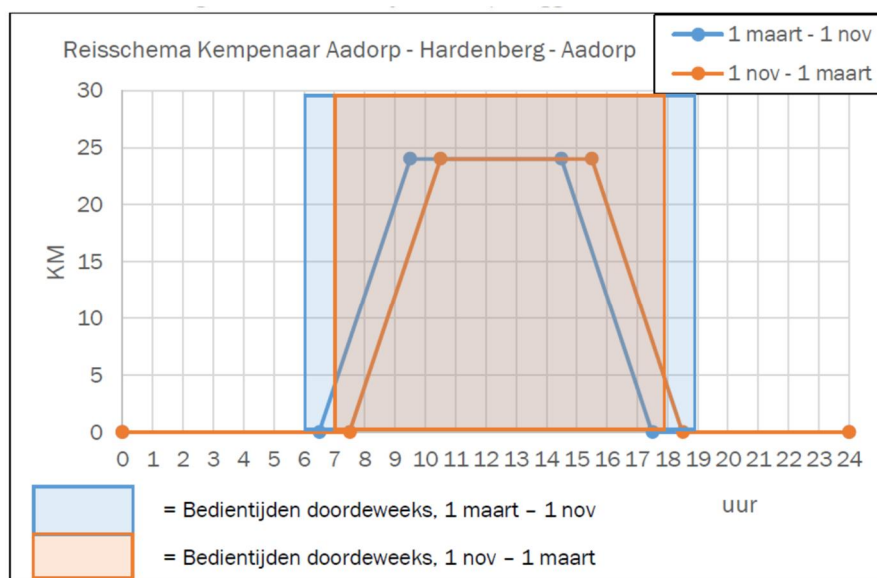
Figuur E.10. Aantal scheepvaartbewegingen en beladingsgraad van beroepsvaart op Kanaal Almelo - De Haandrik in de periode 2000 tot 2020

Volgens een uitgevoerde MKBA van DECISIO⁷ kunnen op het huidige kanaal maximaal 10 ladingen van 700 ton per week worden vervoerd gedurende 8 maanden en 5 ladingen per week in de wintermaanden. De maximale capaciteit van het kanaal is dan circa 303.800 ton per jaar uitgaande van het aangegeven vaarschema (de 100% die in bovenstaande figuur is aangegeven). De maximum capaciteit houdt verband met de verkeersafhandeling op een grotendeels enkelstrooks kanaal. Volgens DECISIO ligt het gebruik van het kanaal nu met circa 240.000 ton/jaar op 80% van de maximum capaciteit. Er is aangegeven dat volledige inzet van schepen met belading tot 700 ton een optimale benutting van de huidige capaciteit kan opleveren, maar ook dat door verkeersmanagement en verruiming van bedientijden van sluizen en bruggen nog een hoger rendement kan worden behaald.

⁷ MKBA opwaardering kanaal Almelo – Coevorden, DECISIO/Anteagroup, 1 november 2018

Het grootste deel van het vervoerd gewicht (circa 90%) is bestemd voor Betonfabriek Diamant in Hardenberg. Circa 10% van het transport heeft Coevorden als bestemming. In 2017 trad een sterke stijging op van het vervoerd gewicht. Terwijl het aantal schepen is gestegen met 35%, is het vervoerd gewicht toegenomen met 75%. Dit houdt verband met een combinatie van het feit dat het kanaal is opgewaardeerd en een grotere vraag naar bouwstoffen (aantrekken van de bouwmarkt).

Het huidige getransporteerde volume zand en grind met als bestemming betonfabriek Diamant in Hardenberg is merendeels afkomstig van de Beneden-Rijn. Het vaarschema wordt bepaald door de afstand, de capaciteit van het kanaal, bedieningstijden en loscapaciteit aan de kade. Volgens DECISIO (p.16/17) is de totale reistijd Aadorp – Hardenberg – Aadorp plus lostijd voor CEMT II klasse schip uitvoerbaar in 11 uur (zie Figuur E.5). Met bedientijden van sluizen en bruggen mee is de reis in het seizoen net binnen een dag uitvoerbaar, maar in de 4 maanden van het winterseizoen met krappere bedientijden is de reistijd langer dan een dag.



Figuur E.11 Vaarschema van Kempenaar op traject Aadorp-Hardenberg-Aadorp op een doordeweekse dag inclusief bedientijd van sluis en bruggen

Volgens de MKBA van DECISIO kan bij gunstige economische omstandigheden of ontwikkeling in mobiliteitsbeleid in de toekomst opwaardering naar 700 of 1000 ton dubbelstrooks mogelijk wel renderend worden. DECISIO geeft in hun economische analyse (p.11) aan dat het transport van bedrijven langs het kanaal die geïnteresseerd zijn in vervoer over water, een potentie heeft tot in totaal ruim 2,5 miljoen ton per jaar. Dat is veel meer dan nu daadwerkelijk over water wordt vervoerd.

De huidige capaciteit van het kanaal is transport van 240.000 ton/jaar maar dat zou nog vergroot kunnen worden door middel van ruimere bedieningstijden van sluizen en bruggen en wanneer de schepen meer wachttijd aanhouden om elkaar te laten passeren. Maar bij dat laatste zouden de vervoerders inefficiëntie (door langere wachttijd) moeten accepteren. De economische nadelen voor vervoerders zou dan met bedrijven verrekend moeten worden. Inzet van een combinatie van zowel grote als kleine schepen is complex en houdt een gericht verkeersmanagement in. Volgens DECISIO zou dat voor het transport wel een economische optimalisatie betekenen (130% van huidige situatie).

De studie van DECISIO is gedaan in het kader van onderzoek door de Provincie in 2017 en 2018 in verband met stimulering van goederenvervoer over water⁸ door opwaardering van het kanaal tot 1000 ton laadvermogen. Daarin zijn de varianten onderzocht van 700 ton dubbelstrooks, 1000 ton enkelstrooks en 1000 ton dubbelstrooks vaart, evenals quick-win maatregelen, zoals verruiming van bediening van bruggen en sluizen, verkeersmanagement en verschuiving naar grotere schepen. De geraamde investeringen voor die opwaarderingsvarianten vielen hoog uit. Bij tegenvallende benutting zou het rendement ongunstig zijn. Daarbij speelt een rol dat mogelijk slechts een beperkt aantal bedrijven (voornamelijk bouwstoffen) gemotiveerd kan worden tot overstap naar of vergroting van vervoer over water. Door de provincie is eind 2018 op basis van de MKBA besloten om niet over te gaan tot opwaardering van het kanaal naar laadvermogens van 1000 ton of andere varianten maar wel de mogelijkheden na te gaan voor capaciteitsverruiming door “quick wins” en bediening van bruggen op afstand.

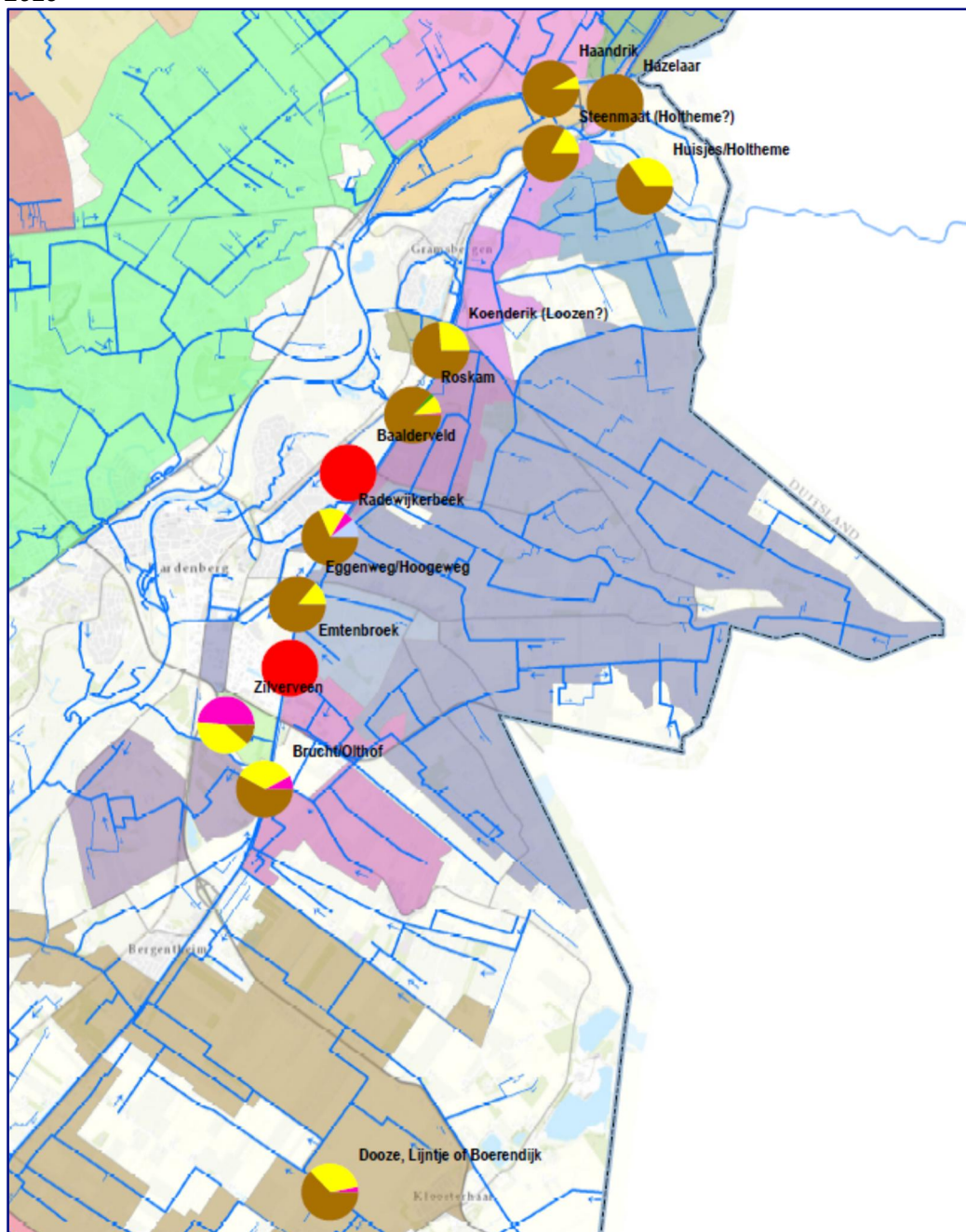
⁸ Provinciale Staten Overijssel, Maatschappelijke kostenbatenanalyse opwaardering vaarweg Almelo-Coevorden, PS/2018/995

E.7 In- en aflaten, beheer Waterschap en Vechtstromen

Bijlage bij Bijlage E

Bron: Waterakkoord Twenthekanalen en Overijsselsche Vecht_21 maart 2017.pdf

Figuur: uitsneden uit Verdringingsreeks inlaatpunten.pdf, Waterschap Vechtstromen, 26 juli 2019



Volgens het Waterakkoord en de kaart komen in het kanaal de volgende in- en aflaten voor.

	Punt nr WS	Locatie	Km	Beschrijving locatie en functie	Qmax m3/s	Gebied met peilbeheer [ha] Drempelhoogte voor zover bekend [mNAP]
1		Sluis Aadorp	0,26	Scheepvaartsluis en gemaal; doorlaat vanuit Twenthekanaal naar kanaal Almelo de Haandrik	+8	Debiet via de sluis naar het kanaal Almelo de Haandrik
2	60	Vriezenveensche Veenkanaal	8,53	Net zuidelijk van Daarlerveen. Open verbinding aanvoer richting gemaal Westerhaar, Geesters Stroomkanaal en Engbertsdijkswenen (Natura2000)	-0,88	Inlaat naar Veenkanaal 4226 ha
3	61	In-/aflaat Vroomshoop	10,25	Linderbeek, afvoer richting Gemaal Eelerberg WDOD via Zwolsekanaal Inlaat Vroomshoop	-1,73 -1,50	6100 ha, waarin 0,2 m3/s ter compensatie van winning Nijverdal; 2193 ha
4	62	Inlaatschuif Geerdijk Hammervliet	13,26	locatie Noorderweg Vroomshoop, Kolenmieten, aanvoer richting wingebed Hammervliet ter compensatie van effecten drinkwaterwinning	-0,80	1323 ha Waarvan 0,2 m3/s ter compensatie van winning Hammervliet
5		Aflaatwerk Kloosterdijk	15,1	Stuwte, aanvoer vanuit kanaal AdH via Nieuwe Stroomkanaal richting westelijk achterliggend gebied (o.a. stedelijk gebied Marienberg).	-0,24	686 ha
6	ong	Aflaat Prinsen	15,52	hoogwaterfunctie voor het peilbeheer van kanaal AdH; aflaat naar Marienberg - Vechtkanaal	onbekend	onbekend
7	63	Gemaal Kloosterdijk	15,79	afvoer vanaf Gemaal (bij Kloosterdijk locatie Beerserveen) pompt het water uit het achterland aan oostzijde op het kanaal	Nvt	Geen inlaat. Minder gevoelig voor peilverlaging
8	90	Watergang De Dooze	20,80	Boerendijk of Het Lijntje, Bergentheim, oostzijde, peilbeheer watergang de Dooze tot gemaal de Dooze	-0,33	1114 ha
9	64	Inlaat Olthof	22,07	Bruchterbeekweg, aanvoer richting achterliggende (westelijke) gebied, Buurtschap Brucht, westzijde	-0,16	389 ha

10	65	Inlaat Zilverveen	22,49	aanvoer vanuit kanaal AdH richting achterliggend gebied	-0,03	86 ha
11	66	Inlaat Emtenbroek	23,47	aanvoer vanuit kanaal AdH richting achterliggend gebied (Duitslandweg, Emtenbroekerdijk? Oostzijde)	-0,03	85 ha
12	67	Inlaat Eggenweg /Hoogeweg	24,06	Locatie Eggenweg Hardenberg: aanvoer vanuit kanaal AdH richting achterliggende gebied oostzijde	-0,13	335 ha
13	68	Inlaatschuif Radewijkerbeek	25,33	aanvoer vanuit kanaal AdH naar Radewijkerbeek (oostzijde).	-0,82	2039 ha
14	108	Inlaat Baalderveld	25,82	aanvoer vanuit kanaal AdH naar stedelijk gebied Hardenberg (westzijde)	-0,02	onbekend
15	109	Inlaat Roskamp	27,21	aanvoer vanuit kanaal AdH naar achterliggend gebied (Roskamperweg, Randwijkerbeek)	-0,04	180 ha
16	69	Inlaat Koenderink/ Loozen	28,51	aanvoer vanuit kanaal AdH richting achterliggende gebied (aan beide zijden Kanaal?).	-0,02	56 ha
17	70	Inlaat Steenmaat/ Holthema	31,30	50 m zuidelijk sluis de Haandrik: aanvoer vanuit kanaal AdH naar achterliggend gebied (oostzijde).	-0,06	10 ha
18		Sluis De Haandrik	32	Aansluiting naar de Vecht	-2,5	Doorlaat naar de Vecht
19		Stuw De Haandrik		Peilbeheersing Vecht NAP +9,1m		Hele oostelijk deel van de Vecht
20		Coevordersluis		Doorlaat van Vecht naar kanaal Vecht - Coevorden	2,5	Debiet gelijk aan wat via sluis De Haandrik wordt doorgelaten

Verder zijn van de Provincie tekeningen ontvangen van onderleiders onder de kanaalbodem. Daarnaast liggen onder het kanaal zinkers voor kruising van kabels en leidingen en riolen.`

	Locatie	Km vanaf sluis Aadorp	Beschrijving locatie en functie	Gebied met peilbeheer [ha] Drempelhoogte voor zover bekend [mNAP]
1	Hollandergraven	0	Onderleider onder het kanaal	Rechthoekig inwendig 2x2,30x1,60 Betondikte 0,3 m BOK=NAP+4,45m BK=NAP+6,35m
2	Oostelijk deel: Lateraalkanaal of verbindingsleiding West: Veneleiding	3,60	Aanvoer vanuit oostelijk gebied en doorvoer naar westelijk gebied. Onderleiders met stelbare kleppen	Bestek WS R&D 1977: 2 buizen inwendig 3,99 m, afgedekt met betonplaat, BK=NAP+5,6m
3	Grondduiker de Stouwe	7,07	Doorvoer oost - west	Bestek Provincie Overijssel 9609: betonnen duiker 4,05x2,05 BK=NAP+5,6m Afgedekt stortsteen BK=NAP+6m
4	Grondduiker Linderbeek separatiepunt Vroomshoop	10,25	Doorvoer Linderbeek oost - west	NV Maatschappij Ov. Kanalen Bestek 486 1953, bestek Prov.Ov. 9609: Betonsegmenten Diameter 1,5m BK=NAP+5,1m Stortsteen BK=NAP+6m
K&L	1 Zinker/boring	7,50	Kabel Enexis	Diepte NAP+1,30m
K&L	1 Zinker/boring	8,2	Kabel Enexis	Diepte NAP+0,80m
K&L	2 Zinker/boring	8,5	Kabel Enexis	Diepte NAP+4,60m
K&L	1 Zinker/boring	8,81	Gasleidingen	Diepte NAP+1,96m
K&L	Zinker riool	10,55	Vrij verval riool diameter 400mm Twenterand	Diepte NAP+5,10m
K&L	3 Zinkers/boringen KPN	11,00	Kabels data KPN	Diepte NAP+4,07/+0,66/+3,50
5	Grondduiker Beerzerveld	14,38	Doorvoer oost – west met kleppen Waterstand Oost=NAP+7,14m West=NAP+7,09m	Bestek Prov.Ov. 9609: Betonsegmenten Diameter 1,5m BK=NAP+5,13m Stortsteen BK=NAP+6m
6	Grondduiker Schapenvonder	18,425	Doorvoer oost - west	Bestek Prov.Ov. 9609: Betonsegmenten Diameter 1,5m BK=NAP+5,1m Stortsteen BK=NAP+6m

7	Grondduiker Brucht	22,065	Doorvoer oost - west	Bestek Prov.Ov. 9609: Betonsegmenten Diameter 1,5m BK=NAP+4,8m Stortsteen BK=NAP+6m
8	Grondduiker Radewijkerbeek	25,31	Doorvoer oost - west	Bestek Prov.Ov. 9609: Betonnen Koker 9,4x3,3 BK=NAP+4,9m Stortsteen BK=NAP+5,7m
9	Grondduiker Lee of Loozen	28,51	Doorvoer oost – west Waterstand Oost=NAP+7,45m West=NAP+7,45m	Bestek Prov.Ov. 9609: 2*stalen buis d=1,82m BK=NAP+4,2m aanvulling BK=NAP+5,7m

E.8 Damwanden langs kanaal Almelo de Haandrik

[Bijlage bij Bijlage E](#)

2019/20 = recent vernieuwd		Wf+Bo ZL50 = toevoegd door Deltares Mtn vanuit WfBo inventarisatie 2018									
Boordvoorzieningen aan oostzijde kanaal		daarbij soms wat moeten schipperen met de trajectlengte en diepte niet bekend zie dat document voor waterdiepte voor de wand tijdens inspectie 2018									
Van km	Tot km	Lengte m	Zijde	Materiaal	Type	Lengte plank m	Verankerd	Jaar van aanleg	Bron	Besteknummer	Opmerkingen
0.008	0.483	475	Oost	Staal	PAZ 5400	?			Wf+Bo ZL505-70		
0.483	0.542	59	Oost	Staal	Belval B2 155	?	Ja		Wf+Bo ZL505-70		
0.542	2.984	2.442	Oost	Beton		4	Nee		Wf+Bo ZL505-70		
2.984	4.26	1.276	Oost	Staal	DWU 5400	?	Nee		Wf+Bo ZL505-70		
4.26	4.338	78	Oost	Staal	Belval B2 128	?	Nee		Wf+Bo ZL505-70		
4.338	5.419	1.081	Oost	Staal	DWU 5400	?	Nee		Wf+Bo ZL505-70		
5.419	5.86	441	Oost	Staal	DWZ 225/6	?	Nee		Wf+Bo ZL505-70		
5.86	6.717	857	Oost	Staal	PAZ 5360	5.5	Nee	2005	As Built	WK-01-03	Waarde van / tot geschat van tekening
6.717	7.027	310	Oost	Beton		4					
7.027	7.198	171	Oost	Staal	PAZ 5360	4	Nee	2005	As Built	WK-01-03	Waarde van / tot geschat van tekening
7.198	7.730	532	Oost	Staal	AZ 18-700	8.5	Nee	2019 / 2020	As Built	WK-2017-25	Traject 4
7.730	8.070	340	Oost	Staal	AZ 18-700	9	Nee	2019 / 2020	As Built	WK-2017-25	Traject 4
8.070	8.360	290	Oost	Staal	AZ 18-700	8.5	Nee	2019 / 2020	As Built	WK-2017-25	Traject 4
8.360	8.810	450	Oost	Staal	AZ 18-700	8	Nee	2019 / 2020	As Built	WK-2017-25	Traject 4
8.810	8.912	102	Oost	Staal	PAZ 5360	5	Nee	2005	As Built	WK-01-03	Waarde van / tot geschat van tekening
8.912	9.480	568	Oost	Staal	PAZ 5360	4	Nee	2005	As Built	WK-01-03	Waarde van / tot geschat van tekening
9.480	9.925	445	Oost	Staal	PAZ 5360	5	Nee	2005	As Built	WK-01-03	Waarde van / tot geschat van tekening
9.925	10.025	100	Oost	Staal	DWZ 245/6	7	Nee	1996 / 1997	Bestekstekeningen	9503	
10.025	10.952	927	Oost	Staal	DWZ 245/6	8.5	Nee	1996 / 1997	Bestekstekeningen	9503	
10.952	11.050	98	Oost	Staal	DWU 5500	?	Nee		Wf+Bo ZL505-70		
11.050	11.100	50	Oost	onbekend		?			Wf+Bo ZL505-70		
11.100	11.448	348	Oost	Staal	DWZ 245/6	8.5	Nee	1996 / 1997	Bestekstekeningen	9503	
11.448	13.656	2.208	Oost	Beton	Beton	4	Ja	2005	As Built	WK-01-03	Waarde van / tot geschat, geen info lengte en dikte plank of ankers
13.656	13.795	139	Oost	Staal	DWZ 245/6	8	Nee	1996 / 1997	Bestekstekeningen	9503	
13.795	14.580	785	Oost	Beton	Beton	4	Ja	2005	As Built	WK-01-03	Waarde van / tot geschat, geen info lengte en dikte plank of ankers
14.580	14.920	340	Oost	Beton	Beton	4	Ja	2005	As Built	WK-01-03	Waarde van / tot geschat, geen info lengte en dikte plank of ankers
14.920	15.201	281	Oost	Staal	PAZ 5360	?	Nee		Wf+Bo ZL505-70		
15.201	15.789	588	Oost	Beton	Beton	4	Ja	2005	As Built	WK-01-03	Waarde van / tot geschat, geen info lengte en dikte plank of ankers
15.789	15.860	71	Oost	Staal	DWZ 225/6	9	Nee	1996 / 1997	Bestekstekeningen	9503	
15.860	15.934	74	Oost	Staal	DWZ 245/6	8	Nee	1996 / 1997	Bestekstekeningen	9503	
15.934	16.070	136	Oost	Staal	DWZ 245/6	7	Ja	1996 / 1997	Bestekstekeningen	9503	Geen info ankers
16.070	17.450	1.380	Oost	Staal	PAZ 5360	4	Nee	2005	As Built	WK-01-03	Waarde van / tot geschat van tekening
17.450	17.560	110	Oost	Staal	PAZ 5360	7.5	Nee	2005	As Built	WK-01-03	Waarde van / tot geschat van tekening
17.560	17.615	55	Oost	onbekend		?			Wf+Bo ZL505-70		
17.615	18.930	1.315	Oost	Staal	PAZ 5360	4	Nee	2005	As Built	WK-01-03	Waarde van / tot geschat van tekening
18.930											

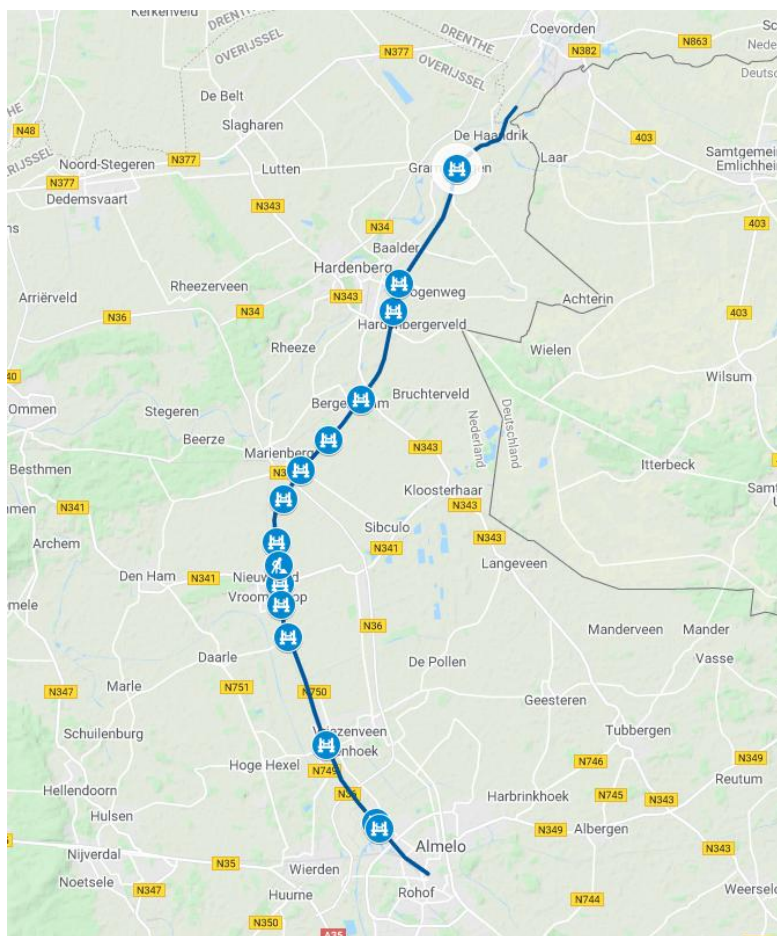
Van km	Tot km	Lengte m	Zijde	Materiaal	Type	Lengte plank m	Verankerd	Jaar van aanleg	Bron	Besteknummer	Opmerkingen
0	0.376	376	west	Staal	DWU 5400	?	Nee		Wi+Bo ZL505-70		
0.376	0.499	123	west	Staal	BZ 155	?	Ja		Wi+Bo ZL505-70		
0.499	0.606	107	west	Staal	DWU 5400	?	Nee		Wi+Bo ZL505-70		
0.606	0.798	192	west	Staal	DWZ 225/6	?	Nee		Wi+Bo ZL505-70		
0.798	2.105	1.307	west	Stortsteen		nvt			Wi+Bo ZL505-70		
2.105	2.149	44	west	Beton		4	N		Wi+Bo ZL505-70		
2.149	3.007	858	west	Stortsteen		nvt			Wi+Bo ZL505-70		
3.007	3.600	593	West	Staal	DWZ 245/6	7	Nee	1996 / 1997	Bestektekeningen	9503	
3.600	4.185	585	West	Staal	DWZ 245/6	7	Ja	1996 / 1997	Bestektekeningen	9503	Geen info ankers
4.185	4.267	82	West	Staal	DWZ 245/6	8	Nee	1996 / 1997	Bestektekeningen	9503	
4.267	4.354	87	west	Staal	onbekend	?	N				
4.354	4.404	50	West	Staal	AZ 18-700	10	Nee	2019	As Built	WK-2017-25	Traject 2
4.404	4.510	106	West	Staal	AZ 18-700	10.5	Nee	2019	As Built	WK-2017-25	Traject 2
4.510	4.816	306	West	Staal	DWZ 245/6	7	Nee	Onbekend	Opdrachtbrief en deel 2.2	Geen	
4.816	4.976	160	West	Staal	DWZ 245/6	7	N		Wi+Bo ZL505-70		
4.976	5.427	451	West	Staal	DWZ 245/6	?	N		Wi+Bo ZL505-70		
5.427	8.623	3.196	West	Beton		4	N		Wi+Bo ZL505-70		
8.623	8.678	55	West	Staal	PAU 2260	?	Ja		Wi+Bo ZL505-70		
8.678	8.761	83	West	Staal	DWZ 225/6	?	Ja		Wi+Bo ZL505-70		
8.761	8.8	39	West	Staal	PAU 2260	?	Ja		Wi+Bo ZL505-70		
8.8	10.198	1.398	West	Beton		4	N		Wi+Bo ZL505-70		
10.198	10.212	14	west	Staal	PAZ 4570	?	N		Wi+Bo ZL505-70		
10.212	10.262	50	west	Staal	DWU 5400	?	N		Wi+Bo ZL505-70		
10.262	10.310	48	West	Staal	AZ 18-700	9.5	Nee	2019 / 2020	As Built	WK-2017-25	Traject 6
10.310	10.580	270	West	Staal	AZ 18-700	8.5	Nee	2019 / 2020	As Built	WK-2017-25	Traject 6
10.580	10.830	250	West	Staal	AZ 18-700	9.5	Nee	2019 / 2020	As Built	WK-2017-25	Traject 6
10.830	10.970	140	West	Staal	AZ 18-700	9	Nee	2019 / 2020	As Built	WK-2017-25	Traject 6
10.970	11.054	84	West	Staal	AZ 18-700	8	Nee	2019 / 2020	As Built	WK-2017-25	Traject 6
11.054	11.093	39	west	Onbekend		Ja			Wi+Bo ZL505-70		
11.093	11.448	355	west	Staal	DWU 5400		N		Wi+Bo ZL505-70		
11.448	12.457	1.009	West	Beton	Beton	4	Ja	2005	As Built	MK-01-03	Waarde van / tot geschat, geen info lengte en dikte plank of ankers
12.457	12.719	262	west	Staal	PAU 2260	?	Ja		Wi+Bo ZL505-70		
12.719	12.901	182	west	Beton		4	N		Wi+Bo ZL505-70		
12.901	13.061	160	west	Staal	PAU 2260	?	Ja		Wi+Bo ZL505-70		
13.061	13.698	637	west	Beton		4	N		Wi+Bo ZL505-70		
13.675	13.829	154	West	Staal	DWZ 245/6	8	Nee	1996 / 1997	As Built	9503	
13.829	13.850	21	West	Staal	PAZ 5360	6	Nee	2005	As Built	MK-01-03	Waarde van / tot geschat van tekening
13.850	14.607	757	West	Beton	Beton	4	Ja	2005	As Built	MK-01-03	Waarde van / tot geschat, geen info lengte en dikte plank of ankers
14.607	14.636	29	west	Staal	PAU 2450	?	N		Wi+Bo ZL505-70		
14.636	14.664	28	west	Staal	PAZ 5360	?	N		Wi+Bo ZL505-70		
14.664	14.923	259	West	Beton	Beton	4	Ja	2005	As Built	MK-01-03	Waarde van / tot geschat, geen info lengte en dikte plank of ankers
14.923	15.235	312	west	Staal	PAZ 5360	?	N		Wi+Bo ZL505-70		
15.235	15.368	133	West	Staal	PAU 2260	?	Ja	2011	As Built	WK-2011-09	Waarde van / tot geschat, geen info over ankers
15.368	15.378	10	West	Staal	PAU 2260	?	Ja	2011	As Built	WK-2011-09	Waarde van / tot geschat, geen info over ankers
15.378	15.489	111	West	Staal	PAU 2260	?	N		Wi+Bo ZL505-70		
15.489	15.780	291	West	Beton		4	N		Wi+Bo ZL505-70		
15.780	15.890	110	West	Staal	PAU 2260	8	Ja	2011	As Built	WK-2011-09	Waarde van / tot geschat, geen info over ankers
15.890	15.934	44	West	Staal	DWZ 245/6	8	Nee	1996 / 1997	As Built	9503	
15.934	16.190	210	West	Staal	PAZ 5360	7.5	Ja	2005	As Built	MK-01-03	Waarde van / tot geschat, geen info groutankers. Is WP Kloosterdijk
16.190	17.570	1.380	West	Beton		4	N		Wi+Bo ZL505-70		
17.570	17.626	56	West	Staal	onbekend	?	N		Wi+Bo ZL505-70		
17.626	18.949	1.323	West	Beton		4	N		Wi+Bo ZL505-70		
18.949	19.690	741	West	Staal	PAZ 5360	4.75	Nee	2005	As Built	MK-01-03	Waarde van / tot geschat van tekening
19.690	19.471	33	West	Staal	PAU 2260	7.5	Ja	2011	As Built	WK-2011-09	Van / tot geschat, klapanke
19.471	19.554	83	West	Staal	PAU 2260	7.5	Nee	2011	As Built	WK-2011-09	Wachtplaats 6, van / tot geschat
19.554	19.579	25	West	Staal	PAU 2260	7.5	Ja	2011	As Built	WK-2011-09	Wachtplaats 6, van / tot geschat, klapanke
19.579	19.676	97	West	Staal	PAU 2260	7	Ja	2011	As Built	WK-2011-09	Van / tot geschat, klapanke
19.676	19.845	169	West	Staal	De Wendel Z245/6	8	Ja	2011	As Built	WK-2011-09	Waarde van tot geschat
20.050	22.015	1.965	West	Staal	PAZ 5360	5	Nee	2005	As Built	MK-01-03	Wachtplaats 7, waarde van / tot geschat, klapanke rond 32 mm, lang 15
22.015	22.192	177	West	Beton		4	N		Wi+Bo ZL505-70		
22.192	22.260	68	West	Staal	PAZ 5460	7.5	Nee	2019 / 2020	As Built	WK-2017-25	Traject 17, let op is natuurvriendelijke oever
22.260	22.340	80	West	Staal	PAZ 5460	7.5	Nee	2019 / 2020	As Built	WK-2017-25	Traject 17, let op is natuurvriendelijke oever
22.340	22.480	140	West	Staal	PAZ 5460	8	Nee	2019 / 2020	As Built	WK-2017-25	Traject 17, let op is natuurvriendelijke oever
22.480	22.540	60	West	Staal	PAZ 5460	7	Nee	2019 / 2020	As Built	WK-2017-25	Traject 17, let op is natuurvriendelijke oever
22.540	22.780	240	West	Staal	PAZ 5460	7.5	Nee	2019 / 2020	As Built	WK-2017-25	Traject 17, let op is natuurvriendelijke oever
22.780	22.900	90	West	Staal	PAZ 5460	8	Nee	2019 / 2020	As Built	WK-2017-25	Traject 17, let op is natuurvriendelijke oever
22.900	23.040	140	West	Staal	PAZ 5460	8	Nee	2019 / 2020	As Built	WK-2017-25	Traject 17, let op is natuurvriendelijke oever
23.040	23.078	38	West	Staal	AZ 12-770	9	Nee	2020	As Built	WK-2017-25	Morssinkhof
23.078	23.121	43	West	Staal	AZ 12-770	10	Ja	2020	As Built	WK-2017-25	Morssinkhof, rond 42,4 x 11,0 mm, groutankers lang 18 m
23.121	23.252	131	West	Staal	PAU 2260	7	Ja		Wi+Bo ZL505-70		
23.252	23.410	158	West	Staal	PAU 2260	7	Ja	2011	As Built	WK-2011-09	Ligplaats 1, klapanke rond 20 mm, lang 12 m, waarde van / tot geschat
23.410	24.449	1.039	west	Beton		4	N		Wi+Bo ZL505-70		
24.449	24.724	275	West	Staal	PAZ 5360	7.75	Ja	Onbekend	As Built	WK-2011-09	Bestaande constructie verankerd, klapanke rond 16 mm, lang 6 m
24.724	24.823	99	West	Staal	PAZ 5360	7.75	Ja	Onbekend	As Built	WK-2011-09	Bestaande constructie verankerd, klapanke rond 20 mm, lang 6 m
24.823	27.804	2.981	west	Beton	Beton	4	Ja	2005	As Built	MK-01-03	Waarde van / tot geschat, geen info lengte en dikte plank of ankers
27.804	27.875	71	west	Staal	PAZ 5360	8					
27.875	28.020	145	West	Staal	PAZ 5460	8	Nee	2020	As Built	WK-2017-25	Traject 23
28.020	28.014										

Trajecten kadeverbetering Provincie (bron: Ontwerpnoot Beens)

Traject	Locatie	Zijde	Lengte traject geschat	Prioriteit 1=hoog	Damwand	Diepte	Anker
T01	Aadorp	O	100	P08			
T02							
T03	Vriezenveen	O	300	P14			
T04							
T05	Vroomshoop	W	1000	P01			
T06							
T07	Zd v Geerdijk	O	1500	P05			
T08	Zd v Beerzerveld	W	1500	P04			
T09	Zd v Beerzerveld	O	200	P16			
T10	Gouden Ploeg	O	1800	P03			
T11	Bergentheim	O	500	P11			
T12	Bergentheim	W	500	P02			
T13	Bergentheim	W	450	P07			
T14	Bergentheim	O	2300	P12			
T15	Bergentheim	W	1400	P08			
T16							
T17							
T18							
T19	Hardenberg	O	800	P18			
T20	Hardenberg	O	150	P17			
T21	Hardenberg	O	750	P13			
T22	Hardenberg	W	250	P06			
T23							
T24	Gramsbergen	W	150	P10			
T25							
T26	De Haandrik	O	150	P15			

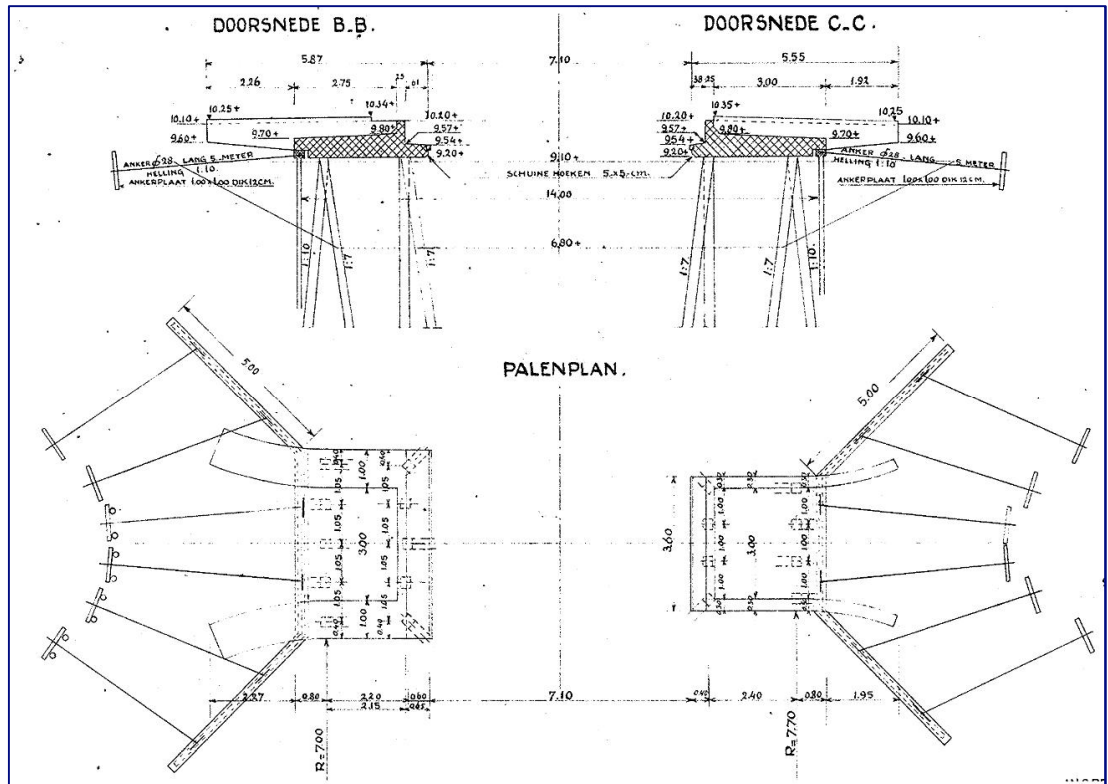
E.9 Bruggen over kanaal Almelo de Haandrik

Bijlage bij Bijlage E



	Naam	Soort	Km	Ligging in wegtraject/locatie	Ouderdom Bijzonderheid
1	Eilandbrug	hefbrug		Aalderinkshoek – Haghoek (Aalderinkssingel)	nvt
2	Dollegoorbrug	basculebrug		RING Wierdensehoek – Schelfhorst (Schuilenburgsingel)	nvt
3	Brug Aadorp	basculebrug	0,55	Aadorp-Oost - Aadorp-West (Bruglaan)	
4	Aadorp	liggerbrug	2,16	N36 Wierden - Witte Paal	Hoge ligging
5	Brug Hammerweg Westeinde	ophaalbrug	4,3	Vriezenveen - Hoge Hexel (Westeinde)	
6	Brug Daarlerveen	ophaalbrug	8,91	Daarlerveen – Daarle (Spoorstraat)	
7	Grote Puntbrug	ophaalbrug	10,23	Vroomshoop – Westerhaar (Europasingel)	Ca. 1952, landhoofden op palen, type onbekend
8	Tonnendijkbrug	ophaalbrug	11,08	N341 Ommen – Kloosterhaar (Tonnendijk)	

9	Geerdijkbrug	ophaalbrug	12,77	Geerdijk - Den Ham (Geerdijk)	
10	Brug Beerzerveld	ophaalbrug	14,59	Beerzerveld (Stenendijk)	Mrt.2013-okt.2013 vervangen; grotere doorvaart breedte
11	Beerzerbrug	liggerbrug	15,38	N36 Wierden - Witte Paal (Twentseweg)	Hoge ligging
12	Kloosterdijkbrug	ophaalbrug	15,98	Mariënborg – Sibculo (Kloosterdijk)	Feb.2012-mrt.2013 vervangen; grotere doorvaart breedte
13	Gouden Ploegbrug	draaibrug	17,60	Gouden Ploeg - Oud-Bergentheim (Eerste Elsweg)	Fundering onbekend
14	Brug Bergentheim	ophaalbrug	19,70	Bergentheim (Van Roijensweg)	Jan.2012-nov.2012 vervangen; grotere doorvaart breedte
15	Bergentheim	liggerbrug	20,16	N343 Oldenzaal – Slagharen (Twenteweg)	Hoge ligging 1981?
16	Bruchterveld	liggerbrug	22,79	Hardenberg – Bruchterveld (Duitslandweg)	Hoge ligging
17	Emtenbroekerdijk-brug	ophaalbrug	23,50	Hardenberg – Moscou (Emtenbroekerdijk)	Apr.2012-mrt.2013 vervangen
18	Hoogenwegbrug	ophaalbrug	24,63	Hardenberg – Hoogenweg (Hoogenweg)	Nov.2011-sept.2012 vervangen. Trillingshinder bij heien > wijziging naar boorpalen
19	Hoge brug Westeindigerdijk	liggerbrug	26,34	Hardenberg – Radewijk (Westeindigerdijk)	Hoge ligging
20	Loozenbrug	ophaalbrug	27,88	Loozen – Radewijk (Schooldijk)	Ca. 1952 landhoofd deels op damwand en deels op palen gefundeerd; type paalfundering onbekend
21	Steensteegbrug	ophaalbrug	29,88	Gramsbergen – Holthema (De Oostermaat)	
22	Sluis De Haandrik	ophaalbrug	31,44	De Haandrik – Gramsbergen (Coevorderweg)	



Figuur E.12 Fundering oude ophaalbruggen zoals bij geamoveerde brug Kloosterdijk [Bron: bestek NV MOK 73.261, file 02f.492-B-03 Overzicht.tif]

Referenties

Bijlage bij Bijlage E

- [1] Deltares (2020). Gebiedsbreed schade onderzoek aan panden Almelo de Haandrik kanaal. Definitief rapport 11203512-005-GEO-0015, 17 maart 2020.
- [2] Deltares (2021). Definitief Plan van Aanpak voor verdiepend onderzoek naar de schade langs het kanaal Almelo – De Haandrik. 4 juni 2021.
- [3] COB (2012). Aanbevelingen voor het ontwerp van bouwkuipen in stedelijke omgeving. COB rapport F530-ER-12-49785.
- [4] Van Baars, S. (2021). Piping bij Kanaal Almelo - De Haandrik. Rapport, 26 maart 2021.
- [5] SBR-CUR (2017). Omgevingsbeïnvloeding inbrengen en trekken van damwanden – Praktijkrichtlijn. SBRCURnet, Delft.
- [6] TNO (2019). 19 04 17 Uitvraag schadeopname. Notitie met beschrijving systematiek van schade-opnamen, Delft.
- [7] Bligh, W.G. (1915). Dams and Weirs - an analytical and practical treatise on gravity dams and weirs; arch and buttress dams; submerged weirs; and barrages. American Technical Society.
- [8] Burenkova, V.V. (1993) Assessment of Suffusion in Non-Cohesive and Graded Soils. Proceedings of the 1st International Conference "Geo-Filters", Karlsruhe, 20-22 October 1992, 357-360.
- [9] Graauw, A. de, Meulen, T. van der, Does, M. van der (1983). Design criteria for granular filters. Waterloopkundig Laboratorium Publication no. 287.
- [10] U.S. Army Corps of Engineers (2000). Engineering and Design - Design and Construction of Levees
- [11] Federal Emergency Management Agency (2011). Filters for Embankment Dams - Best Practices for Design and Construction.
- [12] Förster, U., Ham, G. van den, Calle, E., Kruse, G. (2012). Onderzoeksrapport Zandmeevoerende wellen. Deltares rapport 1202123-003-GEO-0002.
- [13] ICOLD International Committee on Large Dams (1994). Embankment Dams Granular Filters and Drains - Review and recommendations. ICOLD Bulletin 95.
- [14] ICOLD International Committee on Large Dams (2015). Internal Erosion of Existing Dams, Levees and Dikes, and their Foundations. ICOLD Bulletin, 1(164).
- [15] Indraratna, B., Raut, A.K. & Khabbaz, H. (2007). Constriction-Based Retention Criterion for Granular Filter Design. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133(3), pp.266–276
- [16] Istomina, V.S. (1957). Filtration stability of soils (in Russian). Gostroizdat, Moscow, Leningrad.
- [17] Ke, L. and Takahashi, A. (2014). Triaxial erosion test for evaluation of mechanical consequences of internal erosion, Geotech. Test. J., 37 (2), 347-364.
- [18] Ke, L., Ouyang, M., Horikoshi, K., Takahashi, A. (2015). Soil deformation due to suffusion and its consequences on undrained behaviour under various confining pressures. Japanese Geotechnical Society Special Publication, 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.
- [19] Kenney, T.C., & Lau, D. (1985). Internal Stability of Granular Filters. Canadian Geotechnical Journal, 22, p215-225.
- [20] Kodieh A., Gelet, R., Marot, D., Fino, A.Z. (2020). A study of suffusion kinetics inspired from experimental data: comparison of three different approaches. Acta Geotechnica (2021) 16:347–365 <https://doi.org/10.1007/s11440-020-01016-5>
- [21] Koenders, M.A. (1978). Aspecten van filters. Laboratorium voor Grondmechanica CO-406413/7.
- [22] Kovacs, G. (1981). Seepage Hydraulics. Elsevier Scientific Publishing Company.
- [23] LaFleur, J. Mlynarek, J. & Rollin, A.L. (1989). Filtration of Broadly-graded Cohesionless Soils. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE. Vol. 115.

- [24] Lambe, T.W. & Whitman, R., 1969. Soil Mechanics, John Wiley and Sons Inc.
- [25] Lubochkov. E.A. (1965). Graphical and Analytical methods for the Determination of the properties of Non-cohesive Soils Characterizing Suffusion (in Russian). Izvestia VNIIG, No. 78.
- [26] Redlinger, C., Robbins, B., Pabst, M. (2016). Filter Design: The Why, When, and Where.
- [27] Robertson, P. K. (2010, May). Soil behaviour type from the CPT: an update. In 2nd International symposium on cone penetration testing (Vol. 2, pp. 575-583).
- [28] Rönqvist, H. and Viklander, P. (2014) On the Kenney-Lau Approach to Internal Stability Evaluation of Soils. Geomaterials, 4, 129-140. <http://dx.doi.org/10.4236/gm.2014.44013>
- [29] Rosenbrand, E. (2017). Literatuurstudie Filtercriteria ten behoeve van grondzandbarriere. Deltares memo 11200952-003-GEO-001.
- [30] Sellmeijer J.B., Lopéz de la Cruz J., Van Beek V.M., Knoeff J.G. (2011). Fine-tuning of the piping model through small-scale, medium-scale and IJkdijk experiments. European Journal of Environmental and Civil Engineering 15(8): 1139-1154.
- [31] Skempton, A.W. & Brogan, J.M. (1994). Experiments on piping in sandy gravels. Géotechnique, 44(3), pp.449-460.
- [32] Terzaghi, Karl. 1922. Der Grundbruch an Stauwerken Und Seine Verhütung. Die Wasserkraft 17 (24): 445-449.
- [33] United States Department of Agriculture (2017). National Engineering Handbook, Part 633 Soils Engineering, Ch. 26 Gradation Design of Sand and Gravel Filters.
- [34] Vrijling, J.K., Kok, M., Calle, E.O.F., Epema, W.G., Van der Meer, M.T., Van den Berg, P., Schweckendiek, T. (2010). Piping - Realiteit of Rekenfout? Technical report, Dutch Expertise Network on Flood Protection (ENW).
- [35] Wan, C.F. & Fell, R. (2008). Assessing the Potential of Internal Instability and Suffusion in Embankment Dams and Their Foundations. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 134, No. 3, March 1, pp. 401-407.
- [36] Yerro, Alba & Rohe, Alexander & Soga, Kenichi. (2017). Modelling Internal Erosion with the Material Point Method. Procedia Engineering. 175. 10.1016/j.proeng.2017.01.048.
- [37] RHDHV (2011). Verkennend kwelonderzoek kanaal Almelo - De Haandrik – Upgraden kanaal Almelo – De Haandrik tot 700 tons schepen. Concept rapport 9W0044.B6/R001/902953/LM/stee, 2 november 2010.
- [38] ArcGIS (2021). Bodemkaart van Nederland. <https://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?useExisting=1&layers=de58bafde7284c99836a54519fa9f3cd> Laatst geraadpleegd 7 mei 2021.
- [39] Jones L.D., Jefferson I.F. (2012). Expansive soils. In: ICE manual of geotechnical engineering. Volume 1, geotechnical engineering principles, problematic soils and site investigation. Chapter 5, ed. Burland, DOI 10.1007/978-3-319-12127-7_118-1
- [40] Royal Haskoning (2008). Regionale keringen Kanaal Almelo-De Haandrik - Toetsing op Veiligheid op overstroming. Rapport 9T0411.AO/R0004/600451/JEBR/Nijm
- [41] Royal Haskoning (2013). Regionale keringen Kanaal Almelo - De Haandrik - Toetsing op veiligheid (2e ronde). Rapport BC3768/R0001/414320/VVDM/Nijm
- [42] Provincie Overijssel (2021). Offertevraag verdiepingsonderzoek Kanaal Almelo-De Haandrik. 8 april 2021.
- [43] Begeleidingscommissie Verdiepend onderzoek kanaal Almelo – De Haandrik (2021). Opm Begeleidingscommissie 2021-05-17. Notitie, 17 mei 2021.
- [44] Deltares (2021). Verdiepend onderzoek naar de schade rond het kanaal Almelo – De Haandrik – Definitief rapport Desk research, Diepere analyse van de gegevens en Onderzoeksplan. Rapport 11207155-002-GEO-0001, versie 3.0, 11 juni 2021.
- [45] Busschers, F.S., Kasse, C., Van Balen, R.T., Vandenberghe, J., Cohen, K.M., Weerts, H.J.T., Wallinga, J., Johns, C., Cleveringa, P., Bunnik, F.P.M., 2007. Late Pleistocene evolution of the Rhine-Meuse system in the southern North Sea basin: imprints of climate change, sea-level oscillation and glacio-isostasy. Quaternary Science Reviews 26, 3216-3248.

- [46] Stouthamer, E., Cohen, K.M., Hoek, W.Z., 2020. De vorming van het land: geologie en geomorfologie. Perspectief Uitgevers, 8e geheel herziene druk, Utrecht.
- [47] FEMA (2011) *Filters for Embankment Dams - Best Practices for Design and Construction*. Federal Emergency Management Agency.
- [48] de Graauw, A., van der Meulen, T. and van der Does de Bye, M. (1983) *design criteria for granular filters*. Delft Hydraulics Laboratory - publication no. 287.
- [49] ICOLD (2017) *Internal Erosion of existing Dams, Levees and Dikes, and their Foundations*. International Commission on Large Dams - bulletin 164.
- [50] Lambe, T. W. and Whitman, R. . (1969) *Soil Mechanics*. John Wiley and Sons Inc.
- [51] Rönqvist, H. and Viklander, P. (2014) 'On the Kenney-Lau Approach to Internal Stability Evaluation of Soils', *Geomaterials*, 04(04), pp. 129–140. doi: 10.4236/gm.2014.44013.
- [52] USACE (2000) *Design and Construction of Levees*. U.S. Army Corps of Engineers - EM 1110-2-1913.
- [53] Beens, Uitgangspunten nota Boordvoorzieningen kanaal Almelo – De Haandrik, kenmerk 218015_NOT01
- [54] Clafis Ingenieurs. Betonnen damwand Hardenberg. Memo. 1900369-mem-01 v2 d.d. 8-07-2020
- [55] DECISIO, MKBA opwaardering kanaal Almelo – Coevorden, DECISIO/Anteagroup, 1 november 2018
- [56] Heuvelman Ibis, Baggeren kanaal Almelo de Haandrik, WK2010-28, tekeningen oktober 2012, 2013, 2014/2015, 2016
- [57] Provincie Overijssel, Provinciale vaarweg Almelo De Haandrik maximum vaarsnelheden (km 0,000-km 31,700), volgens de Scheepvaartverkeerswet, Besluit administratieve bepalingen scheepvaartverkeer, Provinciaal Blad 2012/0058229, 12 april 2012, <https://lokaleregelgeving.overheid.nl/CVDR345756>
- [58] Provincie Overijssel, V77 kanaal Almelo – Coevorden ged. Almelo – de Haandrik, Definitief Ontwerp, kanaal-upgrade 700 ton, Situatie baggerwerk, 700 ton enkel- en tweestrooksvakken, Tekeningen 2323-113 t/m -120
- [59] Provincie Overijssel, Vaststelling verkeersbesluit maximum diepgang en afmetingen vaartuigen Kanaal Almelo – De Haandrik, Gedeputeerde Staten kenmerk: 2013/0001582, d.d. 8 januari 2013, gepubliceerd op 1 juli 2016, <https://decentrale.regelgeving.overheid.nl/cvdr/XHTMLoutput/Actueel/Overijssel/CVDR601885.html>
- [60] Provincie Overijssel, Uitgevoerde werken bij de opwaardering van Kanaal Almelo – De Haandrik in de periode 2010-2018 met aanduiding van uitgevoerde werken, meldingen en kilometrering langs het kanaal, 31 mei 2018, file 180531_a activiteiten opwaardering en melding.pdf
- [61] Provincie Overijssel, Opwaardering Kanaal Almelo – De Haandrik 700 ton, memo, opgesteld D. Jansen, 20190117
- [62] Provinciale Staten Overijssel, Maatschappelijke kostenbatenanalyse opwaardering vaarweg Almelo-Coevorden, PS/2018/995
- [63] Provincie Overijssel, 4_3_1 Memo_scheepvaartgegevens_2020.PDF, Scheepvaarttellings in Overijssel, Provincie Overijssel, eenheid publieke dienstverlening, team onderzoek en advies, februari 2021
- [64] Provincie Overijssel, Prioriteit V77 boordvoorzieningen, Beleidsinformatie Provincie Overijssel, nr 200019_prio, 7 mei 2020, GIS KAART KADH incl beton.pdf
- [65] Royal Haskoning. Wachtplaatsvoorzieningen Kanaal Almelo- de Haandrik . Dimensionering kadeconstructie wachtplaatsen. 24 februari 2011. Definitief rapport. 9W0044.E1.
- [66] Royal HaskoningDHV, Stabiliteit boordvoorzieningen Almelo – de Haandrik, BD4245_R002_D0.1_Stabiliteit boordvoorzieningen AdH (incl. bijlagen).pdf, 11 maart 2015
- [67] Rijkswaterstaat dir. Bruggen werk A.3358, reg.nr. A.14631, brug Kloosterdijk, 1952

- [68] Rijkswaterstaat, Schutsluis Aadorp bij Almelo, bestekstekening RWS, SS 1127, blad 4, 1985
- [69] Rijkswaterstaat, Schutsluizen De Haandrik, bestekstekening RWS, SH-I-140, 1988
- [70] RWS ea, Ontwerp integraal waterbeheersplan voor Overijsselse Vecht, Meppelerdiep, Kanaal Almelo-De Haandrik, 1994-1998, Rijkswaterstaat Directie Overijssel (RWS, OV); Zuiveringschap West-Overijssel; Waterschap Regge en Dinkel, 11 maart 1994, https://puc.overheid.nl/rijkswaterstaat/doc/PUC_91863_31/
- [71] Rijkswaterstaat Oost Nederland, Provincie Overijssel, Provincie Drenthe, Waterschap Rijn en IJssel, Waterschap Drents Overijsselse Delta, Waterschap Vechtstromen, Waterakkoord Twenthekanalen en Overijsselsche Vecht, versie 19, april 2017
- [72] Rijkswaterstaat, Richtlijnen vaarwegen 2020, Rijkswaterstaat, <https://standaarden.rws.nl/>
- [73] Smolders, A., De geschiedenis van de Overijsselse kanalen, geschiedenis van de N.V. Overijsselsche Kanalisatie Maatschappij en haar rechtsopvolger de N.V. Maatschappij Overijsselsche Kanalen, Rijkswaterstaat uitgave 50
- [74] TAUW, Zoetwatervoorziening Oost Nederland, Project 4798994, oktober 2012
- [75] Tractatenblad van het Koninkrijk der Nederlanden, jaargang 1974 nr.62, Overeenkomst tussen het Koninkrijk der Nederlanden en het Land Nedersaksen inzake de Vecht en enige zijtakken; 's-Gravenhage, 4 april 1974, EDOP-#4957954-v1-04_Grenzvertrag_Vechte.pdf
- [76] Waterschap Vechtstromen, Kader Richtlijn Water 2022-2027, Achtergronddocument onderbouwing maatregelen, Status: ter bestuurlijke vaststelling, Oktober 2020
- [77] Waterstaatskaart, 1884, https://www.rijkswaterstaat.nl/apps/geoservices/geodata/dmc/waterstaatskaart/geogegevens/raster/eerste_editie/28%20Almelo-1.jpg
- [78] Waterstaatskaart, 1924, https://www.rijkswaterstaat.nl/apps/geoservices/geodata/dmc/waterstaatskaart/geogegevens/raster/edit_1bis/Blad_28%20Almelo-4.jpg
- [79] Well-Stam, D. van, Lindenaar, F., Kinderen, S. van, e.a., Risicomanagement voor projecten, De RISMAN-methode toegepast, 2013
- [80] Witteveen+Bos, Onderzoek omloopleiding sluis Aadorp, kenmerk 120670/20-010.776, 10 juli
- [81] Witteveen+Bos, Inventarisatie Oeverconstructies, kenmerk ZL505-70, 21 juni 2016
- [82] Witteveen+Bos. Uitgangspuntenrapport. Toetsing diverse oeverconstructies kanaal Almelo -de Haandrik . ZL505-73/16-014.285 d.d. 24 augustus 2016

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl

Bijlage F Damwanden langs kanaal Almelo de Haandrik

.

2019 / 2020	= recent vernieuwd		Wi+Bo ZL50		= toegevoegd door Deltares Mtn vanuit WiBo inventarisatie 2018							
Boordvoorzieningen aan oostzijde kanaal				daarbij soms wat moeten schipperen met de trajectlengte en diepte niet bekend zie dat document voor waterdiepte voor de wand tijdens inspectie 2018								
Van km	Tot km	Lengte m	Zijde	Materiaal	Type	Lengte plank m	Verankerd	Jaar van aanleg	Bron	Besteknummer	Opmerkingen	
0.008	0.483	475	Oost	Staal	DAW 5400	?	Ja		Wi+Bo ZL505-70			
0.483	0.542	59	Oost	Staal	Belval BZ 155	?	Ja		Wi+Bo ZL505-70			
0.542	2.984	2 442	Oost	Beton		4	Nee		Wi+Bo ZL505-70			
2.984	4.26	1 276	Oost	Staal	DWU 5400	?	Nee		Wi+Bo ZL505-70			
4.26	4.338	78	Oost	Staal	Belval BZ 128	?	Nee		Wi+Bo ZL505-70			
4.338	5.419	1 081	Oost	Staal	DWU 5400	?	Nee		Wi+Bo ZL505-70			
5.419	5.86	441	Oost	Staal	DWZ 225/6	?	Nee		Wi+Bo ZL505-70			
5.86	6.717	857	Oost	Staal	PAZ 5360	5.5	Nee	2005	As Built	MK-01-03	Waarde van / tot geschat van tekening	
6.717	7.027	310	Oost	Beton		4						
7.027	7.198	171	Oost	Staal	PAZ 5360	4	Nee	2005	As Built	MK-01-03	Waarde van / tot geschat van tekening	
7.198	7.730	532	Oost	Staal	AZ 18-700	8.5	Nee	2019 / 2020	As Built	WK-2017-25	Traject 4	
7.730	8.070	340	Oost	Staal	AZ 18-700	9	Nee	2019 / 2020	As Built	WK-2017-25	Traject 4	
8.070	8.360	290	Oost	Staal	AZ 18-700	8.5	Nee	2019 / 2020	As Built	WK-2017-25	Traject 4	
8.360	8.810	450	Oost	Staal	AZ 18-700	8	Nee	2019 / 2020	As Built	WK-2017-25	Traject 4	
8.810	8.912	102	Oost	Staal	PAZ 5360	5	Nee	2005	As Built	MK-01-03	Waarde van / tot geschat van tekening	
8.912	9.480	568	Oost	Staal	PAZ 5360	4	Nee	2005	As Built	MK-01-03	Waarde van / tot geschat van tekening	
9.480	9.925	445	Oost	Staal	PAZ 5360	5	Nee	2005	As Built	MK-01-03	Waarde van / tot geschat van tekening	
9.925	10.025	100	Oost	Staal	DWZ 245/6	7	Nee	1996 / 1997	Bestektekeningen	9503		
10.025	10.952	927	Oost	Staal	DWZ 245/6	8.5	Nee	1996 / 1997	Bestektekeningen	9503		
10.952	11.050	98	Oost	Staal	DWU 5500	?	Nee		Wi+Bo ZL505-70			
11.050	11.100	50	Oost	onbekend		?			Wi+Bo ZL505-70			
11.100	11.448	348	Oost	Staal	DWZ 245/6	8.5	Nee	1996 / 1997	Bestektekeningen	9503		
11.448	13.656	2 208	Oost	Beton	Beton	4	Ja	2005	As Built	MK-01-03	Waarde van / tot geschat, geen info lengte en dikte plank of ankers	
13.656	13.795	139	Oost	Staal	DWZ 245/6	8	Nee	1996 / 1997	Bestektekeningen	9503		
13.795	14.580	785	Oost	Beton	Beton	4	Ja	2005	As Built	MK-01-03	Waarde van / tot geschat, geen info lengte en dikte plank of ankers	
14.580	14.920	340	Oost	Beton	Beton	4	Ja	2005	As Built	MK-01-03	Waarde van / tot geschat, geen info lengte en dikte plank of ankers	
14.920	15.201	281	Oost	Staal	PAZ 5360	?	Nee		Wi+Bo ZL505-70			
15.201	15.789	588	Oost	Beton	Beton	4	Ja	2005	As Built	MK-01-03	Waarde van / tot geschat, geen info lengte en dikte plank of ankers	
15.789	15.860	71	Oost	Staal	DWZ 225/6	9	Nee	1996 / 1997	Bestektekeningen	9503		
15.860	15.934	74	Oost	Staal	DWZ 245/6	8	Nee	1996 / 1997	Bestektekeningen	9503		
15.934	16.070	136	Oost	Staal	DWZ 245/6	7	Ja	1996 / 1997	Bestektekeningen	9503	Geen info ankers	
16.070	17.450	1 380	Oost	Staal	PAZ 5360	4	Nee	2005	As Built	MK-01-03	Waarde van / tot geschat van tekening	
17.450	17.560	110	Oost	Staal	PAZ 5360	7.5	Nee	2005	As Built	MK-01-03	Waarde van / tot geschat van tekening	
17.560	17.615	55	Oost	onbekend		?			Wi+Bo ZL505-70			

Verzoeken tot aanleg van een westzijde kanaal														
Van km	Tot km	Lengte m	Zijde	Materiaal	Type	Lengte plank m	Verankerd	Jaar van aanleg	Bron	Besteknummer	Opmerkingen			
0	0.376	376	west	Staal	DWU 5400	?	Nee		Wi+Bo ZL505-70					
0.376	0.499	123	west	Staal	BZ 155	?	Ja		Wi+Bo ZL505-70					
0.499	0.606	107	west	Staal	DWU 5400	?	Nee		Wi+Bo ZL505-70					
0.606	0.798	192	west	Staal	DWZ 225/6	?	Nee		Wi+Bo ZL505-70					
0.798	2.105	1307	west	Stortsteen		nvt			Wi+Bo ZL505-70					
2.105	2.149	44	west	Beton		4	N		Wi+Bo ZL505-70					
2.149	3.007	858	west	Stortsteen		nvt			Wi+Bo ZL505-70					
3.007	3.600	593	West	Staal	DWZ 245/6	7	Nee	1996 / 1997	Bestekstekeningen	9503				
3.600	4.185	585	West	Staal	DWZ 245/6	7	Ja	1996 / 1997	Bestekstekeningen	9503	Geen info ankers			
4.185	4.267	82	West	Staal	DWZ 245/6	8	Nee	1996 / 1997	Bestekstekeningen	9503				
4.267	4.354	87	west	Staal	onbekend	?	N							
4.354	4.404	50	West	Staal	AZ 18-700	10	Nee	2019	As Built	WK-2017-25	Traject 2			
4.404	4.510	106	West	Staal	AZ 18-700	10.5	Nee	2019	As Built	WK-2017-25	Traject 2			
4.510	4.816	306	West	Staal	DWZ 245/6	7	Nee	Onbekend	Oprachtbrief en deel 2.2	Geen				
4.816	4.976	160	West	Staal	DWZ 245/6	7	N		Wi+Bo ZL505-70					
4.976	5.427	451	West	Staal	DWZ 245/6	?	N		Wi+Bo ZL505-70					
5.427	8.623	3.196	West	Beton		4	N		Wi+Bo ZL505-70					
8.623	8.678	55	West	Staal	PAU 2260	?	Ja		Wi+Bo ZL505-70					
8.678	8.761	83	West	Staal	DWZ 225/6	?	Ja		Wi+Bo ZL505-70					
8.761	8.8	39	West	Staal	PAU 2260	?	Ja		Wi+Bo ZL505-70					
8.8	10.198	1.398	West	Beton		4	N		Wi+Bo ZL505-70					
10.198	10.212	14	west	Staal	PAZ 4570	?	N		Wi+Bo ZL505-70					
10.212	10.262	50	west	Staal	DWU 5400	?	N		Wi+Bo ZL505-70					
10.262	10.310	48	West	Staal	AZ 18-700	9.5	Nee	2019 / 2020	As Built	WK-2017-25	Traject 6			
10.310	10.580	270	West	Staal	AZ 18-700	8.5	Nee	2019 / 2020	As Built	WK-2017-25	Traject 6			
10.580	10.830	250	West	Staal	AZ 18-700	9.5	Nee	2019 / 2020	As Built	WK-2017-25	Traject 6			
10.830	10.970	140	West	Staal	AZ 18-700	9	Nee	2019 / 2020	As Built	WK-2017-25	Traject 6			
10.970	11.054	84	West	Staal	AZ 18-700	8	Nee	2019 / 2020	As Built	WK-2017-25	Traject 6			
11.054	11.093	39	west	Onbekend			Ja		Wi+Bo ZL505-70					
11.093	11.448	355	west	Staal	DWU 5400		N		Wi+Bo ZL505-70					
11.448	12.457	1.009	West	Beton	Beton	4	Ja	2005	As Built	MK-01-03	Waarde van / tot geschat, geen info lengte en dikte plank of ankers			
12.457	12.719	262	west	Staal	PAU 2260	?	Ja		Wi+Bo ZL505-70					
12.719	12.901	182	west	Beton		4	N		Wi+Bo ZL505-70					
12.901	13.061	160	west	Staal	PAU 2260	?	Ja		Wi+Bo ZL505-70					
13.061	13.698	637	west	Beton		4	N		Wi+Bo ZL505-70					
13.675	13.829	154	West	Staal	DWZ 245/6	8	Nee	1996 / 1997	As Built	9503				
13.829	13.850	21	West	Staal	PAZ 5360	6	Nee	2005	As Built	MK-01-03	Waarde van / tot geschat van tekening			
13.850	14.607	757	West	Beton	Beton	4	Ja	2005	As Built	MK-01-03	Waarde van / tot geschat, geen info lengte en dikte plank of ankers			
14.607	14.636	29	west	Staal	PAU 2450	?	N		Wi+Bo ZL505-70					
14.636	14.664	28	west	Staal	PAZ 5360	?	N		Wi+Bo ZL505-70					
14.664	14.923	259	West	Beton	Beton	4	Ja	2005	As Built	MK-01-03	Waarde van / tot geschat, geen info lengte en dikte plank of ankers			
14.923	15.235	312	west	Staal	PAZ 5360	?	N		Wi+Bo ZL505-70					
15.235	15.368	133	West	Beton	Beton	4	Ja	2005	As Built	MK-01-03	Waarde van / tot geschat, geen info lengte en dikte plank of ankers			
15.368	15.378	10	West	Staal	PAU 2260	?	Ja	2011	As Built	WK-2011-09	Waarde van / tot geschat, geen info over ankers			
15.378	15.489	111	West	Staal	PAU 2260	?	N		Wi+Bo ZL505-70					
15.489	15.780	291	West	Beton	Beton	4	N		Wi+Bo ZL505-70					
15.780	15.890	110	West	Staal	PAU 2260	8	Ja	2011	As Built	WK-2011-09	Waarde van / tot geschat, geen info over ankers			
15.890	15.934	44	West	Staal	DWZ 245/6	8	Nee	1996 / 1997	As Built	9503				
15.980	16.190	210	West	Staal	PAZ 5360	7.5	Ja	2005	As Built	MK-01-03	Waarde van / tot geschat, geen info groutankers. Is WP Kloosterdijk			
16.190	17.570	1.380	West	Beton	Beton	4	N		Wi+Bo ZL505-70					
17.570	17.626	56	West	Staal	onbekend	?	N		Wi+Bo ZL505-70					
17.626	18.949	1.323	West	Beton	Beton	4	N		Wi+Bo ZL505-70					
18.949	19.690	741	West	Staal	PAZ 5360	4.75	Nee	2005	As Built	MK-01-03	Waarde van / tot geschat van tekening			
19.438	19.471	33	West	Staal	PAU 2260	7.5	Ja	2011	As Built	WK-2011-09	Van / tot geschat, klapankers			
19.471	19.554	83	West	Staal	PAU 2260	7.5	Nee	2011	As Built	WK-2011-09	Wachtplaats 6, van / tot geschat			
19.554	19.579	25	West	Staal	PAU 2260	7.5	Ja	2011	As Built	WK-2011-09	Wachtplaats 6, van / tot geschat, klapankers			
19.579	19.676	97	West	Staal	PAU 2260	7	Ja	2011	As Built	WK-2011-09	Van / tot geschat, klapankers			
19.676	19.845	169	West	Staal	De Wendel 2245/6	8	Ja	2011	As Built	WK-2011-09	Waarde van tot geschat			
20.050	22.015	1.965	West	Staal	PAZ 5360	5	Nee	2005	As Built	MK-01-03	Wachtplaats 7, waarde van / tot geschat, klapankers rond 32 mm, lang15			
22.015	22.192	177	West	Beton	Beton	4	N		Wi+Bo ZL505-70					
22.192	22.260	68	West	Staal	PAZ 5460	7.5	Nee	2019 / 2020	As Built	WK-2017-25	Traject 17, let op is natuurvriendelijke oever			
22.260	22.340	80	West	Staal	PAZ 5460	7.5	Nee	2019 / 2020	As Built	WK-2017-25	Traject 17, let op is natuurvriendelijke oever			
22.340	22.480	140	West	Staal	PAZ 5460	8	Nee	2019 / 2020	As Built	WK-2017-25	Traject 17, let op is natuurvriendelijke oever			
22.480	22.540	60	West	Staal	PAZ 5460	7	Nee	2019 / 2020	As Built	WK-2017-25	Traject 17, let op is natuurvriendelijke oever			
22.540	22.780	240	West	Staal	PAZ 5460	7.5	Nee	2019 / 2020	As Built	WK-2017-25	Traject 17, let op is natuurvriendelijke oever			
22.810	22.900	90	West	Staal	PAZ 5460	8	Nee	2019 / 2020	As Built	WK-2017-25	Traject 17, let op is natuurvriendelijke oever			
22.900	23.040	140	West	Staal	PAZ 5460	8	Nee	2019 / 2020	As Built	WK-2017-25	Traject 17, let op is natuurvriendelijke oever			
23.040	23.078	38	West	Staal	AZ 12-770	9	Nee	2020	As Built	WK-2017-25	Morssinkhof			
23.078	23.121	43	West	Staal	AZ 12-770	10	Ja	2020	As Built	WK-2017-25	Morssinkhof, rond 42,4 x 11,0 mm, groutankers lang 18 m			
23.121	23.252	131	West	Staal	PAU 2260	7	Ja		Wi+Bo ZL505-70					
23.252	23.410	158	West	Staal	PAU 2260	7	Ja	2011	As Built	WK-2011-09	Ligplaats 1, klapankers rond 20 mm, lang 12 m, waarde van / tot geschat			
23.410	24.449	1.039	West	Beton	Beton	4	N		Wi+Bo ZL505-70					
24.449	24.724	275	West	Staal	PAZ 5360	7.75	Ja	Onbekend	As Built	WK-2011-09	Bestaande constructie verankerd, klapanker rond 16 mm, lang 6 m			
24.724	24.823	99	West	Staal	PAZ 5360	7.75	Ja	Onbekend	As Built	WK-2011-09	Bestaande constructie verankerd, klapanker rond 20 mm, lang 6 m			
24.823	27.804	2.981	west	Beton	Beton	4	Ja	2005	As Built	MK-01-03	Waarde van / tot geschat, geen info lengte en dikte plank of ankers			
27.804	27.875	71	west	Staal	PAZ 5360	8								
27.875	28.020	145	West	Staal	PAZ 5460	8	Nee	2020	As Built	WK-2017-25	Traject 23			

Trajecten kadeverbetering Provincie (bron: Ontwerpnoot Beens)

traject	Locatie	zijde	Lengte traject geschat	Prioriteit 1=hoog	Damwand	Diepte	Anker
T01	Aadorp	O	100	P08			
T02							
T03	Vriezenveen	O	300	P14			
T04							
T05	Vroomshoop	W	1000	P01			
T06							
T07	Zd v Geerdijk	O	1500	P05			
T08	Zd v Beerzerveld	W	1500	P04			
T09	Zd v Beerzerveld	O	200	P16			
T10	Gouden Ploeg	O	1800	P03			
T11	Bergentheim	O	500	P11			
T12	Bergentheim	W	500	P02			
T13	Bergentheim	W	450	P07			
T14	Bergentheim	O	2300	P12			
T15	Bergentheim	W	1400	P08			
T16							
T17							
T18							
T19	Hardenberg	O	800	P18			
T20	Hardenberg	O	150	P17			
T21	Hardenberg	O	750	P13			
T22	Hardenberg	W	250	P06			
T23							
T24	Gramsbergen	W	150	P10			
T25							
T26	De Haandrik	O	150	P15			

Bijlage G Samenvatting gebiedsbreed schade onderzoek (Deltares 2020)

Deze bijlage bevat een samenvatting van het gebiedsbreed schade-onderzoek dat Deltares in 2019 en 2020 heeft uitgevoerd. Deltares heeft onderzocht wat de relatie op gebiedsniveau is tussen de schadebeelden en de uitvoering van de werkzaamheden aan het kanaal.

Het onderzoek naar de schade oorzaken spitste zich toe op een vijftal hoofdonderdelen:

- Het vaststellen van schadebeelden aan de panden.
- Stijging van de grondwaterstand door de baggerwerkzaamheden.
- Trillingen door de uitvoering van diverse werkzaamheden (installatie damwanden en ankers).
- De invloed van andere trillingsbronnen zoals het (on)gecontroleerd sluiten van bruggen, wegverkeer en scheepvaart.
- Ongelijkmatige zettingen als gevolg van de werkzaamheden, waaronder het baggeren.

Deze bijlage wordt gegeven ter informatie. Inzichten en conclusies zoals gegeven in deze bijlage kunnen door het huidige onderzoek zijn achterhaald.

Inleiding

Tussen 2011 en 2016 zijn er werkzaamheden uitgevoerd om het kanaal Almelo - de Haandrik geschikt te maken voor grotere scheepvaart. Omwonenden hebben aangegeven dat er sinds de uitvoering van deze werkzaamheden schade aan hun woningen en percelen is opgetreden. De Provincie Overijssel heeft als gevolg van de schademeldingen Deltares gevraagd om een onderzoek in te stellen naar de relatie tussen deze schade en de werkzaamheden. De Provincie heeft TNO gevraagd een onderzoek te doen naar de schadebeelden in 29 panden.

Deltares heeft onderzocht wat de relatie op gebiedsniveau is tussen de schadebeelden en de uitvoering van de werkzaamheden aan het kanaal. De werkzaamheden aan het kanaal omvatten baggeren, het inbrengen van damwanden en ankers en het vervangen van bruggen. Het onderzoek naar de schade oorzaken spitst zich toe op een vijftal hoofdonderdelen:

- Het vaststellen van schadebeelden aan de panden.
- Stijging van de grondwaterstand door de baggerwerkzaamheden.
- Trillingen door de uitvoering van diverse werkzaamheden (installatie damwanden en ankers).
- De invloed van andere trillingsbronnen zoals het (on)gecontroleerd sluiten van bruggen, wegverkeer en scheepvaart.
- Ongelijkmatige zettingen als gevolg van de werkzaamheden, waaronder het baggeren.

Aanpak

Het onderzoek is gebaseerd op de inventarisatie van de schadebeelden, analyse van beschikbare of uitgevoerde trillings-, en grondwaterstandsmetingen en een set gegevens van de Provincie Overijssel. Op basis hiervan zijn berekeningen en analyses uitgevoerd om de relatie te onderzoeken tussen de geconstateerde schadebeelden en de uitgevoerde werkzaamheden. Het onderzoek spitst zich toe op een aantal oorzaken die mede zijn geïdentificeerd in nauw overleg met de omwonenden. Het onderzoek is uitgevoerd tussen 15 maart 2019 en 17 maart 2020. Het onderzoek baseert zich op gegevens die tot 9 maart 2020 zijn ingewonnen. Het onderzoek gaat in op de oorzaak van de schade in het gehele gebied langs het kanaal. Het gaat overeenkomstig de opdracht, niet in op de gevolgen voor iedere woningeigenaar afzonderlijk. Het rapport geeft per mogelijke oorzaak conclusies over de relatie tussen de werkzaamheden en de geconstateerde schadebeelden. Na een samenvatting van de schadebeelden worden hierna de belangrijkste conclusies per oorzaak weergegeven. Een technische samenvatting verwoordt de conclusies meer in detail.

Vastgestelde schadebeelden

TNO heeft het onderzoek naar de schadebeelden uitgevoerd op 29 panden in Vroomshoop en omgeving. Het onderzoek omvat een inventarisatie van de scheuren van de panden na de werkzaamheden. Voor sommige panden is historische informatie bekend van vóór de werkzaamheden. Uit het TNO onderzoek blijkt dat:

- Een deel van de vastgestelde schade waarschijnlijk gerelateerd is aan trillingen.
- Een deel van de schade waarschijnlijk is ontstaan door ongelijkmatige zettingen in de ondergrond.
- In nagenoeg alle panden ook scheuren aanwezig zijn die niet gerelateerd kunnen worden aan werkzaamheden in en rond het kanaal.

Relatie tussen werkzaamheden en schadebeelden

Het baggeren van de sliblaag op de bodem van het kanaal kan in beginsel leiden tot een tijdelijke stijging van de grondwaterstand, die leidt tot ongelijkmatige zettingen van de ondergrond en wateroverlast.

Stijging van de grondwaterstand door de baggerwerkzaamheden

Een stijging van de grondwaterstand als gevolg van de uitgevoerde baggerwerkzaamheden tussen Almelo en De Haandrik kan niet in de grondwaterstandmetingen in 2011 en 2012 worden teruggevonden. Om de relatie tussen de stijging van de grondwaterstand en de baggerwerkzaamheden nader te onderzoeken zijn, vanwege de beperkte beschikbaarheid van deze metingen, daarom ook grondwaterberekeningen uitgevoerd. Uit de combinatie van grondwaterberekeningen en metingen blijkt dat de grondwaterstand lokaal en kortdurend gestegen kan zijn tot het niveau dat dit een risico op schade geeft.

Ongelijkmatige zettingen door de baggerwerkzaamheden

Er zijn berekeningen gemaakt naar de invloed van de grondwaterstandverhoging op ongelijkmatige zettingen van een fundering op poeren. Uit de berekeningen blijkt dat een relevante stijging van de grondwaterstand bij zo'n fundering in bepaalde gevallen kan leiden tot zodanige ongelijkmatige zakkingen dat schade waarschijnlijk is. Ook blijkt dat panden met een strokenfundering niet gevoelig zijn voor verhoging van de grondwaterstand en dat er voor deze panden geen verband is tussen het baggeren en de waargenomen schade.

Het werkelijke belastingniveau en draagvermogen van de poeren en de stijging van de grondwaterstand dienen per pand te worden vastgesteld om in geval van geconstateerde schade de relatie met de werkzaamheden vast te stellen. Het is niet mogelijk om een gebiedsbrede relatie te geven tussen de stijging van de grondwaterstand door het baggeren en de ongelijkmatige zettingen.

Wateroverlast door de baggerwerkzaamheden

Door het baggeren van de sliblaag op de bodem van het kanaal kan bij alle panden in de directe omgeving van het kanaal een kleine stijging van de grondwaterstand zijn voorgekomen gedurende een periode van hooguit enkele dagen. In natte perioden kan deze stijging geleid hebben tot een tijdelijke toename van de wateroverlast. Er zijn geen schademeldingen die wijzen op opbarsten van de keldervloer en schade aan de afdichting van de kruipruimte.

Vervorming van damwanden als gevolg van de baggerwerkzaamheden

Bij het baggeren kan het weghalen van teveel materiaal aan de voet van de damwanden in beginsel leiden tot vervormingen van deze damwanden. Leckage door spleten tussen de damwandplanken van een vervormde damwand kan leiden tot een stijging van de grondwaterstand ter plaatse van de panden. De stijging is er zolang het lek niet wordt gedicht. De relaties tussen een stijging van het grondwater en ongelijkmatige zettingen en wateroverlast zijn hiervoor beschreven. Andere schademechanismen door vervorming van de damwand zijn niet waarschijnlijk.

Trillingen

Uit metingen blijkt dat trillingen van zwaar wegverkeer voelbaar zijn in de panden maar dat het niveau van de trillingen volgens de gangbare richtlijn acceptabel wordt geacht. Daar waar metingen zijn uitgevoerd blijkt niet dat er sprake is van overschrijding van de grenswaarden voor schade volgens de vigerende richtlijn.

Het uitgevoerde onderzoek toont aan dat de trillingen als gevolg van scheepvaart klein zijn. Uit de meetcampagne blijkt dat de grenswaarde voor schade nergens is overschreden. Het is niet waarschijnlijk dat er schade is veroorzaakt door de trillingen als gevolg van de scheepvaart.

Er is een beoordeling uitgevoerd van mogelijke schade door de brugsluitingen tijdens het niet goed functioneren van het besturingssysteem. De beoordeling geeft aan dat de trillingen door ongecontroleerde brugsluitingen waarschijnlijk geen schade hebben veroorzaakt. De pandopnamen geven aan dat er geen schade als gevolg van trillingen is waargenomen.

Tijdens het installeren van de damwanden en boordvoorziening in 2011 en 2012 zijn metingen uitgevoerd. Hieruit blijkt dat tijdens het installeren van de damwanden en de ankers de grenswaarden uit de SBR richtlijn overschreden zijn, waardoor bij een deel van de nabijgelegen panden schade zal

zijn ontstaan. Dit komt overeen met de constatering van TNO dat een deel van de gevonden schade waarschijnlijk is te relateren aan trillingen.

Ongelijkmatige zettingen door installatie van klapankers

Ongeveer 50 panden in het gebied staan in het invloedsgebied van de klapankers die zijn gebruikt om damwanden te verankeren. De kans dat daadwerkelijk schade is opgetreden door zakking als gevolg van installatie van deze ankers is reëel, maar dient per pand te worden vastgesteld.

Ongelijkmatige zettingen door werkzaamheden aan de wegen

Van werkzaamheden aan de N750 en de overige parallelwegen is het niet waarschijnlijk dat deze schade hebben veroorzaakt aan de fundering van de panden.

Verzakking van de kruipruimtevloer

Verzakking van de kruipruimtevloer is waarschijnlijk het gevolg van het oxideren van veen. Dit is een natuurlijk proces en heeft geen relatie tot de werkzaamheden aan het kanaal.

Gebiedsbrede consequenties

Uit het onderzoek blijkt dat relaties gelegd kunnen worden tussen de uitgevoerde werkzaamheden aan het kanaal en de geconstateerde schadebeelden. Specifieke omstandigheden zijn echter bepalend voor de lokale relatie tussen de mogelijke oorzaken en schades. Het is niet mogelijk om met de resultaten van dit onderzoek voor alle schadeoorzaken een één-op-één vertaling te maken naar de schade per pand, en deze schade te specificeren.

Technische verdieping

Vastgestelde schadebeelden

De opname van de schadebeelden heeft bestaan uit een inventarisatie van aanwezige scheuren, lintvoegmetingen en archiefonderzoek. TNO heeft op basis hiervan een analyse gemaakt van de oorzaken van de scheuren in de panden. In totaal zijn 29 panden onderzocht. De analyse van de relatie met de werkzaamheden is uitgevoerd op 26 van de 29 panden, zijnde de panden die representatief zijn voor woningen. Bij enkele panden is historische informatie over de scheuren beschikbaar van vóór het baggeren.

Uit de onderverdeling van de hoofdoorzaken van de scheuren blijkt:

- Voor 17% van het totaal aantal scheuren, verdeeld over 6 van de 26 panden, geldt dat die scheuren waarschijnlijk gerelateerd zijn aan trillingen.
- Voor 39% van het totaal aantal scheuren, verdeeld over 20 van de 26 panden, geldt dat die scheuren waarschijnlijk zijn ontstaan door ongelijkmatige zettingen in de ondergrond.
- 2 van de 26 panden vertonen scheuren die waarschijnlijk zijn gerelateerd aan trillingen én scheuren die waarschijnlijk zijn ontstaan door ongelijkmatige zettingen in de ondergrond.
- In nagenoeg alle panden is sprake van scheuren die waarschijnlijk niet gerelateerd kunnen worden aan effecten vanuit de ondergrond en daarmee niet gerelateerd kunnen worden aan werkzaamheden in en rond het kanaal. In totaal geldt dit voor 44% van het totaal aantal scheuren.
- In 2 van de 26 panden is er alleen sprake van scheuren die waarschijnlijk niet gerelateerd kunnen worden aan effecten vanuit de ondergrond en daarmee niet gerelateerd kunnen worden aan werkzaamheden in en rond het kanaal.

Bij 10 van de 20 panden met zettingsscheuren is een deel van de scheuren gerelateerd aan uitbreidingen / verbouwingen van het pand. Bij 2 van die 10 panden zijn alle zettingsscheuren waarschijnlijk gerelateerd aan uitbreidingen / verbouwingen.

De panden met een paalfundering of volledige onderkeldering hebben geen of zeer weinig scheuren die mogelijk zijn veroorzaakt door ongelijkmatige zettingen. Zowel de panden met een poerenfundering als de panden met een strokenfundering hebben een groot aantal scheuren die mogelijk zijn veroorzaakt door ongelijkmatige zettingen. Dit geldt ook voor de panden waarvan het funderingstype niet bekend is. Eén pand met een gecombineerde poeren- en strokenfundering heeft geen scheuren die mogelijk zijn veroorzaakt door ongelijkmatige zettingen.

Bij de panden met een significante hoeveelheid zettingsscheuren, geven de lintvoegmetingen aan dat er hoogteverschillen door ongelijkmatige zettingen zijn, variërend van ordegrootte 10 mm over een afstand van 1 à 2 m tot ordegrootte 70 mm over 5 à 10 m.

Relatie tussen werkzaamheden en schadebeelden

Stijging van de grondwaterstand door de baggerwerkzaamheden

Het onderzoek laat geen stijging van de grondwaterstand over langere periodes zien die te wijten zijn aan het weghalen van de kanaalbodemweerstand door baggeren. De verhoging valt te verklaren door neerslag. Dit is zowel af te leiden uit grondwaterstandmetingen uitgevoerd langs het kanaal tijdens de baggerwerkzaamheden, als uit metingen van regionale meetnetten. Dat betekent dat een stijging van de grondwaterstand door het weghalen van de kanaalbodemweerstand door baggeren niet uit de metingen kan worden afgeleid. Het is mogelijk dat de metingen niet volledig representatief zijn voor het gehele gebied, of dat door de meetfrequentie, een keer per dag, een relatief kleine, kortstondige stijging niet is gemeten. Om deze reden zijn grondwaterberekeningen gemaakt om eventuele effecten te onderzoeken. Dit is gedaan voor een locatie bij een prioriteitspand waar voldoende meetpunten aanwezig waren om het model te kalibreren.

De berekeningen benadrukken dat een aanzienlijke grondwaterstijging ter hoogte van de peilbuizen in de metingen zichtbaar had moeten zijn. In de gemeten stijghoogte blijkt het effect van de baggerwerkzaamheden bij het prioriteitspand niet waar te nemen. Dat kan erop duiden dat de bodem van het kanaal na baggeren ter hoogte van die locaties weer zo snel is dichtgeslagen dat er geen meetbare stijging van de grondwaterstand is opgetreden, in ieder geval geen langdurige stijging, of dat de meetfrequentie gedurende deze periode (één meting per dag) te kort is om een tijdelijke stijging van de grondwaterstand op deze locaties aan te tonen. Beide mogelijkheden wijzen in de richting van een zeer tijdelijke stijging van beperkte grootte, die niet valt te onderscheiden van stijgingen die zijn veroorzaakt door neerslag. Ter plekke van de doorgerekende locatie lijkt een stijging van de grondwaterstand als gevolg van het open maken van de kanaalbodem door baggeren, die op 25 m afstand van het kanaal groter is dan ongeveer twee decimeter (en een dubbel zo grote stijging op 8 m van het kanaal) daarom zeer onwaarschijnlijk. Zeker gezien de afwezigheid van een dergelijk signaal in de metingen.

Het is niet uit te sluiten dat baggeren van andere delen van het kanaal, waar mogelijk andere bodem- en drainagecondities gelden of waar een groter traject per dag gebaggerd is, heeft geleid tot iets grotere stijgingen van de grondwaterstand. Op basis van de resultaten van de uitgevoerde gevoeligheidsanalyse kan worden geconcludeerd dat stijging van de grondwaterstand door het weghalen van de kanaalbodemweerstand door baggeren op andere locaties langs het kanaal maximaal 50% groter kan zijn geweest dan bij het prioriteitspand, tot circa 35 cm.

Er is slechts beperkt vastgelegd waar wanneer gebaggerd is. De gemiddelde baggersnelheid voor de periode 2011 en 2012 bedraagt circa 40 m per dag. De grootste gemiddelde snelheid bedraagt circa 100 m per dag voor de winter van 2014 - 2015. Hoe groter de lengte waarover de sliblaag in een korte tijd verwijderd is, hoe groter de mogelijke stijging. De stijging is het grootst bij de panden die zich het dichtste bij het kanaal bevinden, en waar in de winter met grote snelheid gebaggerd is.

Stijging van de grondwaterstand als gevolg van het weghalen van de kanaalbodemweerstand door baggeren kan alleen tot ongelijkmatige zetting leiden als de grondwaterstand een hoogte bereikt die nog niet eerder is bereikt door bijvoorbeeld neerslag. Dit betekent dat slechts gedurende een beperkte periode van baggerwerkzaamheden en een beperkt aantal locaties de grondwaterstanden mogelijk zijn gestegen tot een niveau waarbij het risico op schade aan funderingen bestaat.

Een lekkende damwand heeft een permanente grondwaterstijging tot gevolg, maar over een veel kleiner gebied direct in de omgeving van het lek. Uit oriënterende modelberekeningen met een lekkage over een breedte van een decimeter blijkt dat de optredende stijging in de orde van enkele decimeters kan liggen.

Doordat de monitoring van grondwaterstanden tijdens het baggeren beperkt was en met de huidige gegevens onbekend is wanneer nabij een specifiek pand is gebaggerd, is het niet mogelijk om de conclusies op pandniveau specifieker te maken.

Ongelijkmatige zettingen door de baggerwerkzaamheden

Er zijn berekeningen gemaakt naar de invloed van de grondwaterstandverhoging door het baggeren op ongelijkmatige zettingen van een fundering op poeren. Uit de berekeningen blijkt dat een stijging van de grondwaterstand bij zo'n fundering in bepaalde gevallen kan leiden tot zodanige ongelijkmatige zakkingen dat schade waarschijnlijk is. Ook blijkt dat panden met een strokenfundering niet gevoelig zijn voor verhoging van de grondwaterstand en dat er voor deze panden geen verband is tussen het baggeren en de waargenomen schade.

De kans op schade door het baggeren is afhankelijk van de periode waarin is gebaggerd ter plaatse van de panden. Schade is alleen mogelijk als de grondwaterstand een hoogte bereikt die nog niet eerder is bereikt door bijvoorbeeld neerslag. Als er is gebaggerd in een droge periode is een relatie tussen het baggeren en de waargenomen schade daarom niet waarschijnlijk.

Als in de nabijheid van de panden is gebaggerd in een natte periode is de kans op schade door het baggeren afhankelijk van het funderingstype, de nabijheid van een vervormde damwand met lekkage, de afstand van het pand tot het kanaal. Schade is alleen aannemelijk bij een fundering op poeren, en

alleen in geval de marge tussen de belasting op de poeren en de draagkracht van de ondergrond onder de poeren gering is.

De kans op schade dient per pand te worden vastgesteld aan de hand van de daadwerkelijke marge en de mogelijke maximale opgetreden grondwaterstandsverhoging tijdens het baggeren. Het is niet mogelijk om een gebiedsbrede relatie te geven tussen de stijging van de grondwaterstand en de verschilzakking.

Wateroverlast door de baggerwerkzaamheden

Door het baggeren van de sliblaag op de bodem van het kanaal kan bij alle panden in de directe omgeving van het kanaal een kleine stijging van de grondwaterstand zijn voorgekomen gedurende een periode van hooguit enkele dagen. In natte perioden kan deze stijging geleid hebben tot een tijdelijke toename van de wateroverlast.

Er zijn geen schademeldingen die wijzen op opbarsten van de keldervloer en schade aan de afdichting van de kruipruimte.

Vervorming van damwanden als gevolg van de baggerwerkzaamheden

Veel van de betonnen damwanden lijken te zijn vervormd en verschoven richting het kanaal. Het is mogelijk dat bij het baggeren teveel materiaal aan de voet van de damwanden is weggehaald waardoor deze vervormingen van de damwanden zijn ontstaan. Door het ontstaan van spleten tussen de planken van een vervormde damwand kan een stijging van de grondwaterstand ter plaatse van de panden optreden. De stijging is er zolang het lek niet wordt gedicht. De gevolgen van deze grondwaterstandsverhoging voor ongelijkmatige zettingen van de funderingen van de panden en wateroverlast zijn vergelijkbaar met de gevolgen van grondwaterstandsverhoging door het weghalen van de afsluitende sliblaag op de bodem van het kanaal en zijn hiervoor beschreven.

Andere schademechanismen door vervorming van de damwand zijn niet waarschijnlijk.

Trillingen

Rondom het kanaal Almelo – de Haandrik zijn in 2019 en 2020 verschillende trillingsmetingen uitgevoerd. De metingen zijn beschreven en de resultaten geanalyseerd. In totaal zijn in zeven panden metingen verricht om de kans op schade te beoordelen; in vier panden zijn metingen verricht om na te gaan of de trillingen hinderlijk zijn.

Volgens de SBR richtlijn A is er geen schade aan de panden te verwachten als gevolg van de scheepvaart. In de beschouwde panden is ook de kans op schade door wegverkeer klein. De trillingen van het wegverkeer kunnen wel voelbaar zijn. In geen van de panden tonen de metingen een overschrijding van de streefwaarden voor hinder van de SBR richtlijn B. Deze conclusies worden bevestigd door de waarnemingen tot en met 8 maart 2020.

Op basis van de trillingsmetingen tijdens het installeren van de damwanden en boordvoorzieningen in 2011 en 2012 blijkt dat de grenswaarden uit de SBR richtlijn A overschreden zijn. Hierdoor kan schade zijn opgetreden aan nabijgelegen panden.

In 2019 zijn metingen uitgevoerd bij vergelijkbare installatie van damwanden. Uit de metingen is een empirische curve voor de 95% bovengrens van de trillingssnelheid afgeleid. Het blijkt dat de trillingssnelheid bij bebouwing gelegen op een afstand van minder dan 45 m van het kanaal de grenswaarde van de richtlijn overschrijdt. Dit betekent dat er bij deze panden een kans op schade is geweest die varieert van 6% op 10 m afstand tot 1% op 45 m afstand. Pandopnamen zijn noodzakelijk om aan te geven welke panden wel of geen schade hebben ondervonden door de werkzaamheden.

Er is een beoordeling uitgevoerd van mogelijke schade door de brugsluitingen tijdens het niet goed functioneren van het besturingssysteem van de Puntbrug. De beoordeling geeft aan dat de trillingen door ongecontroleerde brugsluitingen waarschijnlijk geen schade hebben veroorzaakt. De pandopnamen geven aan dat er geen schade als gevolg van trillingen is waargenomen.

Ongelijkmatige zettingen door installatie van klapankers

Het installeren van klapankers onder een poerenfundering kan leiden tot ongelijkmatige zettingen. Ongeveer 50 panden in het gebied staan nabij of in de zakkingstrog van de klapankers. De schadeverwachting voor deze panden is afhankelijk van het type ankers, de precieze locatie van de ankers en het type fundering. Een stroken fundering zal anders reageren op de zakking, maar ook bij dat type is schade als gevolg van het installeren van de ankers niet uit te sluiten. De kans dat daadwerkelijk schade is opgetreden door zakking als gevolg van installatie van deze ankers is reëel, maar dient per pand te worden vastgesteld.

Ongelijkmatige zettingen door werkzaamheden aan de wegen

De zettingen van de funderingen van de panden als gevolg werkzaamheden aan de N750 en de overige parallelwegen langs het kanaal zijn naar verwachting zodanig klein dat het niet waarschijnlijk is dat deze schade hebben veroorzaakt aan de fundering van de panden.

Verzakking van de kruipruimtevloer

Verzakking van de kruipruimtevloer is waarschijnlijk het gevolg van het oxideren van veen. Dit is een natuurlijk proces en heeft geen relatie tot de werkzaamheden aan het kanaal.

Gebiedsbrede consequenties

Uit het onderzoek blijkt dat relaties gelegd kunnen worden tussen de uitgevoerde werkzaamheden aan het kanaal en de geconstateerde schadebeelden. Specifieke omstandigheden zijn echter bepalend voor de lokale relatie tussen de mogelijke oorzaken en schades. Het is niet mogelijk om met de resultaten van dit onderzoek voor alle schadeoorzaken een één-op-één vertaling te maken naar de schade per pand en deze schade te specificeren.

H Draagkracht stroken en poeren en beïnvloeding ervan door grondwaterstand

H.1 Invloed van grondwaterstandverhoging op de draagkracht

Een stijging van het grondwaterpeil zal leiden tot een afname van het draagvermogen van de fundering van de panden als gevolg van afnemende korrelspanningen.

Voor een fundering geldt dat een vanuit de historie bereikte hoge grondwaterstand al heeft geleid tot een tijdelijke afname. De gevolgen daarvan, een opgetreden zakking van de fundering, zal op dat moment dan zijn opgetreden.

Pas wanneer de grondwaterstand hoger wordt dan daarvoor ooit opgetreden zal dit mechanisme verder optreden. Uitgegaan wordt van dat de belasting ongeveer gelijk is gebleven.

Om het effect van een verhoging van de grondwaterstand op een fundering te beoordelen zijn berekeningen uitgevoerd waarbij de volgende aspecten zijn gevarieerd:

- Opbouw zand, veen, zand
- Strook fundering 0,5 m en 1 m diep
- Poer fundering 1 m diep of 2,5 m diep
- Poer afmetingen 0,3*0,3 m en 0,5*0,5 m, poerafstand 2,5 m
- Grondwaterstand van NAP + 7,6 m tot NAP + 8,4 m
- Belasting op fundering 30 kN/m' (1 laags gebouw) of 50 kN/m' (2 laagsgebouw)

Het doel van de berekeningen is een indruk te krijgen van de draagkracht t.o.v. de belasting bij een toenemende grondwaterstand. Bij een factor >1 is de draagkracht groter dan de belasting.

De draagkracht is bepaald volgens de analytische methode vermeld in de nederlandse geotechnische norm NEN 9997-1+C2:2017. Er wordt uitgegaan van verwachtingswaarden, d.w.z. alle partiele factoren zijn gelijk aan 1,0.

Op basis van de huidige inzichten wordt een grondwaterdynamiek verwacht van ca. NAP + 7,2 m tot NAP + 8,0 m (bron: deltares 2020). Een gemiddelde volgt dan van NAP + 7,6 m. De grondwaterstand wordt gevarieerd tot waarde van NAP +8,0 m en een verhoging daarop van 0,2 resp. 0,4 m.

De berekeningen zijn uitgevoerd met D-Foundations v.19.1.

H.2 Laagopbouw en materiaaleigenschappen

Uitgegaan wordt van een maaiveld van NAP +9,8 m. De grondopbouw wordt gevarieerd volgens tabel H. 1.

Tabel H.1 Variatie grondopbouw

Variatie	A1	A2	B	C	Vol.gew.	Wrijviingshoek
	M tov NAP	M tov NAP	M tov NAP	M tov NAP	kN/m3	graden
zand	+9.8	+9.8	+9.8	+9.8	17/19	30
Veen	+8.3	+8.3	+7.8	+7.3	10/10	15
Zand	+7.8	+7.3	+7.3	+7.05	18/20	32.5

Bij sommige panden met een poer fundering is een kruipruimte aanwezig. Deze wordt verondersteld tot 0,8 m onder peil, ofwel ca. 0,6 m onder maaiveld aanwezig te zijn. In de huidige situatie is het maaiveld van de kruipruimte gezakt, verondersteld wordt dat het zelfde gewicht van de grond dan nog aanwezig is.

Het diepe zand kan soms siltig zijn. Er is voor de diepe poeren gevarieerd voor de samenstelling van het diepe zand volgens tabel 2.

Tabel H.2 Variatie samenstelling diepe zand

Variatie	A2	A2silt	Vol.gew.	Wrijviingshoek
	M tov NAP	M tov NAP	kN/m ³	graden
zand	+9.8	+9.8	17/19	30
Veen	+8.3	+8.3	10/10	15
Zand/silt	n.v.t.	+7.3	18/20	27.5
Zand	+7.3	+7.05	18/20	32.5

H.3 Grondwaterstanden

De waarden in Tabel A.2 zijn gehanteerd t.b.v. de berekingen.

Tabel H.3 Grondwaterstanden

Situatie	Grondwaterstand [m NAP]
Gemiddeld (Zomer / winter)	+7,60
Maximaal (Winter)	+8,00
Winter en verhoging door baggeren	+8,20 / +8,4

H.4 Fundering

Uitgangspunten strokenfundering:

- Breedte 0,4 m
- Funderingsdiepte NAP +9.3 m en NAP +8.8 m

Uitgangspunten poerenfundering:

- Afmetingen 0,5*0,5 m² en 0,3*0,3 m² en 0,4*0,8 m²
- Funderingsdiepte NAP +8.8 m en NAP 7.3 m
- Hart-op-hartafstand van 2,5 m of 1,25 m.

H.5 Belasting

De belasting is gebaseerd op een inschatting van het gewicht van de gebouwen. In tabel H.4 zijn de belastingen gegeven.

Tabel H.4 Belastingen

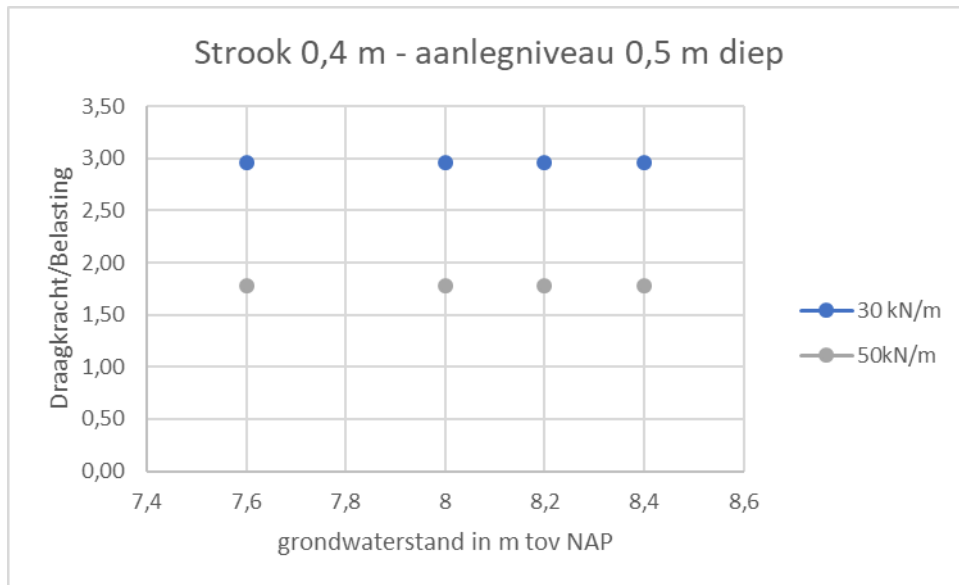
funderingstype	1 laags a 30 kN/m'	2 laags a 50 kN/m'
Strook	30 kN/m'	50 kN/m'
Poer h.o.h. 2,5 m	75 kN	125 kN

Poer h.o.h. 1,25 m	37,5 kN	62,5 kN
-----------------------	------------	------------

H.6 Resultaten D-Foundations berekening

x.6.1 Stroken

De resultaten voor een ondiep strook zijn weergegeven in figuur H.1



Figuur H.1 Resultaten strokenfundering

De draagkracht/belasting is ruim voldoende. Er is geen effect van de hoogte van de grondwaterstand omdat deze niet in de invloedzone van de fundering ligt.

Voor het aanlegniveau van 1,0 m diep daalt de waarde draagkracht/belasting tot waarden genoemd in tabel A.5

Tabel H.5 Factoren Draagkracht/belasting voor strokenfundering op MV-1 m afhankelijk van grondprofiel en grondwaterstand

Grondopbouw	30 kN/m				50 kN/m			
	Gws +7.6	Gws +8	Gws +8.2	Gws +8.4	Gws +7.6	Gws +8	Gws +8.2	Gws +8.4
A1	1.21	1.21	1.21	1.21	0.76	0.76	0.76	0.76
A2	1.21	1.21	1.21	1.21	0.76	0.76	0.76	0.76
B	5.07	5.07	5.07	5.00	3.04	3.04	3.04	3.00
C	5.07	5.07	5.07	5.00	3.04	3.04	3.04	3.00

Opgemerkt wordt dat bij grondopbouw A1 en A2 er vanaf 0,5 m onder strook veen aanwezig is. Deze eigenschappen van deze grondlaag worden dan bepalend voor de berekeningsresultaten.

De grondwaterstand wordt pas van invloed als deze NAP +8.4 m bereikt.

x.6.2 Poeren

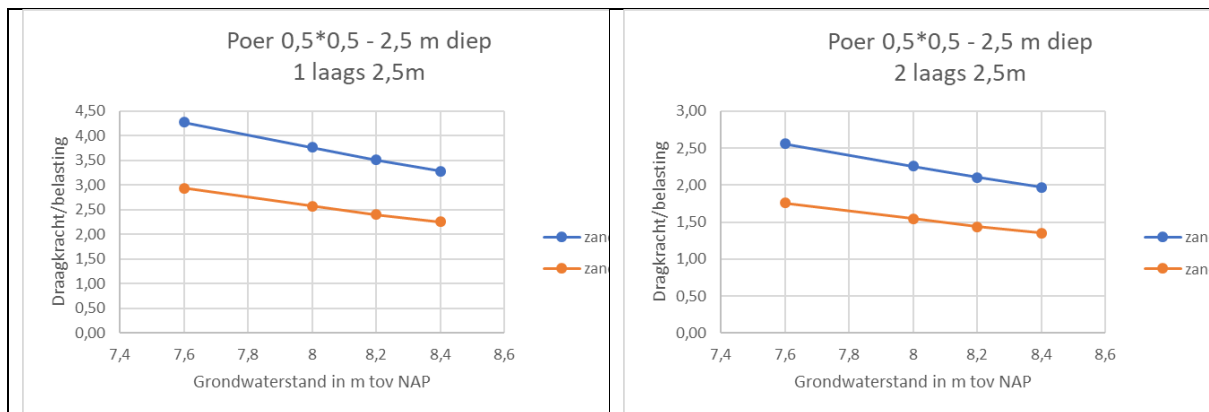
Ondiepe poer

Een ondiepe poer met funderingsniveau 1m onder maaiveld leidt tot een factor draagkracht/belasting $< 1,0$ onafhankelijk van de hoogte van de grondwaterstand als gevolg van de aanwezigheid van veen. Alleen als er geen veen aanwezig zou zijn is de factor ruim boven de 1.

Voor een diepe poer is gevarieerd voor de samenstelling van het diepe zand door aan te nemen dat er goed zand aanwezig is of dat er eerst 0,25 m zand/siltig aanwezig is gevolgd door goed zand.

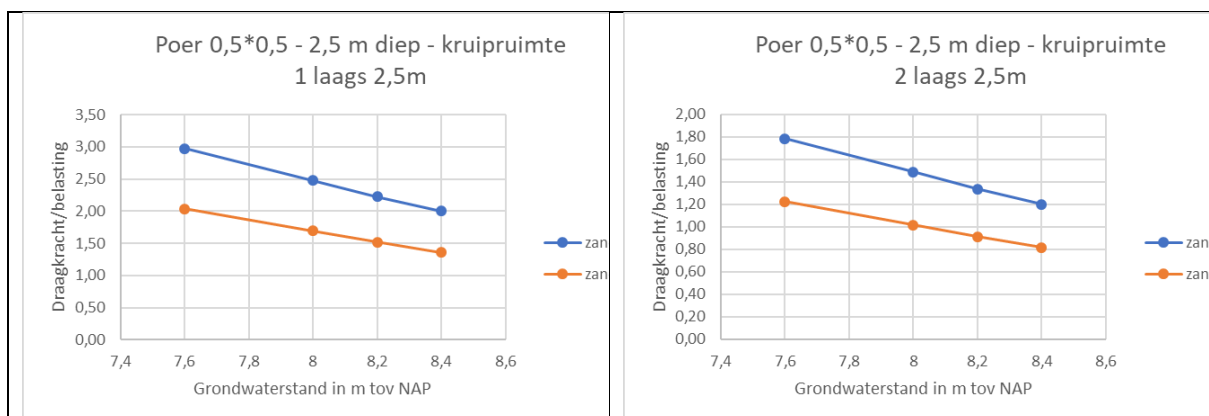
Diepe poer Hart op hart afstand 2,5 m

In figuur H.2 zijn de resultaten voor resp 1 laags en 2 laags belasting gegeven voor poer 0,5*0,5 m gegeven. Uit de resultaten blijkt dat de factor draagkracht/belasting afneemt met toenemende grondwaterstand. Hoe meer zand/siltig aanwezig des te lager de factor. Voor de situatie met 2 laags belasting en 0,5 m zand/siltig benaderd de factor de waarde 1.



Figuur H.2 Resultaten poeren 0,5*0,5 m2 zonder kruipruimte

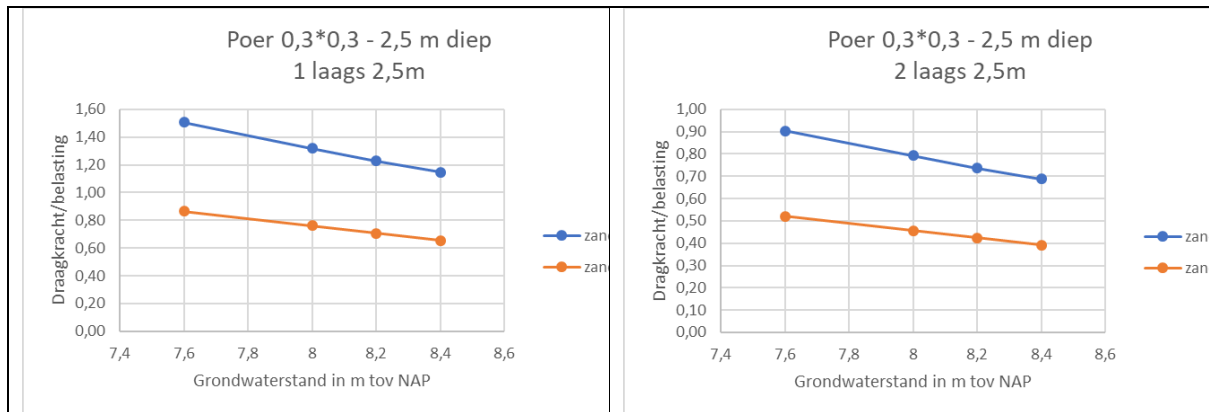
IN figuur H.3 zijn de resultaten voor resp 1 laags en 2 laags belasting gegeven voor poer 0,5*0,5 m gegeven in geval er een kruipruimte aanwezig is. De waarden draagkracht/belasting nemen dan af t.o.v de situatie zonder kruipruimte. Uit de resultaten blijkt dat de factor draagkracht/belasting afneemt met toenemende grondwaterstand. Hoe meer zand/siltig aanwezig des te lager de factor. Voor de situatie met 2 laags belasting en zand/siltig aanwezig daalt de factor tot onder de 1 bij een grondwaterstand groter dan NAP +8.0 m.



Figuur H.3 Resultaten poeren 0,5*0,5 m2 met kruipruimte

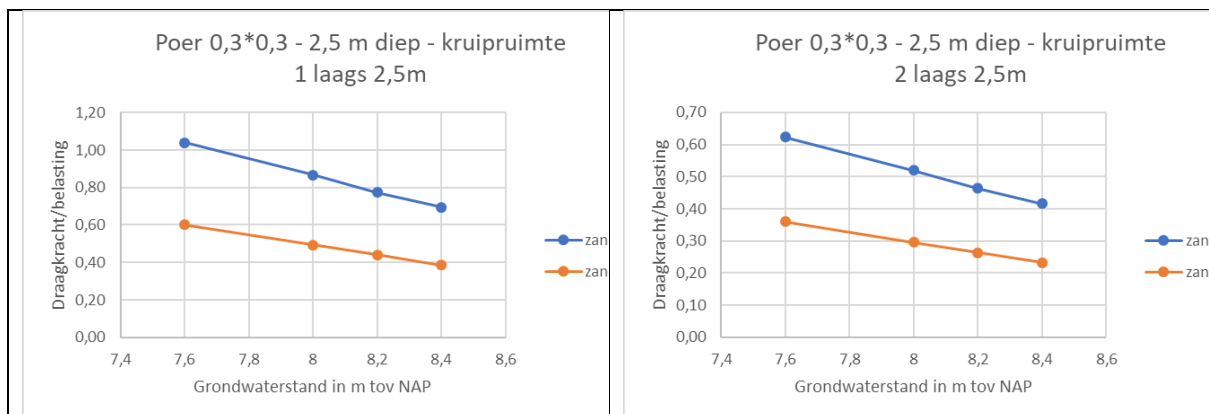
In figuur H.4 zijn de resultaten voor resp 1 laags en 2 laags belasting gegeven voor een kleinere poer 0,3*0,3 m gegeven. Uit de resultaten blijkt dat de factor draagkracht/belasting afneemt met toenemende grondwaterstand. Hoe meer zand/siltig aanwezig des te lager de factor. Voor de situatie

met 1 laags belasting en 0,25 m zand/siltig is de factor lager dan 1. Voor de situatie met 2 laags belasting is de waarde met 0,5 m zand/siltig altijd onder 1.



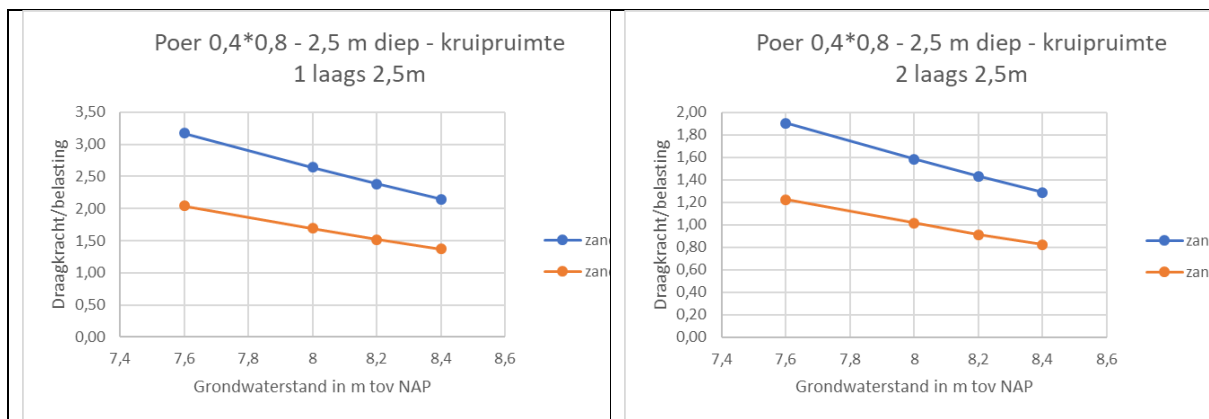
Figuur H.4 Resultaten poeren 0,3*0,3 m2 zonder kruipruimte

In figuur H.5 zijn de resultaten voor resp 1 laags en 2 laags belasting gegeven voor poer 0,3*0,3 m gegeven in geval er een kruipruimte aanwezig is. De waarden draagkracht/belasting nemen dan af t.o.v de situatie zonder kruipruimte en zijn altijd kleiner dan 1 tenzij de grondwaterstand NAP +7.6 m of lager is en de ondergrond uit goed zand bestaat.



Figuur H.5 Resultaten poeren 0,3*0,3 m2 met kruipruimte

In figuur H.6 zijn de resultaten voor resp 1 laags en 2 laags belasting gegeven voor poer 0,4*0,8 m gegeven in geval er een kruipruimte aanwezig is (deze poeren zijn aangetroffen onder gemetselde bogen waarbij altijd een kruipruimte aanwezig is). De waarden draagkracht/belasting lijken op die van poer 0,5*0,5 m2. De waarde wordt kleiner dan 1 bij een grondwaterstand groter dan NAP +8.0 m en er sprake is van zand/silt onder de fundering.

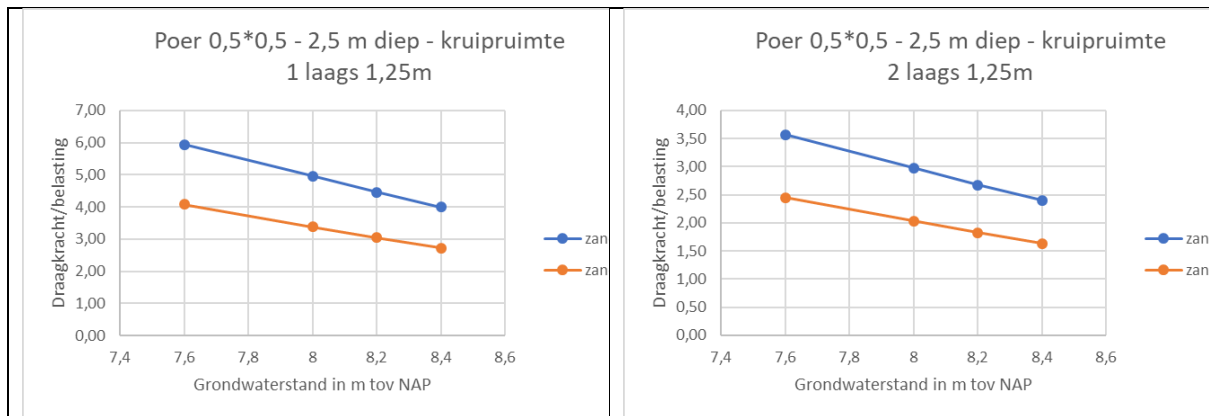


Figuur H.6 Resultaten poeren 0,4*0,8 m2 met kruipruimte

Diepe poer Hart op hart afstand 1,25 m

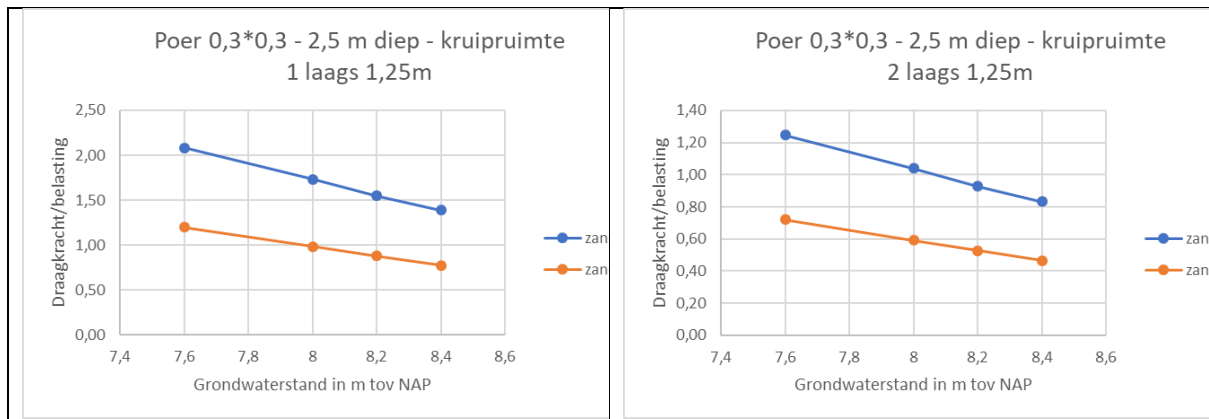
In sommige situaties is geconstateerd dan poeren een kleine hart op hart afstand van circa 1,25 m kunnen hebben. In de volgende figuren zijn de resultaten daarvoor aangegeven voor de gevallen waarbij een kruipruimte aanwezig is. De waarden zijn een factor 2 hoger dan de waarden voor een h.o.h. afstand van 2,5m.

In figuur H.7 zijn de resultaten voor resp 1 laags en 2 laags belasting gegeven voor poer 0,5*0,5 m gegeven in geval er een kruipruimte aanwezig is. Uit de resultaten blijkt dat de factor draagkracht/belasting afneemt met toenemende grondwaterstand. Hoe meer zand/siltig aanwezig des te lager de factor. De factor blijft in alle gevallen hoger dan 1,5.



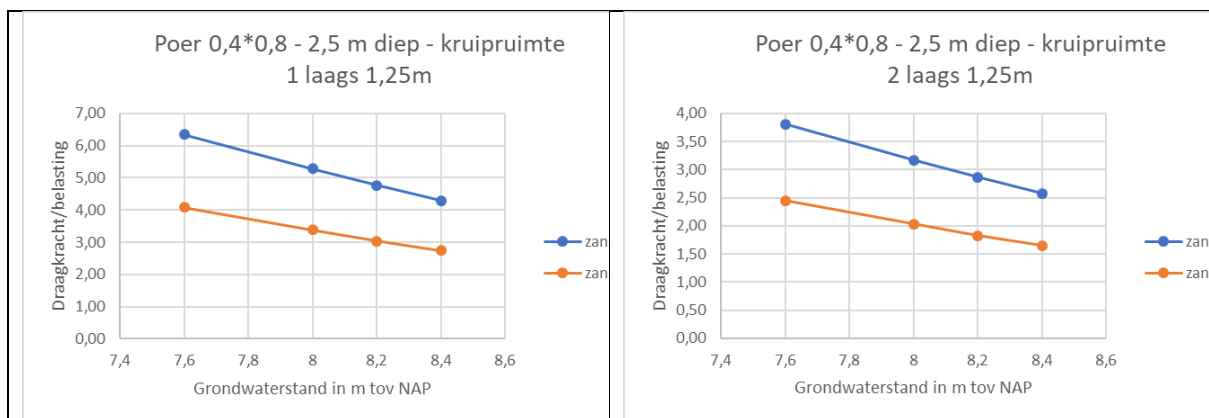
Figuur H.7 Resultaten poeren 0,5*0,5 m2 h.o.h. 1,25 m met kruipruimte

In figuur H.8 zijn de resultaten voor resp 1 laags en 2 laags belasting gegeven voor poer 0,3*0,3 m gegeven in geval er een kruipruimte aanwezig is. De factor draagkracht/belasting wordt kleiner dan 1 als de grondwaterstand groter dan NAP +8.0 m wordt en er zand/silt aanwezig is. Bij een 2 laags belasting kan dat ook optreden als er goed zand aanwezig is. Is in die situatie zand/silt aanwezig dan is de factor altijd kleiner dan 1.



Figuur H.8 Resultaten poeren 0,3*0,3 m2 h.o.h. 1,25 m met kruipruimte

In figuur H.9 zijn de resultaten voor resp 1 laags en 2 laags belasting gegeven voor poer 0,4*0,8 m gegeven in geval er een kruipruimte aanwezig is (deze poeren zijn aangetroffen onder gemetselde bogen waarbij altijd een kruipruimte aanwezig is). De waarden draagkracht/belasting lijken op die van poer 0,5*0,5 m2 en blijven altijd hoger dan 1,5.



Figuur H.9 Resultaten poeren 0,4*0,8 m2 h.o.h. 1,25 m met kruipruimte

H.7 Conclusies

Voor een stroken fundering kunnen de volgende conclusies worden getrokken.

- De draagkracht van een strook met een maximale diepte tot 1 m is onafhankelijk van de grondwaterstand.
- Is er veen aanwezig binnen 1 m onder de fundering dan bepalen de eigenschappen van die laag de draagkracht die daardoor zeer laag wordt.

Voor een poerenfundering kunnen de volgende conclusies worden getrokken bij een h.o.h. afstand van poeren van 2,5 m.

- De draagkracht van een poer met daaronder veen binnen 1 m onder de fundering wordt vooral bepaald door de eigenschappen van de veenlaag die daardoor zeer laag wordt.
- Bij een diepe fundering met poer tot onder het veen wordt de draagkracht bepaald door de hoogte van de grondwaterstand en door de samenstelling van het zand.
- Voor een kleine poer van 0,3*0,3 m2 is de factor draagkracht/belasting alleen groter dan 1 als er een 1 laags belasting aanwezig is, er geen kruipruimte is en de dikte van de laag zand/siltig is max 0,25 m.

- Voor een poer van $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$ kan de factor draagkracht/belasting kleiner dan 1 worden als er een kruipruimte aanwezig is en 2 laags belasting in combinatie met 0,25 m zand/siltig aanwezig en grondwaterstand hoger dan NAP+8 m.

Voor een poerenfundering kunnen de volgende conclusies worden getrokken bij een h.o.h. afstand van poeren van 1,25 m:

- De draagkracht van een poer met daaronder veen binnen 1 m onder de fundering wordt vooral bepaald door de eigenschappen van de veenlaag die daardoor zeer laag wordt.
- Bij een diepe fundering met poer tot onder het veen wordt de draagkracht bepaald door de hoogte van de grondwaterstand en door de samenstelling van het zand.
- Voor een kleine poer van $0,3 \times 0,3 \text{ m}^2$ wordt de factor draagkracht/belasting kleiner dan 1 als de grondwaterstand groter dan NAP +8.0 m wordt en er zand/silt aanwezig is. Bij een 2 laags belasting kan dat ook optreden als er goed zand aanwezig is. In die situatie zand/silt aanwezig dan is de factor altijd kleiner dan 1.
- Voor een poer van $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$ en $0,4 \times 0,8 \text{ m}$ neemt de factor iets af met toenemende grondwaterstand maar blijft de factor altijd hoger dan 1,5.

Interne erosie proeven - Kanaal Almelo de Haandrik

Factual report



Interne erosie proeven - Kanaal Almelo de Haandrik
Factual report

Auteur(s)

Interne erosie proeven - Kanaal Almelo de Haandrik

Factual report

Opdrachtgever	Provincie Overijssel
Contactpersoon	
Referenties	Referenties
Trefwoorden	Kolomproeven, suffosie, filterinstabiliteit, kanaal Almelo – De Haandrik

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	10-09-2021
Projectnummer	11207155-007
Document ID	11207155-007-GEO-0005
Pagina's	126
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0				

Samenvatting

Deltares heeft van de Provincie Overijssel de vraag gekregen om een verdiepend onderzoek uit te voeren om, onder andere, te beoordelen of piping een verklarend mechanisme zou kunnen zijn van de schade aan een aantal specifieke panden rond het kanaal Almelo – De Haandrik. Piping is een verzamelnaam voor verschillende soorten interne erosie. In Nederland wordt de term piping vooral gebruikt voor terugschrijdende erosie, maar in de literatuur bijv. (ICOLD, 2015) wordt het gebruikt voor vier soorten interne erosie: terugschrijdende erosie, 'concentrated leak erosion', contacterosie (een bredere term hiervoor is 'filterincompatibiliteit'), en suffosie. De laatste twee soorten van interne erosie, filterincompatibiliteit en suffosie, worden onderzocht in het verdiepend onderzoek.

Deze twee vormen van interne erosie worden onderzocht aan de hand van vergelijking van korrelverdelingen met bestaande criteria. Daarnaast worden kolomproeven uitgevoerd om:

- De criteria voor suffosie en filterinstabiliteit te verifiëren voor de zanden ter plaatse van kanaal Almelo - de Haandrik;
- De uitspoeling, of het gebrek aan uitspoeling, te visualiseren.

De resultaten van deze kolomproeven zijn in dit Concept Factual report weergegeven.

- Er zijn 7 suffosieproeven uitgevoerd en gerapporteerd. Er zijn geen waarnemingen gedaan die wijzen op korreltransport, met uitzondering van proef 1, waarin na afloop van de proef is vastgesteld dat de fijne fractie richting de bodem van het monster een beperkte toename vertoont. Deze fijne fractie heeft het monster niet verlaten, wat duidt op zelf-filtratie. Er is geen volumeverandering waargenomen.
- Er zijn 4 filterincompatibiliteit proeven uitgevoerd. Er zijn geen waarnemingen van uittredend korreltransport met uitzondering van proef 8 waar duidelijk een verlaging in hoogte van het monster was te zien en van inspoeling van fijn materiaal in het grove materiaal, maar geen uitspoeling van materiaal.

De materialen uit proeven 1 t/m 5 waren volgens de in de internationale literatuur erkende criteria intern stabiel. De proeven bevestigen dit beeld. De proeven 6 t/m 11 waren volgens literatuur instabiel (proef 11 marginaal), tijdens de proeven bleken 6, 7 en 9 t/m 11 toch stabiel. Opgemerkt wordt dat er na afloop van suffosie proef 6 en 9 vastgesteld werd dat het monster minder fijne fractie bevatte dan vooraf gedacht, waardoor ook verwacht kon worden dat deze monsters stabiel zouden zijn. Proef 8 was wel instabiel

In deze bijlage zijn namen van auteurs, adressen van onderzochte panden en andere privacygevoelige informatie geanonimiseerd of verwijderd.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Introductie	8
1.1	Doel van dit rapport	8
1.2	Definitie/criteria suffosie en filterincompatibiliteit	8
1.2.1	Suffosie	8
1.2.2	Filterincompatibiliteit	9
1.3	Opzet van dit rapport	10
2	Proef	11
2.1	Opzet	11
2.2	Opbouw en uitvoering	12
2.3	Programma en monsterselectie	15
3	Resultaten	20
3.1	Filtercriteria en Kenney & Lau en Wan & Fell criteria	20
3.2	Analyse Terzaghi en Lambe & Whitman	21
3.3	Volumeverandering	21
3.4	Doorlatendheidsverandering	22
3.5	Verandering in Korrelverdeling	23
4	Discussie criteria en proefresultaten	25
5	Conclusies en aanbevelingen	27
	Referenties	28
A	Factsheets	29
A.1	Factsheet proef 01	29
A.1.1	Eigenschappen proef	29
A.1.2	Proefverloop	30
A.1.3	Analyse Kenney & Lau en Wan & Fell	34
A.1.4	Doorlatendheid over de hoogte en tijd	34
A.1.5	Volumeverandering	35
A.1.6	C.S.I. korrelverdeling	36
A.2	Factsheet proef 02	37
A.2.1	Eigenschappen proef	37
A.2.2	Proefverloop	38
A.2.3	Analyse Kenney & Lau en Wan & Fell	42
A.2.4	Doorlatendheid over de hoogte en tijd	43
A.2.5	Volumeverandering	44
A.2.6	C.S.I. korrelverdeling	45

A.3	Factsheet proef 03	46
A.3.1	Eigenschappen proef	46
A.3.2	Proefverloop	48
A.3.3	Analyse Kenney & Lau en Wan & Fell	50
A.3.4	Doorlatendheid over de hoogte en tijd	51
A.3.5	Volumeverandering	52
A.3.6	C.S.I. korrelverdeling	53
A.4	Factsheet proef 04	53
A.4.1	Eigenschappen proef	53
A.4.2	Proefverloop	54
A.4.3	Analyse Terzaghi en Lambe & Whitman	57
A.4.4	Doorlatendheid over de hoogte en tijd	57
A.4.5	Volumeverandering	58
A.4.6	C.S.I. korrelverdeling	59
A.5	Factsheet proef 05	60
A.5.1	Eigenschappen proef	60
A.5.2	Proefverloop	62
A.5.3	Analyse Terzaghi en Lambe & Whitman	66
A.5.4	Doorlatendheid over de hoogte en tijd	66
A.5.5	Volumeverandering	67
A.5.6	C.S.I. korrelverdeling	68
A.6	Factsheet proef 06	70
A.6.1	Eigenschappen proef	70
A.6.2	Proefverloop	71
A.6.3	Analyse Kenney & Lau en Wan & Fell	74
A.6.4	Doorlatendheid over de hoogte en tijd	75
A.6.5	Volumeverandering	75
A.6.6	C.S.I. korrelverdeling	76
A.7	Factsheet proef 07	78
A.7.1	Eigenschappen proef	78
A.7.2	Proefverloop	79
A.7.3	Analyse Terzaghi en Lambe & Whitman	83
A.7.4	Doorlatendheid over de hoogte en tijd	83
A.7.5	Volumeverandering	84
A.7.6	C.S.I. korrelverdeling	85
A.8	Factsheet proef 08	87
A.8.1	Eigenschappen proef	87
A.8.2	Proefverloop	88
A.8.3	Analyse Terzaghi en Lambe & Whitman	92
A.8.4	Doorlatendheid over de hoogte en tijd	92
A.8.5	Volumeverandering	93
A.8.6	C.S.I. korrelverdeling	95
A.9	Factsheet proef 09	97
A.9.1	Eigenschappen proef	97
A.9.2	Proefverloop	98
A.9.3	Analyse Kenney & Lau en Wan & Fell	103
A.9.4	Doorlatendheid over de hoogte en tijd	104
A.9.5	Volumeverandering	105
A.9.6	C.S.I. korrelverdeling	106
A.10	Factsheet proef 10	108

A.10.1	Eigenschappen proef	108
A.10.2	Proefverloop	109
A.10.3	Analyse Kenney & Lau en Wan & Fell	112
A.10.4	Doorlatendheid over de hoogte en tijd	112
A.10.5	Volumeverandering	113
A.10.6	C.S.I. korrelverdeling	114
A.11	Factsheet proef 11	117
A.11.1	Eigenschappen proef	117
A.11.2	Proefverloop	118
A.11.3	Analyse Kenney & Lau en Wan & Fell	121
A.11.4	Doorlatendheid over de hoogte en tijd	121
A.11.5	Volumeverandering	122
A.11.6	C.S.I. korrelverdeling	123

1 Introductie

1.1 Doel van dit rapport

Deltares heeft van de Provincie Overijssel de vraag gekregen om een verdiepend onderzoek uit te voeren om, onder andere, te beoordelen of piping een verklarend mechanisme zou kunnen zijn voor de schade aan een aantal specifieke panden rond het kanaal Almelo – De Haandrik. Piping is een verzamelnaam voor verschillende soorten interne erosie. In Nederland wordt de term piping vooral gebruikt voor terugschrijdende erosie, maar in de literatuur bijv. (ICOLD, 2015) wordt het gebruikt voor vier soorten interne erosie: terugschrijdende erosie, ‘concentrated leak erosion’, contacterosie (een bredere term hiervoor is ‘filterincompatibiliteit’), en suffosie, zie ook Paragraaf 1.2.

Als onderdeel in het onderzoek naar piping als schade-oorzaak bij kanaal Almelo – De Haandrik worden kolomproeven uitgevoerd voor filterincompatibiliteit en suffosie (gedefinieerd in sectie 1.2). Deze kolomproeven worden uitgevoerd met materiaal afkomstig uit boringen nabij geselecteerde panden. Het doel van de proeven is om:

- De criteria voor suffosie en filterinstabiliteit te verifiëren voor de zanden ter plaatse van kanaal Almelo - de Haandrik. Hierbij wordt benadrukt dat de criteria voor filterinstabiliteit ontwerpcriteria zijn en de daadwerkelijke grens tussen stabiel en instabiel bij hogere waarden zal liggen. Het geplande aantal proeven is onvoldoende om de daadwerkelijke grens tussen stabiel en instabiel te onderzoeken: het doel van de proeven is slechts om de gevonden resultaten op basis van de criteria te bevestigen;
- De uitspoeling, of het gebrek aan uitspoeling, te visualiseren.

De resultaten van deze kolomproeven zijn in dit Factual report weergegeven.

1.2 Definitie/criteria suffosie en filterincompatibiliteit

1.2.1 Suffosie

Suffosie is gedefinieerd als het eroderen van fijn materiaal uit een grovere matrix ten gevolge van waterstroming (ICOLD, 2015). Een dragend skelet van grove korrels blijft achter. De erosie van fijn materiaal uit de grovere matrix zorgt voor een toename van de doorlatendheid, maar veelal slechts weinig verandering in volume (ICOLD, 2015). Suffosie kan alleen plaatsvinden als 1. de fijne fractie door het grovere skelet kan migreren en 2. er een stroming is die de korrels in beweging brengt. In de bureaustudie zijn twee rekenmethoden geselecteerd om na te gaan of suffosie plaats kan vinden.

De eerste methode is de *Kenney en Lau methode* (Kenney & Lau, Internal Stability of Granular Filters, 1985). Hun criterium is het meest bekende criterium voor suffosie en neemt de gehele korrelverdeling in beschouwing. Deze methode is bevestigd door (Skempton & Brogan, 1994) en (Rönnqvist & Viklander, 2014). (Kenney & Lau, Internal Stability of Granular Filters, 1985) onderzoeken de fractie fijn materiaal tot maximaal 30 massa-% van de totale massa. De fractie daarboven is per definitie het dragend skelet. Voor breed gesorteerd materiaal is de fractie fijn materiaal 20 massa-%. De losse fractie kan alleen in beweging komen als de poriën genoeg ruimte bieden voor migratie van deze losse fractie. Daarbij wordt aangenomen dat de diameter van een korrel die door een porie kan migreren maximaal $\frac{1}{4}$ is van de korreldiameter van de grovere fractie

Daarom beschouwt de K&L-methode het massa-% tussen de fijne fractie met grootte D en een grovere fractie met grootte 4D. Het verschil in massa-% tussen de fijne (D) en grove fractie (4D) wordt aangeduid met H. Wanneer er weinig materiaal aanwezig is tussen deze fracties, is er voldoende ruimte voor de korrels om te migreren: het materiaal is intern instabiel. De vergelijking tussen D en 4D wordt voor de hele korrelverdeling uitgevoerd. Vervolgens wordt vastgesteld wat de verhouding is tussen H (verschil in massa-% tussen grove fractie 4D en fijne fractie D) en F (massa-% fijne fractie D). Wanneer $H/F > 1$ voor alle diameters die tot de losse fractie kunnen behoren (voor $F < 30\%$) is er voldoende materiaal tussen de fracties om het materiaal stabiel te houden. De minimale waarde van H/F wordt de stabiliteitsindex genoemd, deze waarde verschilt in de literatuur, de meeste genomen waarden zijn 1 (Kenney & Lau, 1986) en 1.3 (Kenney & Lau, Internal Stability of Granular Filters, 1985). Volgens (Rönnqvist & Viklander, 2014) is een stabiliteitsindex van 1 nauwkeuriger dan 1.3, daardoor wordt verder 1 aangehouden.

De tweede methode is van (Wan & Fell, 2008) en is een adaptatie van (Burenkova, 1993). De methode Burenkova is gebaseerd op de verhoudingen d_{90}/d_{60} en d_{90}/d_{15} . De verhouding tussen d_{90} en d_{60} is representatief voor de helling in de korrelverdeling van de grove fractie in het monster: een hoge waarde staat voor een slechte sortering en daarmee grote ruimte tussen de korrels. De verhouding d_{90}/d_{15} kan worden gezien als een maat voor filtering tussen de grove en fijne fractie. De methode Burenkova geeft geen duidelijke grens tussen stabiel en instabiele materialen. Wan en Fell (2008) definieerden contouren voor de kans op instabiliteit (vergelijking 1 en 2):

$$P_f = \frac{e^Z}{1+e^Z} \quad \text{Vergelijking 1}$$

$$Z = 3.875 \log(h'') - 3.591 h' + 2.436 \quad \text{Vergelijking 2}$$

waarin:

P_f : de voorspelde kans op interne instabiliteit

Z: variabele van de logaritmische regressie vergelijking

h' : gedefinieerd als d_{90}/d_{60} door Burenkova (1993)

h'' : gedefinieerd als d_{90}/d_{15} door Burenkova (1993)

1.2.2 Filterincompatibiliteit

Filterincompatibiliteit treedt op wanneer fijn materiaal in contact staat met grover materiaal en het fijne materiaal door de poriën van het grove materiaal weg kan spoelen ten gevolge van waterstroming. Dit type erosie kan optreden wanneer filterconstructies niet goed ontworpen zijn. Filterincompatibiliteit kan alleen optreden als: 1. Het fijne materiaal direct tegen het grove materiaal gelegen is; 2. De fijne laag fijn genoeg is om door de grovere laag te migreren (geometrische criteria) en 3. Er een grondwaterstroming is die de korrels in beweging brengt. Voor filterincompatibiliteit zijn twee criteria gebruikt.

Het eerste criterium is gebaseerd op (Terzaghi, 1922) voor korrels kleiner dan 4.75 mm. Dit is vermoedelijk de basis geweest voor een vergelijking die in de literatuur wordt aangeduid als de filtervergelijking van Terzaghi (ICOLD, 1994):

$$\frac{d_{15,f}}{d_{85,b}} < 4 \quad \text{Vergelijking 3}$$

Het tweede criterium is gebaseerd op (Lambe & Whitman, 1969) en bestaat uit drie vergelijkingen. De eerste is dezelfde vergelijking als Terzaghi (1922) maar dan met een waarde van 5. De twee aanvullende vergelijkingen worden in de nieuwere literatuur/voorschriften niet meer gehanteerd.

$$\frac{d_{15,f}}{d_{85,b}} < 5$$

Vergelijking 4

$$4 < \frac{d_{15,f}}{d_{15,b}} < 20$$

Vergelijking 5

$$\frac{d_{50,f}}{d_{50,b}} < 25$$

Vergelijking 6

waarin:

$d_{X,f}$: korrelgrootte van filter (grof materiaal) die door X gewichtsprocenten wordt onderschreden.

$d_{X,b}$: korrelgrootte van basis materiaal (fijn materiaal) die door X gewichtsprocenten wordt onderschreden.

De eis $\frac{d_{15,f}}{d_{15,b}} > 4$ heeft te maken met de gewenste doorlatendheid van het filter, aan deze eis hoeft niet voldaan te worden voor retentie van deeltjes en wordt verder niet aangehouden.

1.3 Opzet van dit rapport

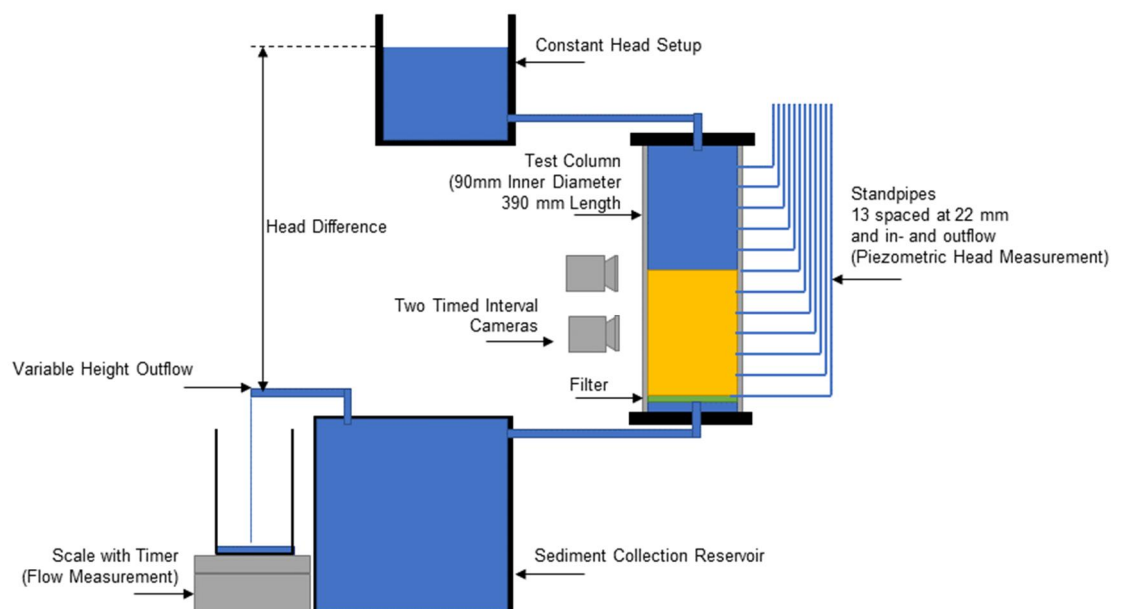
Hoofdstuk 2 beschrijft de proef-opzet en -opbouw. Verder wordt ook het proefprogramma toegelicht. Hoofdstuk 3 beschrijft een samenvatting van alle resultaten. Hoofdstuk 4 discussieert over de criteria en de proefresultaten. Hoofdstuk 5 geeft de conclusies. In Bijlage A zijn de factsheets van alle proeven te vinden.

2 Proef

2.1 Opzet

De kolomproeven voor interne stabiliteit zijn constant-head testen, zie Figuur 2.1. Een transparante kolom met een zandmonster is verbonden aan een constant-head tank en een bezinkbak. Het water stroomt vanaf de constant-head tank, dat op constant niveau wordt gehouden door een pomp en overloop, door het monster uit naar de bezinkbak. De uitstroom kan op willekeurige hoogte constant worden gehouden. De stroming kan vanuit de bovenkant of onderkant van de kolom instromen. Aan het uitstroomeinde van de kolom is een bezinkbak geplaatst om de eventuele uitstroom van korrels te identificeren.

De kolom is 390 mm hoog en heeft een binnendiameter van 90 mm. Het zandmonster in de kolom wordt aan de onderkant tegengehouden door een filterplaat. De diameter van de openingen in de filterplaat is 500 μm . Deze grootte is gekozen aan de hand van literatuur over suffosieproeven en na persoonlijke communicatie met een internationale suffosie-expert (Rachel Gelet – Universit  de Nantes). Hieruit bleek dat het belangrijk is om niet te kleine openingen te kiezen om verstopping van de filterplaat te voorkomen. Tegelijkertijd kunnen de gaten ook niet te groot gekozen worden omdat het filter het dragende skelet ook moet tegenhouden. Met de gedachte dat de gaten in de filterplaat in elk geval groter moeten zijn dan de constrictieruimte in de poriën van het aanliggende materiaal, is gekozen voor een filtermaat die minimaal gelijk is aan de d_{30} (de maximale maat van de fractie die niet onderdeel is van het dragende skelet). In de praktijk blijkt ook een grotere maat geschikt: 500 μm . Langs de kolom zijn op ongeveer elke 22 mm stijghoogtebuisjes aangebracht, om de stijghoogte over de hoogte van de opstelling te meten. Deze buisjes hebben een binnendiameter van 3 mm. Het debiet wordt gemeten door het uitstromende water te wegen. Twee camera's zijn geplaatst,   n om de volumeverandering te meten en een tweede om eventueel korreltransport te identificeren. Deze camera's nemen elke minuut een foto. Bij proeven die gedurende meerdere dagen zijn doorgezet is de frequentie van de foto's nog verlaagd.



Figuur 2.1 Schematisatie van de opstelling.

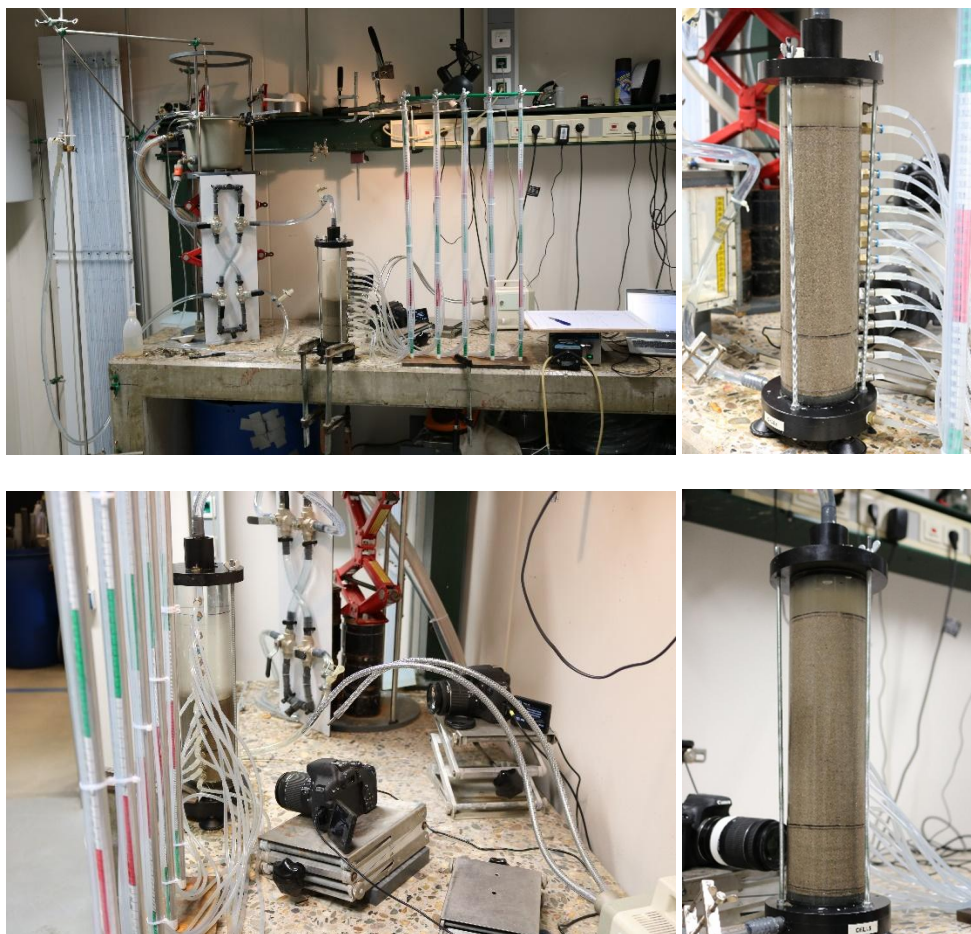
2.2 Opbouw en uitvoering

Zandmonsters zijn geprepareerd door kolommen gedeeltelijk te vullen met ontlucht water. Het droge materiaal is vervolgens voorzichtig in de container gestrooid. Verdichting van het monster werd gerealiseerd door kleine trillingen aan te brengen aan de zijwand van de kolom. Hiermee is een monster beoogd met een relatieve dichtheid van ca. 50%.

In proef 10 en 11 is een afwijkende procedure toegepast voor het prepareren van het monster. Dit is gedaan omdat na afloop van proef 6 en 9 bleek dat het monster minder fijne fractie bevatte dan vooraf gedacht. Een mogelijke verklaring hiervoor was dat het monster tijdens de preparatie fijn materiaal was kwijtgeraakt. De preparatieprocedure voor proef 10 en 11 bestaat uit de volgende stappen:

- Zandmonster mengen in cilinder met ontlucht water. Hierdoor ontstaat een slurry met minimale dichtheid.
- De slurry storten in de met ontlucht gevulde water test kolom.
- Verdichten met kleine schokgolfjes tot de gewenste dichtheid.

De stijghoogte, die aan de bovenkant van het monsters is aangebracht en de lagere stijghoogte die aan de onderzijde van de kolom is aangebracht, zorgen voor stroming door het monster. De stijghoogte aan de top en onderkant van het monster zijn gemeten met stijgbuisjes. Figuur 2.2 toont foto's van de opstelling met opgebouwd monster in de kolom.



Figuur 2.2 Foto's van de opstelling.

Voorafgaand aan elke proef zijn de volgende gegevens verzameld:

- Hoogte van het monster, berekend door het gemiddelde te nemen van vier metingen op verschillende locaties aan de bovenkant om eventuele variaties mee te nemen;
- Volume van het monster, gevonden door de hoogte en de inwendige diameter van de kolom te gebruiken;
- Droog gewicht, het monster is voor de proef gedroogd en gewogen;
- Relatieve dichtheid van het monster, door de porositeit te berekenen met het gewicht en volume van het monster. De korrel dichtheid is aangenomen als 2.65 g/cm³;
- Water- en kamertemperatuur, gemeten met een thermometer.

De proeven werden uitgevoerd door stapsgewijs het verhang te verhogen. De duur van een proef werd afgestemd op de mate van uitspoeling. De uitvoering schema van proeven 2 t/m 6 is weergegeven in Tabel 1. In de eerste proef is ook een verhang van 0.05 aangebracht, maar de nauwkeurigheid van de debiet- en stijghoogtemetingen bleek onvoldoende voor het vaststellen van veranderingen in doorlatendheid. Daardoor zijn de andere proeven zonder 0.05 verhang gerealiseerd. In proeven 7 t/m 8 en 10 t/m 11 is een extra hoger verhang toegepast van 2.5. In proef 9 zijn de toegepaste verhangen, door een vergissing van de laborant, circa twee maal zo hoog.

De retourstroming heeft als doel om deeltjes die door brugvorming vastgeraakt zijn in het pakket weer los te maken. Ten behoeve van de retourstroming is het neerwaarts verval teruggebracht naar 0 en werd een klein opwaarts verval aangebracht gedurende een korte periode van ca. 10 minuten. Vervolgens werd het opwaarts verval weer teruggebracht naar 0 en werd het neerwaarts verhang weer aangebracht. De tijdsduur van de neerwaartse stroming werd beperkt tot 30 minuten voor proeven 1 t/m 6 als er geen uitspoeling plaatsvond. Voor proeven 7 t/m 11 werd de hoogste verhang aangehouden voor een paar dagen.

Tabel 1 Schema uitvoering proef. Negatief verhang geeft aan een neerwaartse stroming.

Stap	Verhang (-)	Tijdsduur (minuten)
Matige stroming	-0.2	30
Retourstroming	0.05	10
Matige stroming	-0.2	30
Grote stroming	-1	30
Retourstroming	0.5	10
Grote stroming	-1	30

Tijdens de proef werden de volgende gegevens verzameld:

- Debiet, gemeten door water in een metalen kom gedurende een minuut te verzamelen en daarna te wegen. Hier werd gebruik gemaakt van een stopwatch en een weegschaal;
- Stijghoogten, deze zijn gemeten door het waterniveau in de stijghoogtebuisjes te lezen met een maatverdeling;
- Het aangebrachte verhang, berekend door de stijghoogte in het in- en uitstroomeinde te meten met de stijghoogtebuisjes. Het verhang is het verschil in stijghoogte gedeeld door de hoogte van het monster;
- Twee foto's om de volumeverandering in kaart te brengen.

Het debiet heeft een meetonzekerheid, deze kan berekend worden met Vergelijking 9.

$$V = \frac{m}{\rho}$$

Vergelijking 7

$$Q = \frac{V}{t}$$

Vergelijking 8

$$\varepsilon Q = \sqrt{\left(\frac{dQ}{dm} \varepsilon m\right)^2 + \left(\frac{dQ}{d\rho} \varepsilon \rho\right)^2 + \left(\frac{dQ}{dt} \varepsilon t\right)^2}$$

Vergelijking 9

waarin:

V : volume (cm³)

m : massa (g)

ρ : dichtheid water (g/cm³)

t : tijd (min)

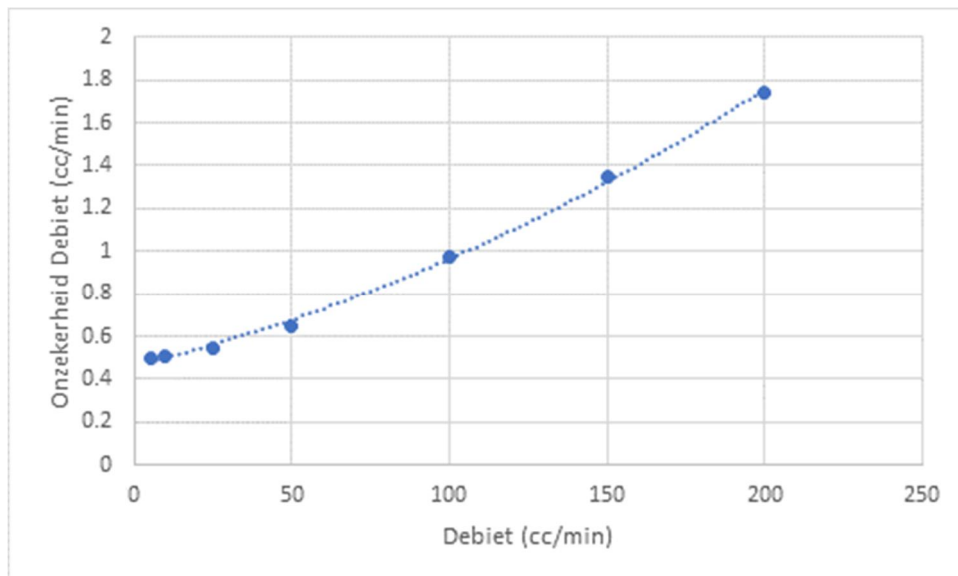
εm : onzekerheid in massa (g)

εt : onzekerheid in tijd (min)

$\varepsilon \rho$: onzekerheid in waterdichtheid (g/cm³)

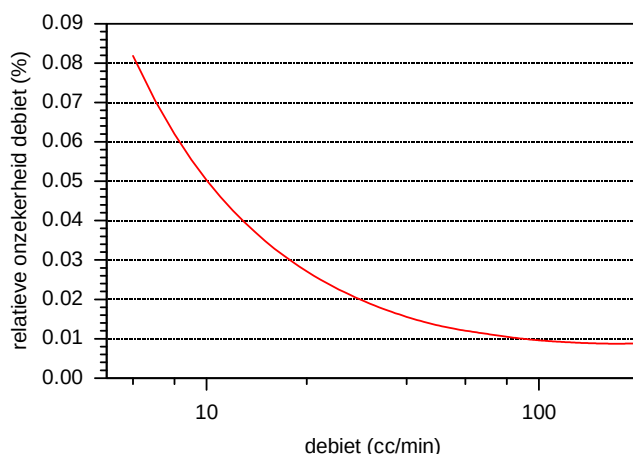
εQ : onzekerheid in debietmeting (cm³/min)

Figuur 2.3 geeft de meetonzekerheid van de debietmeting voor een (optimistische) schatting op basis van 0.5 g onzekerheid in het massa, 0.5 s in de timing en de veronderstelling dat er geen onzekerheid is in de waterdichtheid. Hieruit blijkt dat de relatieve fout bij kleine debieten sterk toeneemt, zie ook Figuur 2-4. De relatie tussen het debiet en het verhang bij de verschillende proeven is weergegeven in de Appendix.



Figuur 2.3 Debiet onzekerheden per gemeten debiet.

De stijghoogten hebben ook meetonzekerheden door de afleesresolutie van +/- 0.5 mm van de stijghoogtebuisjes. Deze bleken een te kleine diameter te hebben waardoor ze wat minder nauwkeurig op kleine drukverschillen reageerden. Na proef 05b zijn ze veranderd naar grotere buisjes.



Figuur 2.4. Relatieve onnauwkeurigheid in debiet meting. Voor een fout kleiner dan 5% moet het debiet meer dan 10 cc/min zijn.

2.3 Programma en monsterselectie

In het proevenprogramma werden proeven gedaan voor controle op suffosie en filterincompatibiliteit. Een overzicht van alle proeven is gegeven in Tabel 2. Op basis van korrelverdelingen uit verschillende boringen en de beschikbare criteria kon worden vastgesteld welke materialen niet stabiel waren voor suffosie volgens Kenney & Lau (1985) en voor filterinstabiliteit volgens Terzaghi en Lambe & Whitman. Op basis van deze analyse en het materiaal dat ten tijde van de proeven beschikbaar was is een keuze gemaakt voor de proeven.

Ten gevolge van de tijdsdruk is het proevenprogramma adaptief ingezet. De eerste proef is uitgevoerd met materiaal uit de eerst beschikbare boring (B01-01). Deze boring bevatte geen grindrijk materiaal. Toch is het meest grove materiaal uit deze boring ingezet in de proef om de proefmethode te testen. De tweede, derde en vierde proef zijn ingezet op basis van zand uit de tweede beschikbare boring (B02-01). Voor dit materiaal zijn zowel suffosie-proeven en filterproeven ingezet. Deze proeven geven vermoedelijk een goed beeld van het gedrag van materialen die veel voorkomen in het gebied. Voor proef 5 was er al aanzienlijk meer keuze. Op basis van korrelverdelingen uit verschillende boringen en de beschikbare criteria kon worden vastgesteld dat geen van de materialen gevoelig zou zijn voor suffosie of filterincompatibiliteit. Daarom is uit de beschikbare materialen gekozen voor de meest ongunstige combinatie van fijn en grof zand, en is bovendien het grove zand afgezeefd (>250 μm) om eventueel fijn vooraf ingespoeld materiaal te verwijderen. Er worden voor de materialen uit proef 5 geen aparte suffosieproeven uitgevoerd: door het verwijderen van de kleinste 30% massa is er voor het grove materiaal geen suffosie meer mogelijk en eventuele suffosie in het fijne materiaal kan ook tijdens de filterproef worden vastgesteld.

Voor proef 6 waren er nog meer boringen beschikbaar. Op basis van korrelverdelingen uit verschillende boringen en de beschikbare criteria kon worden vastgesteld dat één materiaal niet stabiel was voor suffosie volgens Kenney & Lau (1985). Dit materiaal is gekozen voor proef 6.

Uit de laatste materialen die binnen zijn gekomen bleek dat geen van de combinaties van materialen afkomstig van de boringen nabij het kanaal gevoelig zou zijn voor filterincompatibiliteit. Daardoor is gekozen om proef 7 met silt (materiaal beschikbaar bij Deltares) als fijn materiaal te gebruiken en als grof materiaal het materiaal van proef 4 afgezeefd tot 355 μm . Om een nog ongunstiger combinatie te vinden voor een volgende filterincompatibiliteit proef, waarin wel materiaal kan migreren, is gezocht naar een groter verschil tussen fijne en grove materialen. Hierdoor is gekozen voor een materiaal dat veel

grover is dan al het beschikbare materiaal. Dit is in proef 8 uitgezocht. Deze proef is niet representatief voor kanaal Almelo de Haandrik, maar is uitgevoerd om te laten zien dat de opstelling in staat is om filter incompatibiliteit aan te tonen als dat zich voordoet.

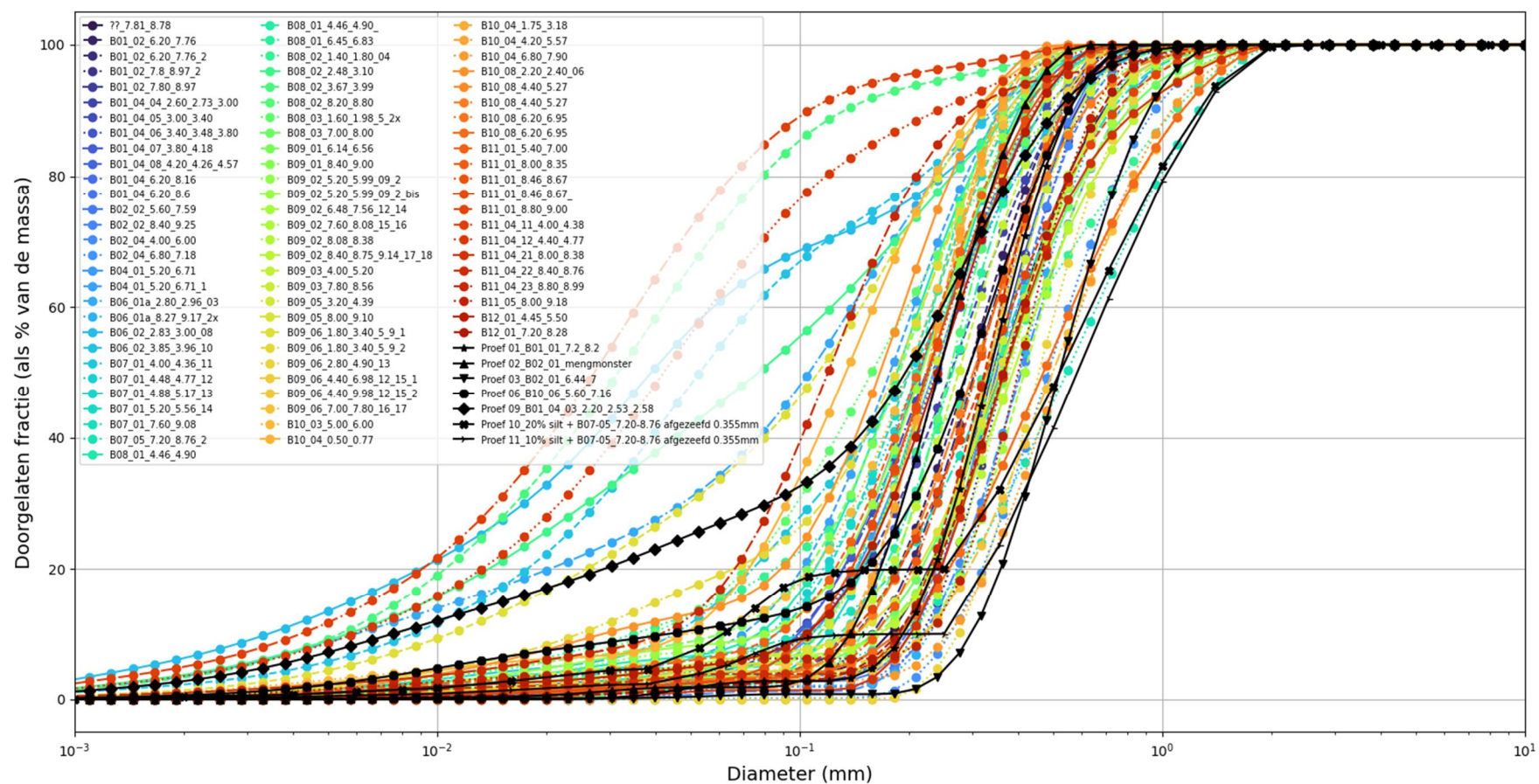
Uit de laatst binnengekomen batch met monsters waren er meerdere materialen die gevoelig zouden zijn voor suffosie. Hier is voor proef 9 de meest ongunstig materiaal gekozen die anders was dan het materiaal uit proef 6. Tabel 2 te vinden. Voor de suffosie- proeven werden monsters opgebouwd met één zandsoort (fijn of grof). Voor de proeven op filtercompatibiliteit werd een combinatie van fijn zand en grover zand toegepast.

Na de post-test (ook wel aangeduid als C.S.I.) analyse bleek dat het materiaal uit proeven 6 en 9 aanzienlijk minder fijne fractie bevatte dan op basis van de laserdiffractie verwacht werd. Door het ontbreken van de fijne fractie was het monster niet meer suffosiegevoelig. Mogelijk is er tijdens de preparatie fijne fractie verloren gegaan of was het deelmonster dat geselecteerd was voor laserdiffractie niet representatief voor het hele monster. Proeven 10 en 11 zijn daardoor uitgevoerd om ook proeven in het programma te hebben met materiaal dat wel suffosiegevoelig is volgens de criteria. Omdat geen van de resterende materialen gevoelig waren voor suffosie is er voor gekozen om boring B07-05_7.20_8.76 af te zeven op 0.355 mm en te mengen met silt. Dit resulteerde in twee monsters die volgens de criteria net intern instabiel zijn.

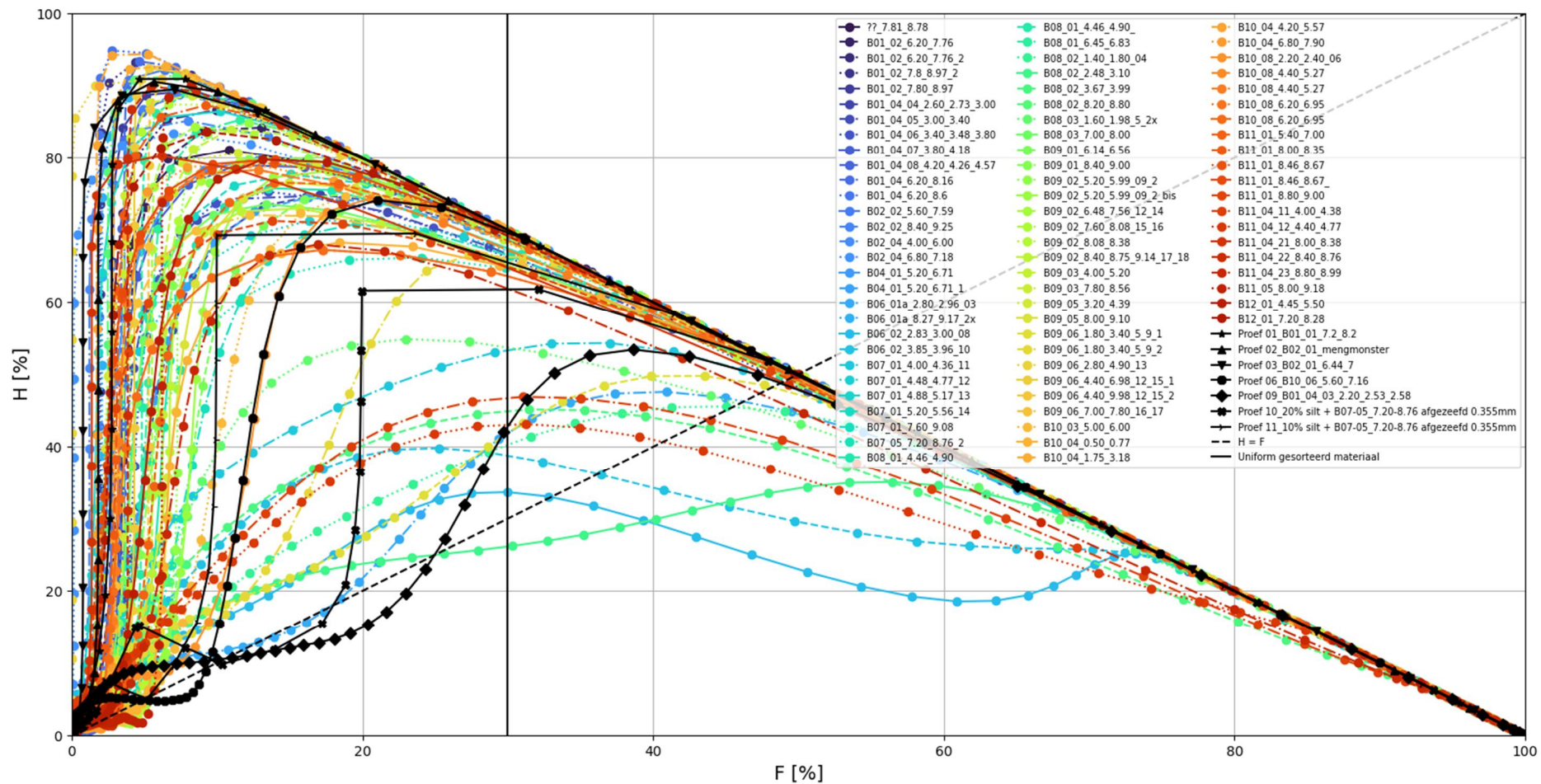
Tabel 2 Overzicht proeven.

Proef	Materiaal
1	Suffosie – B01-01 7.2-8.2 m-mv (2.65-1.65 m+NAP)
2	Suffosie – B02-01 mengmonster 5.92-6, 6.15-6.44, 7.25-7.38 m-mv (4-3.92 m+NAP, 3.77-3.48 m+NAP, 2.67-2.54 m+NAP)
3	Suffosie – B02-01 6.44-7.0 m-mv (3.48-2.92 m+NAP)
4	Filterincompatibiliteit met proefmateriaal uit proef 2 (fijn) en 3 (grof)
5	Filterincompatibiliteit met B09-01 6.14-6.56 m-mv (fijn) en 8.40-9 m-mv (grof, afgezeefd tot d30)
6	Suffosie – B10-06 5.60-7.76 m-mv (4.21-2.05 m+NAP)
7	Filterincompatibiliteit met silt (fijn) en proefmateriaal uit proef 4 (grof, afgezeefd tot d30)
8	Filterincompatibiliteit met silt (fijn) en filterzand (grof) (voor verificatie van de opstelling)
9	Suffosie – B01-04-03- _2.20-2.53-2.58 m-mv (7.13-6.8-6.75 m+NAP)
10	Suffosie – 80% zand van boring B07-05_7.20-8.76 m-mv afgezeefd op 0.355 mm en 20% silt
11	Suffosie – 90% zand van boring B07-05_7.20-8.76 m-mv afgezeefd op 0.355 mm en 10% silt

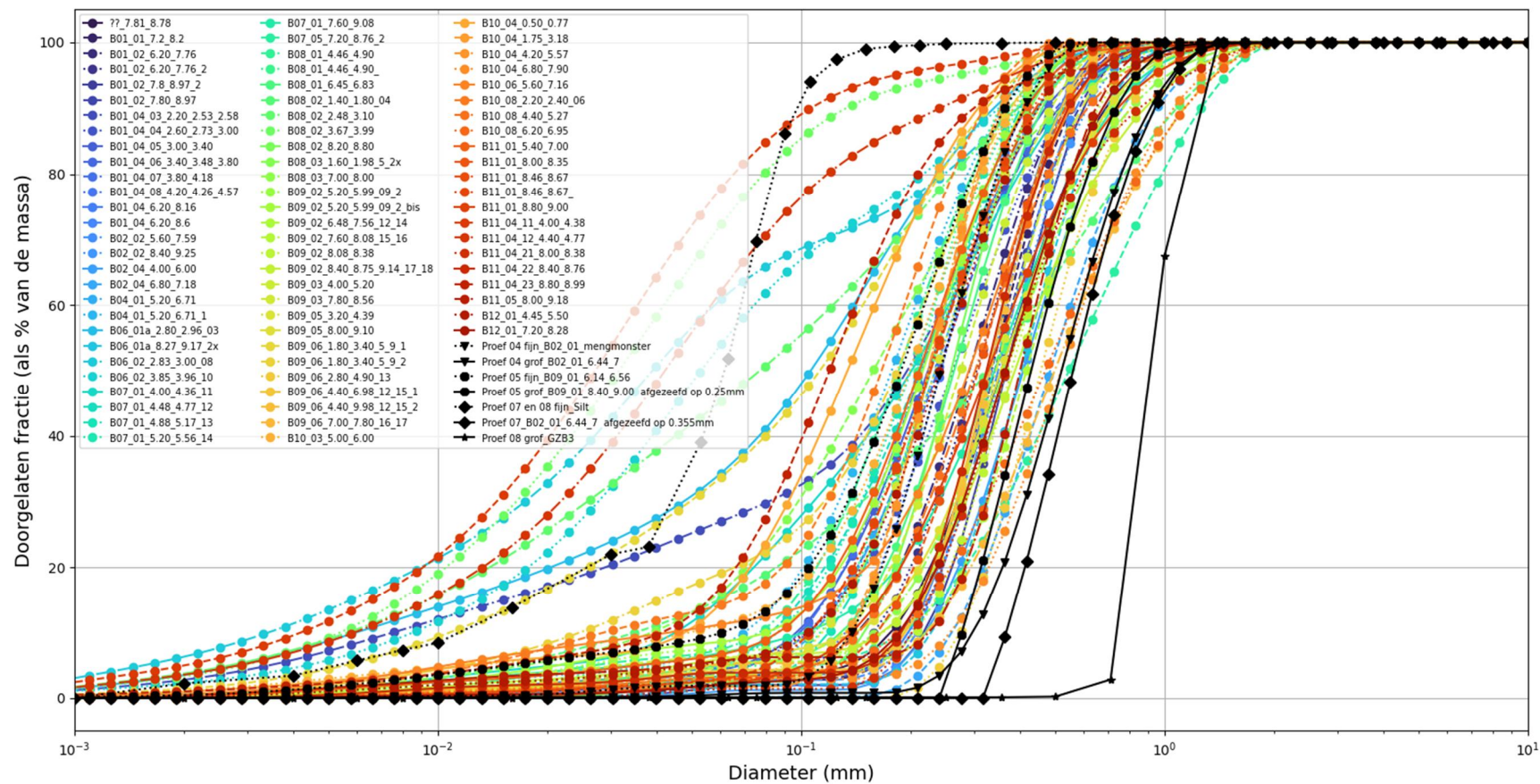
Een overzicht van de korrelverdelingen van alle beschikbare materialen en in zwart de geselecteerde monsters voor de suffosie proeven is in Figuur 2.4 te vinden. Figuur 2.6 geeft de overzicht voor de filterincompatibiliteit proeven, met in zwart gestippelde lijnen de korrelverdeling van het base (fijn) materiaal en in zwart doorgetrokken lijn voor het grof filter materiaal. De Kenney & Lau (1985) grafieken voor de suffosie proeven zijn in Figuur 2.5.



Figuur 2.5 Korrelverdeling van alle beschikbare materialen gemaakt met laser diffractie. In zwart zijn de korrelverdelingen van het materiaal beproefd op suffosie.



Figuur 2.6 Kenney & Lau (1985) criteria van alle beschikbare materialen gemaakt met laser diffractie. In zwart zijn de korrelverdelingen van het materiaal beproefd op suffosie.

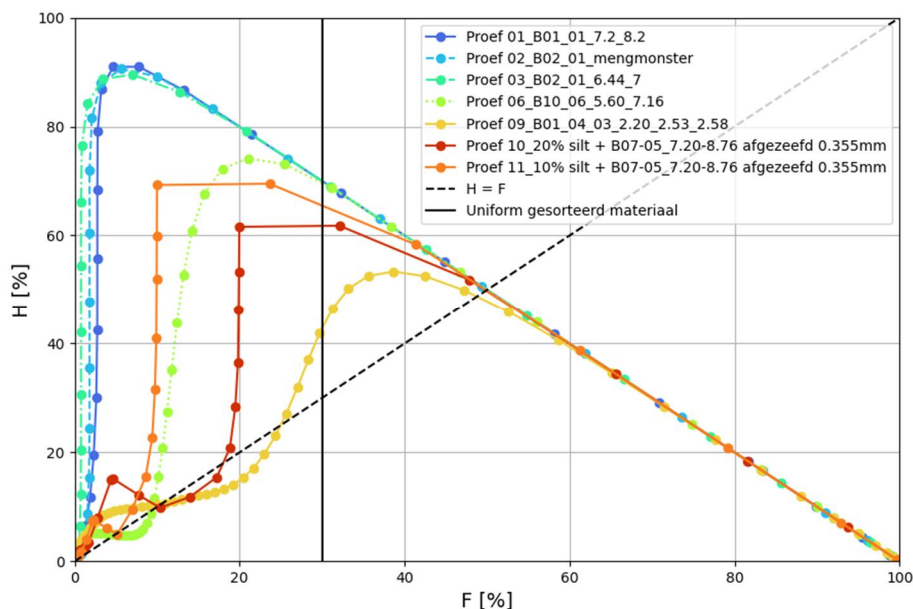


Figuur 2.7 Korrelverdeling van alle beschikbare materialen gemaakt met laser diffractie. In zwart zijn de korrelverdelingen van het materiaal beproefd op filterincompatibiliteit

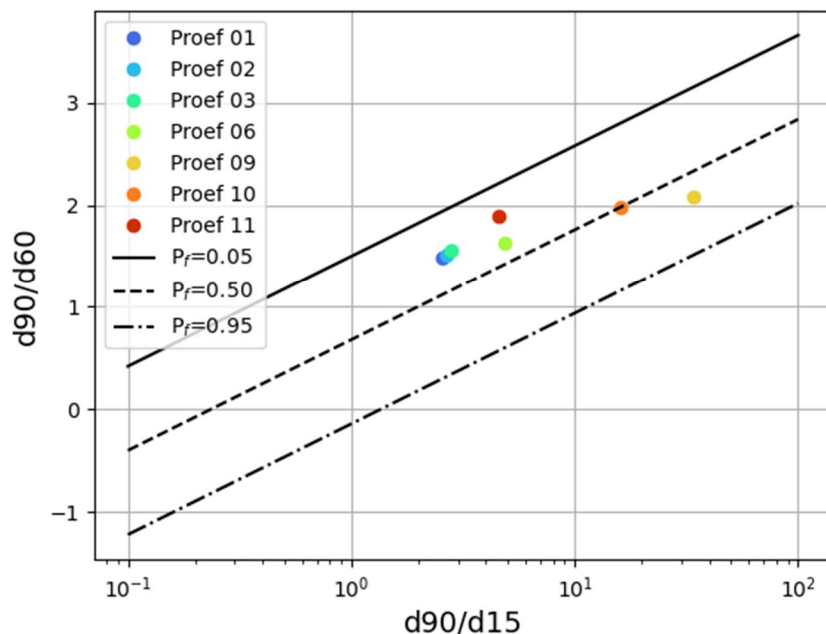
3 Resultaten

3.1 Filtercriteria en Kenney & Lau en Wan & Fell criteria

Volgens de Kenney & Lau (Figuur 3.1) en Wan & Fell (2008) (Figuur 3.2) analyses zijn de monsters van proeven 1 tot 3 intern stabiel en proeven 6 en 9 t/m 11 intern instabiel. Hierbij wordt opgemerkt dat de materialen uit proef 6 en 9 na preparatie niet meer suffosiegevoelig bleken, omdat de fijne fractie aanzienlijk lager was dan vooraf gemeten.



Figuur 3.1 Kenney & Lau (1985) analyse van alle suffosieproeven gemaakt met laser diffractie.



Figuur 3.2 Wan & Fell (2008) analyse van suffosieproeven op basis van korrelverdelingen gemaakt met laser diffractie.

3.2 Analyse Terzaghi en Lambe & Whitman

Volgens Tabel 3 voldoen proeven 4 en 5 aan de Terzaghi (1922) en Lambe & Whitman (1969) criteria. Proef 7 zou niet stabiel zijn volgens Terzaghi (1922) en volgens het tweede criterium van Lambe & Whitman (1969). Proef 8 zou niet stabiel zijn omdat het alleen voldoet aan het derde criterium van Lambe & Whitman (1969).

Tabel 3 Terzaghi (1922) en Lambe & Whitman (1969) criteria voor alle filterincompatibiliteit proeven.

	$\frac{d_{15,f}}{d_{85,b}} < 4 \text{ of } 5$	$\frac{d_{15,f}}{d_{15,b}} < 20$	$\frac{d_{50,f}}{d_{50,b}} < 25$
Proef 04	0.89	1.96	2.19
Proef 05	0.61	2.3	1.97
Proef 07	4.38	21.67	9.03
Proef 08	8.60	42.50	14.87

3.3 Volumeverandering

Aan de hand van foto's van de bovenkant van het monster was de hoogteverandering bepaald in de loop van elke proef. Dit is als volgt gedaan:

- 1 Per foto is een uitsnede gemaakt, een aantal centimeter boven en onder de water-zand interface, en een aantal centimeter breed.
- 2 Hierna is over de breedte het gemiddelde genomen van de grijswaarden van de foto. Hierdoor is één gemiddelde lijn verkregen van de water-zand interface.
- 3 De overgang tussen zand en water is bepaald door de gradiënt te nemen van deze lijn.
- 4 De maximale gradiënt is gehanteerd als laagovergang.
- 5 Dit is per foto bepaald, en vervolgens uitgezet tegen de tijd.

Deze methode is gevoelig voor verschillen in verlichting, bewegingen van de camera en/of van de kolom. Dit veroorzaakt onnauwkeurigheden in meting van de hoogte verandering. Daardoor zijn ook verschilbeelden gemaakt om na te kunnen gaan als een verandering in hoogte veroorzaakt is door het uitspoelen van het monster of door onnauwkeurigheden.

Alleen tijdens proef 8 heeft duidelijk een volumeverandering plaatsgevonden. Deze was terug te zien in de foto's van de bovenkant van het monster, zie Figuur 3.3.



Figuur 3.3 Volume verandering na afloop van proef 8.

3.4 Doorlatendheidsverandering

Na elke proef wordt de doorlatendheid over de hoogte van de kolom bepaald. Een redelijke constante doorlatendheid in de tijd betekent dat het monster stabiel is. De doorlatendheid over de kolom is berekend met de wet van Darcy en de stijghoogtemetingen genomen over de hoogte van de kolom.

$$k = -\frac{q}{i}$$
$$i = \frac{\Delta h}{\Delta l}$$

Met:

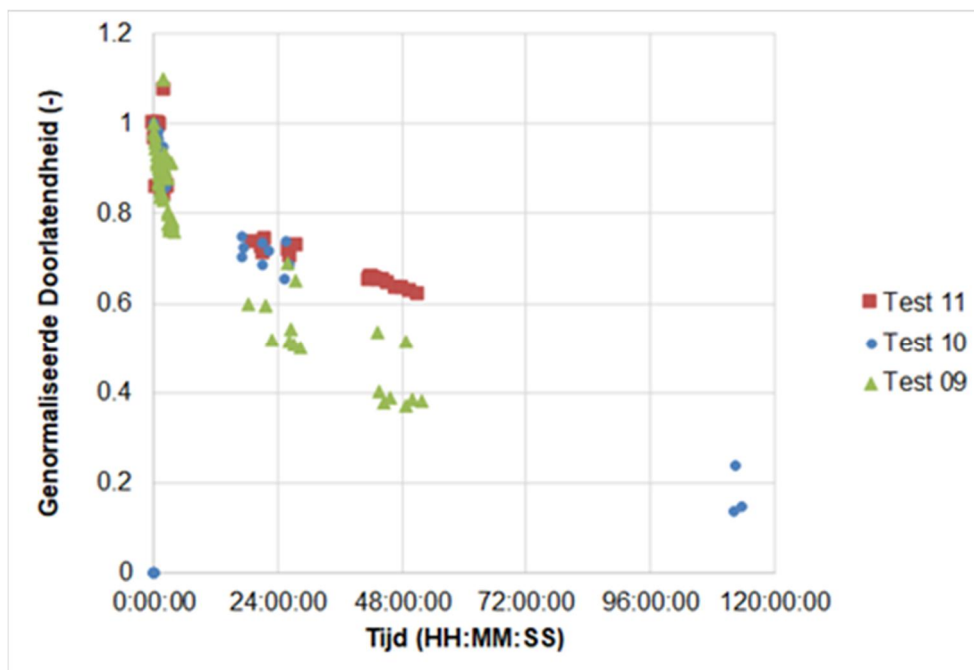
- k : doorlatendheid in m/s;
- q : debiet in m/s;
- i : verhang (-);
- Δh : stijghoogte verschil in m;
- Δl : lengte van de kolom waar de doorlatendheid wordt bepaald in m.

Bij lage verhangen (0.05-0.2) en een neerwaartse stroming was de doorlatendheid over de kolom niet constant. Dit komt vooral door de stijghoogtebuisjes die te klein waren om goed te reageren op kleine drukverschillen gecombineerd met de meetnauwkeurigheid (zie Sectie 2.2). De stijghoogtemetingen hebben een resolutie van +/-0.5 mm.

Verder werden in een laag van de kolom soms nul of positieve verhangen berekend. Een verhang van nul in een laag betekent dat de stijghoogte aan de bovenkant en onderkant van de laag gelijk zijn. Een positief verhang bij een neerwaartse stroming betekent dat de stijghoogte aan de bovenkant van de laag groter is dan die aan de onderkant. Het verschil in stijghoogte over een laag was maximaal 1 mm over een lengte van ongeveer 2.2 cm voor een verhang van 0.2. Dit kan ook worden verklaard door te kleine stijghoogtebuisjes. Voor deze gevallen zijn de metingen buiten beschouwing gelaten. Om dit te voorkomen zijn de stijghoogtebuisjes in proef 5b veranderd naar buisjes met een binnendiameter van 4 mm in plaats van 3 mm.

Er zijn ook kleine veranderingen in doorlatendheid over de tijd gemeten. Deze kleine veranderingen komen niet noodzakelijkerwijs door suffosie maar door de onzekerheid in de debietmeting (zie Figuur 2.3). Dit is ook vooral het geval voor lage verhangen.

Er is geen trend in verlaging van de doorlatendheid over de tijd waargenomen in proeven 1 t/m 7, en 11, met uitzondering van verandering door biologische verstopping of zuurstofontwikkeling in de top van het monster. Proef 8 laat wel een verlaging van de doorlatendheid zien bij een verhang van 2.5, en proef 9 ook bij een verhang van 5.5. In proef 10 is een grote doorlatendheidsverandering gezien over de hele hoogte van het monster. Vermoedelijk heeft de biologische verstopping of verstopping door zuurstofontwikkeling zich door de lange proefduur uitgebreid naar de rest van het monster. Wanneer de doorlatendheid wordt genormaliseerd voor proef 9 t/m 11 is te zien dat de verandering in doorlatendheid voor deze drie proeven eenzelfde patroon volgt (Figuur 3.4).



Figuur 3.4 Verandering van genormaliseerde doorlatendheid in de tijd voor proef 9 t/m 11

3.5 Verandering in Korrelverdeling

Na afloop van de proef is het monster opgebroken in lagen en per laag is de korrelverdeling (KVD) gemeten met een laser diffractie analyse. Hiermee kon worden geanalyseerd of er materiaal gespoeld is in de lagen, d.w.z. of de korrelverdeling per laag veranderd is.

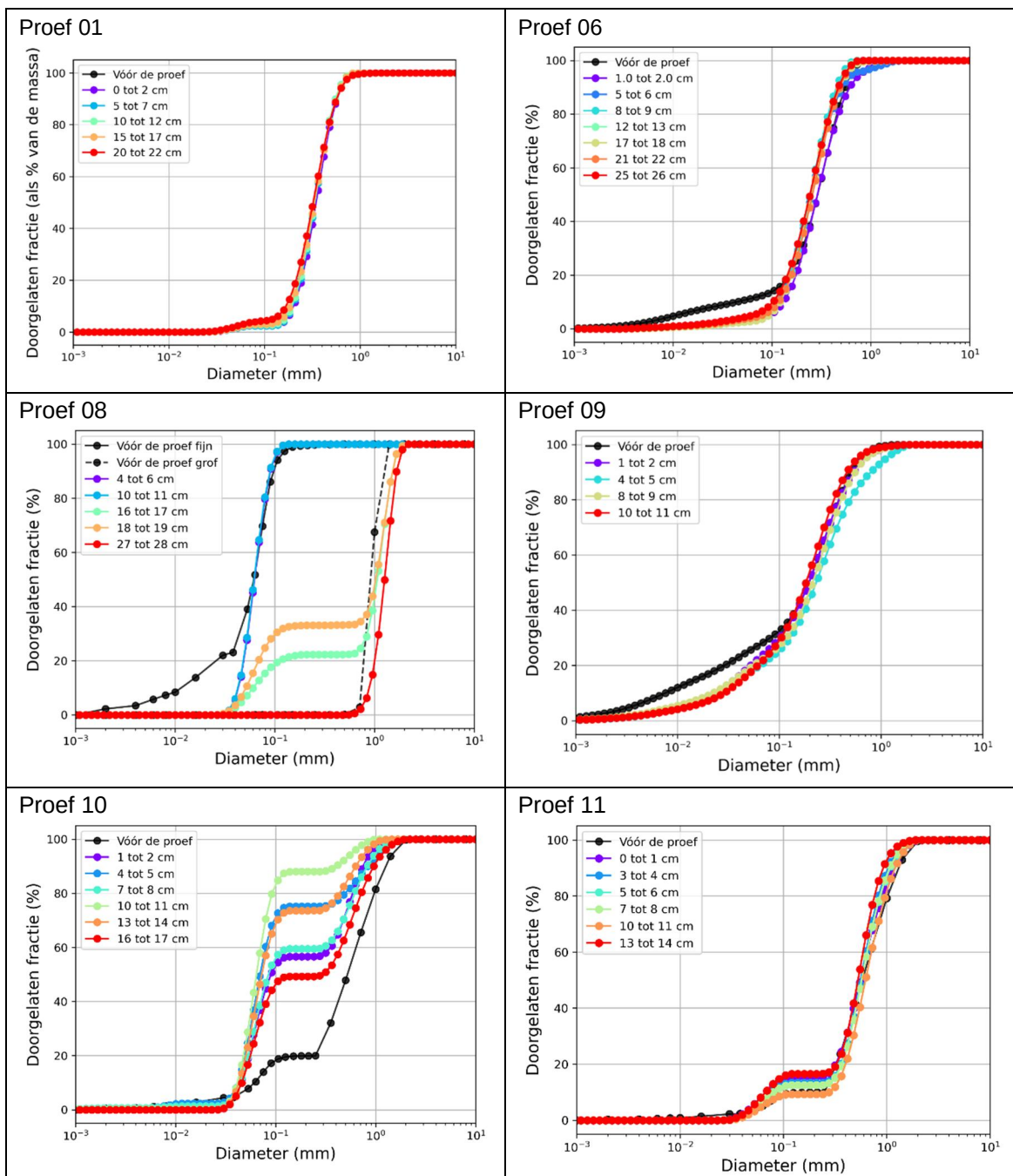
Een paar proeven laten wat veranderingen zien in de post-test (ook wel aangeduid als C.S.I.) analyse (Figuur 3.3):

- In proef 1 kan worden waargenomen dat de onderkant van het monster iets meer fijn materiaal bevat dan de bovenkant van het monster. Het verschil is in de orde van grootte van een paar procent en is waarschijnlijk binnen de meetnauwkeurigheid van de methode.
- In proef 6 kan worden waargenomen dat de onderste lagen meer fijn materiaal bevatten dan de bovenste laag. Hier is het verschil ook in de orde van grootte van een paar procent.
- In proef 8 is een groot gedeelte van de fijne fractie ingespoeld in de grovere fractie. Dit is duidelijk terug te zien in de C.S.I. analyse.
- In Proef 9 is het midden van het monster iets grover geworden en de onderste laag een beetje fijner. Dit valt ook binnen de meetnauwkeurigheid van de methode.

In proef 10 is er wel variatie in percentage silt, maar is er geen trend langs de hoogte van het monster. De laserdiffractie metingen geven merkwaardig hoge percentages silt en worden niet betrouwbaar geacht voor deze proef. Zeving leidde tot betrouwbaardere metingen waarin geen trend is waargenomen.

In proeven 2 t/m 4, 7 en 11 is geen verandering zichtbaar. In proeven 5 t/m 9 heeft de korrelverdeling vóór de proef meer fijn materiaal dan na de proef terwijl geen fijn materiaal is uitgespoeld. Dit kan worden verklaard door:

- Verlies aan fijn materiaal bij de bewerkingen (bijv. drogen).
- Verlies aan fijn materiaal bij de preparatie. De bovenste laag wordt vooraf van de proef weggehaald wat mogelijk veel fijn materiaal bevat.
- Het materiaal gebruikt voor de laser diffractie bevat net wat meer fijn materiaal dan de rest van het monster.



Figuur 3.5 Verandering in KVD voor proeven 1,6, 8 t/m 11. De lagen zijn vanaf de bovenkant van het monster gemeten

4 Discussie criteria en proefresultaten

In deze analyse zijn twee type proeven uitgevoerd: zeven suffosie proeven (bestaande uit één type materiaal: proeven 1 t/m 3, 6, en 9 t/m 11) en vier filterincompatibiliteit proeven (bestaande uit twee typen materiaal: proeven 4, 5, 7 en 8). De keuze van het materiaal is gemaakt aan de hand van stabiliteitscriteria en resultaten van eerdere proeven, d.w.z. alleen materiaal dat naar verwachting meer instabiel zal zijn dan eerdere proeven, is in de proeven meegenomen.

Omdat na proef 4 en 5, het beschikbare materiaal niet meer kritisch was op filterincompatibiliteit is er voor materiaal uit het lab gekozen. Hierdoor bestaat de fijne fractie van proef 7 uit silt en proef 8 bestaat uit silt en grof materiaal (filterzand). Proef 8 is niet representatief voor kanaal Almelo de Haandrik, maar is gekozen om aan te tonen dat de opstelling geschikt is om filterincompatibiliteit te testen.

De drie eerste proefmaterialen waren volgens de criteria van Kenney & Lau (1985) en door Wan & Fell (2008) aangepaste analyse van Burenkova intern stabiel. Volgens dezelfde criteria waren proeven 6 en 9 en 10 intern instabiel. Proef 11 was volgens Kenney & Lau marginaal instabiel, maar volgens Wann & Fell stabiel. Tijdens deze proeven is geen materiaal uitgespoeld, ondanks het aangebrachte verhang van 1 in proeven 1 t/m 3, van 2.5 voor proef 6, 10 en 11 en 5.5 voor proef 9. Proeven 1 en 6 lieten een kleine verandering in korrelverdeling na de proef zien, waarschijnlijk door meeton nauwkeurigheid of door zelf-filtratie in het monster. Na analyse van de korrelverdeling na afloop van proef 6 en 9 bleek echter ook dat, ofwel tijdens de verwerking van het zand ofwel tijdens preparatie, een deel van de fijne fractie verloren is gegaan, waardoor het beproefde materiaal niet meer suffosiegevoelig was, volgens de criteria. In proef 10 en 11 vertoonde de variatie in korrelverdeling geen trend.

Voor proeven 1 t/m 3 en 6 was er geen duidelijke verlaging van doorlatendheid of volumeverandering. In proef 9 was er wel een zichtbare verlaging van de doorlatendheid bij een verhang van 5.5 en wat veranderingen in korrelverdeling na de proef. Omdat er geen uitspoeling was van korrels is dit vermoedelijk veroorzaakt door zelf-filtratie in het monster of door biologische verstopping of verstopping door zuurstofontwikkeling. Het aangebrachte verhang van 5.5 is erg hoog en komt in de praktijk niet voor. In proef 10 was er een grote verandering van doorlatendheid over de hele hoogte van het monster. Het lijkt aannemelijk dat dit door biologische verstopping of zuurstofontwikkeling veroorzaakt is. Proeven 4 en 5 waren volgens Terzaghi (1922) en Lambe & Whitman (1969) stabiel op filterincompatibiliteit. Beide proeven lieten geen zichtbare uitspoeling van korrels zien. Proef 4 heeft een constante doorlatendheid over de tijd, geen volumeverandering en geen verandering van de korrelverdeling na de proef. Bij proef 5 is door het aanbrengen van een retourstroming met een gemiddeld verhang van 0.5 heave opgetreden omdat het verhang over het gedeelte met de fijne korrels groter was dan 1. Hierdoor was een verandering van de doorlatendheid, volume en korrelverdeling zichtbaar. Beide proeven waren niet gevoelig op filterincompatibiliteit.

Proeven 7 en 8 waren volgens Terzaghi (1922) en Lambe & Whitman (1969) instabiel voor filterincompatibiliteit. Tijdens proef 7 is een kleine verlaging van doorlatendheid te zien bij een verhang van 2.5. Verder was er geen verandering in volume of korrelverdeling. In proef 8 was wel een duidelijke verlaging van de hoogte van het monster te zien van ongeveer 15 mm. Tijdens deze proef is piping ontstaan en waren een paar 'luchtbellen' zichtbaar aan de bovenkant van het monster. Bij een verhang van 2.5 nam de doorlatendheid af (bij ongeveer

10^{-3} m/d) gedurende de proef en de korrelverdeling na de proef laat zien dat er fijn materiaal naar beneden is gespoeld, dit is ook te zien op de foto's. Echter, er was geen zichtbare uitspoeling van korrels, hierdoor lijkt het op zelf-filtratie in het monster.

5 Conclusies en aanbevelingen

Er zijn zeven suffosieproeven uitgevoerd.

- De materialen gebruikt in proeven 1 t/m 3 waren volgens de Kenney & Lau (1985) criteria intern stabiel wat ook bevestigd werd door de proeven.
- Het materiaal van proef 6 was volgens de Kenney & Lau (1985) criteria niet stabiel, maar na afloop van de proef bleek dat het materiaal wel stabiel was volgens de criteria, omdat het monster minder fijne fractie bevatte dan verwacht. Uit de proef bleek ook dat het materiaal stabiel was.
- Het materiaal gebruikt in proef 9 was volgens de Kenney & Lau (1985) criteria niet stabiel. Ook bij deze proef bleek achteraf dat het monster minder fijn materiaal bevatte dan vooraf gedacht, waardoor het volgens de criteria niet meer suffosiegevoelig was. Uit de proef blijkt dat waarschijnlijk zelffiltratie heeft plaatsgevonden bij een verhang van 5.5 maar geen uitspoeling.
- Proef 10 was volgens de criteria instabiel. Hoewel er wel een verandering in doorlatendheid is waargenomen, is er geen volumeverandering of uitgespoeld materiaal waargenomen bij een verhang van 2.5. Waarschijnlijk is de verandering van doorlatendheid veroorzaakt door biologische verstopping of zuurstofontwikkeling.
- Proef 11 was volgens Kenney & Lau marginaal instabiel, maar volgens Wan & Fell stabiel. Uit de proef bleek dat het materiaal stabiel was.

Er zijn vier filterincompatibiliteitsproeven uitgevoerd.

- De materialen gebruikt in proeven 4 en 5 waren volgens de Terzaghi (1922) en Lambe & Whitman (1969) criteria stabiel. Dit werd bevestigd door de proeven.
- Het materiaal gebruikt in proef 7 was volgens de Terzaghi (1922) en Lambe & Whitman (1969) criteria niet stabiel. Tijdens de proef werd een kleine verlaging in doorlatendheid waargenomen maar er was geen uitspoeling van materiaal. Hierdoor kan het materiaal toch als stabiel beschouwd worden.
- Het materiaal gebruikt in proef 8 was volgens de Terzaghi (1922) en Lambe & Whitman (1969) criteria niet stabiel en dit was ook terug te zien in de proeven. Er was een duidelijk sprake van zelffiltratie maar er trad nog geen uitspoeling op binnen de tijd van de uitvoering.

Referenties

- Burenkova, V. (1993). Assessment of Suffusion in Non-Cohesive and Graded Soils. *Proceedings of the 1st International Conference "Geo-Filters", Karlsruhe, 20-22, (pp. 357-360). Rotterdam.*
- ICOLD, I. C. (2015). *Internal Erosion of Existing*. ICOLD Bulletin, 1(164).
- Kenney, T., & Lau, D. (1985). Internal Stability of Granular Filters. *Canadian Geotechnical Journal* 22, 215-225.
- Kenney, T., & Lau, D. (1986). Internal Stability of Granular Filters: Reply. *Canadian Geotechnical Journal*, 23, 420-423.
- Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1969). Soil mechanics. John Willey & Sons. Inc. New York, 553.
- Rönnqvist, H., & Viklander, P. (2014). On the Kenney-Lau Approach to Internal Stability Evaluation of Soils. *Geomaterials*, 4, 129-140.
- Skempton, A., & Brogan, J. (1994). Experiments on piping in sandy gravels. *Géotechnique*, 44(3), 449–460.
- Terzaghi, K. (1922). Der Grundbruch an Stauwerken Und Seine Verhütung. . *Die Wasserkraft* 17 (24), 445–449.
- van Beek, V., van Meerten, H., van Onselen, E., Venmans, A., Vergroesen, T., & Zwanenburg, C. (2021). *Verdiepend onderzoek naar de schade rond het kanaal Almelo - De Haandrik*. Delft: Deltares.
- Wan, C., & Fell, R. (2008). Assessing the Potential of Internal Instability and Suffusion in Embankment Dams and Their Foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 134, No. 3, 401-407.

A Factsheets

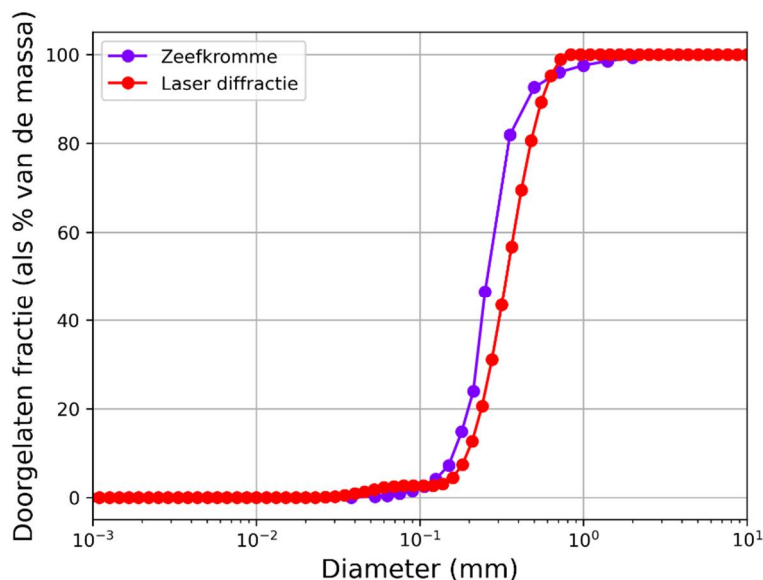
A.1 Factsheet proef 01

A.1.1 Eigenschappen proef

Proef 01 heeft plaats gevonden op 26/05/2021 en bestaat uit zand van boring B01_01 van 7.2 m tot 8.2 m-mv. De volgende gegevens zijn voor de proef gemeten:

- Temperatuur water: 20.5 °C;
- Kamertemperatuur: 21.8 °C;
- Hoogte van het filter: 1.7 cm;
- Hoogte van het monster: 32.5 cm;
- Droog gewicht: 3484.6 g;
- Porositeit: 0.36;
- Relatieve dichtheid: 68.8%.

De zeefkromme van het monster gemeten met een zeef analyse en een laser diffractie is in Figuur 0.1 te zien en de korrelgrootte voor verschillende massa-% is in Tabel 4 te zien.



Figuur 0.1 Proef 01 – Korrelverdeling gemaakt met zeefanalyse en laser diffractie. Voor laser diffractie is de doorgelaten fractie niet als % van de massa berekend maar als % van de volume.

Tabel 4 Proef 01 – Korrelgrootte voor verschillende doorgelaten fractie-% gebaseerd op de laser diffractie.

	Korrelgrootte (mm)
D15	0.174
D30	0.217
D50	0.268
D60	0.289
D85	0.430
D90	0.474

A.1.2

Proefverloop

De eerste proef verliep over een duur van 4 uren. Er is een milde, matige en grote neerwaartse stroming over het monster aangebracht. Na elke neerwaartse stroming is een opwaartse stroming aangebracht om deeltjes die door brugvorming vastgeraakt zijn in het pakket weer los te maken. Elke neerwaartse stroming is minstens 15 min aangebracht en iedere opwaartse 10 min. Er was geen zichtbare uitspoeling van materiaal. De debiet en stijghoogten over de kolom per ongeveer vijf minuten zijn in Tabel 5 te zien. De locatie van elke stijghoogtebuis is in Tabel 6 weergegeven.

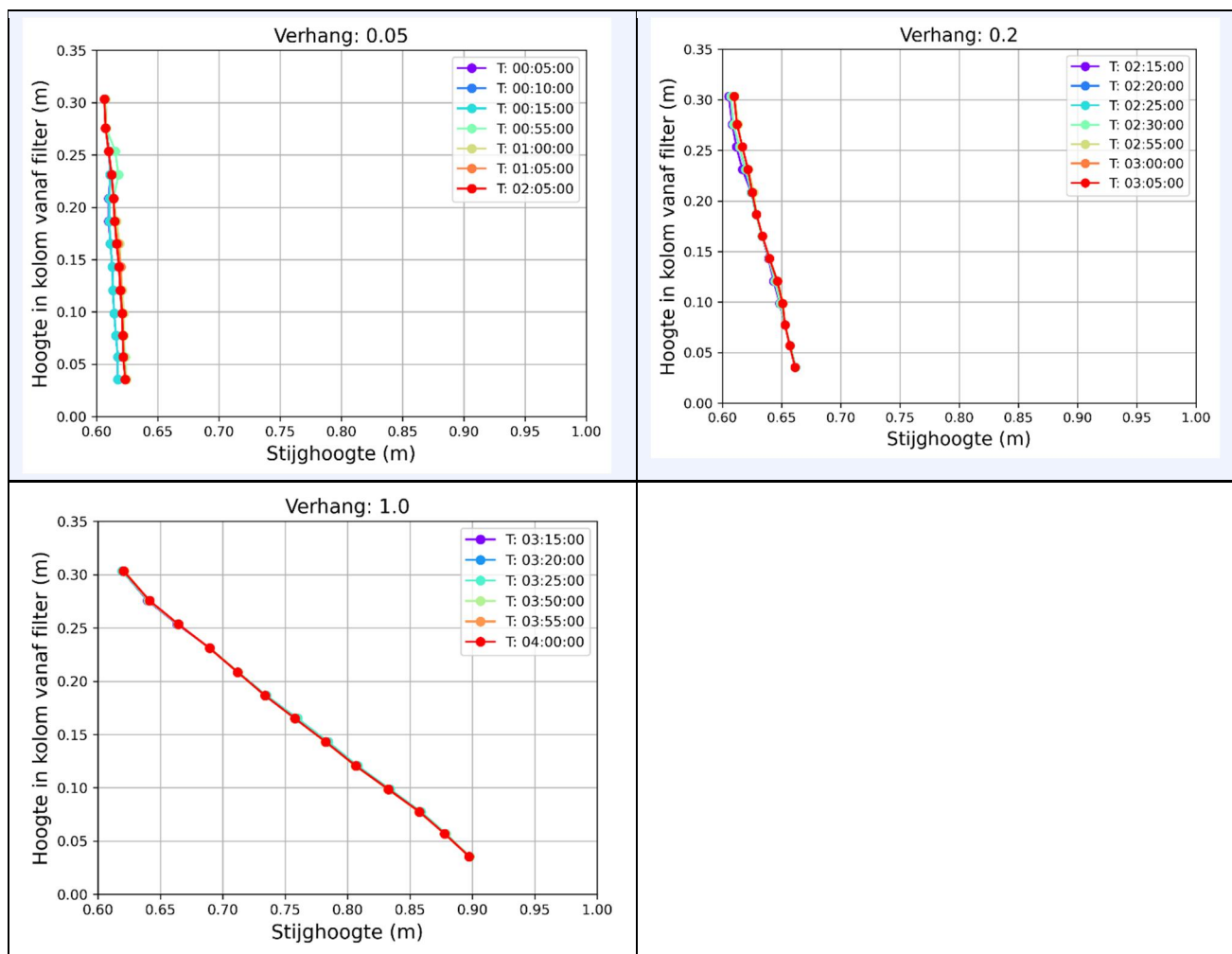
Tabel 5 Proef 01 – Verloop van de proef. De kolom 'Retour flow' geeft aan als het een neerwaartse stroming is (0) of een opwaartse stroming (1). Een hogere stijghoogte is in groen gekleurd en een lagere in rood met geel tussendoor.

Δp (cm)	i (-)	Retour Flow	stop watch	Flow (cc/min)	h1 (cm)	h2 (cm)	h3 (cm)	h4 (cm)	h5 (cm)	h6 (cm)	h7 (cm)	h8 (cm)	h9 (cm)	h10 (cm)	h11 (cm)	h12 (cm)	h13 (cm)	h14 (cm)	h15 (cm)	h16 (cm)	in (cm)	out (cm)
0	0	1	00:00	0.00	60.90	61.00	60.80	60.80	61.30	61.20	61.10	61.20	61.10	61.10	61.05	61.30	60.80	60.70	60.70	61.10	60.20	60.20
1.65	0.05	0	00:05	3.80	61.80	61.70	61.80	61.70	61.50	61.40	61.30	61.30	61.00	61.00	61.00	61.30	60.80	60.80	60.70	61.10	62.00	60.35
1.65	0.05	0	00:10	4.00	61.80	61.70	61.80	61.70	61.50	61.40	61.30	61.30	61.00	61.10	61.00	61.25	60.80	60.80	60.70	61.10	62.00	60.35
1.65	0.05	0	00:15	3.80	61.80	61.70	61.80	61.70	61.50	61.40	61.30	61.30	61.00	61.10	61.00	61.30	60.80	60.80	60.70	61.10	62.00	60.35
2.25	0.07	1	00:30	3.70	60.80	61.20	61.30	61.20	61.70	61.70	61.80	62.00	61.90	62.10	62.20	61.30	82.20	62.30	62.40	62.40	62.60	60.35
2.25	0.07	1	00:35	3.60	61.80	61.20	61.30	61.20	61.30	61.70	61.80	62.00	61.90	62.20	62.30	62.30	82.20	62.30	62.40	62.40	62.60	60.35
1.65	0.05	1	00:40	3.70	60.80	61.20	61.30	61.20	61.70	61.70	61.80	62.00	61.90	62.20	62.20	62.30	82.20	62.30	62.40	62.40	62.00	60.35
2.25	0.07	0	00:55	3.80	61.80	62.50	62.40	62.30	62.20	62.00	62.00	62.00	61.70	61.50	61.30	62.30	60.80	60.80	60.70	60.70	62.60	60.35
2.35	0.07	0	01:00	3.70	61.80	62.50	62.40	62.20	62.30	62.20	62.00	62.00	61.80	61.50	61.30	61.20	60.80	60.80	60.70	60.70	62.70	60.35
2.35	0.07	0	01:05	3.80	61.50	62.40	62.30	62.10	62.20	62.00	62.00	62.00	61.50	61.50	61.30	61.20	60.80	60.70	60.60	60.70	62.70	60.35
2.35	0.07	0	02:05	3.80	61.80	62.40	62.30	62.10	62.20	62.00	61.90	61.80	61.50	61.50	61.30	61.20	60.80	60.70	60.60	60.70	62.70	60.35
6.45	0.20	0	02:15	14.90	66.60	66.40	66.00	65.50	65.10	64.60	64.10	63.70	63.00	62.70	62.20	61.20	61.20	60.50	60.60	60.60	66.80	60.35
6.45	0.20	0	02:20	14.90	66.70	66.40	66.00	65.50	65.10	64.70	64.20	63.70	63.00	62.70	62.20	61.70	61.20	60.70	60.70	60.70	66.80	60.35
6.45	0.20	0	02:25	14.60	66.70	66.40	66.00	65.50	65.10	64.70	64.20	63.70	63.00	62.70	62.20	61.70	61.20	60.70	60.70	60.70	66.80	60.35
6.45	0.20	0	02:30	14.70	66.70	66.40	66.00	65.50	65.10	64.70	64.20	63.70	63.00	62.70	62.30	61.70	61.20	60.70	60.70	60.70	66.80	60.35
1.55	0.05	1	02:40	2.50	60.70	61.20	61.40	61.10	61.70	61.80	61.70	61.60	61.60	61.80	61.80	61.70	61.70	61.90	61.90	62.00	61.90	60.35
1.55	0.05	1	02:45	2.30	60.70	61.00	61.40	61.00	61.50	61.80	61.70	61.70	61.60	61.80	61.80	61.90	61.50	61.50	61.90	61.90	61.90	60.35
6.55	0.20	0	02:55	15.20	66.60	66.40	65.90	65.50	65.10	65.20	64.20	63.80	63.00	62.80	62.55	61.90	61.40	61.30	60.80	60.80	66.90	60.35
6.65	0.20	0	03:00	15.10	66.65	66.40	65.90	65.50	65.10	65.10	64.20	63.80	63.00	62.80	62.25	62.10	61.30	61.20	60.80	60.80	67.00	60.35
6.65	0.20	0	03:05	14.90	66.65	66.40	65.90	65.50	65.10	65.10	64.20	63.80	63.00	62.80	62.25	62.10	61.30	61.20	60.80	60.80	67.00	60.35
32.45	1.00	0	03:15	73.00	92.75	90.80	88.80	86.90	84.80	82.00	79.60	77.30	74.70	72.30	70.20	67.80	64.90	63.10	60.80	60.80	92.80	60.35
32.45	1.00	0	03:20	72.10	92.75	90.80	88.80	86.90	84.80	82.05	79.60	77.30	74.70	72.30	70.20	67.80	65.00	63.10	60.80	60.80	92.80	60.35
32.45	1.00	0	03:25	72.30	92.75	90.80	88.80	87.00	84.80	82.05	79.60	77.30	74.70	72.30	70.20	67.80	65.00	63.10	60.80	60.80	92.80	60.35
16.45	0.51	1	03:35	38.70	60.90	62.00	63.10	64.00	65.00	66.80	67.80	69.00	70.00	71.40	72.40	73.10	74.10	75.10	76.80	76.80	76.80	60.35
16.45	0.51	1	03:40	38.30	60.90	62.00	63.10	64.00	65.00	66.70	67.80	69.00	70.00	71.40	72.40	73.20	74.10	75.10	76.80	76.80	76.80	60.35
32.45	1.00	0	03:50	73.70	92.75	90.80	88.80	86.85	84.70	81.85	79.40	77.10	74.50	72.30	70.20	67.80	65.00	63.15	61.00	60.80	92.80	60.35
32.45	1.00	0	03:55	73.00	92.75	90.80	88.70	86.85	84.60	81.90	79.40	77.10	74.50	72.30	70.10	67.80	65.10	63.20	61.00	60.80	92.80	60.35
32.45	1.00	0	04:00	73.10	92.75	90.80	88.70	86.85	84.70	81.90	79.45	77.10	74.50	72.30	70.10	67.80	65.10	63.20	60.90	60.80	92.80	60.35

Tabel 6 Proef 01 – Positie van de stijghoogtebuizen.

Label	Afstand van het filter (cm)
h1	0.0
h2	2.5
h3	4.7
h4	6.8
h5	8.8
h6	11.0
h7	13.2
h8	15.5
h9	17.6
h10	19.8
h11	22.0
h12	24.3
h13	26.5
h14	28.7
h15	32.1
h16	34.5

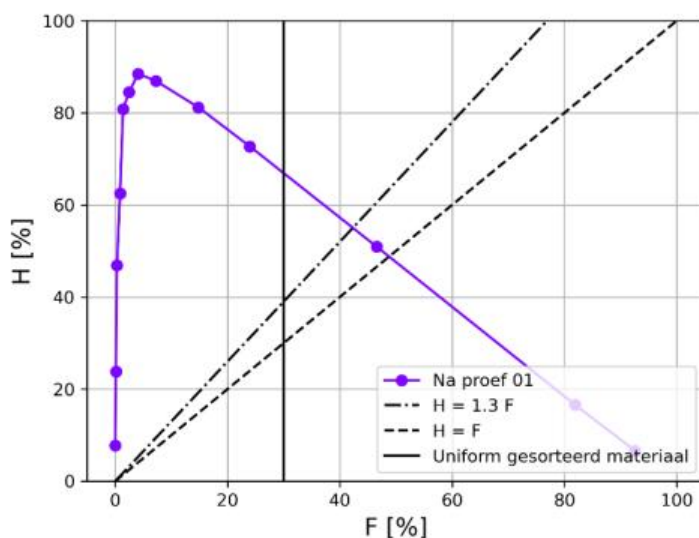
Figuur 0.2 geeft de stijghoogtemetingen aan in de loop van de tijd van de proef voor verschillende aangebrachte verhangen. Deze zijn, per verhang, constant over de tijd.



Figuur 0.2 Proef 01 – Stijghoogte voor verschillende verhangen over de kolom en over de tijd.

A.1.3 Analyse Kenney & Lau en Wan & Fell

De zeefkromme van Figuur 0.1 is gebruikt om een Kenney & Lau (1985) analyse te maken en daardoor te voorspellen of het materiaal intern stabiel is. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 0.3, waar duidelijk te zien is dat het monster stabiel is, dat wil zeggen dat de punten met $F < 30\%$ zijn allemaal boven beide zwarte onderbroken lijnen liggen.

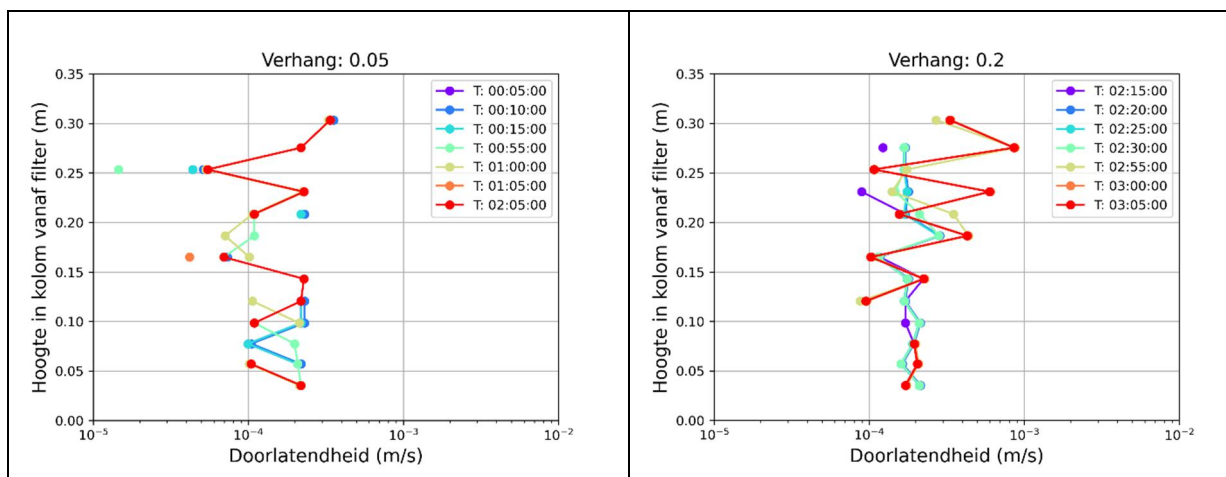


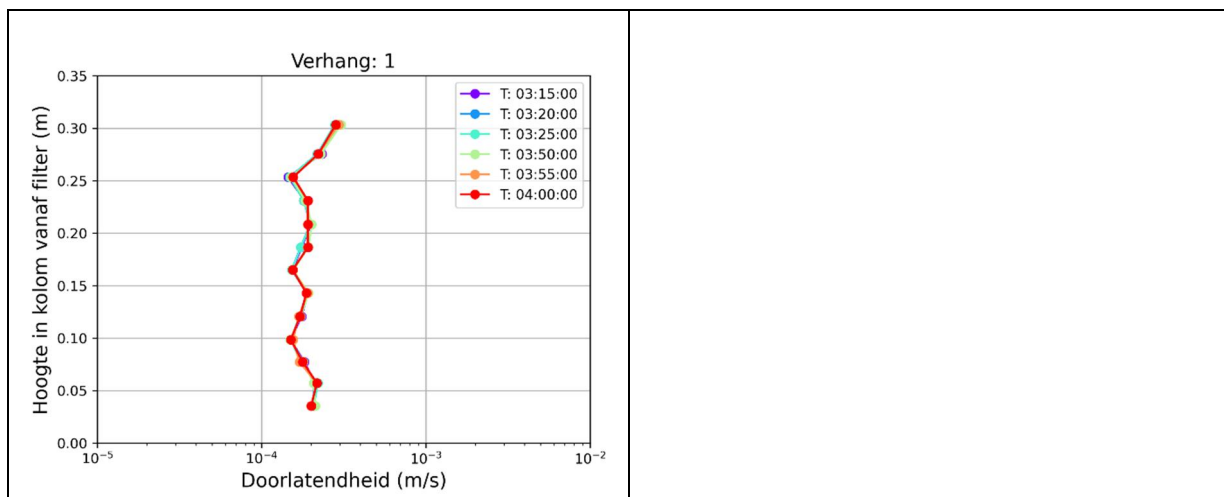
Figuur 0.3 Proef 01 – Uitwerking Kenney & Lau (1985) methode voor het monster.

Met deze zweefkromme is ook een Wan & Fell (2008) analyse gemaakt. De voorspelde kans op interne instabiliteit is 0.15, wat ook aangeeft dat het monster intern stabiel is.

A.1.4 Doorlatendheid over de hoogte en tijd

Figuur 0.4 geeft het verloop van de doorlatendheid aan over de tijd. Op de x-as staat de doorlatendheid in m/s, en op de y-as is de hoogte van de kolom in meters aangegeven. Een plot is gemaakt voor elke meting, ongeveer elke 5 minuten. Uit de resultaten is af te leiden dat de doorlatendheid over de kolom aanzienlijk kan veranderen vooral voor lage verhangen, dit is in Sectie 3.3 toegelicht. Per fase is de doorlatendheid over de tijd ongeveer constant, hierdoor kan worden geconcludeerd dat er geen suffosie is opgetreden.





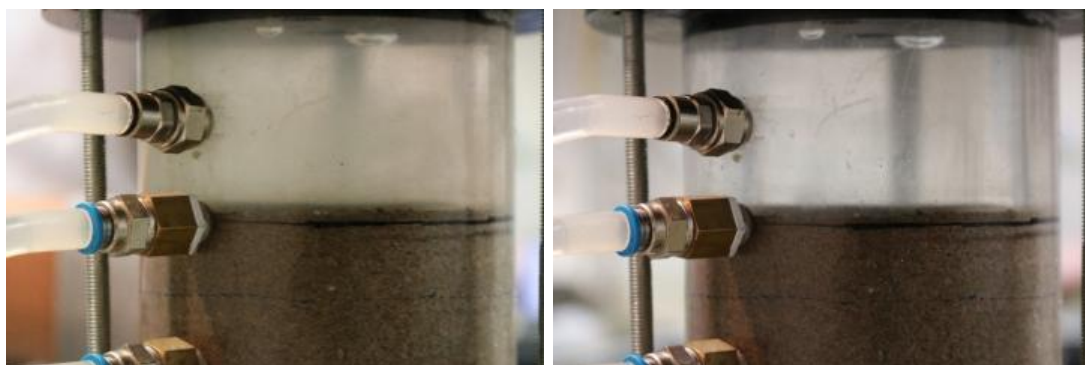
Figuur 0.4 Proef 01 – Doorlatendheid over de hoogte voor verschillende tijdstippen en verhangen.

A.1.5 Volumeverandering

Met twee camera's foto's gemaakt: aan de onderkant van het monster ingezoomd om de korrels te zien (Figuur 0.5) en aan de bovenkant van het monster uitgezoomd om eventuele verzakkingen te zien (Figuur 0.6). Uit beide analyses blijkt dat er geen verandering is plaatsgevonden tijdens de proef. Uit Figuur 0.6 blijkt dat het water helder werd na de proef.



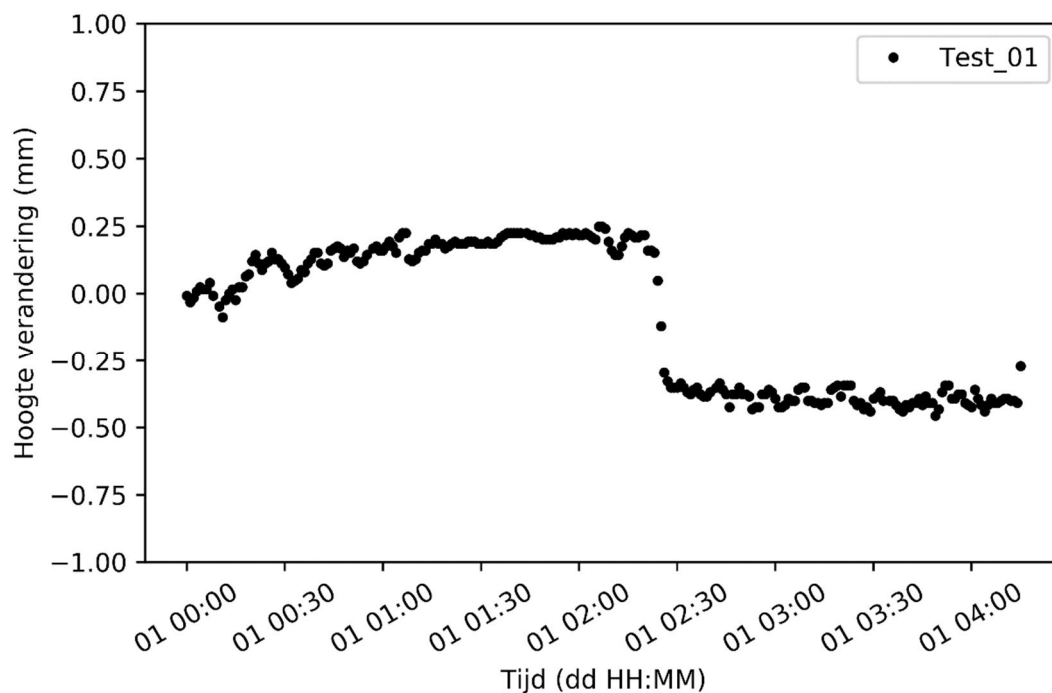
Figuur 0.5 Proef 01 – Foto gezoomd op de korrels aan de onderkant van het monster voor (links) en na (rechts) de proef.



Figuur 0.6 Proef 01 – Foto van de bovenkant van het monster vóór (links) en na (rechts) de proef.

Met behulp van foto's zoals Figuur 0.6, was de hoogteverandering van het monster bepaald (zie Figuur 0.7). De veranderingen in hoogte van het monster zijn verklaarbaar door onnauwkeurigheden en niet door een verlies aan materiaal. In proef 01 was de kolom nog niet vast, na 140 min werd deze vastgemaakt wat 0.75 mm verschuiving heeft veroorzaakt,

dit is terug te zien in Figuur 0.7. Verder is de camera niet vast en kan daardoor nog voor wat kleine beweging oorzaken. Dit gebeurt rond 50 min en is duidelijk terug te zien in de verschilbeelden gebruikt ter controle van de resultaten, i.e. het monster verschuift even veel als een vast punt in de foto. Een verschil in achtergrondverlichting kan ook wat kleine veranderingen veroorzaken. Globaal genomen is er geen verschil in hoogte van het monster.



Figuur 0.7 Proef 01 – Hoogteverandering van het monster over de duur van de proef.

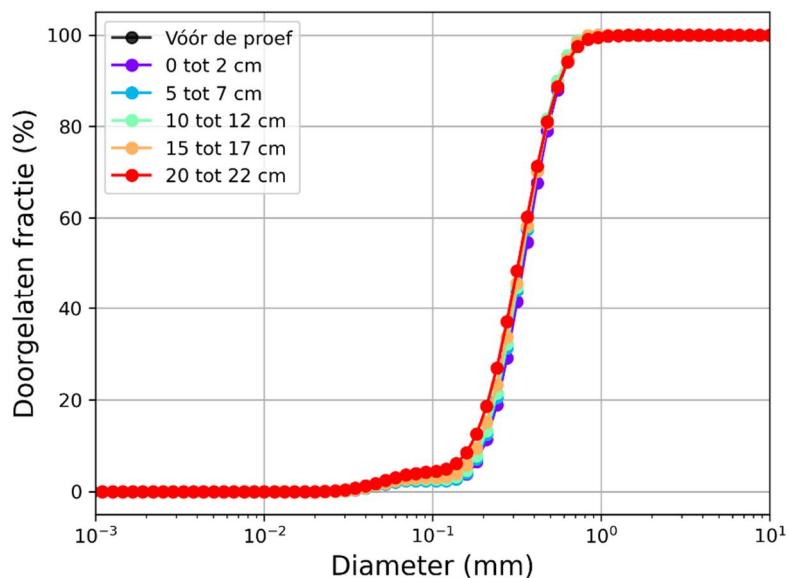
A.1.6

C.S.I. korrelverdeling

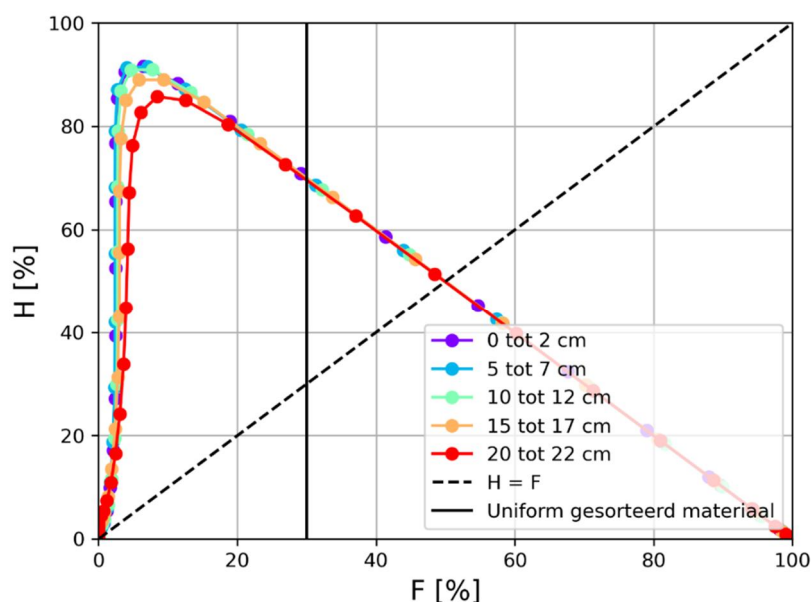
Figuur 0.8 geeft de C.S.I. korrelverdelingen per laag na de proef, en Tabel 7 geeft de D10 en D20 per laag. Deze korrelverdelingen zijn gebruikt om per laag ook een Kenney & Lau (1985) analyse te maken (Figuur 0.9), hieruit blijkt dat geen laag intern instabiel is. Er zijn kleine verschillen waargenomen in de fijne fractie over de diepte. Er lijkt een geleidelijke toename in fijne fractie te zijn in neerwaartse richting: het gaat echter om een zeer klein percentage.

Tabel 7 Proef 01 – D10 en D20 per laag na het einde van de proef. De lagen zijn vanaf de bovenkant van het monster gemeten.

C.S.I. laag	D10 (mm)	D20 (mm)
0 tot 2 cm	0.201	0.244
5 tot 7 cm	0.197	0.238
10 tot 12 cm	0.193	0.234
15 tot 17 cm	0.185	0.227
20 tot 22 cm	0.167	0.214



Figuur 0.8 Proef 01 – Korrelverdeling per laag na het einde van de proef. De lagen zijn vanaf de bovenkant van het monster gemeten.



Figuur 0.9 Proef 01 – Kenney & Lau (1985) criteria per laag aan het einde van de proef. De lagen zijn vanaf de bovenkant van het monster gemeten.

A.2 Factsheet proef 02

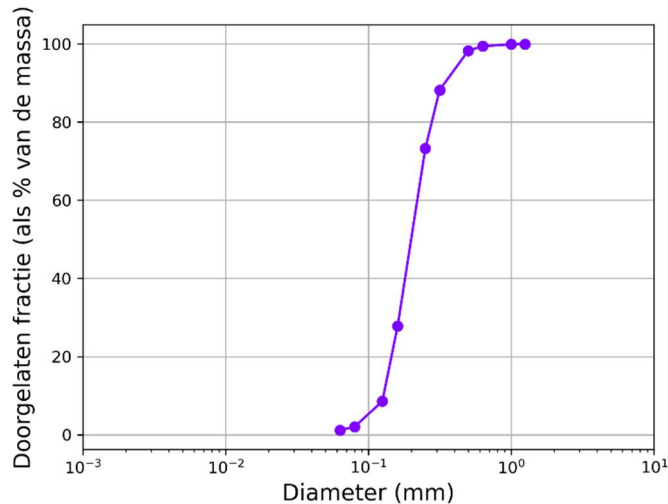
A.2.1 Eigenschappen proef

Proef 02 heeft plaats gevonden op 01/06/2021 en bestaat uit zand van boring B02-01. Het betreft een mengmonster: doordat het zandpakket niet uit dikke lagen van hetzelfde materiaal bestaat, is om voldoende materiaal met vergelijkbare eigenschappen bijeen te brengen een mengmonster genomen op dieptes 5.92-6 m-mv, 6.15-6.44 m-mv, 7.25-7.38 m-mv. De volgende gegevens zijn voor de proef gemeten:

- Temperatuur water: 20.5 °C;
- Kamertemperatuur: 22.1 °C;

- Hoogte van het filter: 2.5 cm;
- Hoogte van het monster: 22.45 cm;
- Droog gewicht: 2260.4 g;
- Porositeit: 0.40;
- Relatieve dichtheid: 46.0%.

De zeefkromme van het monster is in Figuur 0.10 te zien en de korrelgrootte voor verschillende massa-% is in Tabel 8 te zien.



Figuur 0.10 Proef 02 – Korrelverdeling gemaakt met zeefanalyse t/m 0.063 mm.

Tabel 8 Proef 02 – Korrelgrootte voor verschillende doorgelaten fractie-% gebaseerd op de laser diffractie.

	Korrelgrootte (mm)
D15	0.1367
D30	0.1643
D50	0.204
D60	0.2238
D85	0.301
D90	0.3476

A.2.2 Proefverloop

De tweede proef duurde ongeveer 5 uur en 30 min. Na 1 uur 25 min raakte de bovenste laag verstopt, waarschijnlijk door biologisch reden. Hierdoor is na 3 uren en 45 min de bovenlaag (ongeveer 5 mm) gezogen en daarna is de proef verder gegaan. Uit proef 1 bleek dat een verhang van 0.05 niet veel verandering liet zien en minder nauwkeurige resultaten gaf. Daardoor is voor deze proef gekozen om direct te beginnen met een matige stroming, d.w.z. verhang van 0.2, en geen milde stroming te toetsen. Er werd ook besloten om minimaal 30 min per neerwaartse stroming aan te brengen en 10 min opwaartse stroming. Er was geen

zichtbare uitspoeling van materiaal. Het debiet en stijghoogten over de kolom per ongeveer vijf minuten zijn in Tabel 9 te zien. De locatie van elke stijghoogtebuis is in Tabel 10 weergegeven.

Tabel 9 Proef 02 – Verloop van de proef. De kolom 'Retour flow' geeft aan als het een neerwaartse stroming is (0) of een opwaartse stroming (1). Een hogere stijghoogte is in groen gekleurd en een lagere in rood met geel tussendoor.

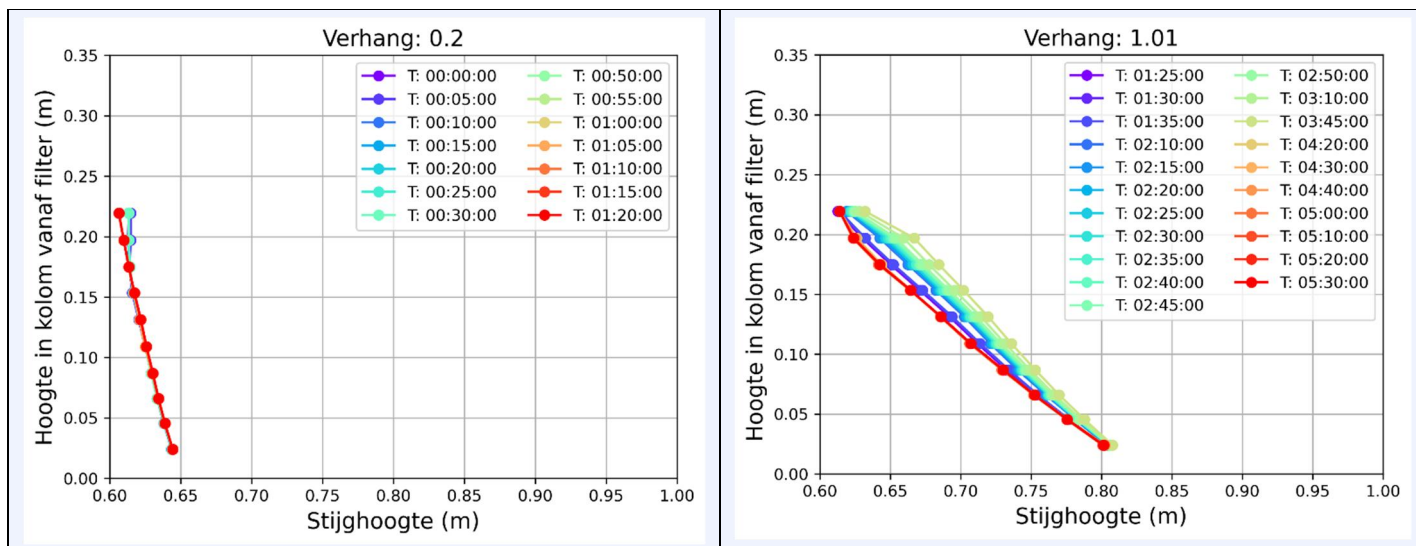
Δp (cm)	i (-)	Retour Flow	stop watch	Flow (cc/min)	h1 (cm)	h2 (cm)	h3 (cm)	h4 (cm)	h5 (cm)	h6 (cm)	h7 (cm)	h8 (cm)	h9 (cm)	h10 (cm)	h11 (cm)	h12 (cm)	in (cm)	out (cm)
0	0	1	00:00		60.50	60.60	61.70	61.20	61.10	61.10	61.10	61.20	61.30	61.30	61.20	61.30	60.40	60.40
4.5	0.200445	0	00:00	16.00	64.90	64.70	64.15	63.50	63.20	62.70	62.30	61.80	61.40	61.40	61.20	61.50	64.90	60.40
4.6	0.2049	0	00:05	16.00	64.90	64.60	64.15	63.50	63.20	62.70	62.30	61.85	61.40	61.40	61.60	61.40	65.00	60.40
4.6	0.2049	0	00:10	15.70	64.90	64.60	64.15	63.50	63.20	62.70	62.30	61.85	61.40	61.40	61.30	61.40	65.00	60.40
4.6	0.2049	0	00:15	15.90	64.90	64.60	64.15	63.50	63.20	62.70	62.30	61.90	61.40	61.40	61.30	61.40	65.00	60.40
4.6	0.2049	0	00:20	15.70	64.90	64.60	64.20	63.50	63.20	62.70	62.30	61.90	61.45	61.40	61.30	61.40	65.00	60.40
4.6	0.2049	0	00:25	15.80	64.90	64.60	64.20	63.50	63.20	62.70	62.30	61.90	61.45	61.40	61.30	61.40	65.00	60.40
4.6	0.2049	0	00:30	15.80	64.90	64.60	64.20	63.50	63.20	62.70	62.30	61.90	61.45	61.40	61.30	61.40	65.00	60.40
1.1	0.048998	1	00:40	2.90	60.60	60.40	60.80	61.00	61.40	61.40	61.70	61.70	61.70	61.60	61.75	61.60	61.50	60.40
1.1	0.048998	1	00:45	2.70	60.60	60.50	60.80	61.00	61.30	61.30	61.70	61.70	61.60	61.50	61.75	61.55	61.50	60.40
4.6	0.2049	0	00:50	16.00	65.10	64.60	64.20	63.60	63.30	62.80	62.30	61.90	61.50	61.20	60.80	60.50	65.00	60.40
4.6	0.2049	0	00:55	16.10	65.05	64.70	64.20	63.55	63.30	62.70	62.30	61.90	61.50	61.20	60.80	60.50	65.00	60.40
4.6	0.2049	0	01:00	16.00	65.05	64.70	64.20	63.55	63.30	62.70	62.30	61.90	61.50	61.20	60.80	60.50	65.00	60.40
4.6	0.2049	0	01:05	16.00	65.05	64.70	64.20	63.55	63.30	62.70	62.30	61.90	61.50	61.20	60.80	60.50	65.00	60.40
4.6	0.2049	0	01:10	16.10	65.05	64.70	64.20	63.60	63.30	62.80	62.40	62.00	61.50	61.20	60.80	60.50	65.00	60.40
4.6	0.2049	0	01:15	15.90	65.05	64.70	64.20	63.60	63.30	62.80	62.40	62.00	61.50	61.20	60.80	60.50	65.00	60.40
4.6	0.2049	0	01:20	15.90	65.05	64.70	64.20	63.60	63.30	62.80	62.40	62.00	61.50	61.20	60.80	60.50	65.00	60.40
22.5	1.002227	0	01:25	75.30	82.85	81.40	78.80	76.30	74.30	72.20	70.20	68.20	66.00	64.05	62.00	60.55	82.90	60.40
22.6	1.006682	0	01:30	74.80	82.85	81.40	78.90	76.40	74.40	72.30	70.40	68.30	66.10	64.15	62.10	60.60	83.00	60.40
22.6	1.006682	0	01:35	74.40	82.85	81.40	78.90	76.50	74.50	72.35	70.40	68.40	66.20	64.25	62.20	60.60	83.00	60.40
22.55	1.004454	0	02:10	70.40	82.85	81.40	79.30	77.00	75.10	73.00	71.20	69.30	67.20	65.30	63.20	60.60	83.00	60.45
22.55	1.004454	0	02:15	69.40	82.85	81.60	79.25	77.00	75.20	73.15	71.30	69.45	67.30	65.40	63.35	60.60	83.00	60.45
22.55	1.004454	0	02:20	68.90	82.85	81.70	79.35	77.15	75.25	73.20	71.40	69.50	67.50	65.60	63.60	60.60	83.00	60.45
22.55	1.004454	0	02:25	68.50	82.85	81.70	79.35	77.15	75.30	73.30	71.55	69.60	67.55	65.70	63.70	60.60	83.00	60.45
22.55	1.004454	0	02:30	68.30	82.85	81.70	79.40	77.15	75.35	73.40	71.60	69.70	67.70	65.90	63.80	60.60	83.00	60.45

22.5	1.002227	0	02:35	67.60	82.85	81.70	79.40	77.20	75.45	73.50	71.70	69.80	67.80	66.00	64.00	60.60	83.00	60.50
22.5	1.002227	0	02:40	66.80	82.85	81.70	79.40	77.30	75.50	73.60	71.80	70.00	68.00	66.15	64.20	60.60	83.00	60.50
22.5	1.002227	0	02:45	66.00	82.90	81.70	79.50	77.35	75.60	73.65	71.90	70.10	68.10	66.25	64.30	60.60	83.00	60.50
22.5	1.002227	0	02:50	65.50	82.90	81.75	79.55	77.40	75.65	73.70	72.00	70.15	68.20	66.40	64.40	60.60	83.00	60.50
22.5	1.002227	0	03:10	63.50	82.90	81.75	79.60	77.50	75.85	74.00	72.30	70.55	68.60	66.90	65.00	60.60	83.00	60.50
22.5	1.002227	0	03:45	60.50	82.90	81.80	79.80	77.80	76.20	74.40	72.80	71.10	69.30	67.60	65.80	60.60	83.00	60.50
22.6	1.006682	0	04:20	77.70	82.85	81.60	78.90	76.30	74.20	71.80	69.55	67.60	65.35	63.45	61.80	61.00	83.10	60.50
22.6	1.006682	0	04:30	77.80	82.85	81.60	78.90	76.30	74.20	71.80	69.50	67.60	65.30	63.30	61.80	61.00	83.10	60.50
22.6	1.006682	0	04:40	77.70	82.85	81.60	78.90	76.30	74.20	71.80	69.50	67.60	65.30	63.30	61.80	61.00	83.10	60.50
11.3	0.503341	1	04:45	40.00	61.15	61.50	62.30	63.30	64.60	65.80	67.00	68.00	69.10	70.10	71.10	71.60	71.80	60.50
11.3	0.503341	1	04:50	40.10	60.80	61.50	62.30	63.30	64.60	65.80	67.00	68.00	69.10	70.10	71.10	71.60	71.80	60.50
22.4	0.997773	0	05:00	78.50	82.80	81.40	78.80	76.25	74.10	71.75	69.50	67.60	65.20	63.10	61.60	61.20	82.90	60.50
22.4	0.997773	0	05:10	77.80	82.80	81.40	78.85	76.30	74.20	71.85	69.55	67.60	65.25	63.20	61.60	61.20	82.90	60.50
22.4	0.997773	0	05:20	77.60	82.80	81.40	78.85	76.30	74.20	71.85	69.60	67.60	65.30	63.20	61.60	61.20	82.90	60.50
22.5	1.002227	0	05:30	77.70	82.80	81.50	78.85	76.30	74.20	71.85	69.60	67.60	65.30	63.20	61.60	61.20	83.00	60.50

Tabel 10 Proef 02 – Positie van de stijghoogtebuizen.

Label	Afstand van het filter (cm)
h1	0.0
h2	1.3
h3	3.5
h4	5.6
h5	7.6
h6	9.8
h7	12.0
h8	14.3
h9	16.4
h10	18.6
h11	20.8
h12	23.1

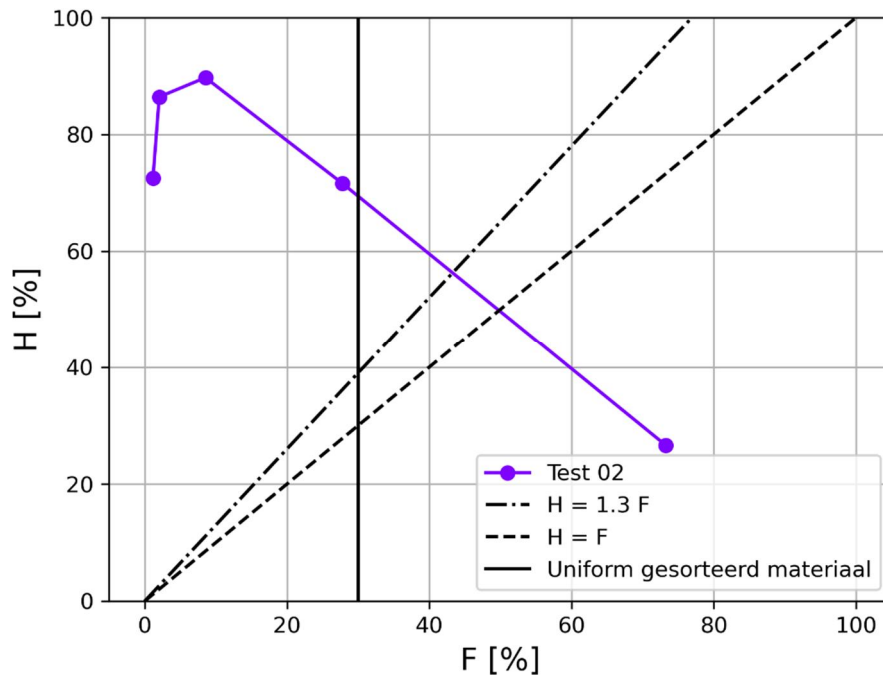
Figuur 0.11 geeft de stijghoogtemetingen aan in de loop van de tijd van de tweede proef voor verschillende aangebrachte verhangen. Deze zijn voor een verhang van 0.2 constant over de tijd. Met een verhang van 1 wijken de stijghoogtes af door de biologisch verstopping.



Figuur 0.11 Proef 02 – Stijghoogte voor verschillende verhangen over de kolom en over de tijd.

A.2.3 Analyse Kenney & Lau en Wan & Fell

De zeefkomme van Figuur 0.10 is gebruikt om een Kenney & Lau (1985) analyse te maken en daardoor te voorspellen of het materiaal intern stabiel is. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 0.12, waar duidelijk te zien is dat het monster stabiel is, dat wil zeggen dat de punten met $F < 30\%$ zijn allemaal boven beide zwarte onderbroken lijnen liggen.

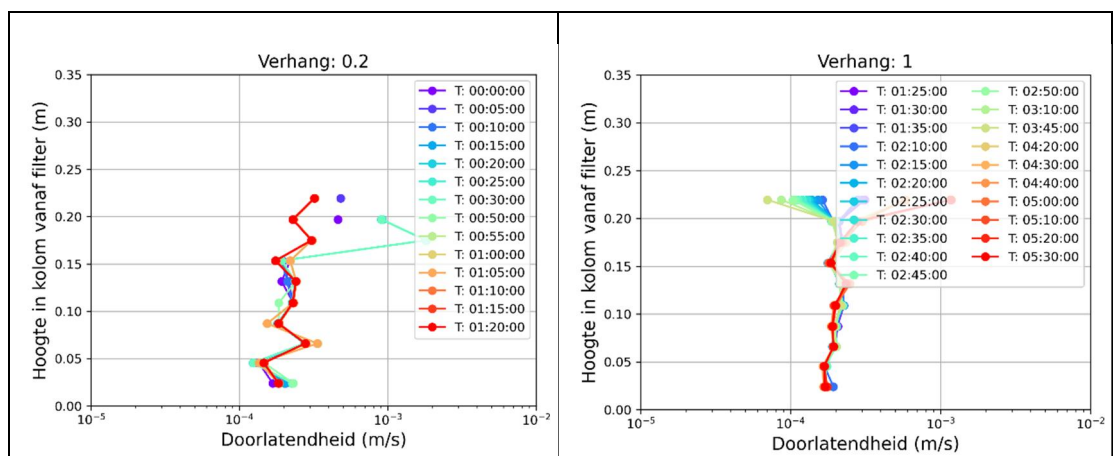


Figuur 0.12 Proef 02 – Uitwerking Kenney & Lau (1985) methode voor het monster.

Met deze zweefkromme is ook een Wan & Fell (2008) analyse gemaakt. De voorspelde kans op interne instabiliteit is 0.17, wat ook aangeeft dat het monster intern stabiel is.

A.2.4 Doorlatendheid over de hoogte en tijd

Figuur 0.13 geeft het verloop van de doorlatendheid aan over de tijd. Op de x-as staat de doorlatendheid in m/s, en op de y-as is de hoogte van de kolom in meter weergegeven. Een plot is gemaakt voor elke meting, ongeveer elke 5 minuten. Uit de resultaten is af te leiden dat de doorlatendheid over de kolom aanzienlijk kan veranderen vooral voor lage verhangen, dit is in Sectie 3.3 toegelicht. Per fase is de doorlatendheid over de tijd ongeveer constant, hierdoor kan worden geconcludeerd dat er geen suffosie is opgetreden. Alleen bij een verhang van 1 tussen tijdstip 01:25 tot 03:45 verandert de doorlatendheid aan de bovenkant van het monster, dit komt niet door suffosie maar door de opzuiging van de bovenste 5 mm laag waardoor juist onder die bovenste 5 mm ook fijn materiaal werden verwijderd. Dit is gedaan door een biologisch verstopping aan de bovenkant te verwijderen. Er is tijdens de proef en tijdens het verwijderen van de biologische verstopping geen suffosie opgetreden.



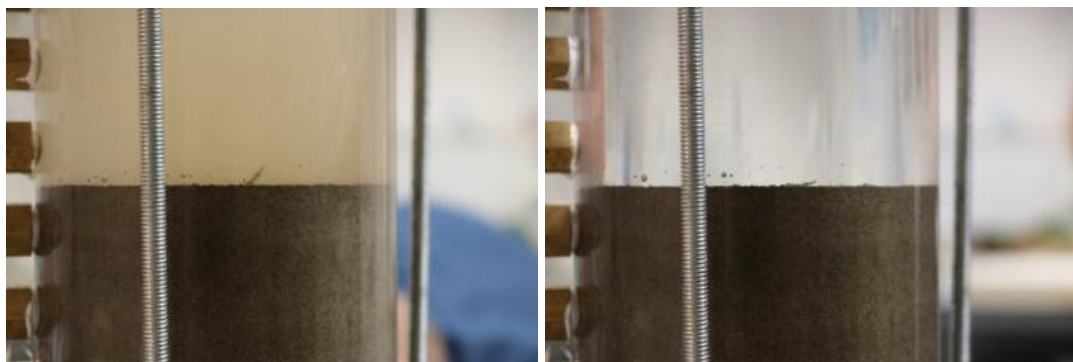
Figuur 0.13 Proef 02 – Doorlatendheid over de hoogte voor verschillende tijdstippen en verhangen.

A.2.5 Volumeverandering

Met twee camera's zijn iedere minuut foto's gemaakt aan de onderkant van het monster ingezoomd om de korrel te zien (Figuur 0.14) en aan de bovenkant van het monster uitgezoomd om eventueel verzakkingen te zien (Figuur 0.15). Visueel blijkt dat er geen verandering heeft plaats gevonden tijdens de proef. Uit Figuur 0.15 blijkt dat het water helder werd na het proef.

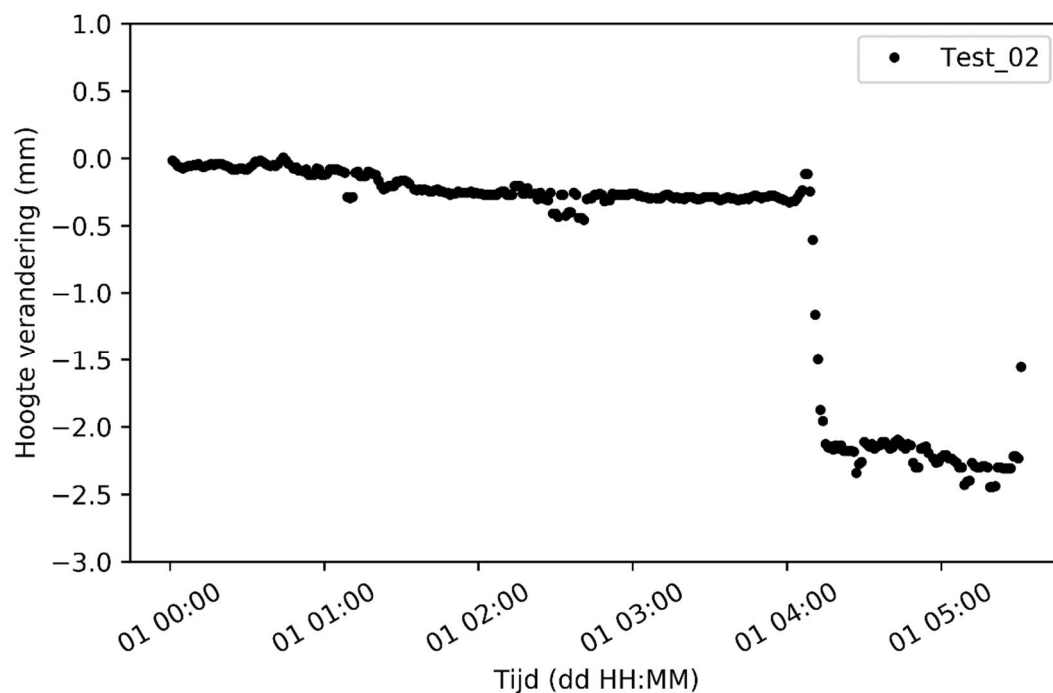


Figuur 0.14 Proef 02 – Foto gezoomd op de korrels aan de onderkant van het monster voor (links) en na (rechts) de proef.



Figuur 0.15 Proef 02 – Foto aan de bovenkant van het monster vóór (links) en na (rechts) de proef.

Met behulp van foto's zoals Figuur 0.15, was de hoogte verandering van het monster bepaald (zie Figuur 0.16). Vóór het afzuigen van het monster (vóór 250 min) is een verschuiving van circa 0.24 mm te zien. Doordat er geen consistente verandering is in vast punten in de verschilbeelden, komt deze verschuiving niet door beweging van de camera. De achtergrond verlichting verandert wel veel en zou de 0.24 mm verschuiving kunnen verklaren. In het algemeen, vóór de opzuiging, zijn er geen verandering in hoogte van het monster. Rond 250 min is er een 2 mm verlaging van het monster door opzuiging.



Figuur 0.16 Proef 02 – Hoogte verandering van het monster voor en tijdens de verstopping.

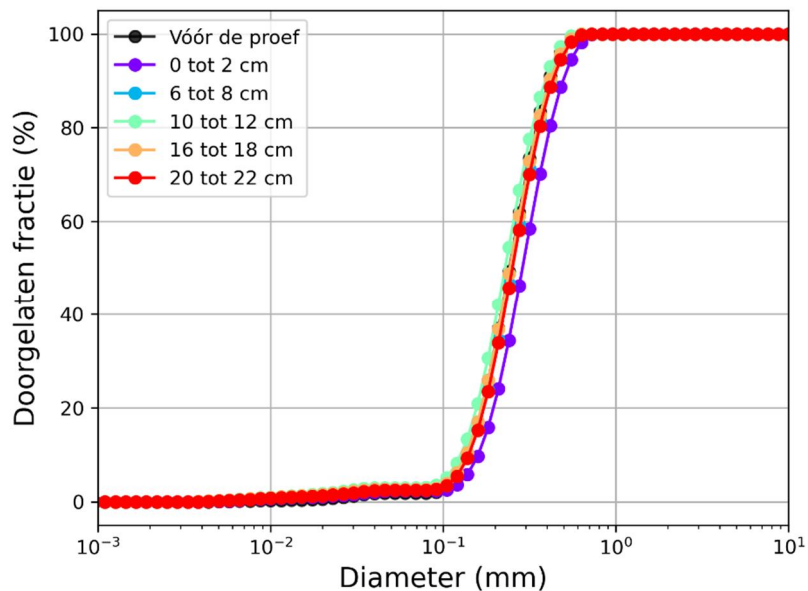
A.2.6

C.S.I. korrelverdeling

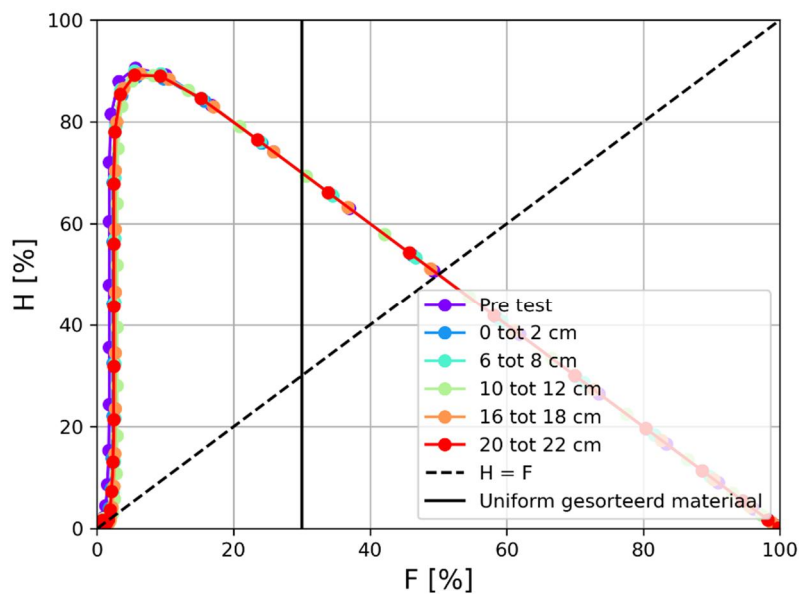
Figuur 0.17 geeft de C.S.I korrelverdelingen per laag na de proef, en Tabel 11 geeft de D10 en D20 per laag. Deze korrelverdelingen zijn gebruikt om per laag ook een Kenney & Lau (1985) analyse te maken (Figuur 0.18). Figuur 0.17 geeft aan dat de laag van 0 tot 2 cm vanaf de bovenkant van het monster grover is dan de rest, dit komt waarschijnlijk doordat deze laag afgezogen werd na de verstopping. Verder is er geen trend in de korrelverdeling te ontdekken. Hieruit blijkt dat geen enkele laag intern instabiel is.

Tabel 11 Proef 02 – D10 en D20 per laag na het einde van de proef. De lagen zijn vanaf de bovenkant van het monster gemeten.

C.S.I. laag	D10 (mm)	D20 (mm)
0 tot 2 cm	0.16	0.196
6 tot 8 cm	0.14	0.171
10 tot 12 cm	0.126	0.156
16 tot 18 cm	0.136	0.166
20 tot 22 cm	0.141	0.172



Figuur 0.17 Proef 02 – Korrelverdeling per laag na het einde van de proef. De lagen zijn vanaf de bovenkant van het monster gemeten.



Figuur 0.18 Proef 02 – Kenney & Lau (1985) criteria per laag aan het einde van de proef. De lagen zijn vanaf de bovenkant van het monster gemeten.

A.3 Factsheet proef 03

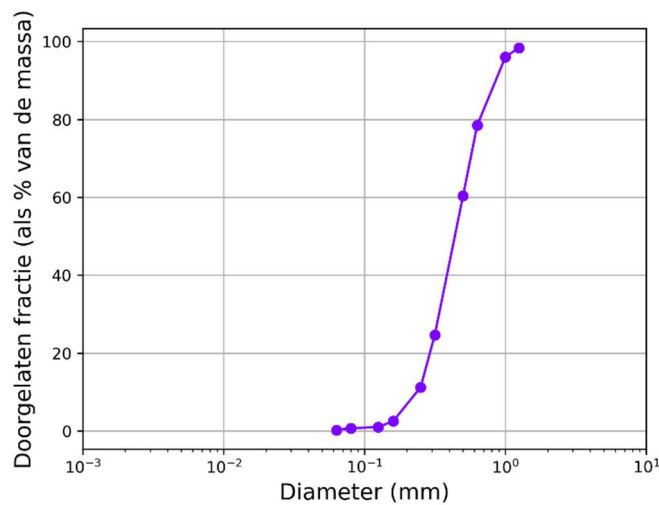
A.3.1 Eigenschappen proef

Proef 03 heeft plaats gevonden op 02/06/2021 en bestaat uit zand van boring B02-01 6.44-7.0 m-mv. De volgende gegevens zijn voor de proef gemeten:

- Temperatuur water: 21 °C;
- Kamertemperatuur: 20.3 °C;
- Hoogte van het filter: 2.5 cm;
- Hoogte van het monster: 12.5 cm;

- Droog gewicht: 1357 g;
- Porositeit: 0.36;
- Relatieve dichtheid: 47.5%.

De zeefkromme van het monster is in Figuur 0.19 te zien en de korrelgrootte voor verschillende massa-% is in Tabel 12 te zien.



Figuur 0.19 Proef 03 – Korrelverdeling gemaakt met zeefanalyse t/m 0.063 mm.

Tabel 12 Proef 03 – Korrelgrootte voor verschillende doorgelaten fractie-% gebaseerd op de laser diffractie.

	Korrelgrootte (mm)
D15	0.2682
D30	0.3426
D50	0.4462
D60	0.498
D85	0.7673
D90	0.8725

A.3.2 Proefverloop

De derde proef verliep over een duur van 3 uur en 10 min. Na 1 uur 40 min, bij het aanbrengen van een neerwaartse verhang van 1, raakte de bovenste laag verstopt, waarschijnlijk door biologisch reden. Hierdoor is na 3 uren en 10 min de proef gestopt zonder een retour stroming met een verhang van 0.5 en de laatste grote neerwaartse stroming met een verhang van 1 aan te brengen. Na deze proef was de hele proef opstel gereinigd.

Elke neerwaartse stroming is minstens 30 min aangebracht en iedere opwaartse 10 min. Er was geen zichtbare uitspoeling van materiaal. De debiet en stijghoogten over de kolom per ongeveer vijf minuten zijn in Tabel 13 te zien. De locatie van elke stijghoogtebuis is in Tabel 14 weergegeven.

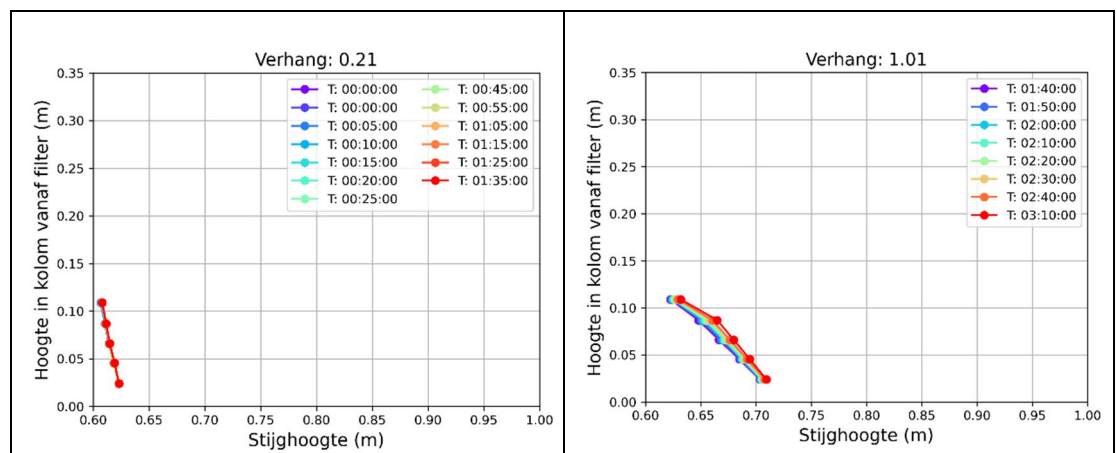
Tabel 13 Proef 03 – Verloop van de proef. De kolom 'Retour flow' geeft aan als het een neerwaartse stroming is (0) of een opwaartse stroming (1). Een hogere stijghoogte is in groen gekleurd en een lagere in rood met geel tussendoor.

□p (cm)	i (-)	Retour Flow	stop watch	Flow (cc/min)	h1 (cm)	h2 (cm)	h3 (cm)	h4 (cm)	h5 (cm)	h6 (cm)	h7 (cm)	h8 (cm)	in (cm)	out (cm)
0.06	0.0048	0	00:00		60.40	60.30	60.50	60.50	60.60	60.60	60.60	60.30	60.31	60.25
2.6	0.208	0	00:00	58.30	62.75	62.50	62.10	61.60	61.20	60.90	60.55	60.40	62.85	60.25
2.6	0.208	0	00:00	57.80	62.75	62.50	62.10	61.60	61.20	60.90	60.45	60.35	62.85	60.25
2.6	0.208	0	00:05	57.50	62.75	62.50	62.10	61.60	61.20	60.90	60.45	60.35	62.85	60.25
2.6	0.208	0	00:10	56.50	62.85	62.50	62.10	61.60	61.25	60.90	60.55	60.35	62.85	60.25
2.6	0.208	0	00:15	56.30	62.85	62.50	62.10	61.60	61.25	61.00	60.55	60.35	62.85	60.25
2.6	0.208	0	00:20	56.20	62.85	62.50	62.10	61.60	61.25	61.00	60.55	60.35	62.85	60.25
2.6	0.208	0	00:25	56.40	62.85	62.50	62.10	61.60	61.25	61.00	60.55	60.35	62.85	60.25
0.75	0.06	1	00:30	2.90	61.00	60.95	61.10	61.00	61.20	61.00	60.95	60.80	61	60.25
0.75	0.06	1	00:35	2.90	60.80	60.80	60.95	60.90	61.20	61.00	61.00	60.80	61	60.25
2.6	0.208	0	00:45	57.30	62.85	62.50	62.10	61.60	61.25	61.00	60.60	60.50	62.85	60.25
2.6	0.208	0	00:55	55.90	62.85	62.50	62.10	61.60	61.25	61.00	60.60	60.50	62.85	60.25
2.6	0.208	0	01:05	55.00	62.85	62.50	62.10	61.60	61.25	61.00	60.60	60.50	62.85	60.25
2.65	0.212	0	01:15	53.30	62.85	62.50	62.15	61.70	61.30	61.00	60.60	60.50	62.9	60.25
2.65	0.212	0	01:25	53.50	62.85	62.50	62.15	61.70	61.30	61.05	60.60	60.50	62.9	60.25
2.65	0.212	0	01:35	53.00	62.85	62.50	62.15	61.70	61.30	61.05	60.60	60.50	62.9	60.25
12.65	1.012	0	01:40	229.80	72.60	71.30	69.40	67.60	65.70	63.90	60.65	60.60	72.9	60.25
12.65	1.012	0	01:50	222.60	72.60	71.30	69.50	67.70	66.00	64.05	60.70	60.60	72.9	60.25
12.65	1.012	0	02:00	216.40	72.60	71.40	69.60	67.90	66.20	64.25	60.70	60.60	72.9	60.25
12.65	1.012	0	02:10	211.90	72.65	71.40	69.65	68.00	66.35	64.50	60.70	60.60	72.9	60.25
12.65	1.012	0	02:20	205.70	72.65	71.50	69.80	68.20	66.50	64.70	60.70	60.60	72.9	60.25
12.65	1.012	0	02:30	198.80	72.70	71.50	69.90	68.30	66.70	65.00	60.70	60.60	72.9	60.25
12.65	1.012	0	02:40	194.10	72.70	71.60	70.00	68.40	66.90	65.20	60.70	60.60	72.9	60.25
12.75	1.02	0	03:10	179.90	72.70	71.70	70.20	68.70	67.30	65.70	60.70	60.60	73	60.25

Tabel 14 Proef 03 – Positie van de stijghoogtebuizen.

Label	Afstand vanaf filter (cm)
h1	0.0
h2	1.3
h3	3.5
h4	5.6
h5	7.6
h6	9.8
h7	12.0
h8	14.3

Figuur 0.20 geeft de stijghoogtemetingen aan in de loop van de tijd van de derde proef voor verschillende aangebrachte verhangen. Deze zijn voor een verhang van 0.2 constant over de tijd. Met een verhang van 1 wijken de stijghoogtes af door de biologisch verstopping.

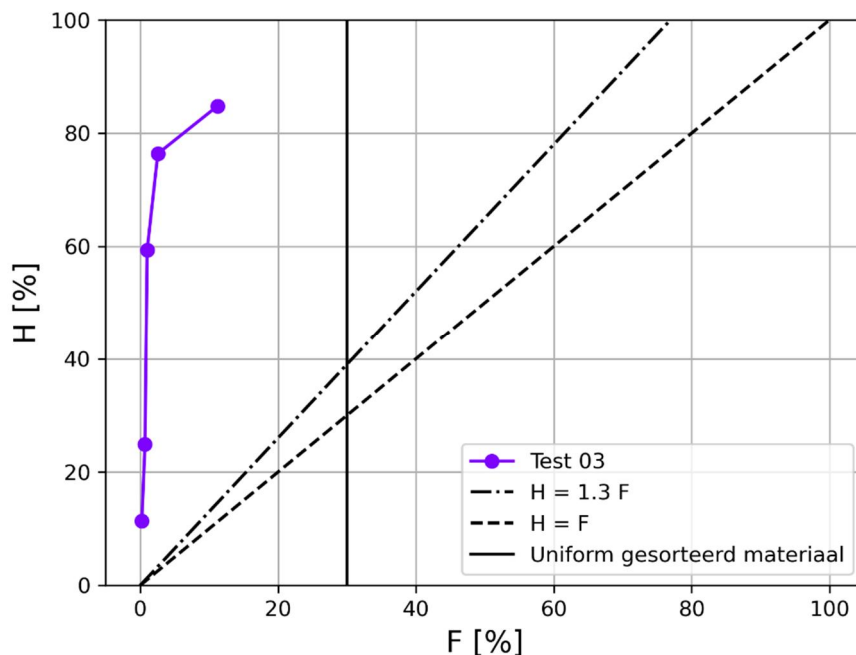


Figuur 0.20 Proef 03 – Stijghoogte voor verschillende verhangen over de kolom en over de tijd.

A.3.3

Analyse Kenney & Lau en Wan & Fell

De zeefkromme van Figuur 0.19 is gebruikt om een Kenney & Lau (1985) analyse te maken en daardoor te voorspellen of het materiaal intern stabiel is. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 0.21, waar het duidelijk te zien is dat het monster stabiel is, d.w.z. de punten met $F < 30\%$ liggen allemaal boven beide zwarte onderbroken lijnen.

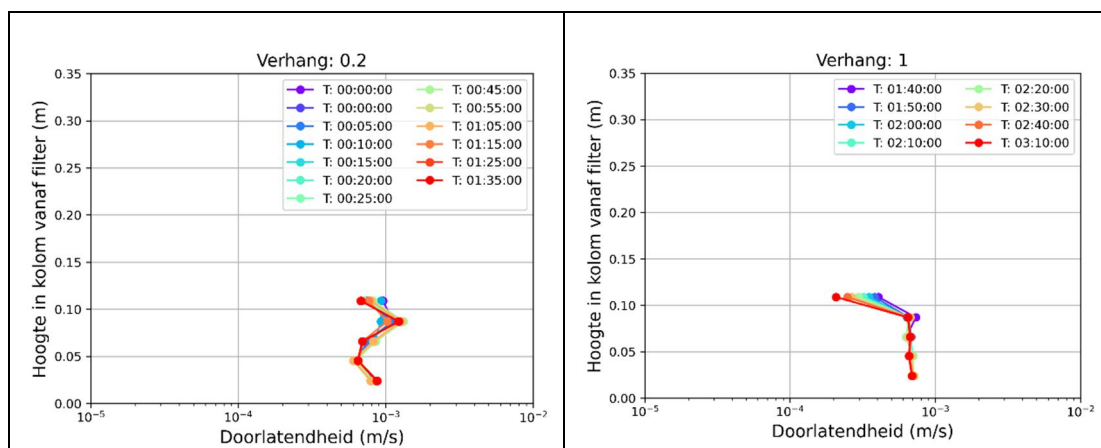


Figuur 0.21 Proef 03 – Uitwerking Kenney & Lau (1985) methode voor het monster.

Met deze zweefkromme is ook een Wan & Fell (2008) analyse gemaakt. De voorspelde kans op interne instabiliteit is 0.13, wat ook aangeeft dat het monster intern stabiel is.

A.3.4 Doorlatendheid over de hoogte en tijd

Figuur 0.22 geeft het verloop van de doorlatendheid aan over de tijd. Op de x-as staat de doorlatendheid in m/s, en op de y-as is de hoogte van de kolom in meter weergegeven. Een plot is gemaakt voor elke meting, ongeveer elke 5 minuten. Uit de resultaten is af te leiden dat de doorlatendheid over de kolom kan veranderen vooral voor lage verhangen, dit is in Sectie 3.3 toegelicht. Bij een verhang van 0.2 is de doorlatendheid over de tijdsduur van de proef redelijk constant. Bij een verhang van 1 is duidelijk te zien dat de top laag verstopt. In de onderste lagen is echter geen verandering zichtbaar, i.e. de doorlatendheid over de tijd is constant.



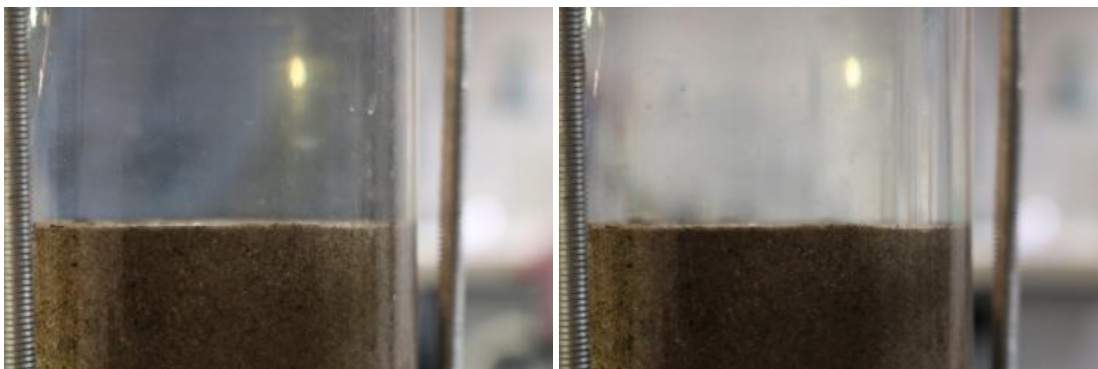
Figuur 0.22 Proef 03 – Doorlatendheid over de hoogte voor verschillende tijdstippen en verhangen.

A.3.5 Volumeverandering

Met twee camera's zijn iedere minuut foto's gemaakt aan de onderkant van het monster ingezoomd om de korrel te zien (Figuur 0.23) en aan de bovenkant van het monster uitgezoomd om eventueel verzakkingen te zien (Figuur 0.24). Uit beide analyses blijkt dat er geen verandering heeft plaatsgevonden tijdens de proef.

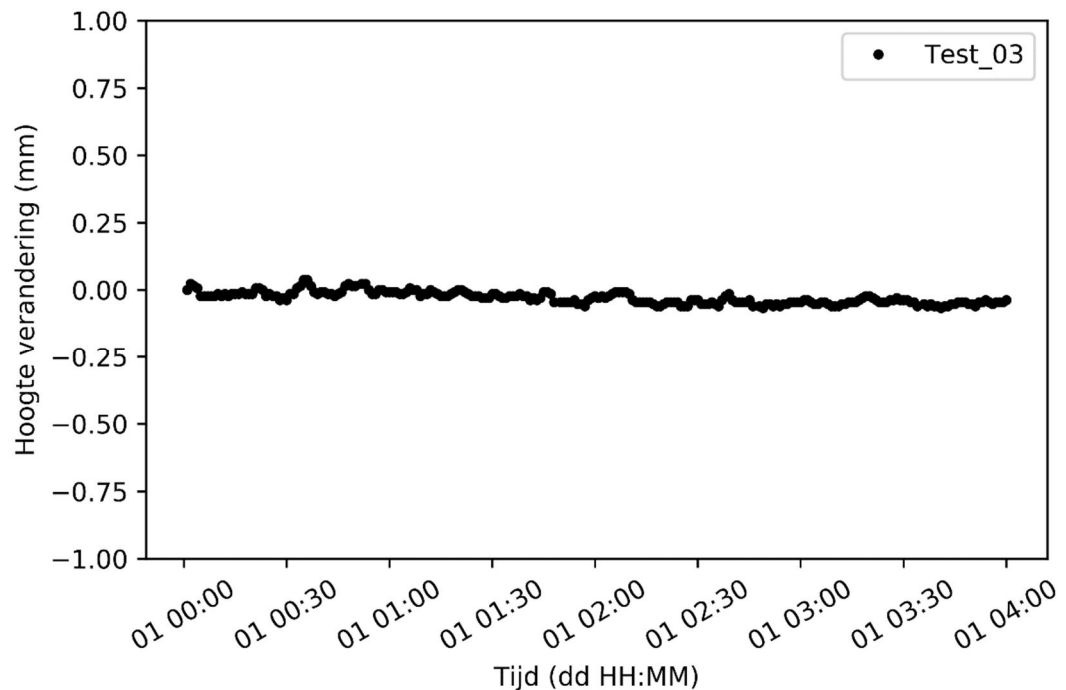


Figuur 0.23 Proef 03 – Foto gezoomd op de korrels aan de onderkant van het monster vóór (links) en na (rechts) de proef.



Figuur 0.24 Proef 03 – Foto van de bovenkant van het monster vóór (links) en na (rechts) de proef.

Met behulp van foto's van de bovenkant van het monster genomen elke minuut, was de hoogte verandering van het monster bepaald (zie Figuur 0.25). In deze figuur is te zien dat er heel kleine veranderingen zijn in hoogte van het monster, kleiner dan 0.1 mm. In de verschilbeelden zijn deze verschuiving terug te vinden en zijn ongeveer 0.06 mm. Echter zijn dezelfde veranderingen te zien op de schroefdraad (vast punt), de camera is dus bewogen. Er is geen verandering in hoogte van het monster.



Figuur 0.25 Proef 03 – Hoogte verandering van het monster over de duur van de proef.

A.3.6

C.S.I. korrelverdeling

C.S.I. van proef 3 wordt bij proef 4 gerapporteerd, omdat dit zand in twee fasen is beproefd: eerst suffosie (proef 3) en daarna als onderste laag bij filterinstabiliteit (proef 4).

A.4

Factsheet proef 04

A.4.1

Eigenschappen proef

Proef 04 is een filterincompatibiliteit proef, met als onderste laag een grof zand (proefmateriaal uit proef 3) en als bovenste laag een fijn zand (proefmateriaal uit proef 2). Het proef heeft plaats gevonden op 07/06/2021. De volgende gegevens zijn voor de proef gemeten:

- Temperatuur water: 20.2 °C;
- Kamertemperatuur: 22 °C;
- Hoogte van het filter: 2.5 cm;
- Hoogte van het monster: 16.05 cm (9.70 cm grof + 6.35 cm fijn);
- Droog gewicht onderste laag: 1057 g;
- Droog gewicht bovenste laag: 634.8 g;
- Porositeit onderste laag: 0.35;
- Porositeit bovenste laag: 0.41;
- Relatieve dichtheid onderste laag: 49.5%;
- Relatieve dichtheid bovenste laag: 42.5%.

De zeefkromme en de korrelgrootte voor verschillende massa-% zijn terug te zien in de Factsheet van proef 02 en 03 (Bijlage A.2.1 en A.3.1).

A.4.2 Proefverloop

De vierde proef verliep over een duur van 2 uur en 35 min. Dankzij de reiniging die na de derde test werd gedaan, was er geen verstopping meer bij proef 04.

Er is een matige en grote neerwaartse stroming over het monster aangebracht. Er was geen zichtbare uitspoeling van materiaal. De debiet en stijghoogten over de kolom per ongeveer vijf minuten zijn in Tabel 15 te zien. De locatie van elke stijghoogtebuis is in Tabel 16 weergegeven.

Tabel 15 Proef 04 – Verloop van de proef. De kolom 'Retour flow' geeft aan als het een neerwaartse stroming is (0) of een opwaartse stroming (1). Een hogere stijghoogte is in groen gekleurd en een lagere in rood met geel tussendoor.

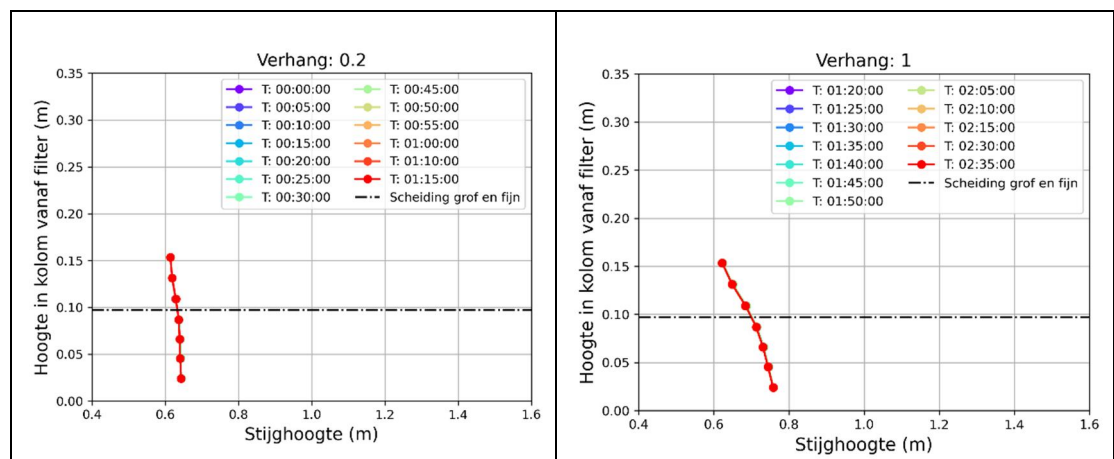
Δp (cm)	i (-)	Retour Flow	stop watch	Flow (cc/min)	h1 (cm)	h2 (cm)	h3 (cm)	h4 (cm)	h5 (cm)	h6 (cm)	h7 (cm)	h8 (cm)	h9 (cm)	in (cm)	out (cm)
0	0	0	00:00		61.75	61.5	61.6	61.5	61.4	61.3	61.7	61.4	61.3	61.55	61.55
3.25	0.202492	0	00:00	30.60	65.25	64.3	64.3	64	64	63.4	62.2	61.5	61.3	64.8	61.55
3.2	0.199377	0	00:05	30.40	65.25	64.4	64.3	64.1	64.1	63.4	62.2	61.5	61.3	64.8	61.6
3.2	0.199377	0	00:10	30.60	65.25	64.4	64.3	64.1	64.1	63.4	62.3	61.5	61.3	64.8	61.6
3.2	0.199377	0	00:15	30.40	65.25	64.4	64.3	64.1	64.1	63.4	62.3	61.5	61.3	64.8	61.6
3.2	0.199377	0	00:20	30.30	65.25	64.4	64.3	64.1	64.1	63.4	62.3	61.5	61.3	64.8	61.6
3.2	0.199377	0	00:25	30.40	65.25	64.4	64.3	64.1	64.1	63.4	62.3	61.5	61.3	64.8	61.6
3.2	0.199377	0	00:30	30.40	65.25	64.4	64.3	64.1	64.1	63.4	62.3	61.5	61.3	64.8	61.6
0.8	0.049844	1	00:35	11.00	61.75	62.1	62	61.9	62.4	62.4	62.2	62.1	62.3	62.4	61.6
0.8	0.049844	1	00:40	11.10	61.75	62	62	61.9	62.4	62.5	62.2	62.1	62.3	62.4	61.6
3.3	0.205607	0	00:45	30.80	65.25	64.4	64.2	63.9	63.9	63.4	62.3	61.5	61.3	64.7	61.4
3.3	0.205607	0	00:50	30.80	65.2	64.4	64.2	64	63.9	63.4	62.3	61.5	61.3	64.7	61.4
3.3	0.205607	0	00:55	30.60	65.2	64.4	64.2	64	63.9	63.4	62.3	61.5	61.3	64.7	61.4
3.3	0.205607	0	01:00	30.60	65.2	64.4	64.2	64	63.9	63.4	62.3	61.5	61.3	64.7	61.4
3.3	0.205607	0	01:10	30.60	65.2	64.4	64.2	64	63.9	63.5	62.3	61.5	61.3	64.7	61.4
3.3	0.205607	0	01:15	30.60	65.2	64.4	64.2	64	63.9	63.5	62.3	61.5	61.3	64.7	61.4
16.2	1.009346	0	01:20	129.70	77.35	76.4	75.25	73.85	72.6	70.25	67	63.2	61.4	77.6	61.4
16.2	1.009346	0	01:25	129.10	77.35	76.4	75.25	73.85	72.7	70.25	67	63.2	61.4	77.6	61.4
16.2	1.009346	0	01:30	128.90	77.35	76.4	75.3	73.9	72.7	70.3	67	63.2	61.4	77.6	61.4
16.2	1.009346	0	01:35	128.70	77.35	76.4	75.3	73.9	72.7	70.3	67	63.2	61.4	77.6	61.4
16.2	1.009346	0	01:40	128.40	77.35	76.4	75.3	73.9	72.7	70.3	67	63.2	61.4	77.6	61.4
16.2	1.009346	0	01:45	128.30	77.3	76.4	75.3	73.9	72.7	70.3	67	63.2	61.4	77.6	61.4
16.2	1.009346	0	01:50	129.10	77.35	76.4	75.3	73.9	72.7	70.3	67.1	63.2	61.4	77.6	61.4
8.1	0.504673	1	01:55	69.60	61.7	62.1	62.2	62.8	64	65.3	66.4	69.2	69.4	69.5	61.4
8.1	0.504673	1	02:00	69.30	61.7	62.1	62.2	62.8	64	65.3	66.4	69.2	69.4	69.5	61.4
16.2	1.009346	0	02:05	133.40	77.35	76.4	75.2	73.7	72.5	70.1	66.8	62.9	61.6	77.6	61.4

16.2	1.009346	0	02:10	133.20	77.35	76.4	75.2	73.7	72.5	70.1	66.8	62.9	61.6	77.6	61.4
16.2	1.009346	0	02:15	133.30	77.35	76.4	75.2	73.7	72.5	70.1	66.8	62.9	61.6	77.6	61.4
16.2	1.009346	0	02:30	134.70	77.35	76.4	75.2	73.7	72.5	70.1	66.8	62.9	61.6	77.6	61.4
16.2	1.009346	0	02:35	134.60	77.35	76.4	75.2	73.7	72.5	70.1	66.8	62.9	61.6	77.6	61.4

Tabel 16 Proef 04 – Positie van de stijghoogtebuizen.

Label	Afstand vanaf filter (cm)
h1	0.0
h2	1.3
h3	3.5
h4	5.6
h5	7.6
h6	9.8
h7	12.0
h8	14.3
h9	16.4

Figuur 0.26 geeft de stijghoogtemetingen aan in de loop van de tijd van de vierde proef voor verschillende aangebrachte verhangen. Deze zijn voor een verhang van 0.2 en 1 constant over de tijd. Er is duidelijk een knik in de stijghoogtelijn door de twee verschillende lagen materiaal.



Figuur 0.26 Proef 04 – Stijghoogte voor verschillende verhangen over de kolom en over de tijd.

A.4.3 Analyse Terzaghi en Lambe & Whitman

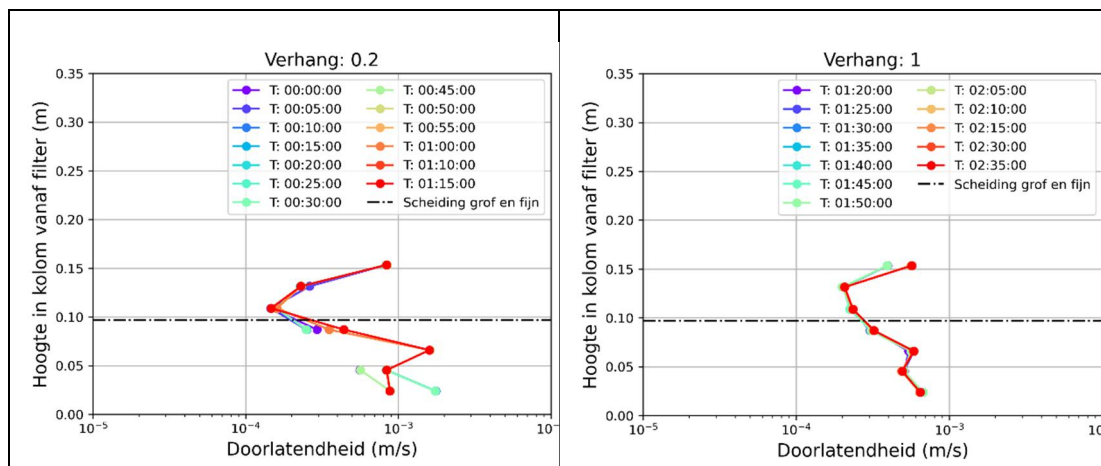
De methoden van Terzaghi (1922) en Lambe & Whitman (1969) zijn gebruikt om te voorspellen of het materiaal intern stabiel is op filterincompatibiliteit. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 17, waar het duidelijk te zien is dat het monster stabiel is.

Tabel 17 Proef 04 – Filterincompatibiliteit criteria.

	$\frac{d_{15,f}}{d_{85,b}} < 4 \text{ of } 5$	$\frac{d_{15,f}}{d_{15,b}} < 20$	$\frac{d_{50,f}}{d_{50,b}} < 25$
Proef 04	0.89	1.96	2.19

A.4.4 Doorlatendheid over de hoogte en tijd

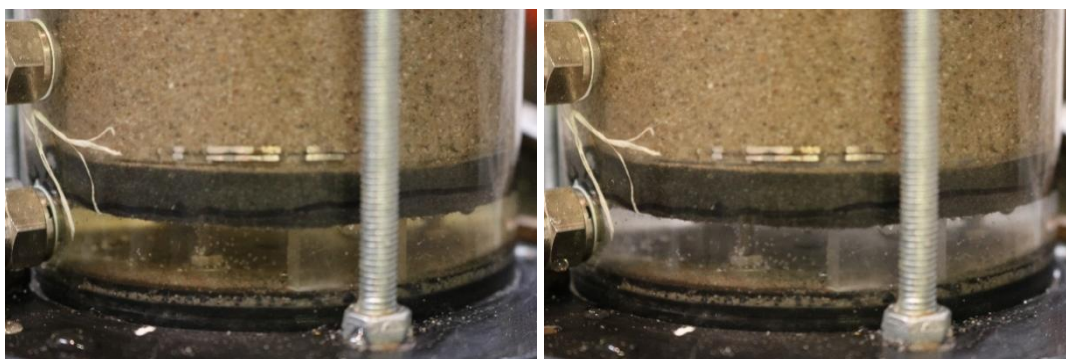
Figuur 0.27 geeft het verloop van de doorlatendheid aan over de tijd. Op de x-as staat de doorlatendheid in m/s, en op de y-as is de hoogte van de kolom in meter weergegeven. Een plot is gemaakt voor elke meting, ongeveer elke 5 minuten. Uit de resultaten is af te leiden dat de doorlatendheid over de kolom aanzienlijk kan veranderen vooral voor lage verhangen, dit is in Sectie 3.3 toegelicht. De doorlatendheid is constant over de tijd.



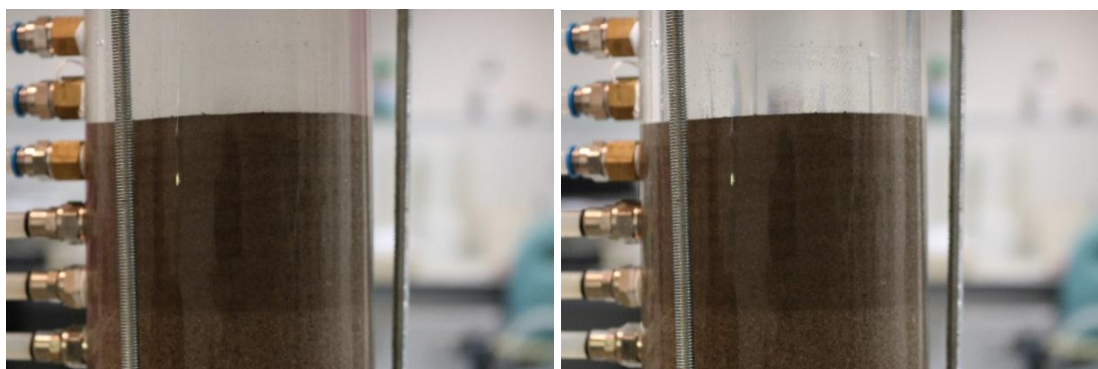
Figuur 0.27 Proef 04 – Doorlatendheid over de hoogte voor verschillende tijdstippen en verhangen.

A.4.5 Volumeverandering

Met twee camera's zijn iedere minuut foto's gemaakt aan de onderkant van het monster ingezoomd om de korrel te zien (Figuur 0.28) en aan de bovenkant van het monster uitgezoomd om eventueel verzakkingen te zien (Figuur 0.29). Uit beide analyses blijkt dat er geen verandering heeft plaatsgevonden tijdens de proef.



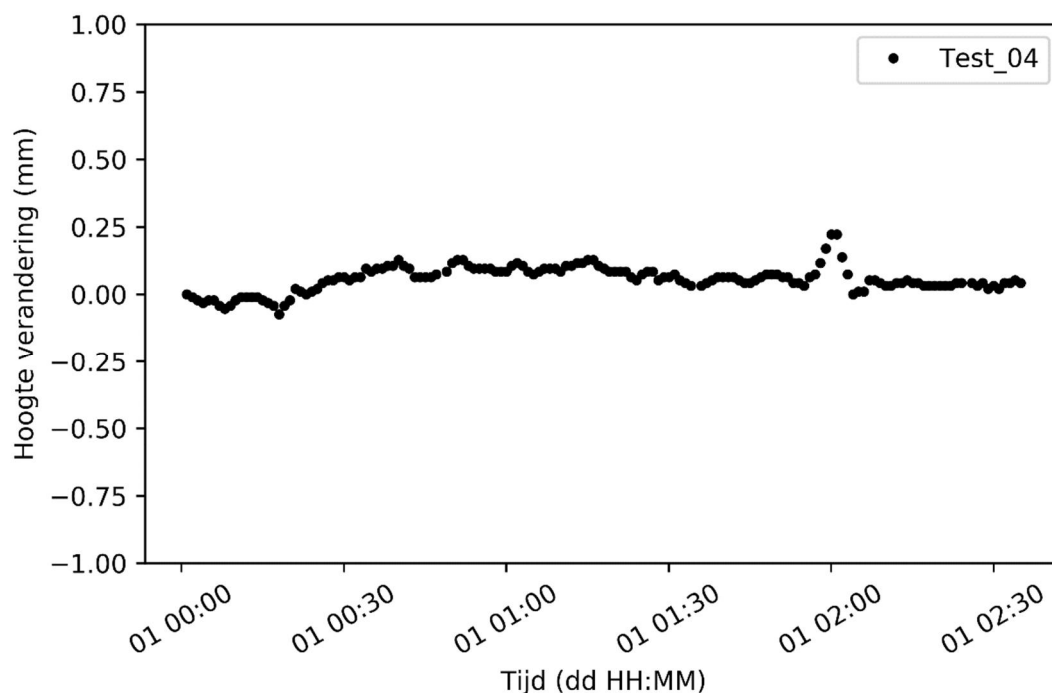
Figuur 0.28 Proef 04 – Foto gezoomd op de korrels aan de onderkant van het monster vóór (links) en na (rechts) de proef.



Figuur 0.29 Proef 04 – Foto van de bovenkant van het monster vóór (links) en na (rechts) de proef.

Met behulp van foto's van de bovenkant van het monster genomen elke minuut, was de hoogte verandering van het monster bepaald (zie Figuur 0.30). Tussen 40 min en 80 min is er veel verschil in achtergrond verlichting terug te zien in de verschilbeelden, wat voor ongeveer 0.2 mm verschuiving heeft veroorzaakt. Rond 110 min is er een witte lijn net boven de bovenkant van het monster wat verklaart waarom daar een sprong van 0.25 mm is

gemeten. Deze verlichting verdwijnt lichtelijk rond 120 min en komt dan terug om weer even te verdwijnen rond 145 min. In het algemeen is er geen verschuiving van het monster.



Figuur 0.30 Proef 04 – Hoogte verandering van het monster over de duur van de proef.

A.4.6

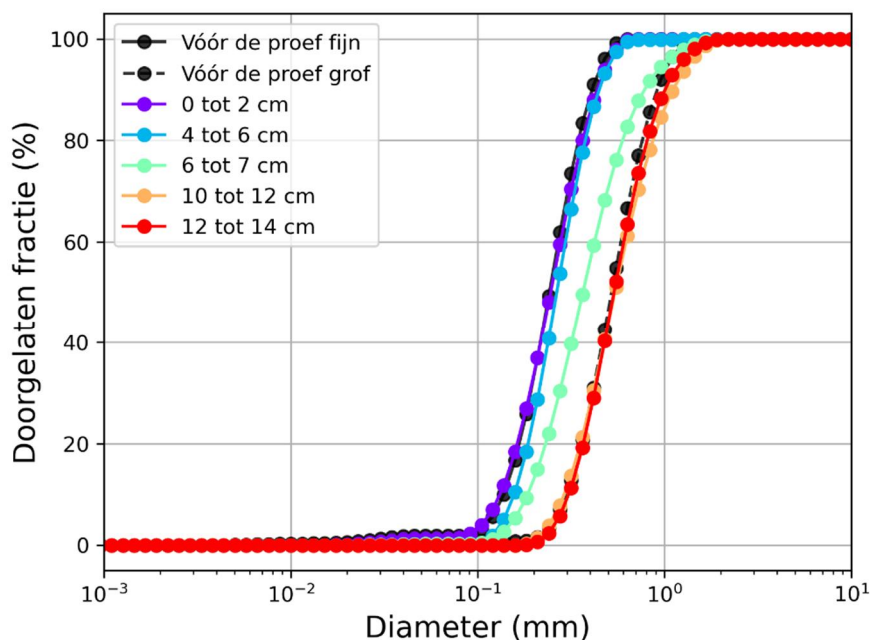
C.S.I. korrelverdeling

Figuur 0.31 geeft de C.S.I. korrelverdelingen per laag na de proef, en Tabel 18 geeft de D10 en D20 per laag. Uit Figuur 0.31 is er een kleine verandering in korrelverdeling voor de fijn deel (0 tot 6 cm) aan de onderkant van het monster. Voor de grof deel (10 tot 14 cm) is er geen verandering in korrelverdeling. De scheiding tussen grof en fijn staat op 6.35 cm van de bovenkant van het monster, daardoor is het laag van 6 tot 7 cm in het midden van beide korrelverdelingen.

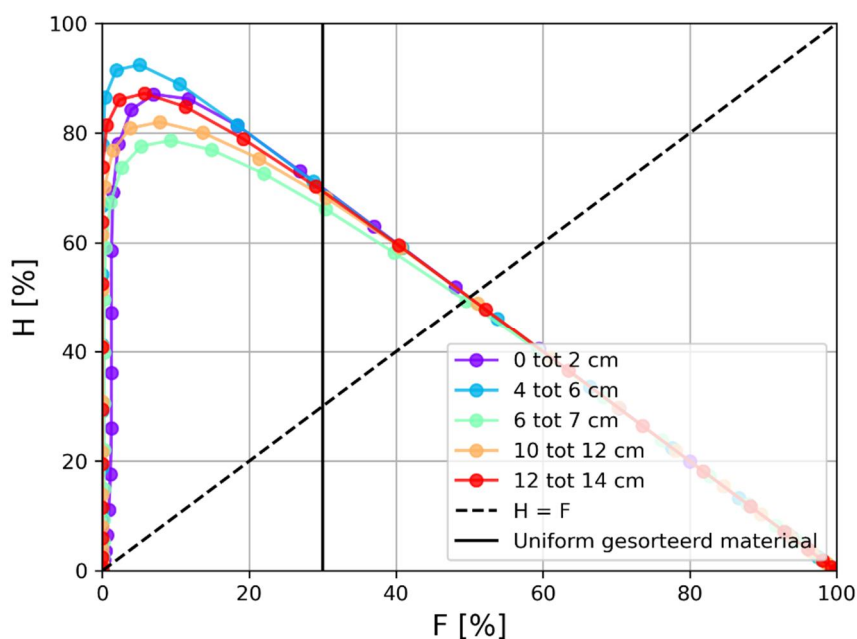
Deze korrelverdelingen zijn gebruikt om per laag ook een Kenney & Lau (1985) analyse te maken (Figuur 0.32), waaruit blijkt geen stabiliteitsprobleem te zijn volgens Kenney & Lau (1985).

Tabel 18 Proef 04 – D10 en D20 per laag na het einde van de proef. De lagen zijn vanaf de bovenkant van het monster gemeten.

C.S.I. laag	D10 (mm)	D20 (mm)
0 tot 2 cm	0.131	0.163
4 tot 6 cm	0.157	0.186
6 tot 7 cm	0.185	0.231
10 tot 12 cm	0.291	0.355
12 tot 14 cm	0.307	0.368



Figuur 0.31 Proef 04 – Korrelverdeling per laag na het einde van de proef. De lagen zijn vanaf de bovenkant van het monster gemeten. De scheiding tussen fijn en grof materiaal is 6.35 cm van de bovenkant van het monster, daardoor is de groene laag een menglaag.



Figuur 0.32 Proef 04 – Kenney & Lau (1985) criteria per laag aan het einde van de proef. De lagen zijn vanaf de bovenkant van het monster gemeten.

A.5 Factsheet proef 05

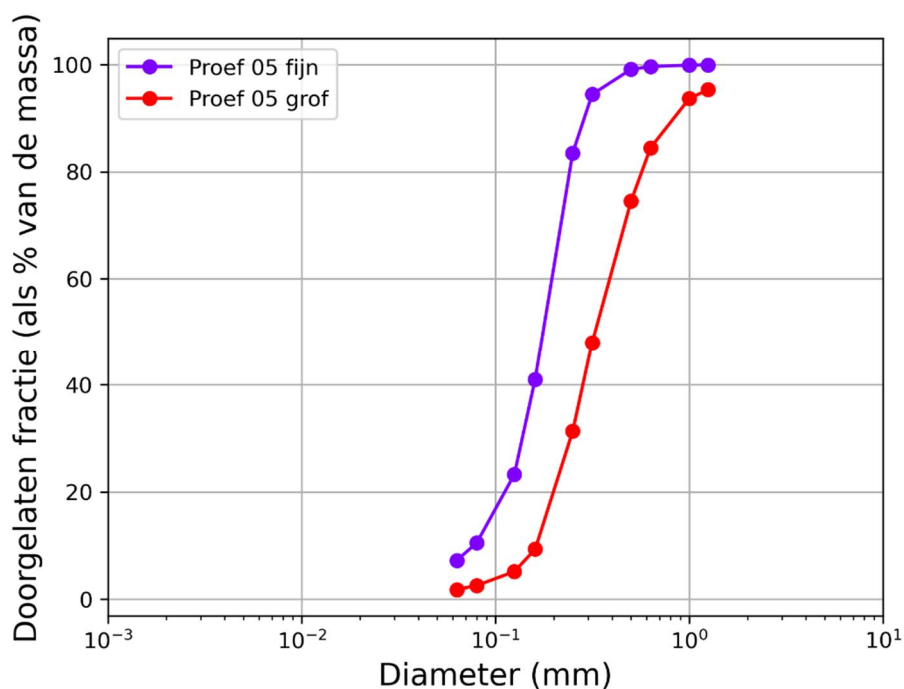
A.5.1 Eigenschappen proef

Proef 05 is een filterincompatibiliteit proef, met als onderste laag een grof zand (uit B09-01 van 8.40 m tot 9 m-mv, afgezeefd tot 250 μ m) en als bovenste laag een fijn zand (uit B09-01 van

6.14 m tot 6.56 m-mv). Het proef heeft plaats gevonden op 09/06/2021. De volgende gegevens zijn voor de proef gemeten:

- Temperatuur water: 18.4 °C;
- Kamertemperatuur: 20.8 °C;
- Hoogte van het filter: 2.5 cm;
- Hoogte van het monster: 31.1 cm (18.3 cm grof + 12.8 cm fijn);
- Droog gewicht onderste laag: 1879.1 g;
- Droog gewicht bovenste laag: 1199.3 g;
- Porositeit onderste laag: 0.39;
- Porositeit bovenste laag: 0.44;
- Relatieve dichtheid onderste laag: 44.1%;
- Relatieve dichtheid bovenste laag: 29.6%.

De zeefkromme van het bovenste en onderste materiaal is in Figuur 0.33 te zien en hun korrelgrootte voor verschillende massa-% is in Tabel 19 te zien.



Figuur 0.33 Proef 05 – Korrelverdeling.

Tabel 19 Proef 05 – Korrelgrootte voor verschillende doorgelaten fractie-% gebaseerd op de laser diffractie.

	Korrelgrootte bovenste materiaal (mm)	Korrelgrootte onderste materiaal (mm)
D15	0.087	0.201
D30	0.134	0.278
D50	0.188	0.371
D60	0.219	0.424
D85	0.327	0.622
D90	0.363	0.697

A.5.2 Proefverloop

In de vijfde proef was de toplaag van het fijne monster verstopt geraakt na 1 uur 30 min bij een neerwaartse verhang van 1 zie Tabel 20. Na de verstopping werd de proef onverstoord overnacht verlaten. De volgende ochtend was nog steeds geen zichtbare uitspoeling van materiaal.

Door deze verstopping is de bovenste laag van het fijne zand gezogen en is besloten om de proef opnieuw te maken (proef 05b), zie Tabel 21. Door de opzuiging van de toplaag zijn de eigenschappen van de bovenste laag van proef 05b veranderd:

- Temperatuur water: 18.6 °C
- Hoogte van bovenste laag van het monster: 11.3 cm
- Droog gewicht bovenste laag: 1076.8 g
- Porositeit bovenste laag: 0.43
- Relatieve dichtheid bovenste laag: 36.3%

Proef 5b proef heeft 2 uur en 30 min geduurd. Tijdens proef 05b was er een kleine verandering in de watertemperatuur, op tijdstip 01:40 was het watertemperatuur 19.1 °C en om 02:00 was het 19.2 °C.

Een bijzonderheid van proef 05b is dat, bij het aanbrengen van een opwaartse stroming met een verhang van 0.5 om 01:55, er heave opgetreden is in de toplaag. Dit heeft invloed gehad op de dichtheid en hoogte van de fijne laag. Na het optreden van heave is de stroming weer omgedraaid naar een neerwaartse stroming met een verhang van 1.

De locatie van elke stijghoogtebuis is in Tabel 22 weergegeven.

Tabel 20 Proef 05a – Verloop van de proef. De kolom 'Retour flow' geeft aan als het een neerwaartse stroming is (0) of een opwaartse stroming (1). Een hogere stijghoogte is in groen gekleurd en een lagere in rood met geel tussendoor.

Δp	i	Retour	stop	Flow	h1	h2	h3	h4	h5	h6	h7	h8	h9	h10	h11	h12	h13	h14	h15	h16	in	out
(cm)	(-)	Flow	watch	(cc/min)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
0.00	0.00		00:00	0	61.40	61.50	61.40	61.40	61.50	61.60	61.50	61.60	61.40	61.30	61.40	61.20	61.20	61.20	61.20	61.10	61.20	61.20
6.15	0.20	0	00:00	17.10	67.30	67.20	67.10	67.00	67.00	66.90	66.00	66.50	66.50	66.30	65.90	65.30	64.60	64.00	61.10	61.30	67.30	61.15
6.15	0.20	0	00:05	16.00	67.35	67.20	67.15	67.05	67.00	66.90	66.80	66.65	66.50	66.30	66.00	65.40	64.80	64.20	61.10	61.30	67.30	61.15
6.15	0.20	0	00:10	15.50	67.35	67.20	67.15	67.05	67.05	66.95	66.80	66.70	66.55	66.40	66.00	65.50	64.90	64.20	61.10	61.35	67.30	61.15
6.15	0.20	0	00:15	15.20	67.35	67.20	67.15	67.05	67.05	67.00	66.85	66.70	66.55	66.40	66.10	65.60	64.90	64.25	61.10	61.35	67.30	61.15
6.15	0.20	0	00:20	15.10	67.35	67.20	67.15	67.05	67.05	67.00	66.85	66.70	66.55	66.40	66.10	65.60	64.90	64.25	61.10	61.35	67.30	61.15
6.15	0.20	0	00:25	15.30	67.35	67.20	67.15	67.05	67.05	67.00	66.85	66.70	66.55	66.40	66.10	65.60	64.90	64.25	61.10	61.35	67.30	61.15
6.15	0.20	0	00:30	15.10	67.35	67.20	67.15	67.05	67.05	67.00	66.85	66.70	66.55	66.40	66.10	65.60	64.90	64.25	61.10	61.35	67.30	61.15
6.15	0.20	0	00:35	15.20	67.35	67.20	67.15	67.05	67.05	67.00	66.85	66.70	66.55	66.40	66.10	65.60	64.90	64.25	61.10	61.35	67.30	61.15
0.55	0.02	1	00:40	5.30	62.20	62.00	62.00	61.90	62.50	62.30	61.90	62.50	62.50	62.10	62.30	62.80	62.80	62.50	62.50	62.50	61.70	61.15
1.55	0.05	1	00:45	4.90	61.70	61.90	61.90	61.80	61.50	62.30	61.80	62.50	62.50	62.10	62.30	62.80	62.80	62.50	62.50	62.50	62.70	61.15
6.25	0.20	0	00:50	17.90	67.40	67.20	67.15	67.00	67.05	66.90	66.80	66.60	66.50	66.30	65.90	65.30	64.60	64.00	61.30	61.60	67.40	61.15
6.25	0.20	0	00:55	17.70	67.35	67.20	67.15	67.05	67.05	66.90	66.80	66.60	66.50	66.30	65.90	65.30	64.60	64.00	61.35	61.60	67.40	61.15
6.25	0.20	0	01:00	17.70	67.35	67.20	67.15	67.05	67.05	66.90	66.80	66.60	66.50	66.30	65.90	65.30	64.60	64.00	61.35	61.60	67.40	61.15
6.25	0.20	0	01:05	17.70	67.35	67.20	67.15	67.05	67.05	66.90	66.80	66.60	66.50	66.30	65.90	65.30	64.60	64.00	61.35	61.60	67.40	61.15
6.25	0.20	0	01:15	17.70	67.35	67.20	67.15	67.05	67.00	66.90	66.80	66.60	66.50	66.30	65.90	65.30	64.60	64.00	61.35	61.60	67.40	61.15
6.25	0.20	0	01:25	17.70	67.35	67.20	67.15	67.05	67.00	66.90	66.80	66.60	66.50	66.30	65.90	65.30	64.60	64.00	61.35	61.60	67.40	61.15
31.15	1.00	0	01:30	87.30	92.15	91.85	91.30	90.80	90.55	90.10	89.25	88.60	88.05	87.15	85.20	82.50	79.00	75.70	61.35	61.60	92.30	61.15
31.15	1.00	0	01:35	86.30	92.15	91.85	91.30	90.80	90.70	90.20	89.30	88.70	88.05	87.15	85.20	82.50	79.10	76.00	61.35	61.60	92.30	61.15
31.15	1.00	0	01:40	85.80	92.15	91.85	91.30	90.80	90.70	90.15	89.30	88.70	88.05	87.20	85.30	82.65	79.30	76.10	61.35	61.60	92.30	61.15
31.15	1.00	0	01:45	85.00	92.15	91.85	91.35	90.80	90.70	90.15	89.30	88.70	88.10	87.35	85.40	82.70	79.55	76.20	61.35	61.60	92.30	61.15
31.15	1.00	0	01:50	84.90	92.15	91.85	91.35	90.80	90.70	90.10	89.30	88.70	88.10	87.30	85.40	82.80	79.55	76.30	61.35	61.60	92.30	61.15
31.15	1.00	0	01:55	84.70	92.15	91.85	91.35	90.80	90.70	90.10	89.30	88.70	88.10	87.30	85.40	82.90	79.55	76.40	61.35	61.60	92.30	61.15
31.15	1.00	0	02:00	84.20	92.15	91.85	91.35	90.80	90.70	90.10	89.30	88.70	88.10	87.30	85.50	82.90	79.60	76.50	61.35	61.60	92.30	61.15

31.15	1.00	0	02:05	83.60	92.15	91.85	91.35	90.80	90.70	90.10	89.30	88.80	88.15	87.40	85.60	83.00	79.70	76.60	61.35	61.60	92.30	61.15
31.15	1.00	0	02:25	81.00	92.15	91.85	91.35	90.80	90.70	90.10	89.30	88.90	88.30	87.60	85.70	83.30	80.10	77.10	61.35	61.60	92.30	61.15
31	1.00	0	07:30	38.20	92.25	92.10	91.80	91.60	91.45	91.30	91.10	90.80	90.50	90.10	89.35	88.10	86.55	85.10	61.35	61.60	92.30	61.30
31	1.00	0	07:35	37.60	92.25	92.15	91.90	91.60	91.45	91.30	91.10	90.80	90.50	90.10	89.30	88.20	86.60	85.20	61.35	61.60	92.30	61.30

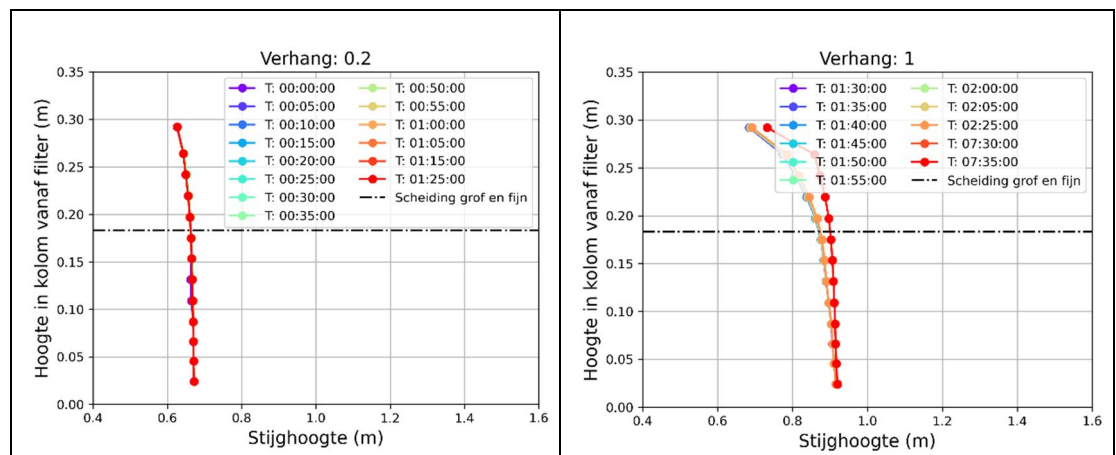
Tabel 21 Proef 05b – Verloop van de proef. De kolom 'Retour flow' geeft aan als het een neerwaartse stroming is (0) of een opwaartse stroming (1). Een hogere stijghoogte is in groen gekleurd en een lagere in rood met geel tussendoor.

Δp	i	Retour	stop	Flow	h1	h2	h3	h4	h5	h6	h7	h8	h9	h10	h11	h12	h13	h14	h15	h16	in	out
(cm)	(-)	Flow	watch	(cc/min)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
6.1	0.20	0	00:00	22.1	66.75	66.50	66.70	66.50	66.50	66.40	66.20	66.00	65.80	65.60	65.10	64.40	63.50	62.30	60.90	60.90	67.00	60.90
6.1	0.20	0	00:10	22.20	66.65	66.50	66.70	66.50	66.50	66.35	66.20	66.00	65.75	65.55	65.05	64.40	63.50	62.30	60.90	60.90	67.00	60.90
6.1	0.20	0	00:20	22.20	66.65	66.50	66.70	66.50	66.50	66.35	66.20	66.00	65.80	65.60	65.10	64.40	63.50	62.30	60.90	60.90	67.00	60.90
6.1	0.20	0	00:30	22.00	66.65	66.50	66.70	66.50	66.50	66.35	66.20	66.00	65.80	65.60	65.10	64.40	63.50	62.30	60.90	60.90	67.00	60.90
1.55	0.05	1	00:35	5.40	60.90	66.10	61.10	61.20	61.30	61.15	61.40	61.40	61.35	61.40	61.50	61.70	61.80	61.85	62.20	62.20	62.45	60.90
1.5	0.05	1	00:40	5.30	60.90	60.90	61.00	61.10	61.30	61.15	61.40	61.40	61.30	61.40	61.50	61.70	61.80	61.85	62.20	62.20	62.40	60.90
6	0.20	0	00:45	22.50	66.65	66.40	66.50	66.40	66.35	66.20	66.05	65.90	65.65	65.40	64.85	64.20	63.25	62.10	60.90	60.90	66.90	60.90
6	0.20	0	00:55	22.40	66.65	66.40	66.50	66.40	66.35	66.20	66.05	65.90	65.65	65.40	64.85	64.25	63.30	62.10	60.90	60.90	66.90	60.90
6	0.20	0	01:05	22.50	66.65	66.40	66.50	66.40	66.35	66.20	66.05	65.90	65.65	65.40	64.85	64.25	63.30	62.10	60.90	60.90	66.90	60.90
6	0.20	0	01:15	22.50	66.65	66.40	66.50	66.40	66.35	66.20	66.05	65.90	65.65	65.40	64.85	64.25	63.30	62.10	60.90	60.90	66.90	60.90
29.7	1.00	0	01:20	108.80	90.20	89.65	89.30	88.60	88.20	87.40	86.70	86.00	85.10	83.80	81.15	77.90	73.40	67.60	60.90	60.90	90.60	60.90
29.7	1.00	0	01:30	107.40	90.25	89.75	89.35	88.65	88.20	87.45	86.70	86.00	85.10	83.80	81.15	77.90	73.40	67.60	60.90	60.90	90.60	60.90
29.7	1.00	0	01:40	107.10	90.25	89.75	89.35	88.65	88.20	87.45	86.70	86.00	85.10	83.80	81.15	77.90	73.40	67.60	60.90	60.90	90.60	60.90
29.7	1.00	0	01:50	107.20	90.25	89.75	89.35	88.65	88.20	87.45	86.70	86.00	85.10	83.80	81.15	77.90	73.40	67.60	60.90	60.90	90.60	60.90
29.7	1.00	0	02:00	105.50	90.20	89.65	89.30	88.65	88.20	87.45	86.70	86.00	85.20	83.90	81.30	78.50	75.50	72.90	60.90	60.90	90.60	60.90
29.7	1.00	0	02:10	105.90	90.25	89.70	89.30	88.65	88.20	87.45	86.70	86.00	85.20	83.90	81.30	78.40	75.40	72.90	60.90	60.90	90.60	60.90
29.7	1.00	0	02:20	105.90	90.25	89.70	89.30	88.65	88.20	87.45	86.70	86.00	85.20	83.90	81.30	78.40	75.40	72.80	61.00	61.00	90.60	60.90
29.7	1.00	0	02:30	105.50	90.25	89.70	89.30	88.65	88.20	87.45	86.70	86.00	85.20	83.90	81.30	78.40	75.40	72.80	61.00	61.00	90.60	60.90

Tabel 22 Proef 05 – Positie van de stijghoogtebuizen.

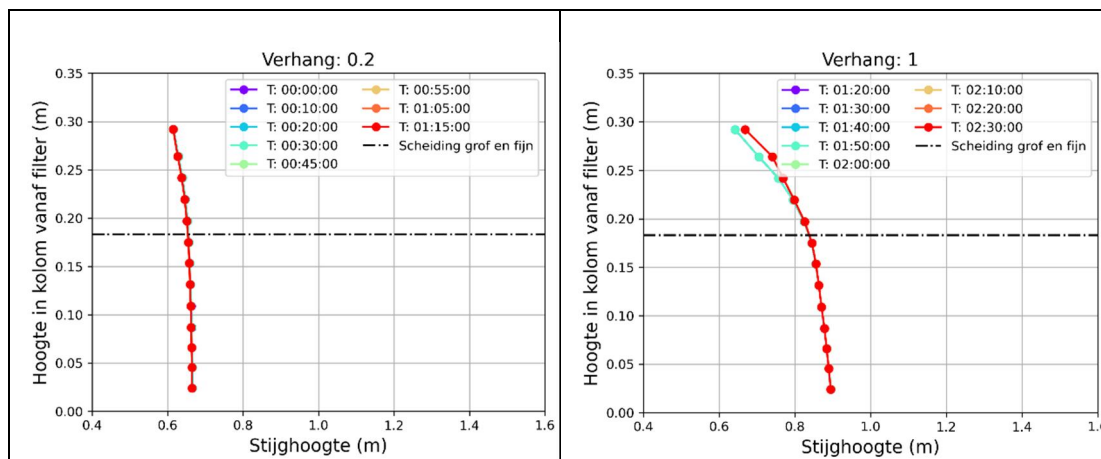
Label	Afstand vanaf filter (cm)
h1	0.0
h2	1.3
h3	3.5
h4	5.6
h5	7.6
h6	9.8
h7	12.0
h8	14.3
h9	16.4
h10	18.6
h11	20.8
h12	23.1
h13	25.3
h14	27.5
h15	30.9
h16	33.3

Figuur 0.34 geeft de stijghoogtemetingen aan in de loop van de tijd van de eerste vijfde proef (Proef 05a) voor verschillende aangebrachte verhangen. Deze zijn voor een verhang van 0.2 constant over de tijd. Met een verhang van 1 wijken de stijghoogtes af door de biologisch verstopping. Er is een knik in de stijghoogtelijn door de twee verschillende lagen materiaal.



Figuur 0.34 Proef 05a – Stijghoogte voor verschillende verhangen over de kolom en over de tijd.

Figuur 0.35 geeft de stijghoogtemetingen aan in de loop van de tijd van de tweede vijfde proef (Proef 05b) voor verschillende aangebrachte verhangen. Nu waren de stijghoogtes voor een verhang van 0.2 en 1 constant over de tijd. Hier ook is er een knik in de stijghoogtelijn door de twee verschillende lagen materiaal.



Figuur 0.35 Proef 05b – Stijghoogte voor verschillende verhangen over de kolom en over de tijd.

A.5.3 Analyse Terzaghi en Lambe & Whitman

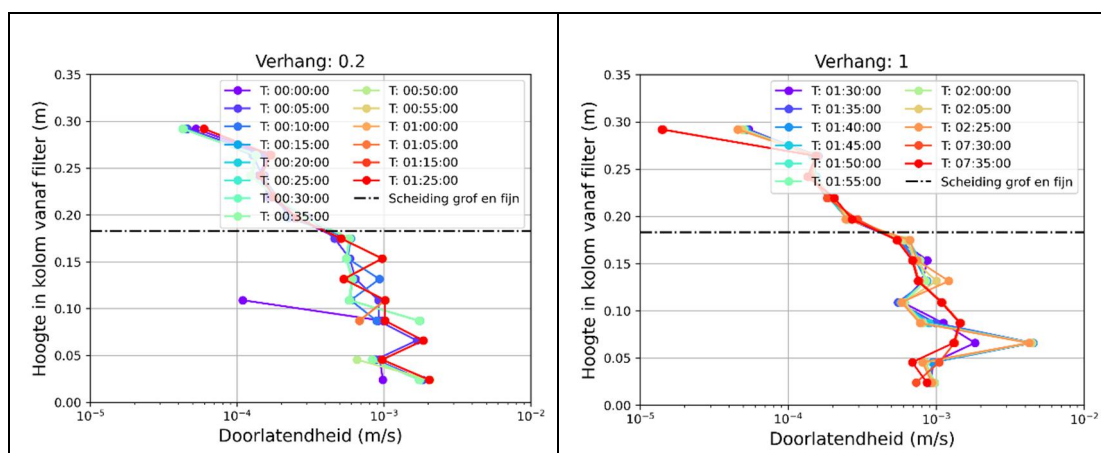
De methoden van Terzaghi (1922) en Lambe & Whitman (1969) zijn gebruikt om te voorspellen of het materiaal intern stabiel is op filterincompatibiliteit. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 23, waar het duidelijk te zien is dat het monster stabiel is.

Tabel 23 Proef 05 – Filterincompatibiliteit criteria.

	$\frac{d_{15,f}}{d_{85,b}} < 4 \text{ of } 5$	$\frac{d_{15,f}}{d_{15,b}} < 20$	$\frac{d_{50,f}}{d_{50,b}} < 25$
Proef 05	0.61	2.3	1.97

A.5.4 Doorlatendheid over de hoogte en tijd

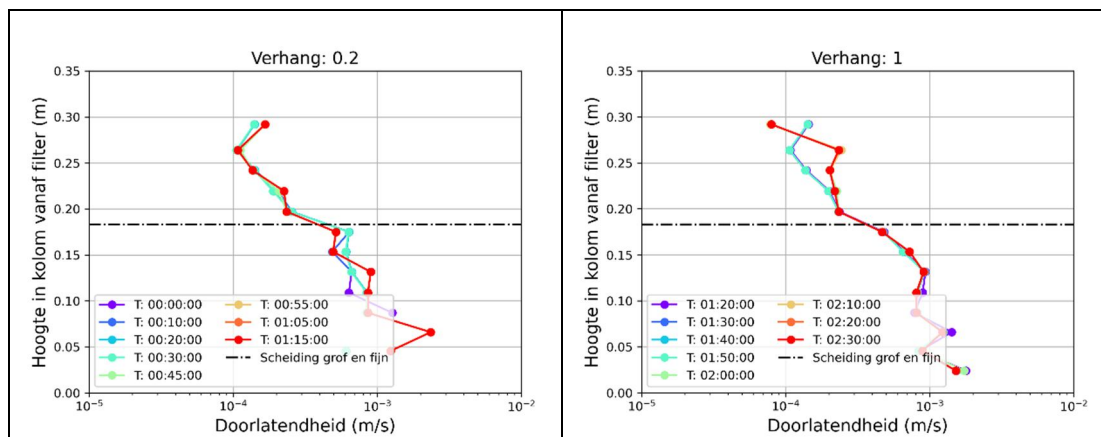
Figuur 0.36 geeft het verloop van de doorlatendheid aan over de tijd van proef 05a. Op de x-as staat de doorlatendheid in m/s, en op de y-as is de hoogte van de kolom in meter weergegeven. Een plot is gemaakt voor elke meting, ongeveer elke 5 minuten. Uit de resultaten is af te leiden dat de doorlatendheid over de kolom aanzienlijk kan veranderen vooral voor lage verhangen, dit is in Sectie 3.3 toegelicht. Bij een verhang van 1 is duidelijk te zien dat de top laag weer verstopt.



Figuur 0.36 Proef 05a – Doorlatendheid over de hoogte voor verschillende tijdstippen en verhangen.

Figuur 0.37 geeft het verloop van de doorlatendheid aan over de tijd van proef 05b. Op de x-as staat de doorlatendheid in m³/s, en op de y-as is de hoogte van de kolom in meter

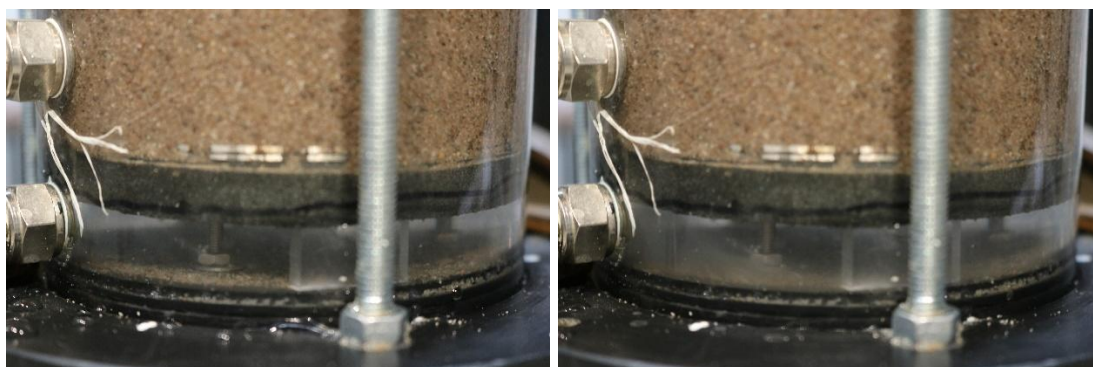
weergegeven. Een plot is gemaakt voor elke meting, ongeveer elke 5 minuten. Uit de resultaten is af te leiden dat de doorlatendheid over de kolom aanzienlijk kan veranderen vooral voor lage verhangen, dit is in Sectie 3.3 toegelicht. Verder waren geen grote veranderingen in doorlatendheid over de tijd.



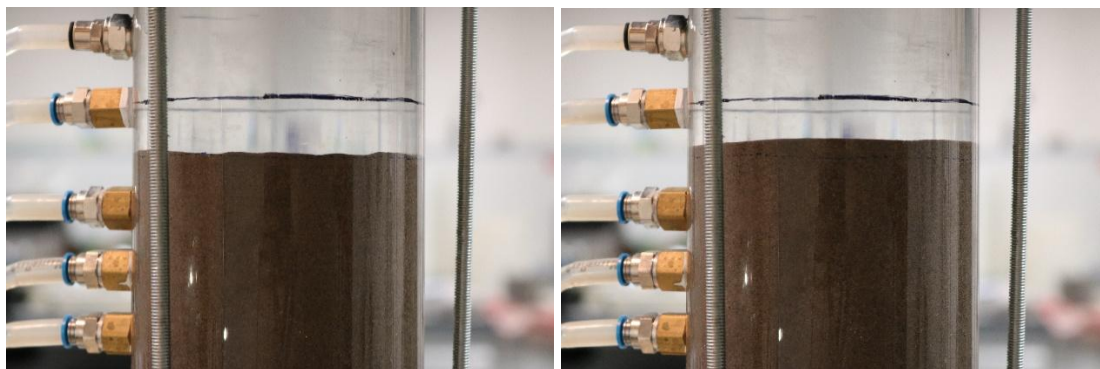
Figuur 0.37 Proef 05b – Doorlatendheid over de hoogte voor verschillende tijdstippen en verhangen.

A.5.5 Volumeverandering

Met twee camera's zijn iedere minuut foto's gemaakt aan de onderkant van het monster ingezoomd om de korrel te zien (Figuur 0.38) en aan de bovenkant van het monster uitgezoomd om eventueel verzakkingen te zien (Figuur 0.39). Uit beide analyses blijkt dat er geen verandering heeft plaatsgevonden tijdens de proef.

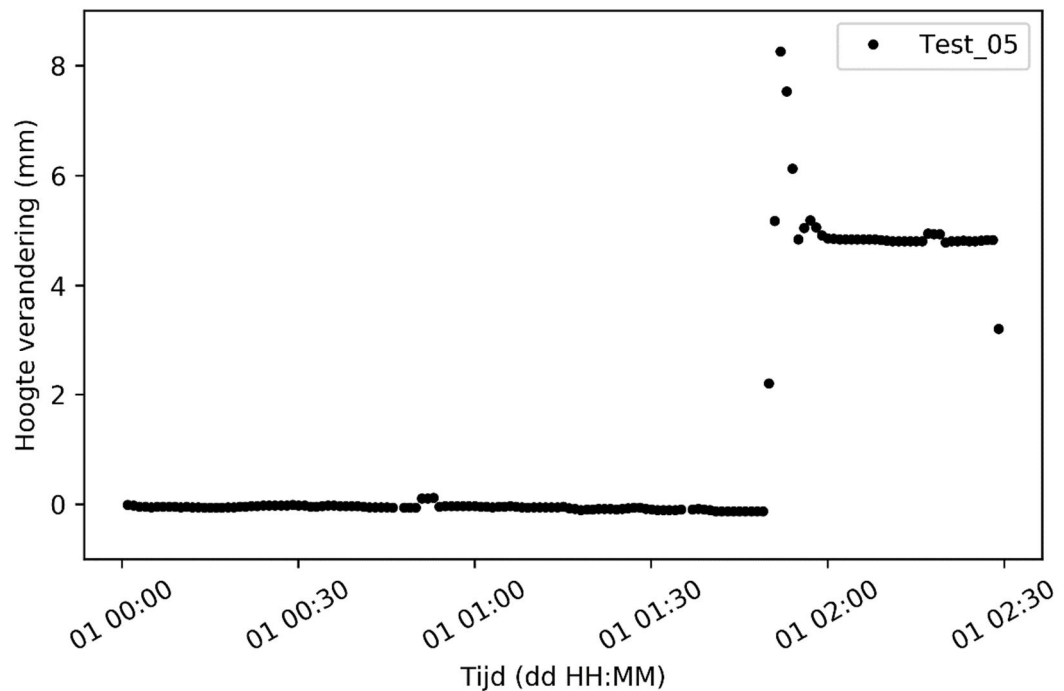


Figuur 0.38 Proef 05 – Foto gezoomd op de korrels aan de onderkant van het monster vóór (links) en na (rechts) de proef.



Figuur 0.39 Proef 05 – Foto van de bovenkant van het monster vóór (links) en na (rechts) de proef. Ophoging van het monster aan het einde van de proef komt door de opbarsting die na 1 uur en 55 min is opgetreden.

Met behulp van foto's van de bovenkant van het monster genomen elke minuut, was de hoogte verandering van het monster tijdens proef 05b bepaald (zie Figuur 0.40). Op verschilbeelden genomen rond 50 min is een wit bandje zichtbaar van circa 0.24 m, die verklaart de gemeten verschuiving. Deze markering is ook op de cilinder te zien dus de camera is iets bewogen. Na 115 min heeft opbarsten plaats gevonden wat de 5 mm verhoging verklaart, deze is ook duidelijk te zien in Figuur 0.40.



Figuur 0.40 Proef 05b – Hoogte verandering van het monster over de duur van de proef.

A.5.6

C.S.I. korrelverdeling

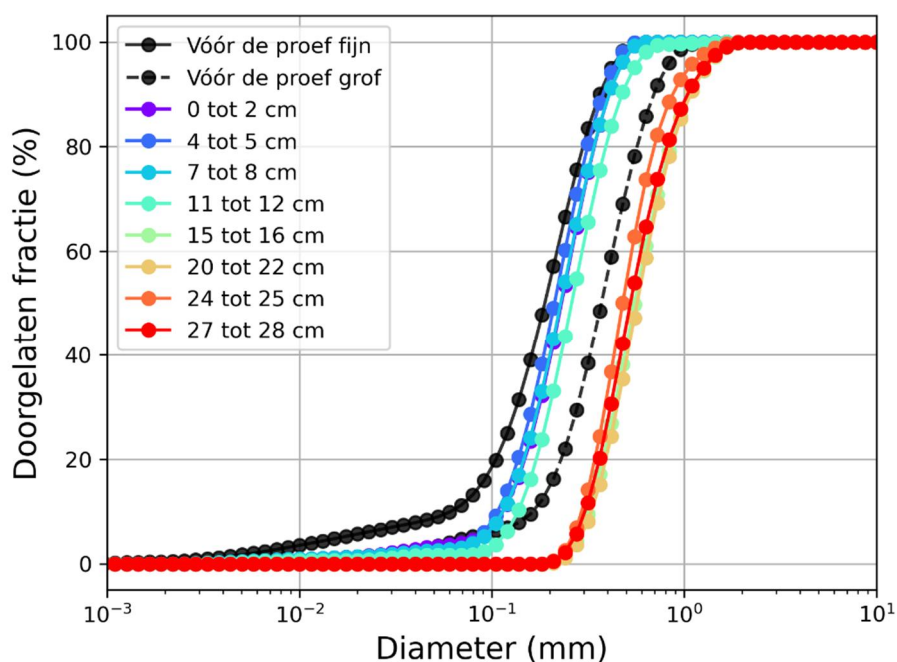
Figuur 0.41 geeft de C.S.I. korrelverdelingen per laag na de proef, en Tabel 24 geeft de D10 en D20 per laag. De verandering in materiaal (van fijn naar grof) is op 11.3 cm van de bovenkant van het monster, daardoor wijkt laag van 11 tot 12 cm een beetje af van de korrelverdeling van de fijn laag (0 tot 8 cm). Voor de fijn deel (0 tot 8 cm) is er geen verandering in korrelverdeling. Voor de grof deel (15 tot 28 cm) is er een klein afwijking in korrelverdeling bij de bovenste laag, dit komt waarschijnlijk door de heave dit opgetreden is.

Deze korrelverdelingen zijn gebruikt om per laag ook een Kenney & Lau (1985) analyse te maken (Figuur 0.42), waaruit blijkt geen stabiliteitsprobleem te zijn volgens Kenney & Lau (1985).

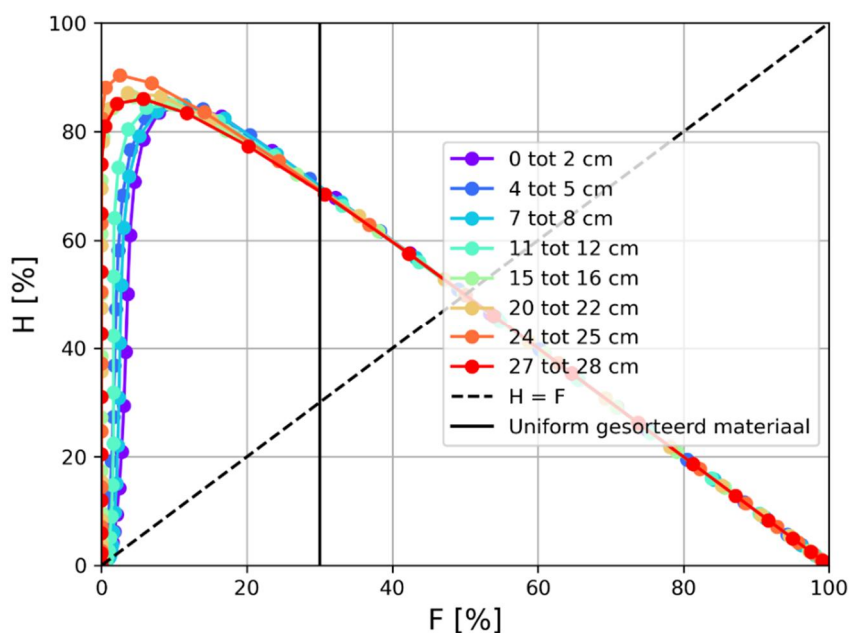
Tabel 24 Proef 05b – D10 en D20 per laag na het einde van de proef. De lagen zijn vanaf de bovenkant van het monster gemeten.

C.S.I. laag	D10 (mm)	D20 (mm)
0 tot 2 cm	0.114	0.148
4 tot 5 cm	0.107	0.137
7 tot 8 cm	0.114	0.147

11 tot 12 cm	0.137	0.17
15 tot 16 cm	0.319	0.379
20 tot 22 cm	0.329	0.391
24 tot 25 cm	0.293	0.343
27 tot 28 cm	0.305	0.362



Figuur 0.41 Proef 05b – Korrelverdeling per laag na het einde van de proef. De lagen zijn vanaf de bovenkant van het monster gemeten.



Figuur 0.42 Proef 05b – Kenney & Lau (1985) criteria per laag aan het einde van de proef. De lagen zijn vanaf de bovenkant van het monster gemeten.

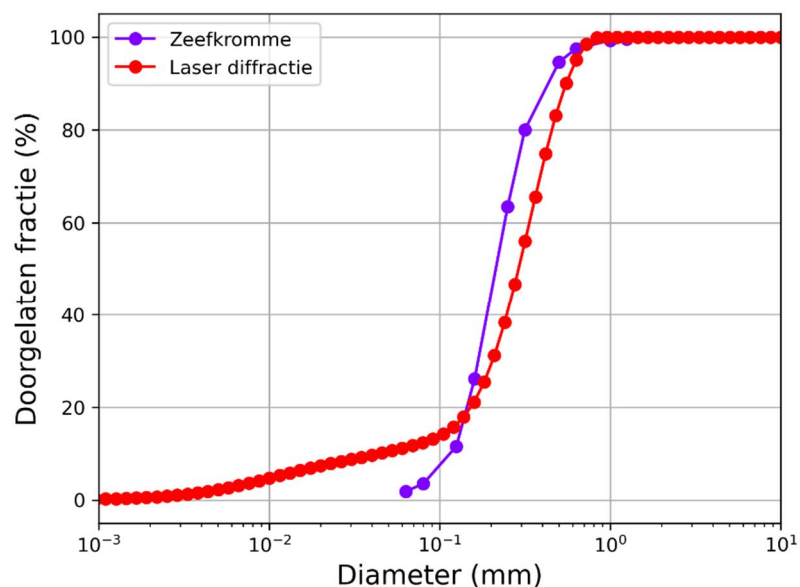
A.6 Factsheet proef 06

A.6.1 Eigenschappen proef

Proef 06 heeft plaats gevonden op 21/06/2021 en bestaat uit zand van boring B10-06 5.60-7.76 m-mv. De volgende gegevens zijn voor de proef gemeten:

- Temperatuur water: 22 °C;
- Kamertemperatuur: 21.8 °C;
- Hoogte van het filter: 2.5 cm;
- Hoogte van het monster: 28.30 cm;
- Droog gewicht: 2817.9 g;
- Porositeit: 0.41;
- Relatieve dichtheid: 50.5%.

De zeefkromme van het monster is in Figuur 0.43 te zien en de korrelgrootte voor verschillende massa-% is in Tabel 25 te zien. De korrelverdeling met de zeefanalyse gaat alleen tot 0.063 mm daardoor is ook de korrelverdeling met de laser diffractie geplot om de korrelverdeling van de fijner gedeelte ook zichtbare te maken.



Figuur 0.43 Proef 06 – Korrelverdeling gemaakt met zeefanalyse en laser diffractie.

Tabel 25 Proef 06 – Korrelgrootte voor verschillende doorgeelaten fractie-% gebaseerd op de laser diffractie.

	Korrelgrootte (mm)
D15	0.113
D30	0.203
D50	0.290
D60	0.336
D85	0.498
D90	0.549

A.6.2

Proefverloop

De zesde proef verliep over een duur van 3 uur. Er waren geen bijzonderheden en geen uitspoeling van materiaal. De debiet en stijghoogten over de kolom per ongeveer vijf minuten zijn in Tabel 27 te zien. De locatie van elke stijghoogtebuis is in Tabel 26 weergegeven.

Tabel 26 Proef 06 – Positie van de stijghoogtebuizen.

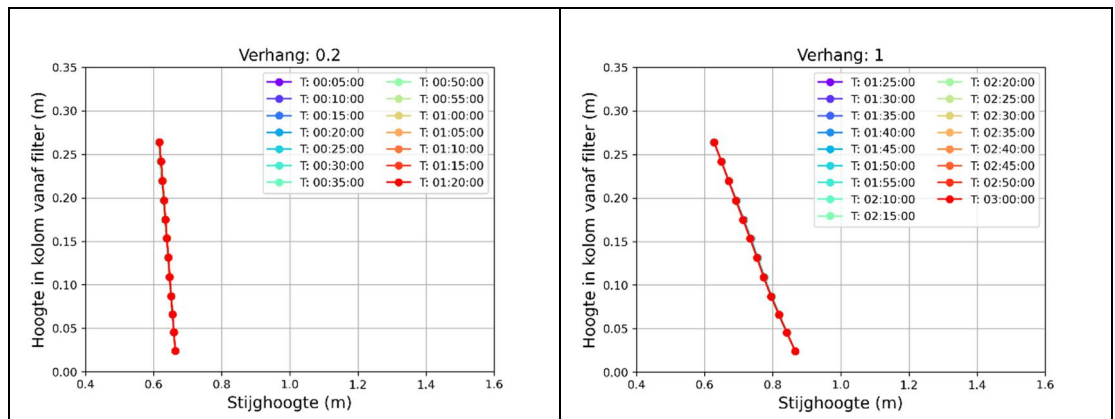
Label	Afstand van het filter (cm)
h1	0.0
h2	1.3
h3	3.5
h4	5.6
h5	7.6
h6	9.8
h7	12.0
h8	14.3
h9	16.4
h10	18.6
h11	20.8
h12	23.1
h13	25.3
h14	27.5
h15	30.9
h16	33.3

Tabel 27 Proef 06 – Verloop van de proef. De kolom 'Retour flow' geeft aan als het een neerwaartse stroming is (0) of een opwaartse stroming (1). Een hogere stijghoogte is in groen gekleurd en een lagere in rood met geel tussendoor.

Δp (cm)	i (-)	Retour Flow	stop watch	Flow (cc/min)	h1 (cm)	h2 (cm)	h3 (cm)	h4 (cm)	h5 (cm)	h6 (cm)	h7 (cm)	h8 (cm)	h9 (cm)	h10 (cm)	h11 (cm)	h12 (cm)	h13 (cm)	h14 (cm)	h15 (cm)	h16 (cm)	in (cm)	out (cm)
0	0.0	1	00:00	0	61.10	61.20	61.40	61.40	61.40	61.40	61.40	61.40	61.40	61.40	61.40	61.40	61.40	61.30	61.30	61.30	61.35	61.35
5.75	0.2	0	00:05	14.10	67.00	66.55	66.20	65.70	65.35	64.85	64.45	64.05	63.60	63.15	62.75	62.10	61.80	61.40	61.40	61.35	67.10	61.35
5.75	0.2	0	00:10	14.10	67.00	66.55	66.20	65.70	65.35	64.90	64.45	64.05	63.60	63.15	62.75	62.10	61.80	61.35	61.35	61.35	67.10	61.35
5.75	0.2	0	00:15	14.10	67.00	66.55	66.20	65.75	65.35	64.90	64.45	64.05	63.60	63.15	62.75	62.10	61.80	61.35	61.35	61.35	67.10	61.35
5.75	0.2	0	00:20	14.00	67.00	66.55	66.20	65.75	65.35	64.90	64.45	64.05	63.60	63.15	62.75	62.10	61.80	61.35	61.35	61.35	67.10	61.35
5.75	0.2	0	00:25	14.00	67.00	66.60	66.20	65.75	65.35	64.90	64.45	64.05	63.60	63.15	62.75	62.10	61.80	61.35	61.35	61.35	67.10	61.35
5.75	0.2	0	00:30	14.00	67.00	66.60	66.20	65.75	65.35	64.90	64.45	64.05	63.60	63.15	62.75	62.10	61.80	61.35	61.35	61.35	67.10	61.35
5.75	0.2	0	00:35	14.00	67.00	66.60	66.20	65.75	65.35	64.90	64.45	64.05	63.60	63.15	62.75	62.10	61.80	61.35	61.35	61.35	67.10	61.35
1.45	0.1	1	00:40	3.90	61.35	61.40	61.80	61.90	62.00	62.20	62.30	62.35	62.25	62.35	62.45	62.50	62.65	62.70	62.80	62.80	62.80	61.35
1.45	0.1	1	00:45	4.20	61.35	61.35	61.75	61.75	62.00	62.10	62.20	62.30	62.25	62.30	62.40	62.50	62.65	62.70	62.80	62.00	62.80	61.35
5.65	0.2	0	00:50	13.80	66.85	66.40	66.25	65.80	65.50	65.00	64.60	64.20	63.80	63.35	62.90	62.45	62.00	61.40	61.40	61.40	67.00	61.35
5.65	0.2	0	00:55	13.80	66.90	66.50	66.25	65.80	65.45	65.00	64.60	64.20	63.80	63.35	62.90	62.45	62.00	61.40	61.40	61.40	67.00	61.35
5.65	0.2	0	01:00	13.90	66.90	66.50	66.25	65.80	65.45	65.00	64.60	64.20	63.75	63.30	62.90	62.45	62.00	61.40	61.40	61.40	67.00	61.35
5.65	0.2	0	01:05	13.80	66.90	66.50	66.25	65.80	65.45	65.00	64.60	64.20	63.75	63.30	62.90	62.45	62.00	61.40	61.40	61.40	67.00	61.35
5.65	0.2	0	01:10	13.80	66.90	66.50	66.25	65.75	65.40	64.95	64.55	64.15	63.70	63.30	62.85	62.45	62.00	61.40	61.40	61.40	67.00	61.35
5.65	0.2	0	01:15	13.80	66.90	66.50	66.25	65.75	65.40	64.95	64.55	64.15	63.70	63.30	62.85	62.45	62.00	61.40	61.40	61.40	67.00	61.35
5.65	0.2	0	01:20	13.80	66.90	66.50	66.25	65.75	65.40	64.95	64.55	64.15	63.70	63.30	62.85	62.45	62.00	61.40	61.40	61.40	67.00	61.35
28.4	0.2	0	01:25	68.00	89.55	87.90	85.35	83.10	80.90	78.60	76.60	74.70	72.60	70.50	68.30	66.00	64.00	61.40	61.40	61.40	89.80	61.40
28.4	1.0	0	01:30	68.30	89.60	88.00	85.35	83.10	80.90	78.60	76.60	74.70	72.60	70.50	68.30	66.00	64.00	61.40	61.40	61.40	89.80	61.40
28.4	1.0	0	01:35	68.40	89.60	88.00	85.35	83.10	80.90	78.60	76.60	74.70	72.60	70.50	68.30	66.00	64.00	61.40	61.40	61.40	89.80	61.40
28.4	1.0	0	01:40	68.40	89.60	88.00	85.35	83.10	80.90	78.60	76.60	74.70	72.60	70.50	68.30	66.00	64.00	61.40	61.40	61.40	89.80	61.40
28.4	1.0	0	01:45	69.00	89.60	88.00	85.35	83.10	80.90	78.60	76.60	74.70	72.60	70.50	68.30	66.00	64.00	61.40	61.40	61.40	89.80	61.40
28.4	1.0	0	01:50	69.30	89.60	88.00	85.35	83.10	80.90	78.60	76.60	74.70	72.50	70.40	68.30	66.05	64.05	61.40	61.40	61.40	89.80	61.40
28.4	1.0	0	01:55	69.40	89.60	88.00	85.35	83.10	80.90	78.60	76.60	74.70	72.50	70.40	68.30	66.05	64.05	61.40	61.40	61.40	89.80	61.40
14.2	1.0	0	02:00	36.10	61.10	62.25	63.80	65.00	66.20	67.35	68.35	69.20	70.10	71.20	72.40	73.40	74.60	75.50	75.60	75.60	75.60	61.40
14.2	0.5	1	02:05	36.00	61.10	62.15	63.70	64.85	66.10	67.30	68.40	69.20	70.15	71.50	72.35	73.40	74.60	75.50	75.60	75.60	75.60	61.40
28.4	0.5	1	02:10	70.00	89.55	87.90	85.25	82.85	80.60	78.40	76.40	74.40	72.30	70.30	68.15	66.00	63.85	61.80	61.50	61.50	89.80	61.40
28.4	1.0	0	02:15	70.00	89.60	88.00	85.30	83.00	80.75	78.40	76.40	74.40	72.30	70.30	68.20	66.00	63.85	61.80	61.40	61.40	89.80	61.40
28.4	1.0	0	02:20	70.00	89.60	88.00	85.30	83.00	80.75	78.40	76.40	74.40	72.30	70.30	68.20	66.00	63.85	61.80	61.40	61.40	89.80	61.40
28.4	1.0	0	02:25	69.90	89.60	88.00	85.35	83.00	80.75	78.40	76.40	74.40	72.40	70.30	68.20	66.00	63.90	61.80	61.40	61.40	89.80	61.40
28.4	1.0	0	02:30	69.70	89.60	88.00	85.35	83.00	80.75	78.40	76.40	74.40	72.40	70.30	68.20	66.00	63.90	61.80	61.40	61.40	89.80	61.40
28.4	1.0	0	02:35	69.80	89.60	88.00	85.35	83.00	80.75	78.40	76.40	74.40	72.40	70.30	68.20	66.00	63.90	61.80	61.40	61.40	89.80	61.40
28.4	1.0	0	02:40	70.30	89.60	88.00	85.30	83.00	80.75	78.40	76.40	74.40	72.40	70.30	68.20	66.00	63.90	61.80	61.40	61.40	89.80	61.40

28.4	1.0	0	02:45	70.20	89.60	88.00	85.30	83.00	80.70	78.40	76.40	74.40	72.40	70.30	68.20	66.00	63.90	61.80	61.40	61.40	89.80	61.40
28.4	1.0	0	02:50	70.10	89.60	88.00	85.30	83.00	80.70	78.40	76.40	74.40	72.40	70.30	68.20	66.00	63.90	61.80	61.40	61.40	89.80	61.40
28.4	1.0	0	03:00	70.70	89.60	88.00	85.30	83.00	80.70	78.40	76.40	74.40	72.40	70.30	68.20	66.00	63.90	61.80	61.40	61.40	89.80	61.40

Figuur 0.44 geeft de stijghoogtemetingen aan in de loop van de tijd van proef 06 voor verschillende aangebrachte verhangen. Deze zijn constant over de tijd.

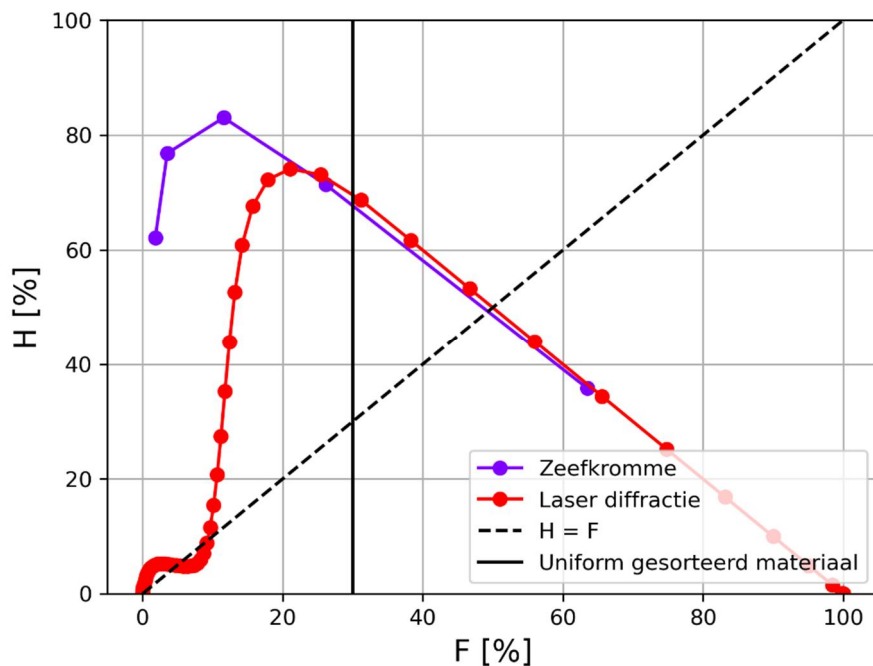


Figuur 0.44 Proef 06 – Stijghoogte voor verschillende verhangen over de kolom en over de tijd.

A.6.3

Analyse Kenney & Lau en Wan & Fell

De korrelverdeling van Figuur 0.43 is gebruikt om een Kenney & Lau (1985) analyse te maken en daardoor te voorspellen of het materiaal intern stabiel is. De data van de laser diffractie geeft een duidelijker beeld van de fijne gedeelte van het monster. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 0.45, waar blijkt volgens de korrelverdeling van de laser diffractie dat het materiaal niet intern stabiel is.

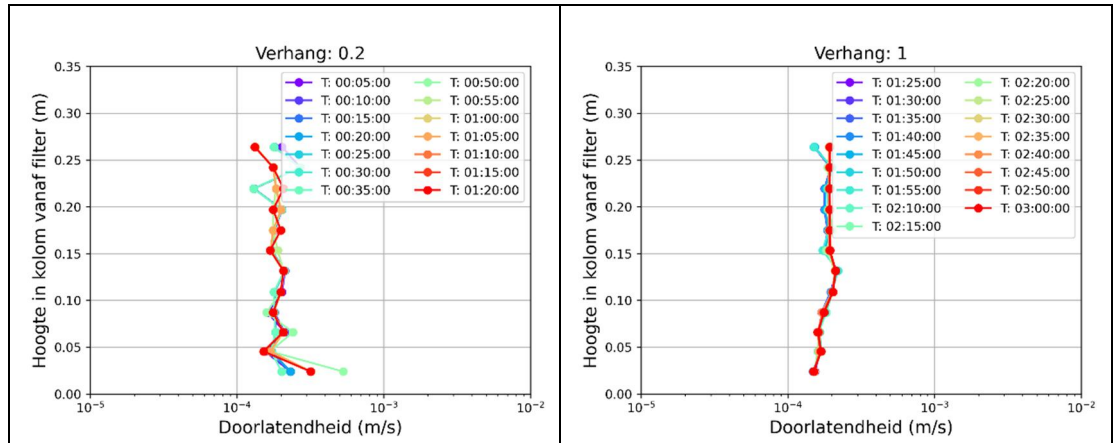


Figuur 0.45 Proef 06 – Uitwerking Kenney & Lau (1985) methode voor het monster gemaakt met zeefanalyse en laser diffractie.

Met deze zweefkromme is ook een Wan & Fell (2008) analyse gemaakt. De voorspelde kans op interne instabiliteit is 0.315, wat aangeeft dat het monster redelijk intern stabiel is.

A.6.4 Doorlatendheid over de hoogte en tijd

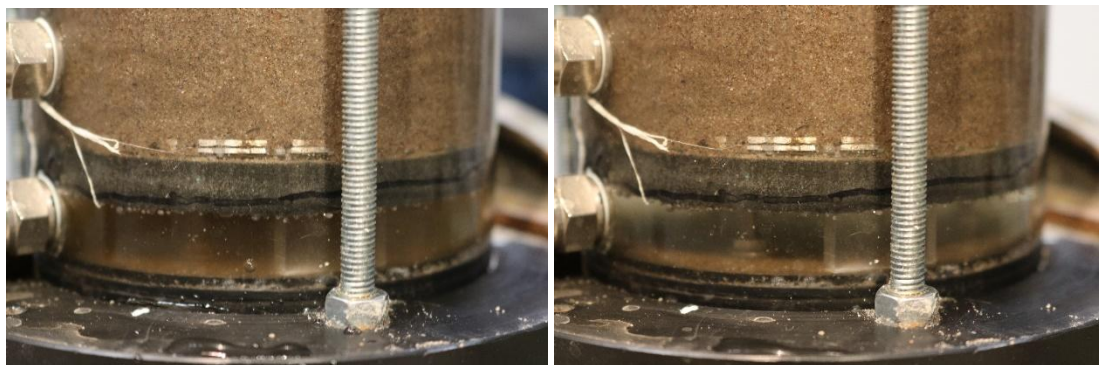
Figuur 0.46 geeft het verloop van de doorlatendheid aan over de tijd. Op de x-as staat de doorlatendheid in m/s, en op de y-as is de hoogte van de kolom in meter weergegeven. Een plot is gemaakt voor elke meting, ongeveer elke 5 minuten. Uit de resultaten is af te leiden dat de doorlatendheid over de kolom kan veranderen vooral voor lage verhangen, dit is in Sectie 3.3 toegelicht. Verder is er weinig verandering in doorlatendheid over de tijd en voor een verhang van 1 bijna geen verandering ook over de hoogte van de kolom. Hiermee blijkt dat deze materiaal toch intern stabiel is ook al voldoet die niet aan de Kenney & Lau (1985) criteria.



Figuur 0.46 Proef 06 – Doorlatendheid over de hoogte voor verschillende tijdstippen en verhangen.

A.6.5 Volumeverandering

Met twee camera's zijn iedere minuut foto's gemaakt aan de onderkant van het monster ingezoomd om de korrel te zien (Figuur 0.47) en aan de bovenkant van het monster uitgezoomd om eventueel verzakkingen te zien (Figuur 0.48). Uit beide analyses blijkt dat er geen verandering heeft plaatsgevonden tijdens de proef.

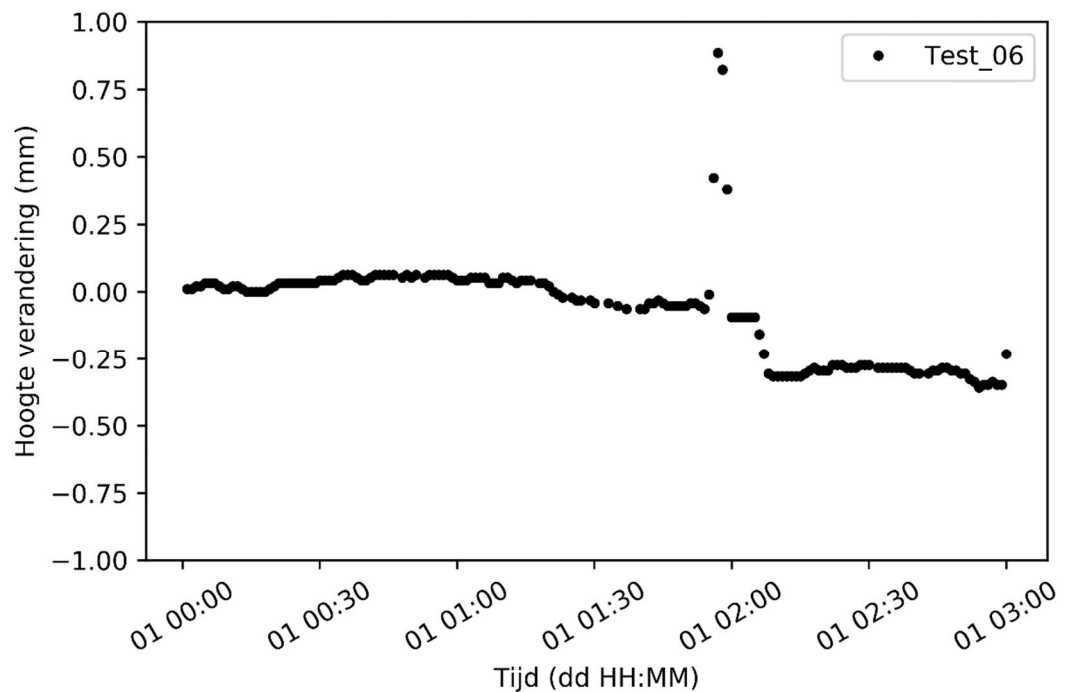


Figuur 0.47 Proef 06 – Foto gezoomd op de korrels aan de onderkant van het monster vóór (links) en na (rechts) de proef.



Figuur 0.48 Proef 06 – Foto van de bovenkant van het monster vóór (links) en na (rechts) de proef.

Met behulp van foto's van de bovenkant van het monster genomen elke minuut, was de hoogte verandering van het monster bepaald, dit is in Figuur 0.49 te zien. Hier zijn veel verschillende verschuivingen te zien. Dit komt doordat er veel verandering is in achtergrond verlichting. Door naar de verschilbeelden te kijken zie je een groot verschil in verlichting na ongeveer 50 min, rond 75 en 100 min en weer rond 110 en 120 min. Daarna weer rond 170 min. De verschuiving komt dus door deze verschillen in verlichting, het monster over de tijd toont geen verandering in hoogte.



Figuur 0.49 Proef 06 – Hoogte verandering van het monster over de duur van de proef.

A.6.6

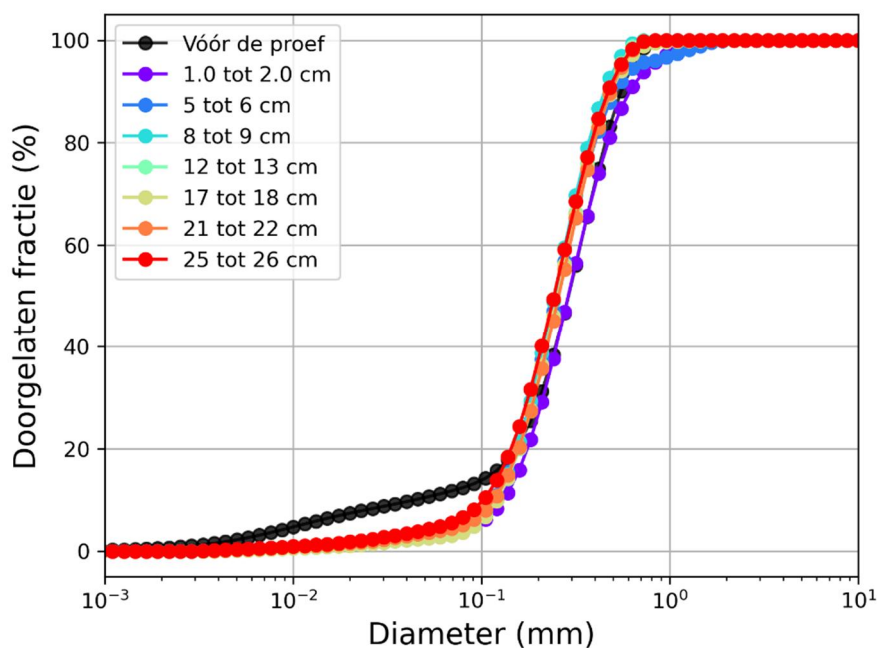
C.S.I. korrelverdeling

Figuur 0.50 geeft de C.S.I. korrelverdelingen per laag na de proef en in zwart vóór de proef, en Tabel 28 geeft de D10 en D20 per laag. De korrelverdeling na de proef wijkt af van vóór de proef, de redenen hiervan zijn in vermeld in Sectie 3.5. Uit deze figuur blijkt de grove fractie van de bovenste laag identiek te zijn gebleven aan vóór de proef. De onderste lagen lijken fijner te zijn geworden: het gaat echter om een zeer klein percentage.

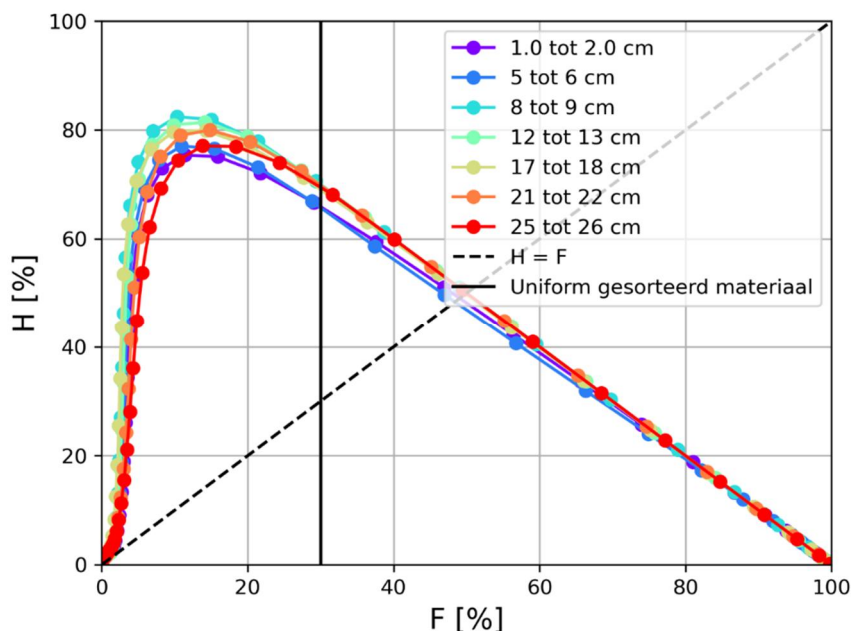
Deze korrelverdelingen zijn gebruikt om per laag ook een Kenney & Lau (1985) analyse te maken, zie Figuur 0.51. Uit deze figuur blijkt geen laag meer intern instabiel op suffosie, dit komt doordat de fijne fractie verloren is.

Tabel 28 Proef 06 – D10 en D20 per laag na het einde van de proef. De lagen zijn vanaf de bovenkant van het monster gemeten.

C.S.I. laag	D10 (mm)	D20 (mm)
1.0 tot 2.0 cm	0.13	0.175
5 tot 6 cm	0.115	0.154
8 tot 9 cm	0.119	0.154
12 tot 13 cm	0.121	0.159
17 tot 18 cm	0.121	0.158
21 tot 22 cm	0.116	0.157
25 tot 26 cm	0.102	0.143



Figuur 0.50 Proef 06 – Korrelverdeling per laag na het einde van de proef. De lagen zijn vanaf de bovenkant van het monster gemeten.



Figuur 0.51 Proef 06 – Kenney & Lau (1985) criteria per laag aan het einde van de proef. De lagen zijn vanaf de bovenkant van het monster gemeten.

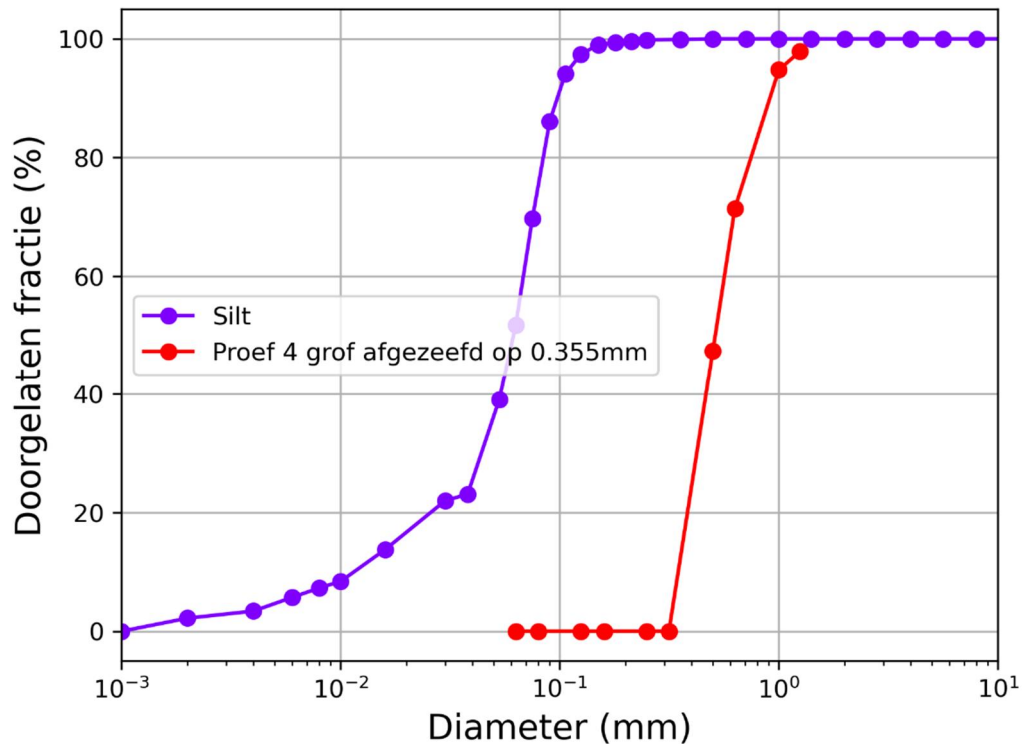
A.7 Factsheet proef 07

A.7.1 Eigenschappen proef

Proef 07 is een filterincompatibiliteit proef, met als onderste laag een grof zand (proefmateriaal uit proef 4 afgezeefd op 355 mm) en als bovenste laag silt. Het proef heeft plaats gevonden op 29/06/2021. De volgende gegevens zijn voor de proef gemeten:

- Temperatuur water: 21.1 °C;
- Kamertemperatuur: 21.5 °C;
- Hoogte van het filter: 2.5 cm;
- Hoogte van het monster: 25.1 cm (12 cm grof + 13.1 cm fijn);
- Droog gewicht onderste laag: 1243.3 g;
- Droog gewicht bovenste laag: 1121.6 g;
- Porositeit onderste laag: 0.39;
- Porositeit bovenste laag: 0.49;
- Relatieve dichtheid onderste laag: 46.4%;
- Relatieve dichtheid bovenste laag: 38.9%.

De zeefkromme van het bovenste en onderste materiaal is in Figuur 0.52 te zien en hun korrelgrootte voor verschillende massa-% is in Tabel 29 te zien.



Figuur 0.52 Proef 07 – Korrelverdeling gemaakt met laser diffractie.

Tabel 29 Proef 07 – Korrelgrootte voor verschillende doorgelaten fractie-% gebaseerd op de laser diffractie.

	Korrelgrootte bovenste materiaal (mm)	Korrelgrootte onderste materiaal (mm)
D15	0.018	0.390
D30	0.044	0.459
D50	0.062	0.560
D60	0.068	0.621
D85	0.089	0.857
D90	0.098	0.940

A.7.2 Proefverloop

Deze proef verliep over een duur van 1 dag, 18 uur en 53 min. Er waren drie neerwaartse verhangen aangebracht:

- De eerste was een verhang van 0.2, aangebracht voor 1 uur en 25 min. Halverwege deze neerwaarts stroming is een retourstroming met een verhang van 0.06 gedurende 10 min aangebracht.
- De tweede was een verhang van 1, aangebracht voor ongeveer 1 uur en 25 min. Halverwege deze neerwaarts stroming is een retourstroming met een verhang van 0.26 gedurende 10 min aangebracht.
- De grootste neerwaartse stroming was met een verhang van 2.5. Deze is aangebracht over een duur van ongeveer 40 uur. In die tijd zijn 2 retour stromingen met een verhang van 0.25 aangebracht. De eerste na 15 uur en de tweede na 22 uur en 38 min, beide zijn aangebracht gedurende 10 min.

Er was geen zichtbare uitspoeling van materiaal. De gemeenten debiet en stijghoogten over de kolom en tijd zijn in Tabel 30 te zien. De locatie van elke stijghoogtebuis is in Tabel 31 weergegeven.

Tabel 30 Proef 07 – Verloop van de proef. De kolom 'Retour flow' geeft aan als het een neerwaartse stroming is (0) of een opwaartse stroming (1). Een hogere stijghoogte is in groen gekleurd en een lagere in rood met geel tussendoor. De stopwatch wordt na 24 uur gereset.

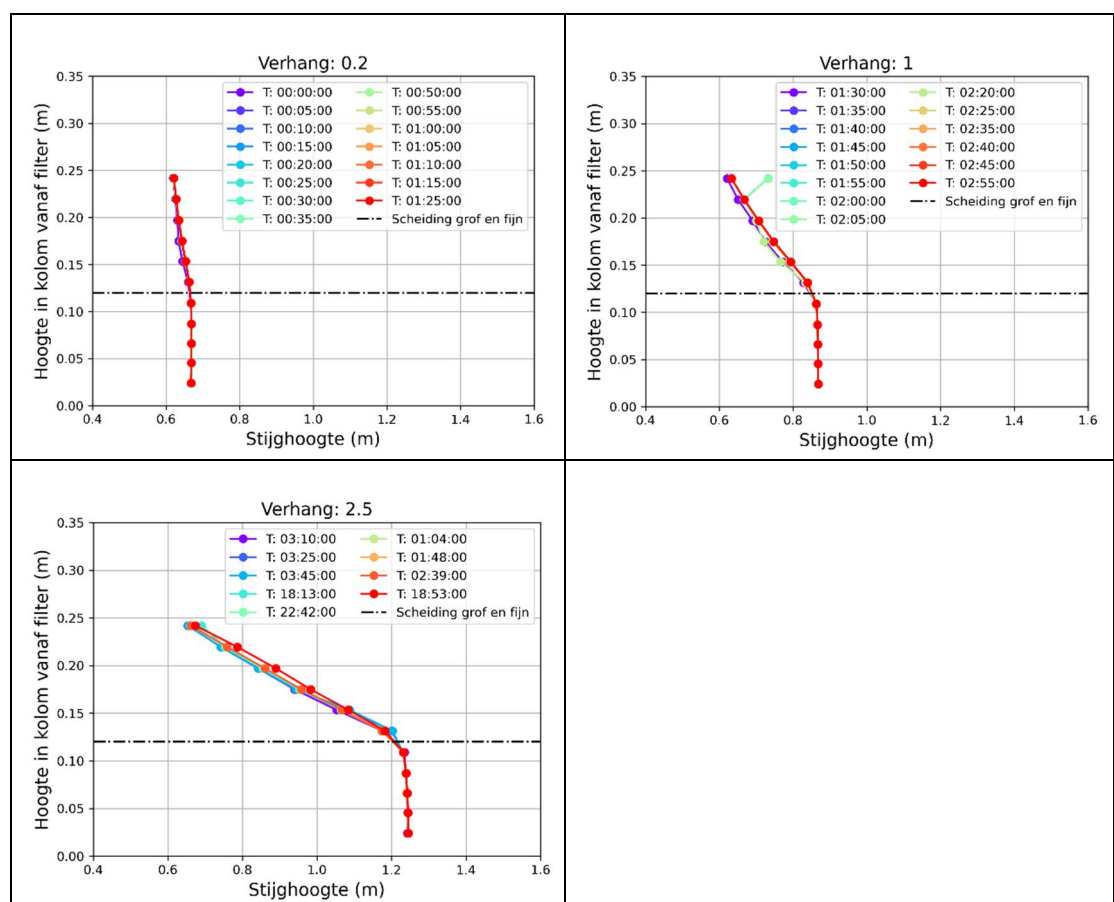
Δp (cm)	i (-)	Retour Flow	stop watch	Flow (cc/min)	h1 (cm)	h2 (cm)	h3 (cm)	h4 (cm)	h5 (cm)	h6 (cm)	h7 (cm)	h8 (cm)	h9 (cm)	h10 (cm)	h11 (cm)	h12 (cm)	h13 (cm)	in (cm)	out (cm)
					61.70	61.70	61.70	61.70	61.80	61.80	61.80	61.80	61.80	61.80	61.80	61.70	61.70	61.70	61.70
5.1	0.20	0	00:00	4.70	66.80	66.60	67.00	66.90	67.00	66.90	66.55	65.40	63.50	63.30	62.90	62.10	61.75	66.85	61.75
5.1	0.20	0	00:05	4.50	66.80	66.70	67.00	66.90	67.00	66.90	66.75	65.80	64.50	63.80	63.10	62.15	61.75	66.85	61.75
5.1	0.20	0	00:10	4.70	66.80	66.70	67.00	66.90	67.00	66.90	66.75	65.85	64.75	63.80	63.10	62.20	61.75	66.85	61.75
5.1	0.20	0	00:15	4.60	66.80	66.70	67.00	66.90	67.00	66.90	66.75	65.85	64.80	63.85	63.10	62.20	61.75	66.85	61.75
5.1	0.20	0	00:20	4.50	66.80	66.70	67.00	66.90	67.00	66.90	66.75	65.85	64.80	63.85	63.10	62.20	61.75	66.85	61.75
5.1	0.20	0	00:25	4.50	66.80	66.70	67.00	66.90	67.00	66.90	66.70	65.85	64.80	63.85	63.10	62.25	61.75	66.85	61.75
5.15	0.21	0	00:30	4.50	66.80	66.70	67.00	66.90	67.00	66.90	66.75	65.85	64.80	63.85	63.10	62.25	61.75	66.90	61.75
5.15	0.21	0	00:35	4.50	66.80	66.70	67.00	66.90	67.00	66.90	66.75	65.85	64.80	63.85	63.10	62.25	61.75	66.90	61.75
1.25	0.05	1	00:40	1.50	61.80	61.80	61.80	61.85	62.00	62.00	62.20	62.90	63.30	62.85	62.70	62.90	63.10	63.00	61.75
1.35	0.05	1	00:45	1.30	61.80	61.80	61.80	61.85	61.90	61.90	62.00	62.35	62.70	62.70	62.70	62.85	63.10	63.10	61.75
5.15	0.21	0	00:50	4.70	66.80	66.70	66.85	66.80	66.90	66.90	66.75	65.80	64.70	63.80	63.10	62.50	61.80	66.90	61.75
5.15	0.21	0	00:55	4.50	66.80	66.70	66.85	66.85	66.90	66.90	66.75	65.80	64.75	63.90	63.10	62.50	61.80	66.90	61.75
5.15	0.21	0	01:00	4.60	66.80	66.70	66.85	66.85	66.90	66.90	66.75	65.90	64.80	63.90	63.10	62.50	61.80	66.90	61.75
5.15	0.21	0	01:05	4.60	66.80	66.70	66.85	66.85	66.90	66.90	66.75	65.90	64.80	63.90	63.10	62.50	61.80	66.90	61.75
5.15	0.21	0	01:10	4.50	66.80	66.70	66.85	66.85	66.90	66.90	66.75	65.90	64.80	63.90	63.10	62.50	61.80	66.90	61.75
5.15	0.21	0	01:15	4.60	66.80	66.70	66.85	66.85	66.90	66.90	66.75	65.90	64.80	63.90	63.10	62.50	61.80	66.90	61.75
5.15	0.21	0	01:25	4.50	66.80	66.70	66.85	66.85	66.90	66.90	66.75	65.90	64.80	63.90	63.10	62.50	61.80	66.90	61.75
25.3	1.01	0	01:30	22.30	86.85	86.70	86.85	86.70	86.70	86.60	86.00	79.70	74.70	70.40	67.80	62.40	61.80	87.05	61.75
25.35	1.01	0	01:35	22.10	86.90	86.80	86.85	86.75	86.70	86.60	86.05	81.70	76.70	72.50	68.70	64.70	81.75	87.10	61.75
25.35	1.01	0	01:40	22.00	86.90	86.80	86.85	86.75	86.70	86.60	86.10	81.70	76.85	72.60	68.75	64.70	81.75	87.10	61.75
25.35	1.01	0	01:45	22.10	86.90	86.80	86.85	86.75	86.70	86.60	86.10	81.80	76.85	72.60	68.75	64.70	81.75	87.10	61.75
25.35	1.01	0	01:50	22.20	86.90	86.80	86.85	86.75	86.70	86.60	86.10	81.80	76.85	72.60	68.75	64.70	81.75	87.10	61.75
25.35	1.01	0	01:55	22.10	86.90	86.80	86.85	86.75	86.70	86.60	86.10	81.80	76.85	72.60	68.75	64.70	81.75	87.10	61.75
25.35	1.01	0	02:00	22.00	86.90	86.80	86.85	86.75	86.70	86.60	86.15	81.85	76.90	72.70	68.80	64.70	81.75	87.10	61.75
25.35	1.01	0	02:05	21.90	86.90	86.80	86.85	86.75	86.70	86.60	86.15	81.85	76.90	72.70	68.80	64.70	81.75	87.10	61.75
6.25	0.25	1	02:10	5.50	61.60	61.80	61.85	61.90	62.05	62.10	63.10	68.20	69.80	66.60	66.50	67.40	68.00	68.00	61.75
0	0.00	1	02:15	5.60	61.60	61.80	61.85	61.90	62.00	62.05	63.20	63.80	64.80	65.70	66.50	67.40	68.00	68.00	61.75
25.35	1.01	0	02:20	22.20	86.90	86.80	86.90	86.75	86.75	86.60	85.80	80.80	72.50	71.60	68.50	64.90	61.80	87.10	61.75
25.35	1.01	0	02:25	22.20	86.90	86.80	86.90	86.75	86.75	86.60	86.05	81.80	76.15	72.60	68.75	64.80	61.80	87.10	61.75
25.35	1.01	0	02:35	22.00	86.90	86.80	86.90	86.75	86.75	86.60	86.10	81.90	76.90	72.70	68.75	64.80	61.80	87.10	61.75
25.35	1.01	0	02:40	21.90	86.90	86.80	86.90	86.75	86.75	86.60	86.10	81.90	76.90	72.70	68.75	64.80	61.80	87.10	61.75
25.35	1.01	0	02:45	21.90	86.90	86.80	86.90	86.75	86.75	86.60	86.10	81.90	76.90	72.70	68.75	64.80	61.80	87.10	61.75
25.35	1.01	0	02:55	21.90	86.90	86.80	86.90	86.75	86.75	86.60	86.10	81.90	76.90	72.70	68.80	64.80	61.80	87.10	61.75
63	2.51	0	03:10	54.70	124.75	124.00	124.45	124.20	124.00	123.70	123.30	111.50	99.00	89.00	79.40	69.10	61.60	124.75	61.75

63	2.51	0	03:25	54.40	124.80	124.50	124.45	124.20	124.00	123.75	122.50	117.50	99.50	89.15	79.40	69.10	61.60	124.75	61.75
63.05	2.51	0	03:45	54.20	124.80	124.55	124.50	124.20	124.00	123.70	122.50	118.00	99.50	89.20	79.40	69.10	61.70	124.80	61.75
63.1	2.51	0	18:13	52.20	124.80	124.50	124.50	124.20	124.00	123.80	122.60	112.40	100.40	90.20	80.60	70.10	68.10	124.80	61.70
6.3	0.25	1	21:32	5.10	61.80	61.80	61.90	61.90	62.00	62.10	62.20	63.30	64.80	65.50	66.50	67.50	68.10	68.00	61.70
63.1	2.51	0	22:42	51.40	124.80	124.60	124.50	124.20	124.00	123.80	122.50	112.30	100.60	90.50	80.90	70.30	61.90	124.80	61.70
63.1	2.51	0	01:04	50.20	124.80	124.60	124.50	124.20	124.00	123.80	122.50	112.50	100.80	90.70	81.30	70.50	61.80	124.80	61.70
63.1	2.51	0	01:48	50.20	124.80	124.60	124.50	124.20	124.00	123.80	122.50	112.50	100.80	90.70	81.30	70.60	61.80	124.80	61.70
6.3	0.25	1	02:08	4.89	61.60	61.70	61.85	61.85	61.90	61.90	62.10	63.30	64.90	65.40	66.40	67.50	68.10	68.00	61.70
63.1	2.51	0	02:39	50.90	124.80	124.50	124.50	124.30	124.00	123.80	122.40	112.50	100.80	90.80	81.30	70.50	61.80	124.80	61.70
63.1	2.51	0	18:53	44.90	124.80	124.60	124.50	124.50	124.10	123.80	122.70	113.80	103.00	93.60	84.40	72.90	61.80	124.80	61.70

Tabel 31 Proef 07 – Positie van de stijghoogtebuizen.

Label	Afstand vanaf filter (cm)
h1	0.0
h2	1.3
h3	3.5
h4	5.6
h5	7.6
h6	9.8
h7	12.0
h8	14.3
h9	16.4
h10	18.6
h11	20.8
h12	23.1
h13	25.3

Figuur 0.53 geeft de stijghoogtemetingen aan in de loop van de tijd van proef 07 voor verschillende aangebrachte verhangen. Deze zijn voor een verhang van 0.2 constant over de tijd. Met een verhang van 1 en 2.5 worden de stijghoogtes een beetje hoger met de tijd bij de fijne fractie maar is constant bij de grover fractie: deze verhoging is echter erg klein en kan ook door meetnauwkeurigheid komen.



Figuur 0.53 Proef 07 – Stijghoogte voor verschillende verhangen over de kolom en over de tijd.

A.7.3 Analyse Terzaghi en Lambe & Whitman

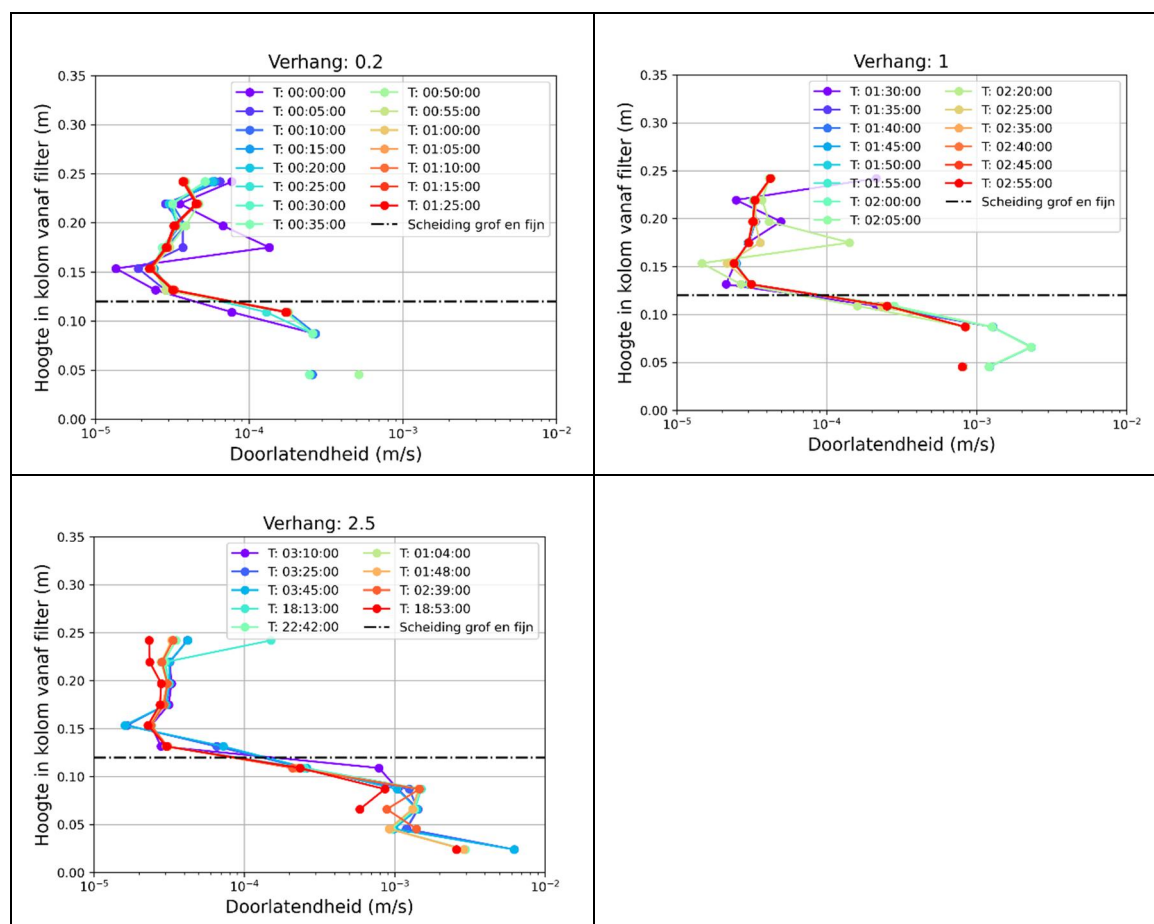
De methoden van Terzaghi (1922) en Lambe & Whitman (1969) zijn gebruikt om te voorspellen of het materiaal intern stabiel is op filterincompatibiliteit. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 32, waar het duidelijk te zien is dat het monster niet stabiel is volgens de tweede criteria. De eerste criteria voldoet niet aan de Terzaghi (1922) criteria maar wel aan Lambe & Whitman (1969).

Tabel 32 Proef 07 – Filterincompatibiliteit criteria.

	$\frac{d_{15,f}}{d_{85,b}} < 4 \text{ of } 5$	$\frac{d_{15,f}}{d_{15,b}} < 20$	$\frac{d_{50,f}}{d_{50,b}} < 25$
Proef 07	4.38	21.67	9.03

A.7.4 Doorlatendheid over de hoogte en tijd

Figuur 0.54 geeft het verloop van de doorlatendheid aan over de tijd. Op de x-as staat de doorlatendheid in m/s, en op de y-as is de hoogte van de kolom in meter weergegeven. Een line is gemaakt voor elke meting, en een plot is gemaakt per verhang. Uit de resultaten is af te leiden dat de doorlatendheid over de kolom kan veranderen vooral voor lage verhangen, dit is in Sectie 3.3 toegelicht. Verder zijn de veranderingen in de tijd niet heel consistent, waardoor het aan te duiden is dat het door meet onnauwkeurigheden komt. Voor metingen met een verhang van 2.5 kan aan de toplaag wel een kleine afname van doorlatendheid over de tijd worden gezien.



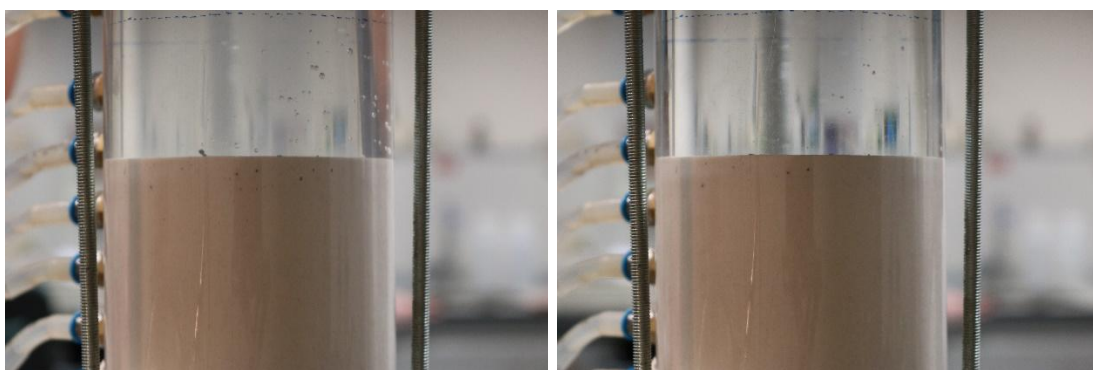
Figuur 0.54 Proef 07 – Doorlatendheid over de hoogte voor verschillende tijdstippen en verhangen.

A.7.5 Volumeverandering

Met twee camera's zijn iedere minuut foto's gemaakt ingezoomd aan de onderkant van het monster om de individuele korrels te zien (Figuur 0.55) en aan de bovenkant van het monster uitgezoomd om eventueel verzakkingen te zien (Figuur 0.56).

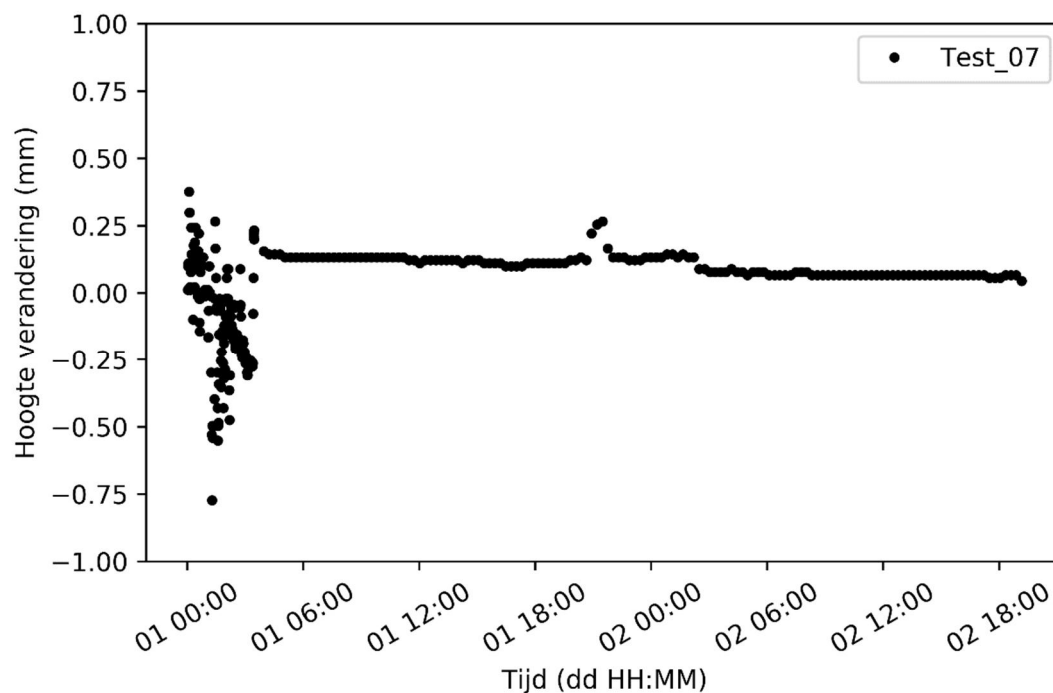


Figuur 0.55 Proef 07 – Foto gezoomd op de korrels aan de onderkant van het monster vóór (links) en na (rechts) de proef.



Figuur 0.56 Proef 07 – Foto van de bovenkant van het monster vóór (links) en na (rechts) de proef.

Met behulp van foto's van de bovenkant van het monster, was de hoogteverandering van het monster bepaald, dit is in Figuur 0.57 te zien. Deze figuur geeft in het begin al een verhoging van het monster omdat de eerste foto veel lichter is dan de rest. Daardoor is de hoogte van het monster in het begin overschat. Verder zijn in de eerste uren veel verandering in achtergrondverlichting wat terug te zien is in de verschilbeelden en verklaart waarom er zo veel verschuivingen zijn. Na ongeveer 18 uur, 1 dag en 1 uur, 1 dag en 10 uur zijn ook grote sprongen in verlichting terug te zien. Het monster over de tijd toont geen verandering in hoogte.



Figuur 0.57 Proef 07 – Hoogte verandering van het monster over de duur van de proef.

A.7.6

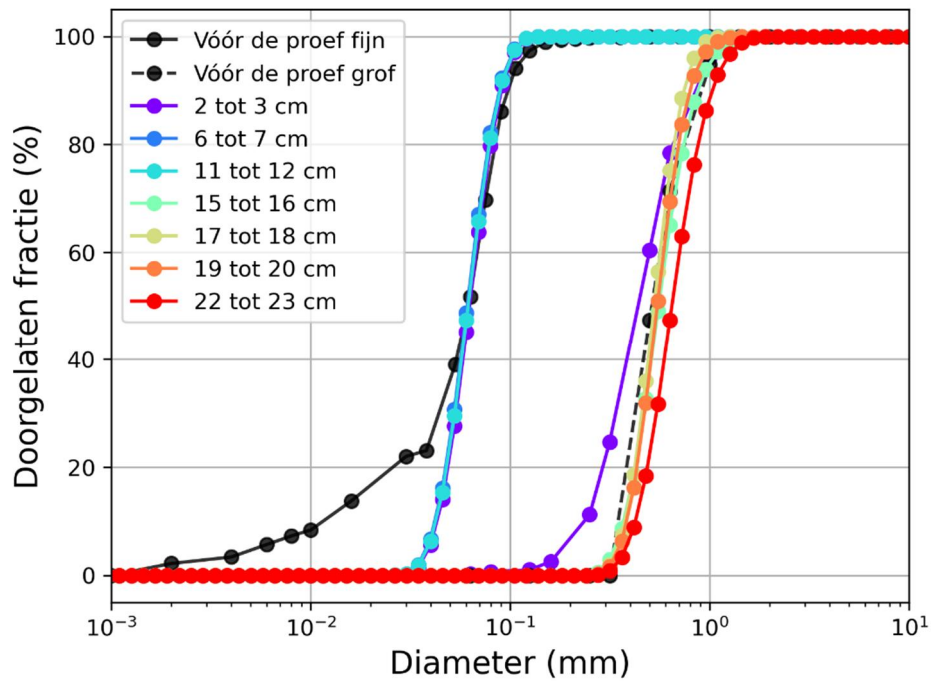
C.S.I. korrelverdeling

Figuur 0.58 geeft de C.S.I. korrelverdelingen per laag na de proef, en Tabel 33 geeft de D10 en D20 per laag. Uit Figuur 0.58 is duidelijk te zien dat in de fijn en grof fractie geen verandering in korrelverdeling heeft plaats gevonden. Alleen de onderste laag lijkt wat grover te zijn. De korrelverdelingen van de fijn fractie zijn grover dan vóór de proef, de mogelijke redenen hiervan zijn in Sectie 3.5 vermeld.

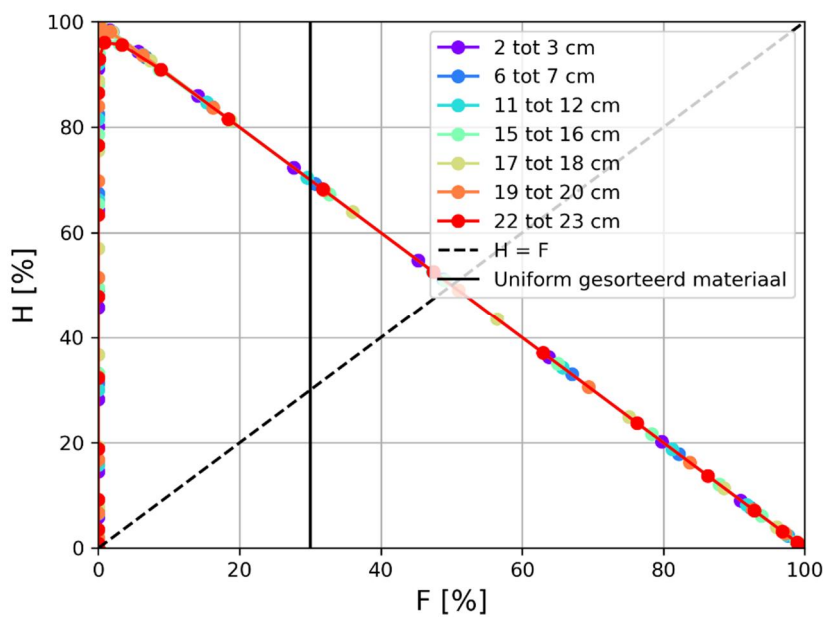
Tabel 33 Proef 07 – D10 en D20 per laag na het einde van de proef. De lagen zijn vanaf de bovenkant van het monster gemeten.

C.S.I. laag	D10 (mm)	D20 (mm)
2 tot 3 cm	0.043	0.049
6 tot 7 cm	0.042	0.047
11 tot 12 cm	0.042	0.048
15 tot 16 cm	0.37	0.423
17 tot 18 cm	0.376	0.422
19 tot 20 cm	0.383	0.432
22 tot 23 cm	0.424	0.487

Deze korrelverdelingen zijn gebruikt om per laag ook een Kenney & Lau (1985) analyse te maken (Figuur 0.59), waaruit blijkt geen stabiliteitsprobleem te zijn volgens Kenney & Lau (1985).



Figuur 0.58 Proef 07 – Korrelverdeling per laag na het einde van de proef. De lagen zijn vanaf de bovenkant van het monster gemeten.



Figuur 0.59 Proef 07 – Kenney & Lau (1985) criteria per laag aan het einde van de proef. De lagen zijn vanaf de bovenkant van het monster gemeten.

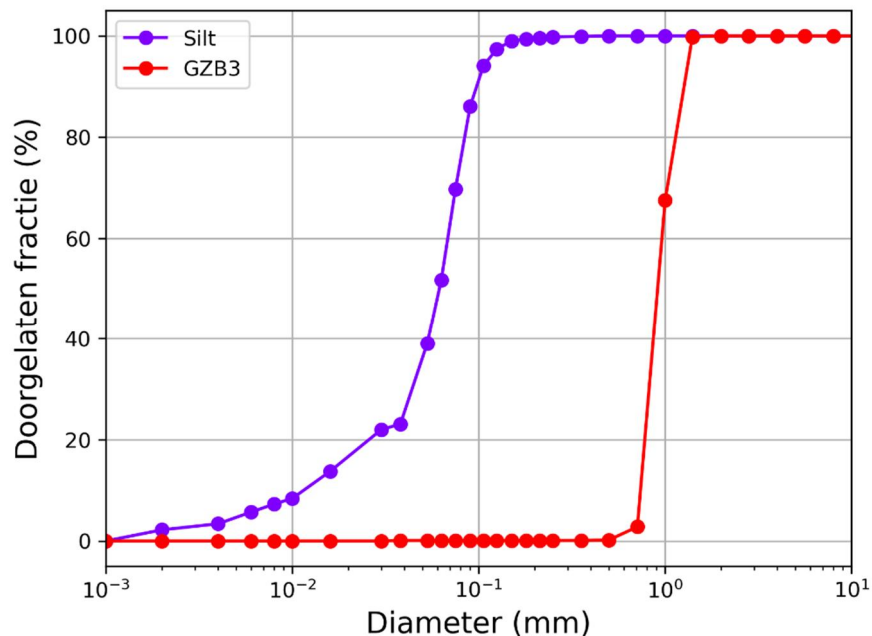
A.8 Factsheet proef 08

A.8.1 Eigenschappen proef

Proef 08 is een filterincompatibiliteit proef, met als onderste laag een grof filterzand en als bovenste laag silt. De proef heeft plaats gevonden op 01/07/2021. De volgende gegevens zijn voor de proef gemeten:

- Temperatuur water: 21.8 °C;
- Kamertemperatuur: 21.5 °C;
- Hoogte van het filter: 2.5 cm;
- Hoogte van het monster: 32.5 cm (17.2 cm grof + 15.3 cm fijn);
- Droog gewicht onderste laag: 1710.8 g;
- Droog gewicht bovenste laag: 1353.4 g;
- Porositeit onderste laag: 0.41;
- Porositeit bovenste laag: 0.48;
- Relatieve dichtheid onderste laag: 44.7%;
- Relatieve dichtheid bovenste laag: 53.1%.

De zeefkromme van het bovenste en onderste materiaal is in Figuur 0.60 te zien en hun korrelgrootte voor verschillende massa-% is in Tabel 34 te zien.



Figuur 0.60 Proef 08 – Korrelverdeling gemaakt met zeefanalyse.

Tabel 34 Proef 08 – Korrelgrootte voor verschillende doorgelaten fractie-% gebaseerd op de laser diffractie.

	Korrelgrootte bovenste materiaal (mm)	Korrelgrootte onderste materiaal (mm)
D15	0.018	0.765
D30	0.044	0.832
D50	0.062	0.922
D60	0.068	0.966
D85	0.089	1.217
D90	0.098	1.279

A.8.2 Proefverloop

Deze proef verliep over een duur van 4 dagen, 3 uur en 37 min. Drie neerwaartse verhangen zijn aangebracht.

- De eerste is een verhang van 0.2, aangebracht voor 1 uur en 30 min. Halverwege deze neerwaarts stroming is een retourstroming met een verhang van 0.06 gedurende 10 min aangebracht.
- De tweede is een verhang van 1, aangebracht voor ongeveer 16 uur en 30 min. Na 35 min is een retourstroming met een verhang van 0.26 gedurende 10 min aangebracht.
- De derde is een verhang van 2.5, aangebracht voor ongeveer 3 dagen, 5 uur en 40 min. Vier retourstroming met een verhang van 0.25 zijn aangebracht gedurende 10 min. Deze zijn geplaatst na 2 uur 15min, 7 uur 10min, 25 uur en 50 uur.

Er was geen zichtbare uitspoeling van materiaal maar wel een duidelijke inspoeling van het fijne materiaal in het grove. De gemeten debieten en stijghoogten over de kolom en tijd zijn in Tabel 35 te zien. De locatie van elke stijghoogtebuis is in Tabel 36 weergegeven.

Tabel 35 Proef 08 – Verloop van de proef. De kolom 'Retour flow' geeft aan als het een neerwaartse stroming is (0) of een opwaartse stroming (1). Een hogere stijghoogte is in groen gekleurd en een lagere in rood met geel tussendoor. De stopwatch wordt na 24 uur gereset.

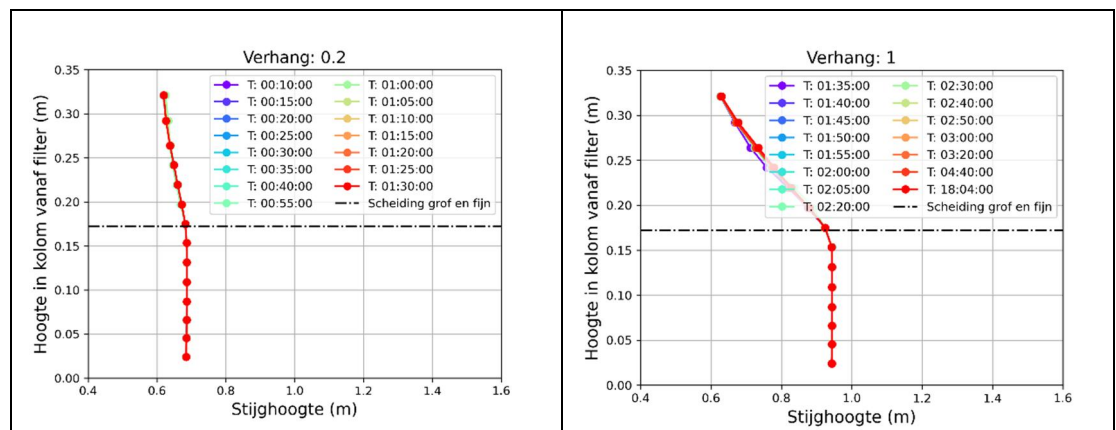
Δp	i	Retour	Dag	stop	Flow	h1	h2	h3	h4	h5	h6	h7	h8	h9	h10	h11	h12	h13	h14	h15	h16	out	in
(cm)	(-)	Flow		watch	(cc/min)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
0	0.00	0	0	00:05	5.00	68.50	68.50	68.50	68.50	68.50	68.50	68.50	68.50	68.50	68.50	68.50	68.50	68.50	68.50	68.50	68.50	68.50	68.50
6.9	0.21	0	0	00:10	4.90	68.50	68.40	68.50	68.50	68.70	68.70	68.70	68.70	68.60	67.80	66.60	65.40	64.40	63.40	62.00	61.70	68.60	61.70
6.9	0.21	0	0	00:15	4.90	68.50	68.40	68.50	68.60	68.70	68.70	68.70	68.70	68.60	67.85	66.60	65.45	64.40	63.40	62.00	61.70	68.60	61.70
6.9	0.21	0	0	00:20	5.00	68.60	68.40	68.60	68.60	68.70	68.70	68.70	68.70	68.60	67.90	66.60	65.50	64.40	63.40	62.00	61.70	68.60	61.70
6.9	0.21	0	0	00:25	5.00	68.60	68.40	68.60	68.60	68.70	68.70	68.70	68.70	68.60	67.90	66.60	65.50	64.40	63.40	62.00	61.70	68.60	61.70
6.9	0.21	0	0	00:30	4.90	68.60	68.40	68.60	68.60	68.70	68.70	68.70	68.70	68.60	67.90	66.60	65.50	64.40	63.50	62.00	61.70	68.60	61.70
6.9	0.21	0	0	00:35	4.90	68.60	68.40	68.60	68.60	68.70	68.70	68.70	68.70	68.60	67.90	66.60	65.50	64.40	63.50	62.00	61.70	68.60	61.70
6.9	0.21	0	0	00:40	5.00	68.60	68.40	68.60	68.60	68.70	68.70	68.70	68.70	68.60	67.90	66.60	65.50	64.40	63.50	62.00	61.70	68.60	61.70
1.8	0.06	1	0	00:45	1.40	61.60	61.70	61.70	61.70	61.90	61.90	61.90	61.90	61.90	61.90	63.30	63.20	63.50	63.10	63.30	63.70	63.50	61.70
2	0.06	1	0	00:50	1.40	61.60	61.70	61.70	61.70	61.90	61.90	61.90	61.90	61.85	62.20	62.50	62.80	63.00	63.10	63.50	63.70	63.70	61.70
6.9	0.21	0	0	00:55	4.90	68.50	68.40	68.50	68.50	68.70	68.70	68.70	68.70	68.60	67.70	66.10	65.20	64.00	63.40	63.20	61.80	68.60	61.70
6.9	0.21	0	0	01:00	4.90	68.60	68.40	68.60	68.60	68.70	68.70	68.70	68.70	68.60	67.80	66.55	65.44	64.35	63.40	63.20	61.80	68.60	61.70
6.9	0.21	0	0	01:05	4.90	68.60	68.40	68.60	68.60	68.70	68.70	68.70	68.70	68.60	67.85	66.60	65.40	64.40	63.40	62.20	61.80	68.60	61.70
6.9	0.21	0	0	01:10	4.80	68.60	68.40	68.60	68.60	68.70	68.70	68.70	68.70	68.60	67.85	66.60	65.45	64.40	63.40	62.20	61.80	68.60	61.70
6.9	0.21	0	0	01:15	4.80	68.60	68.40	68.60	68.60	68.70	68.70	68.70	68.70	68.60	67.85	66.60	65.45	64.40	63.15	62.15	61.80	68.60	61.70
6.9	0.21	0	0	01:20	4.90	68.60	68.40	68.60	68.60	68.70	68.70	68.70	68.70	68.60	67.85	66.60	65.45	64.45	63.15	62.15	61.80	68.60	61.70
6.9	0.21	0	0	01:25	4.80	68.60	68.40	68.60	68.60	68.70	68.70	68.70	68.70	68.60	67.85	66.60	65.45	64.45	63.15	62.15	61.80	68.60	61.70
6.9	0.21	0	0	01:30	4.90	68.60	68.40	68.60	68.60	68.70	68.70	68.70	68.70	68.60	67.85	66.60	65.45	64.45	63.15	62.15	61.80	68.60	61.70
32.7	1.01	0	0	01:35	22.80	94.30	94.20	94.40	94.35	94.40	94.40	94.40	94.40	94.20	90.50	84.75	79.15	72.50	70.00	63.60	61.75	94.40	61.70
32.7	1.01	0	0	01:40	22.80	94.30	94.20	94.40	94.30	94.40	94.40	94.40	94.40	94.25	90.60	85.00	79.70	74.40	70.35	63.60	61.75	94.40	61.70
32.7	1.01	0	0	01:45	22.70	94.30	94.20	94.40	94.30	94.40	94.40	94.40	94.40	94.25	90.60	85.00	79.70	74.85	70.40	63.60	61.75	94.40	61.70
32.7	1.01	0	0	01:50	22.80	94.30	94.20	94.40	94.30	94.40	94.40	94.40	94.40	94.30	90.65	85.00	79.75	74.85	70.40	63.60	61.75	94.40	61.70
32.7	1.01	0	0	01:55	22.40	94.30	94.20	94.40	94.30	94.40	94.40	94.40	94.40	94.30	90.65	85.00	79.75	75.00	70.40	63.60	61.75	94.40	61.70
32.7	1.01	0	0	02:00	22.60	94.30	94.20	94.40	94.30	94.40	94.40	94.40	94.40	94.30	90.65	85.10	79.75	75.00	70.45	63.65	61.75	94.40	61.70
32.7	1.01	0	0	02:05	22.60	94.30	94.20	94.40	94.30	94.40	94.40	94.40	94.40	94.30	90.65	85.10	79.75	75.00	70.45	63.70	61.75	94.40	61.70

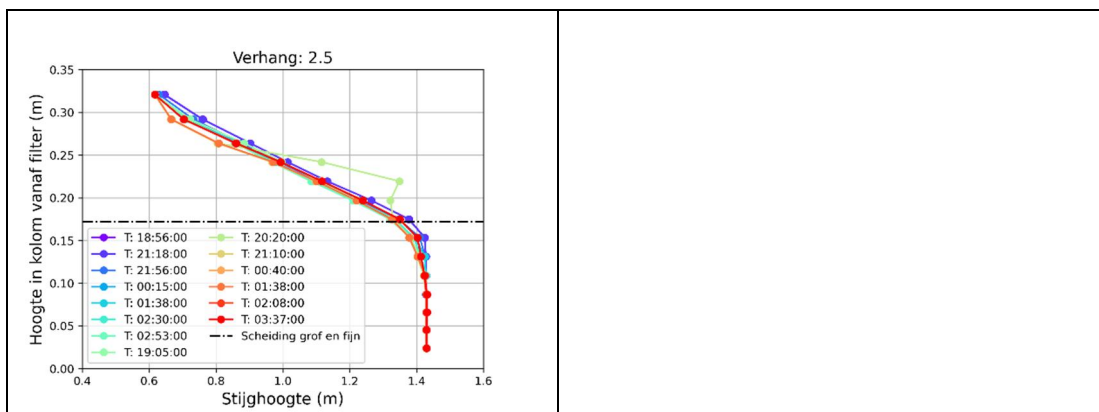
8.3	0.26	1	0	02:10	5.70	61.70	61.80	61.80	61.80	61.90	61.90	61.90	61.90	64.90	64.00	65.30	66.30	68.55	68.00	69.80	70.10	70.00	61.70
8.3	0.26	1	0	02:15	5.90	61.70	61.80	61.80	61.80	61.90	61.90	61.90	61.90	62.40	63.00	64.40	66.75	67.20	68.00	69.80	70.10	70.00	61.70
32.65	1.00	0	0	02:20	22.40	94.30	94.20	94.40	94.40	94.40	94.40	94.40	94.40	94.20	90.40	87.85	79.50	74.65	70.10	63.90	61.80	94.40	61.75
32.65	1.00	0	0	02:30	22.30	94.30	94.20	94.40	94.40	94.45	94.40	94.40	94.40	94.20	90.60	85.00	79.70	75.00	70.40	63.90	61.80	94.40	61.75
32.65	1.00	0	0	02:40	22.30	94.45	94.30	94.40	94.40	94.45	94.40	94.40	94.40	94.20	90.60	85.00	79.70	75.00	70.40	63.80	61.75	94.40	61.75
32.65	1.00	0	0	02:50	22.40	94.45	94.30	94.40	94.40	94.45	94.40	94.40	94.40	94.20	90.60	85.05	79.75	75.00	70.50	63.80	61.75	94.40	61.75
32.65	1.00	0	0	03:00	22.30	94.40	94.30	94.40	94.40	94.45	94.40	94.40	94.40	94.25	90.60	85.05	79.80	75.10	70.50	63.80	61.75	94.40	61.75
32.65	1.00	0	0	03:20	22.30	94.40	94.30	94.40	94.40	94.40	94.40	94.40	94.40	94.25	90.60	85.05	79.80	75.10	70.50	63.80	61.75	94.40	61.75
32.65	1.00	0	0	04:40	22.10	94.40	94.30	94.40	94.40	94.40	94.40	94.40	94.40	94.25	90.60	85.10	79.80	75.10	70.50	63.80	61.75	94.40	61.75
2.7	0.08	1	0	18:04	21.10	94.40	94.20	94.40	94.30	94.40	94.40	94.40	94.40	94.25	90.65	85.40	80.20	75.70	71.25	64.25	61.75	94.40	61.70
81.3	2.50	0	0	18:56	53.10	142.90	142.90	142.90	142.80	142.85	142.70	142.70	142.80	142.10	133.50	119.50	106.95	95.80	84.60	67.50	61.75	143.00	61.70
81.4	2.50	0	0	21:18	52.30	143.00	143.00	143.00	142.90	142.90	143.00	142.90	142.80	142.00	133.30	119.60	107.10	95.80	84.70	67.20	61.75	143.10	61.70
8.4	0.26	1	0	21:38	5.10	61.70	61.70	61.70	61.70	61.70	61.70	61.65	61.60	63.30	62.90	64.20	65.50	66.65	67.70	69.85	70.10	70.10	61.70
81.4	2.50	0	0	21:56	49.60	143.00	142.90	142.90	143.00	142.80	142.75	142.75	142.40	139.60	129.80	116.40	104.80	93.20	82.40	64.10	61.80	143.10	61.70
81.5	2.51	0	1	00:15	48.40	143.00	143.00	143.00	142.90	142.90	142.90	142.80	142.20	137.00	127.60	114.70	103.70	91.90	81.40	61.90	61.80	143.10	61.60
81.4	2.50	0	1	01:38	47.80	143.00	143.00	143.00	142.90	143.00	142.90	142.80	142.10	136.80	127.50	114.70	103.55	91.80	81.20	61.70	61.70	143.10	61.70
8.4	0.26	1	1	02:06	4.80	61.50	61.70	61.75	61.75	61.90	61.90	61.90	61.90	62.30	63.20	64.50	65.70	66.80	68.00	70.10	70.55	70.10	61.70
81.4	2.50	0	1	02:30	48.00	143.00	143.00	143.00	142.90	143.00	142.90	142.80	139.80	138.50	128.90	114.80	103.00	91.20	80.70	61.80	61.80	143.10	61.70
81.3	2.50	0	1	02:53	47.30	142.90	142.90	142.90	142.80	143.00	142.80	142.60	139.50	136.70	127.50	114.30	102.60	90.80	80.40	61.80	61.80	143.00	61.70
81.3	2.50	0	3	19:05	40.40	142.90	142.90	142.90	142.80	143.20	142.80	142.50	139.60	136.70	128.00	116.60	105.50	94.00	82.90	61.70	61.70	143.00	61.70
8.4	0.26	1	3	20:00	4.00	61.55	61.70	61.80	61.80	61.90	61.90	61.90	62.40	64.30	63.20	64.40	65.60	66.90	68.00	69.90	67.00	70.10	61.70
81.4	2.50	0	3	20:20	43.10	142.90	143.00	143.00	142.80	142.90	142.80	141.40	139.10	137.60	128.40	135.90	133.80	89.40	71.70	61.80	61.80	143.10	61.70
81.5	2.51	0	3	21:10	43.10	143.00	143.00	142.90	142.90	142.90	143.10	141.90	138.70	137.20	128.10	115.80	103.85	89.60	71.30	61.70	61.80	143.10	61.60
81.5	2.51	0	4	00:40	42.20	143.00	143.00	142.90	143.00	143.00	143.10	141.90	138.60	137.20	128.10	115.90	104.10	89.90	71.40	61.70	61.80	143.10	61.60
81.5	2.51	0	4	01:38	42.30	143.00	143.00	143.00	142.90	143.00	143.20	142.10	138.50	137.10	128.10	116.00	104.20	90.00	71.60	61.70	61.80	143.10	61.60
8.4	0.26	1	4	01:57	3.90	61.80	61.70	61.80	61.80	61.90	61.90	61.90	62.20	62.70	63.20	64.30	65.60	66.80	68.60	69.80	69.90	70.00	61.60
81.5	2.51	0	4	02:08	42.30	143.00	143.00	142.90	142.80	143.10	142.70	141.90	140.80	139.70	130.00	117.60	105.70	92.80	78.80	61.70	61.70	143.10	61.60
81.5	2.51	0	4	03:37	42.40	142.90	143.00	143.10	143.00	143.30	143.00	141.90	140.80	139.80	130.20	117.70	105.80	93.00	79.10	61.70	61.70	143.10	61.60

Tabel 36 Proef 08 – Positie van de stijghoogtebuizen.

Label	Afstand vanaf filter (cm)
h1	0.0
h2	1.3
h3	3.5
h4	5.6
h5	7.6
h6	9.8
h7	12.0
h8	14.3
h9	16.4
h10	18.6
h11	20.8
h12	23.1
h13	25.3
h14	27.5
h15	30.9
h16	33.3

Figuur 0.61 geeft de stijghoogtemetingen aan in de loop van de tijd van proef 08 voor verschillende aangebrachte verhangen. Deze zijn voor een verhang van 0.2 en 1 redelijk constant over de tijd. Met een verhang van 2.5 neemt de stijghoogte een beetje af in de bovenste fijn deel van het monster terwijl aan de onderste grof deel blijft de stijghoogte constant over de tijd.





Figuur 0.61 Proef 08 – Stijghoogte voor verschillende verhangen over de kolom en over de tijd.

A.8.3 Analyse Terzaghi en Lambe & Whitman

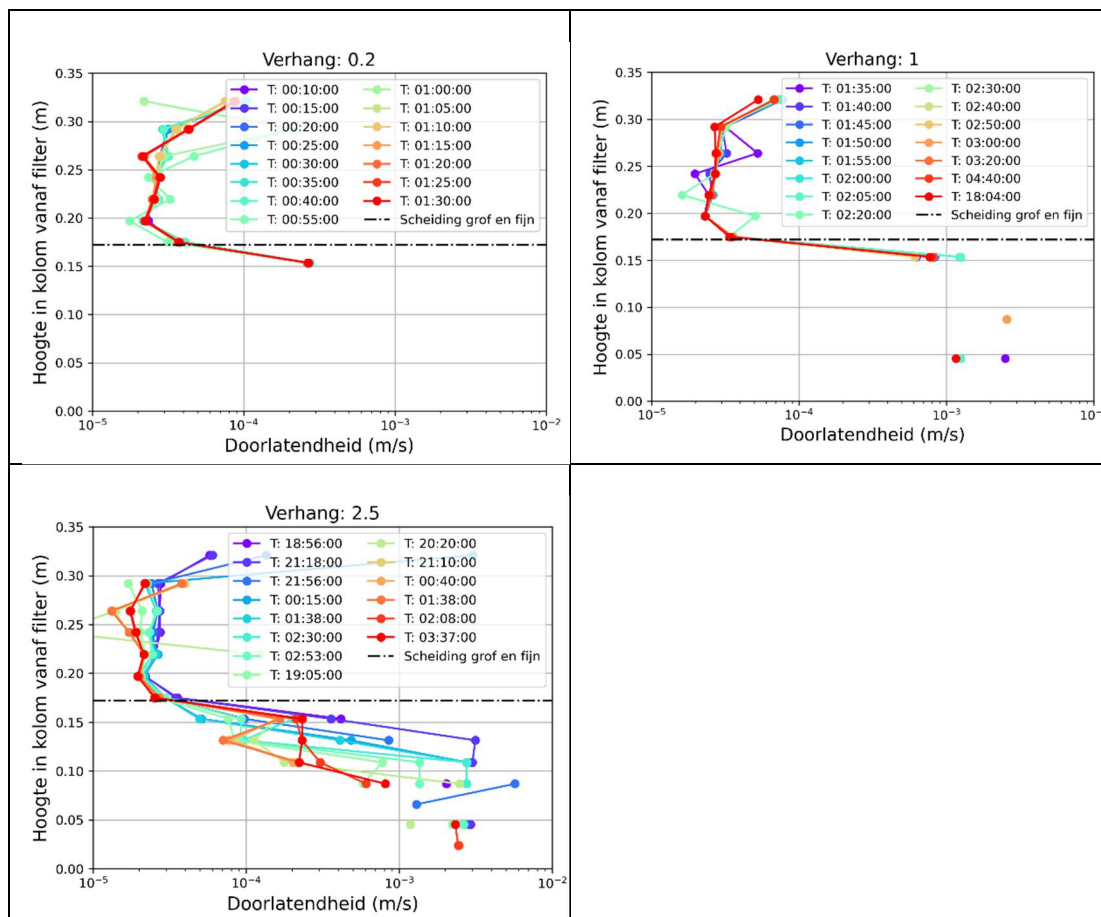
De methoden van Terzaghi (1922) en Lambe & Whitman (1969) zijn gebruikt om te voorspellen of het materiaal intern stabiel is op filterincompatibiliteit. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 37 waar het duidelijk te zien is dat het monster niet stabiel is volgens de eerste en tweede criteria.

Tabel 37 Proef 08 – Filterincompatibiliteit criteria.

	$\frac{d_{15,f}}{d_{85,b}} < 4 \text{ of } 5$	$\frac{d_{15,f}}{d_{15,b}} < 20$	$\frac{d_{50,f}}{d_{50,b}} < 25$
Proef 08	8.60	42.50	14.87

A.8.4 Doorlatendheid over de hoogte en tijd

Figuur 0.62 geeft het verloop van de doorlatendheid aan over de tijd. Op de x-as staat de doorlatendheid in m/s, en op de y-as is de hoogte van de kolom in meter weergegeven. Uit de resultaten is af te leiden dat de doorlatendheid over de kolom kan veranderen vooral voor lage verhangen, dit is in Sectie 3.3 toegelicht. Met een verhang van 0.2 en 1 is er geen duidelijk trend in verandering van de doorlatendheid. Met een verhang van 2.5 neemt de doorlatendheid aan de top van het monster wel af in de tijd. Dit is te verklaren door de inspoeling van fijn materiaal in het grove materiaal.



Figuur 0.62 Proef 08 – Doorlatendheid over de hoogte voor verschillende tijdstippen en verhangen.

A.8.5 Volumeverandering

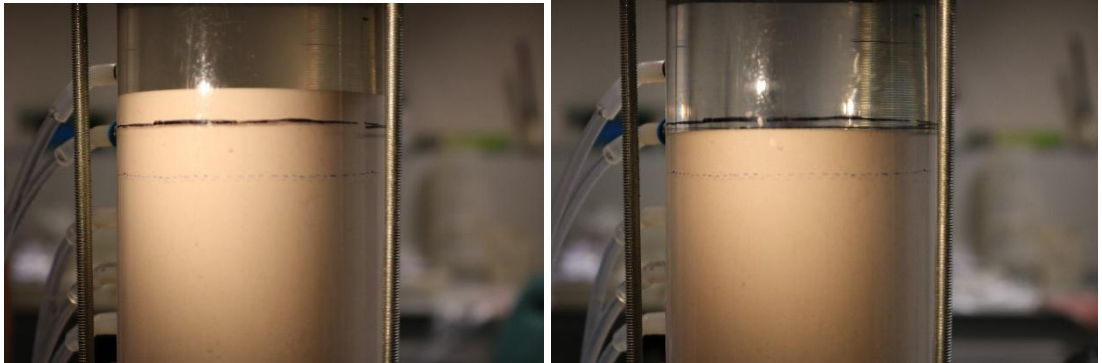
Met twee camera's zijn iedere minuut foto's gemaakt aan de onderkant van het monster ingezoomd om de individuele korrel te zien (Figuur 0.63) en aan de bovenkant van het monster uitgezoomd om eventueel verzakkingen te zien (Figuur 0.64). Uit beide analyses blijkt dat er geen verandering heeft plaatsgevonden tijdens de proef.



Figuur 0.63 Proef 08 – Foto gezoomd op de korrels aan de onderkant van het monster vóór (links) en na (rechts) de proef.

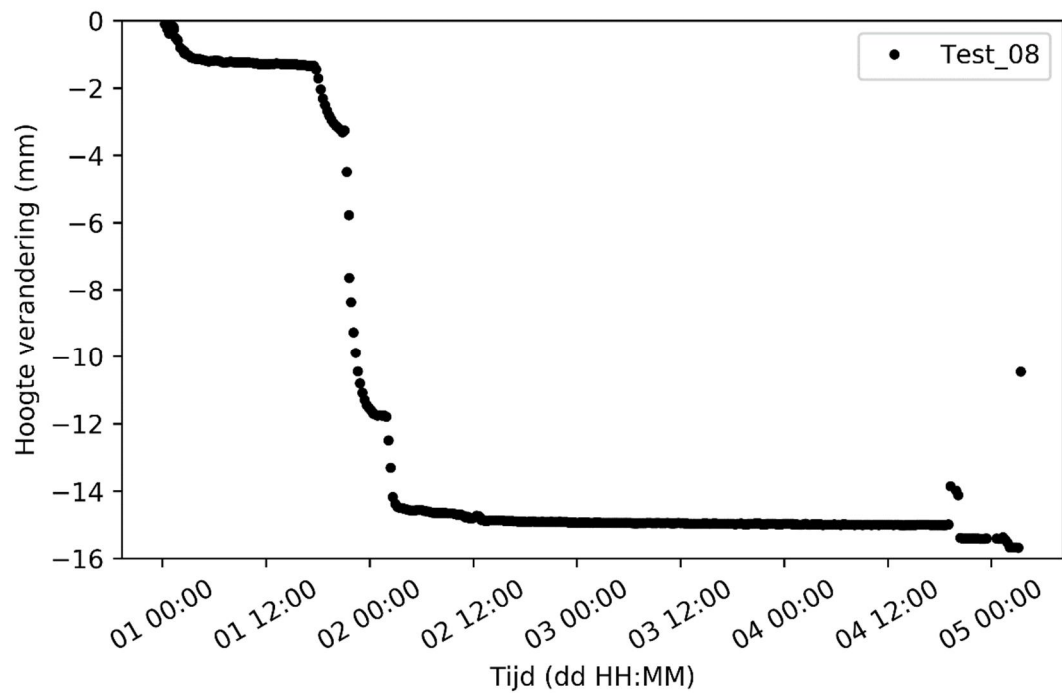


Figuur 0.64 Proef 08 – Foto van de scheiding tussen grof en fijn vóór (links) en na (rechts) de proef. De camera is naar beneden geschoven na 3 dagen en 18 uur om de onderkant van de infiltratie te zien.



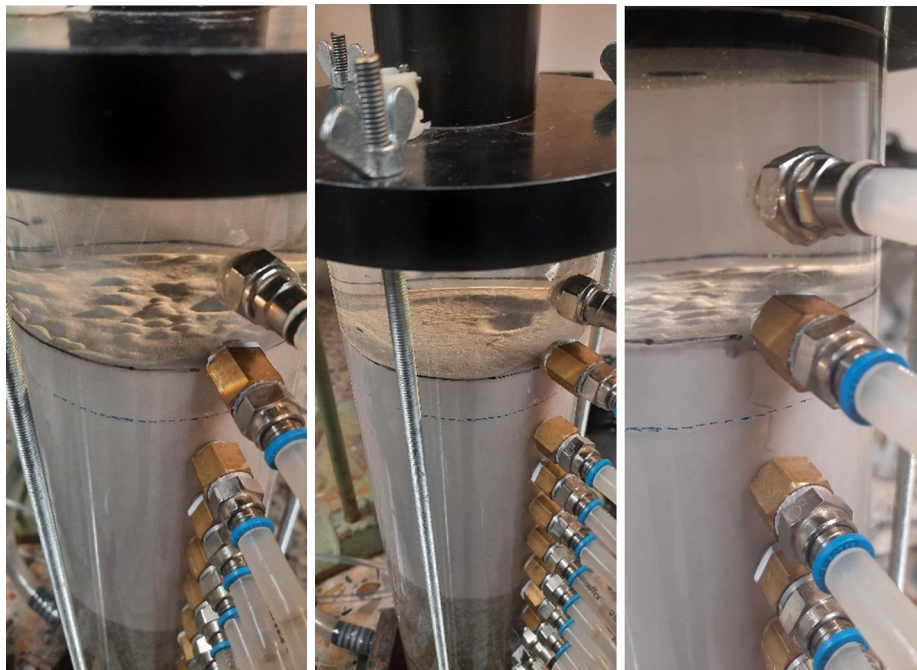
Figuur 0.65 Proef 08 – Foto van de bovenkant van het monster vóór (links) en na (rechts) de proef.

Met Figuur 0.65 is het al duidelijk te zien dat er een verlaging van de hoogte van het monster heeft plaats gevonden en dat de fijne materiaal in het grover materiaal is ingespoeld (ook zichtbaar met Figuur 0.64). Met behulp van foto's van de bovenkant van het monster, was de hoogteverandering van het monster bepaald, dit is in Figuur 0.66 te zien. In deze figuur is een verlaging van ongeveer 15 mm gemeten van de hoogte van het monster. Deze verlaging is ook duidelijk terug te zien in de foto's.



Figuur 0.66 Proef 08 – Hoogte verandering van het monster over de duur van de proef.

Verder is tijdens de proef piping ontstaan bij de bovenste stijgbuisje (zie midden foto van Figuur 0.67) door de wisselen van stromingsrichting. Door de retourstroming zijn ook luchtbelllen ontstaan.



Figuur 0.67: Volume veranderingen aan de bovenkant van het monster tijdens proef 08.

A.8.6

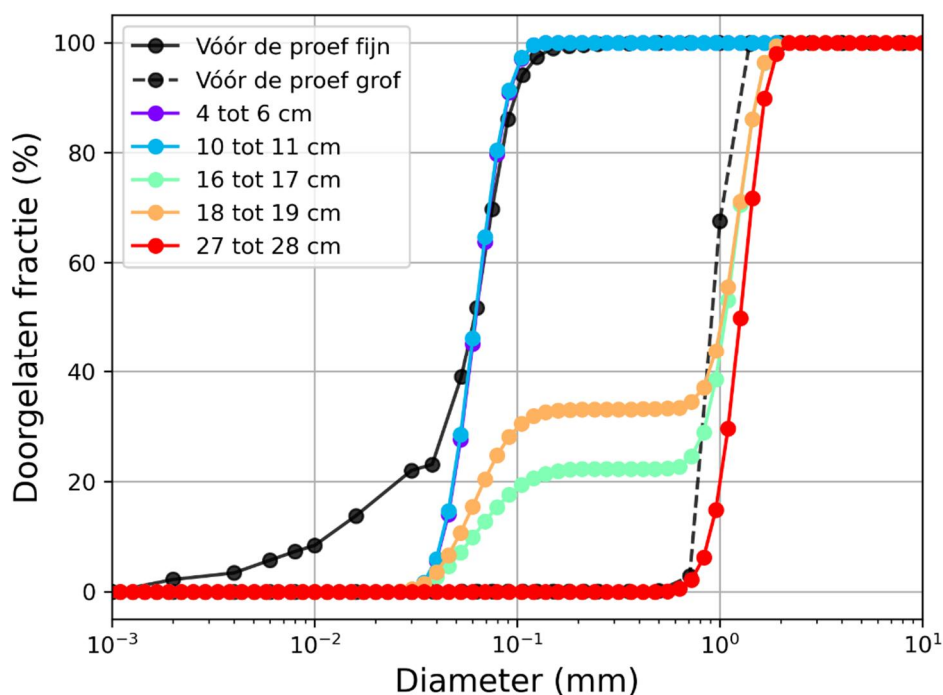
C.S.I. korrelverdeling

Figuur 0.68 geeft de C.S.I korrelverdelingen per laag na de proef, en Tabel 38 geeft de D10 en D20 per laag. Deze korrelverdelingen zijn gebruikt om per laag ook een Kenney & Lau (1985) analyse te maken Figuur 0.69. Het monster is 32.5 cm en het scheiding tussen fijn en grof

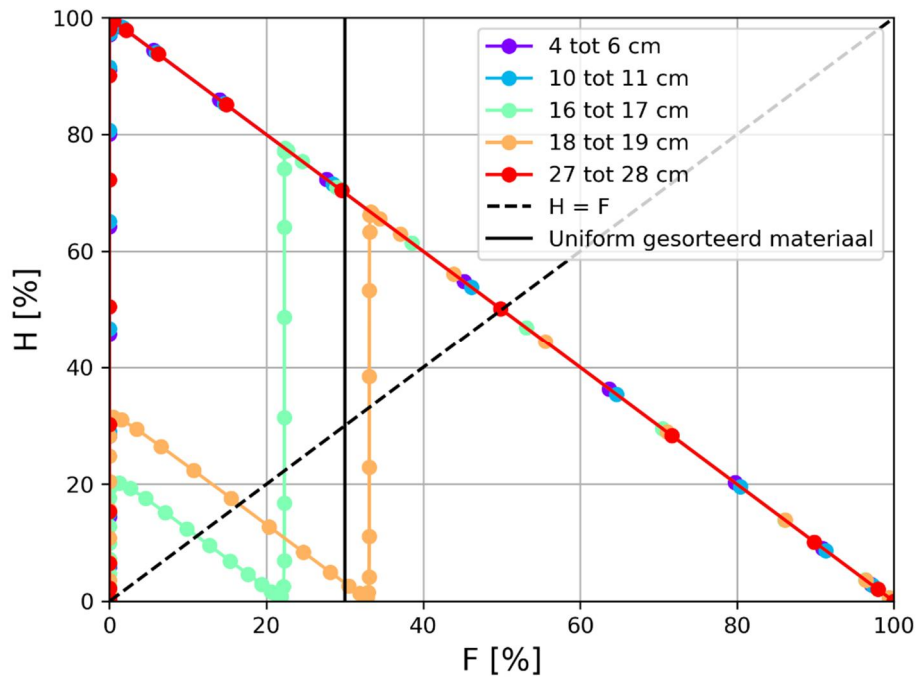
materiaal ligt 15.3 cm vanaf het bovenkant van het monster. Uit deze figuur is duidelijk te zien dat de lagen tijdens de proef veel fijne deeltjes hebben ingevangen door de inspoeling van materiaal.

Tabel 38 Proef 08 – D10 en D20 per laag na het einde van de proef. De lagen zijn vanaf de bovenkant van het monster gemeten.

C.S.I. laag	D10 (mm)	D20 (mm)
4 tot 6 cm	0.043	0.049
10 tot 11 cm	0.043	0.048
16 tot 17 cm	0.061	0.112
18 tot 19 cm	0.051	0.069
27 tot 28 cm	0.885	1.004



Figuur 0.68 Proef 08 – Korrelverdeling per laag na het einde van de proef. De lagen zijn vanaf de bovenkant van het monster gemeten.



Figuur 0.69 Proef 08 – Kenney & Lau (1985) criteria per laag aan het einde van de proef. De lagen zijn vanaf de bovenkant van het monster gemeten.

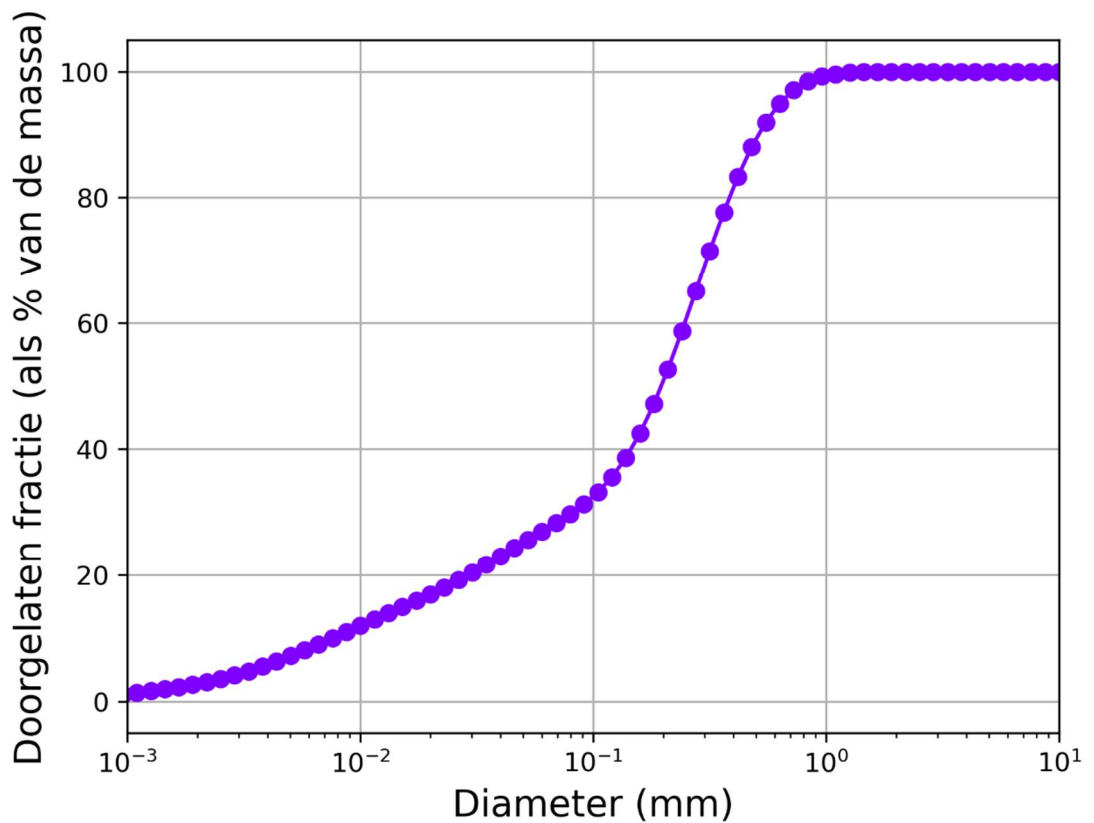
A.9 Factsheet proef 09

A.9.1 Eigenschappen proef

Proef 09 heeft plaats gevonden op 06/07/2021 en bestaat uit zand van boring B01-04-03-2.20-2.53-2.58 m-mv. De volgende gegevens zijn voor de proef gemeten:

- Temperatuur water: 21.8 °C;
- Kamertemperatuur: 22 °C;
- Hoogte van het filter: 2.5 cm;
- Hoogte van het monster: 12.8 cm;
- Droog gewicht: 1183.4 g;
- Porositeit: 0.45;
- Relatieve dichtheid: 61.2%.

De zeefkromme van het monster is in Figuur 0.70 te zien en de korrelgrootte voor verschillende massa-% is in Tabel 39 te zien. De korrelverdeling is gevonden met een laser diffractie.



Figuur 0.70 Proef 09 – Korrelverdeling gemaakt met laser diffractie.

Tabel 39 Proef 09 – Korrelgrootte voor verschillende doorgelaten fractie-% gebaseerd op de laser diffractie.

	Korrelgrootte (mm)
D15	0.015
D30	0.082
D50	0.196
D60	0.247
D85	0.439
D90	0.514

A.9.2 Proefverloop

Proef 09 verliep over een duur van 51 uur en 47 min. Er zijn drie neerwaartse stroming over het monster aangebracht:

- De eerste is een verhang van 0.44, aangebracht voor 2 uur en 35 min. Na 1 uur 50 min is een retourstroming met een verhang van 0.11 gedurende 10 min aangebracht.
- De tweede is een verhang van 2.18, aangebracht voor ongeveer 18 uur en 50 min. Na 35 min is een retourstroming met een verhang van 0.55 gedurende 10 min aangebracht.
- De derde is een verhang van 5.5, aangebracht voor ongeveer 32 uur 47 min. Na 4 uur 16 min, 5 uur 47 min, 21 uur 38 min en 27 uur 07 min is een retourstroming aangebracht met een verhang van 0.56.

Er was geen zichtbare uitspoeling van materiaal. De gemeten debieten en stijghoogten over de kolom en tijd zijn in Tabel 40 te zien. De locatie van elke stijghoogtebuis is in Tabel 41 weergegeven.

Tabel 40 Proef 09 – Verloop van de proef. De kolom 'Retour flow' geeft aan als het een neerwaartse stroming is (0) of een opwaartse stroming (1). Een hogere stijghoogte is in groen gekleurd en een lagere in rood met geel tussendoor.

Δp	i	Retour	stop	Flow	h1	h2	h3	h4	h5	h6	h7	h8	out	in
(cm)	(-)	Flow	watch	(cc/min)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
5.6	0.44	0	00:00	14.70	67.20	66.20	65.20	64.60	64.10	62.80	62.20	61.60	67.30	61.70
5.6	0.44	0	00:05	14.40	67.20	66.20	65.50	64.80	64.20	62.90	62.20	61.60	67.30	61.70
5.6	0.44	0	00:10	14.30	67.20	66.20	65.50	64.80	64.20	63.00	62.20	61.60	67.30	61.70
5.6	0.44	0	00:15	14.10	67.20	66.20	65.50	64.80	64.20	63.00	62.20	61.60	67.30	61.70
5.6	0.44	0	00:20	14.10	67.20	66.20	65.50	64.80	64.20	63.00	62.20	61.60	67.30	61.70
5.6	0.44	0	00:25	13.90	67.20	66.20	65.50	64.80	64.30	63.10	62.30	61.60	67.30	61.70
5.6	0.44	0	00:30	13.70	67.20	66.20	65.50	64.80	64.30	63.10	62.30	61.60	67.30	61.70
5.6	0.44	0	00:35	13.50	67.20	66.20	65.50	64.80	64.30	63.10	62.30	61.60	67.30	61.70
5.6	0.44	0	00:40	13.40	67.20	66.20	65.50	64.90	64.40	63.20	62.40	61.60	67.30	61.70
5.6	0.44	0	00:45	13.20	67.20	66.20	65.55	64.90	64.40	63.20	62.45	61.60	67.30	61.70
5.6	0.44	0	00:50	13.00	67.20	66.20	65.60	64.95	64.40	63.25	62.50	61.60	67.30	61.70
5.6	0.44	0	00:55	12.80	67.20	66.20	65.60	65.00	64.45	63.30	62.60	61.60	67.30	61.70
5.6	0.44	0	01:00	12.70	67.20	66.20	65.60	65.05	64.50	63.30	62.65	61.60	67.30	61.70
5.6	0.44	0	01:10	12.50	67.20	66.25	65.65	65.15	64.55	63.40	62.75	61.60	67.30	61.70
5.6	0.44	0	01:20	12.30	67.20	66.30	65.70	65.15	64.60	63.60	62.90	61.55	67.30	61.70
5.6	0.44	0	01:30	12.40	67.20	66.30	65.70	65.15	64.65	63.60	62.90	61.55	67.30	61.70
5.6	0.44	0	01:40	12.20	67.20	66.30	65.70	65.15	64.65	63.60	62.90	61.55	67.30	61.70
5.6	0.44	0	01:45	12.33	67.20	66.30	65.70	65.15	64.65	63.60	62.90	61.55	67.30	61.70
1.35	0.11	1	01:50	3.90	61.70	62.00	62.20	62.40	62.70	62.70	63.00	63.00	63.05	61.70
1.35	0.11	1	01:55	3.90	61.70	61.90	62.20	62.40	62.70	62.70	63.00	63.00	63.05	61.70
5.5	0.43	0	02:00	13.50	67.05	66.20	65.60	65.00	64.45	63.30	62.55	61.60	67.20	61.70
5.5	0.43	0	02:05	13.20	67.05	66.20	65.60	65.00	64.45	63.30	62.55	61.65	67.20	61.70
5.5	0.43	0	02:10	13.00	67.10	66.20	65.60	65.00	64.50	63.30	62.55	61.65	67.20	61.70
5.5	0.43	0	02:15	13.00	67.10	66.20	65.65	65.00	64.50	63.30	62.55	61.65	67.20	61.70
5.6	0.44	0	02:20	13.00	67.10	66.20	65.65	65.00	64.50	63.30	62.60	61.70	67.30	61.70

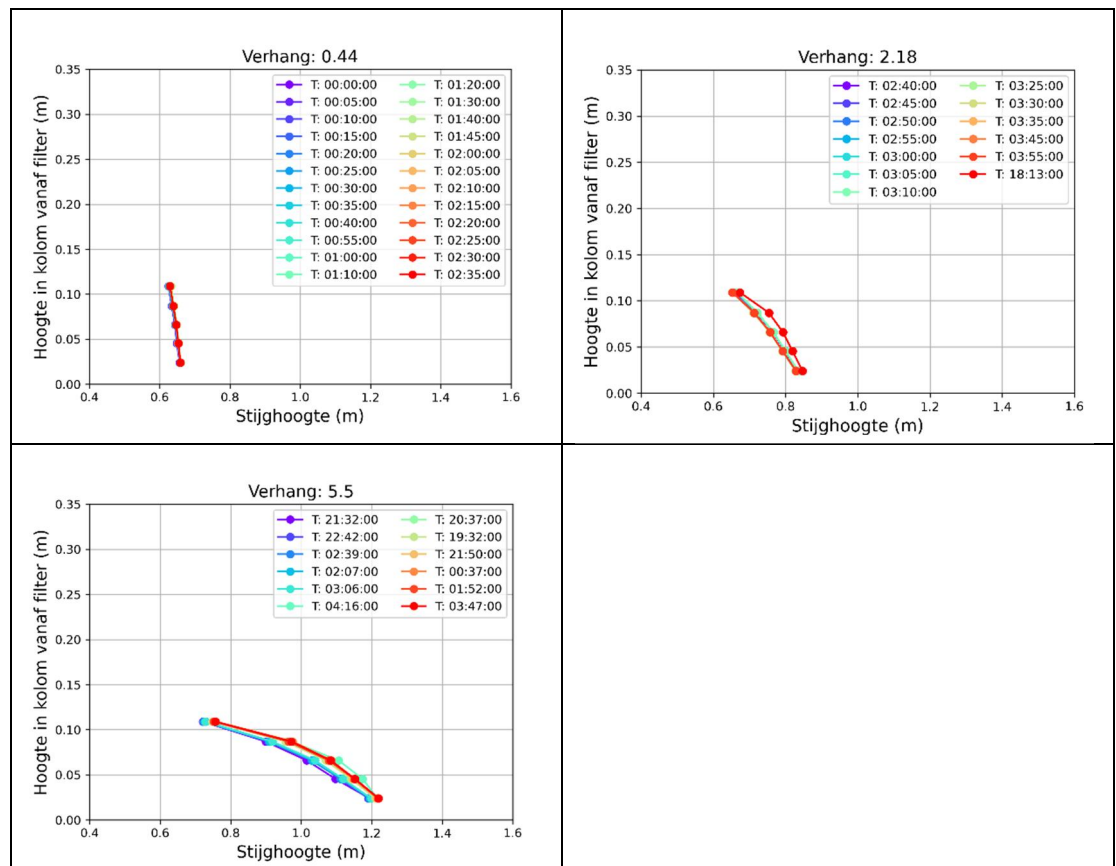
5.6	0.44	0	02:25	13.00	67.10	66.20	65.65	65.00	64.50	63.30	62.60	61.70	67.30	61.70
5.6	0.44	0	02:30	12.90	67.10	66.20	65.65	65.00	64.50	63.30	62.60	61.70	67.30	61.70
5.6	0.44	0	02:35	12.90	67.10	66.20	65.65	65.00	64.50	63.30	62.60	61.70	67.30	61.70
27.9	2.18	0	02:40	59.00	89.45	85.15	81.55	78.20	74.90	69.20	63.20	61.70	89.60	61.70
27.9	2.18	0	02:45	58.40	89.50	85.20	81.60	78.20	74.90	69.20	63.20	61.70	89.60	61.70
27.9	2.18	0	02:50	56.80	89.50	85.25	81.70	78.30	75.00	69.30	63.60	61.70	89.60	61.70
27.9	2.18	0	02:55	56.50	89.50	85.25	81.70	78.30	75.00	69.35	63.70	61.70	89.60	61.70
27.9	2.18	0	03:00	56.40	89.50	85.25	81.70	78.35	75.00	69.40	63.80	61.70	89.60	61.70
27.9	2.18	0	03:05	56.00	89.50	85.25	81.70	78.35	75.00	69.40	63.80	61.70	89.60	61.70
27.9	2.18	0	03:10	55.90	89.50	85.25	81.70	78.35	75.00	69.50	63.80	61.70	89.60	61.70
7	0.55	1	03:15	16.80	61.50	63.10	64.20	65.30	66.30	67.40	68.60	68.60	68.70	61.70
7	0.55	1	03:20	16.80	61.50	63.00	64.20	65.20	66.30	67.50	68.60	68.60	68.70	61.70
27.9	2.18	0	03:25	57.60	89.40	84.70	80.90	77.35	73.90	68.30	62.20	61.70	89.60	61.70
27.9	2.18	0	03:30	57.40	89.40	84.70	81.00	77.40	74.00	68.40	62.20	61.70	89.60	61.70
27.9	2.18	0	03:35	56.80	89.40	84.70	81.00	77.40	74.00	68.50	62.20	61.70	89.60	61.70
27.9	2.18	0	03:45	56.30	89.40	84.75	81.00	77.40	74.10	68.60	62.10	61.70	89.60	61.70
27.9	2.18	0	03:55	55.60	89.40	84.80	81.00	77.40	74.10	68.60	62.00	61.70	89.60	61.70
27.9	2.18	0	18:13	43.80	89.40	86.15	83.30	80.60	78.00	72.80	62.00	61.70	89.60	61.70
70.1	5.48	0	21:32	109.40	131.70	124.90	113.90	105.60	97.60	82.30	62.00	61.70	131.80	61.70
70.2	5.48	0	22:42	95.50	131.80	122.90	115.10	107.20	99.70	83.90	62.00	61.70	131.90	61.70
7.3	0.57	1	25:48	13.20	61.60	62.80	63.90	64.90	65.90	67.30	69.00	69.00	69.00	61.70
70.2	5.48	0	26:39	99.90	131.70	123.25	115.40	107.00	98.90	82.60	62.00	61.80	131.90	61.70
70.2	5.48	0	26:07	94.90	131.70	123.50	115.80	107.70	99.00	83.30	62.00	61.80	131.90	61.70
70.2	5.48	0	27:06	93.50	131.70	123.70	116.00	107.90	100.00	83.70	62.00	61.80	131.90	61.70
7.3	0.57	1	27:19	12.50	61.50	62.70	63.70	64.70	65.80	67.40	69.00	69.10	69.00	61.70
70.1	5.48	0	28:16	92.20	131.70	124.90	118.40	116.50	104.80	89.50	61.90	61.70	131.80	61.70
70.1	5.48	0	44:37	69.90	131.75	124.90	118.40	111.50	104.80	89.50	61.90	61.70	131.80	61.70
7.2	0.56	1	43:20	10.10	61.60	62.60	63.65	64.65	65.60	67.30	68.80	68.70	68.90	61.70
70.1	5.48	0	43:32	73.80	131.70	124.30	117.80	110.50	103.40	87.70	61.90	61.70	131.80	61.70
70.1	5.48	0	45:50	71.20	131.70	124.60	118.10	111.00	104.20	88.60	61.90	61.70	131.80	61.70

70.1	5.48	0	48:37	68.10	131.80	124.90	118.60	111.65	105.50	89.80	61.90	61.70	131.80	61.70
7.2	0.56	1	48:39	9.70	61.60	62.60	63.60	64.50	65.50	67.20	68.70	68.60	68.90	61.70
70.1	5.48	0	49:52	70.90	131.80	124.90	118.60	111.40	104.30	88.50	61.90	61.70	131.80	61.70
70.1	5.48	0	51:47	70.00	131.80	125.20	118.80	111.80	105.00	89.50	61.90	61.70	131.80	61.70

Tabel 41 Proef 09 – Positie van de stijghoogtebuizen.

Label	Afstand vanaf filter (cm)
h1	0.0
h2	1.3
h3	3.5
h4	5.6
h5	7.6
h6	9.8
h7	12.0
h8	14.3

Figuur 0.71 geeft de stijghoogtemetingen aan in de loop van de tijd van proef 09 voor verschillende aangebrachte verhangen. Deze zijn voor een verhang van 0.44 constant over de tijd. Met een verhang van 2.18 wijken de stijghoogte een klein beetje af na 18 uur en 13 min. Bij het hoge verhang zie je wat verhoging in stijghoogte over de tijd aan de bovenkant van het monster, wat erop duidt dat het bovenste gedeelte van het monster iets minder doorlatend wordt ten opzichte van het onderste gedeelte.

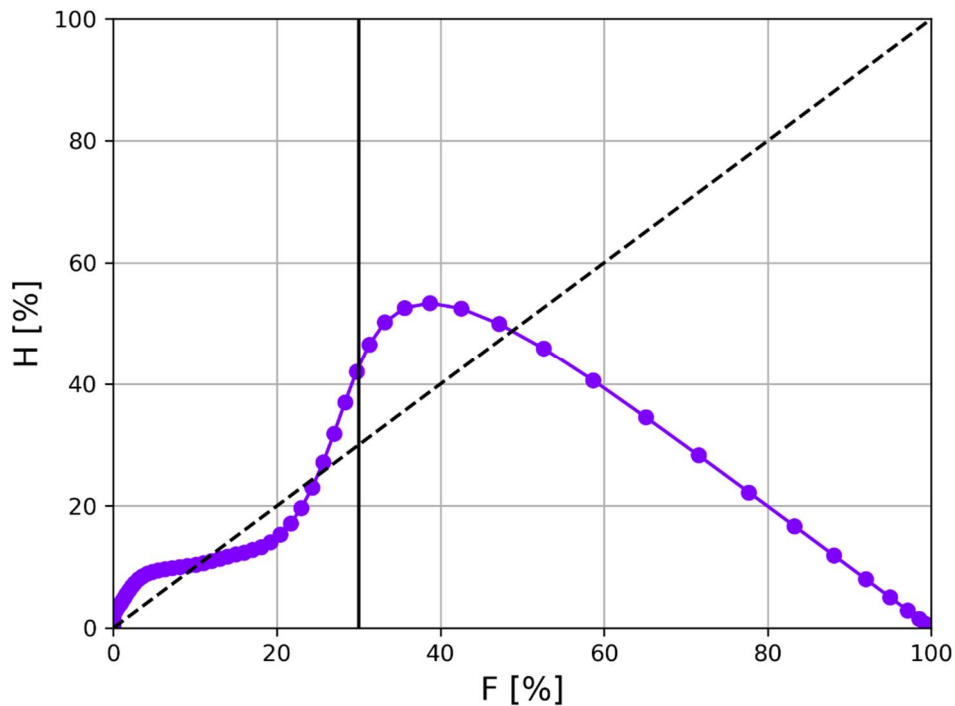


Figuur 0.71 Proef 09 – Stijghoogte voor verschillende verhangen over de kolom en over de tijd.

A.9.3

Analyse Kenney & Lau en Wan & Fell

De zeefkromme van Figuur 0.70 is gebruikt om een Kenney & Lau (1985) analyse te maken en daardoor te voorspellen of het materiaal intern stabiel is. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 0.72, waar blijkt dat het materiaal niet intern stabiel is.

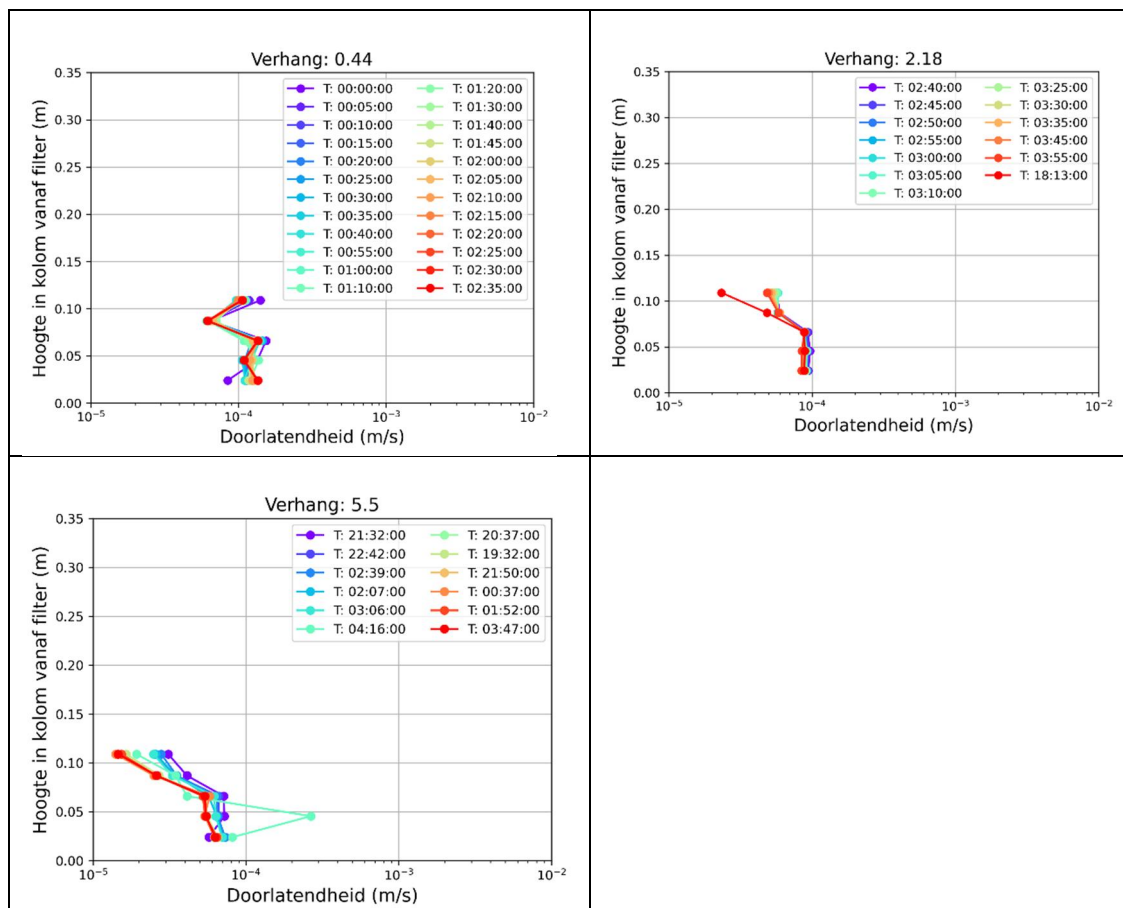


Figuur 0.72 Proef 09 – Uitwerking Kenney & Lau (1985) methode voor het monster gemaakt met laser diffractie.

Met deze zweefkromme is ook een Wan & Fell (2008) analyse gemaakt. De voorspelde kans op interne instabiliteit is 0.71, wat ook aangeeft dat het monster intern instabiel is.

A.9.4 Doorlatendheid over de hoogte en tijd

Figuur 0.73 geeft het verloop van de doorlatendheid aan over de tijd. Op de x-as staat de doorlatendheid in m/s, en op de y-as is de hoogte van de kolom in meters weergegeven. Een plot is gemaakt voor elke meting, ongeveer elke 5 minuten. Uit de resultaten is af te leiden dat de doorlatendheid over de kolom kan veranderen vooral voor lage verhangen, dit is in Sectie 3.3 toegelicht. Verder lijkt de top van het monster bij een verhang van 2.18 te verstoppert over de tijd. Bij een verhang van 5.5 is er een duidelijke verlaging van de doorlatendheid, iets meer aan de bovenkant dan de onderkant, waaruit is te concluderen dat het materiaal verstopt aan de bovenkant.



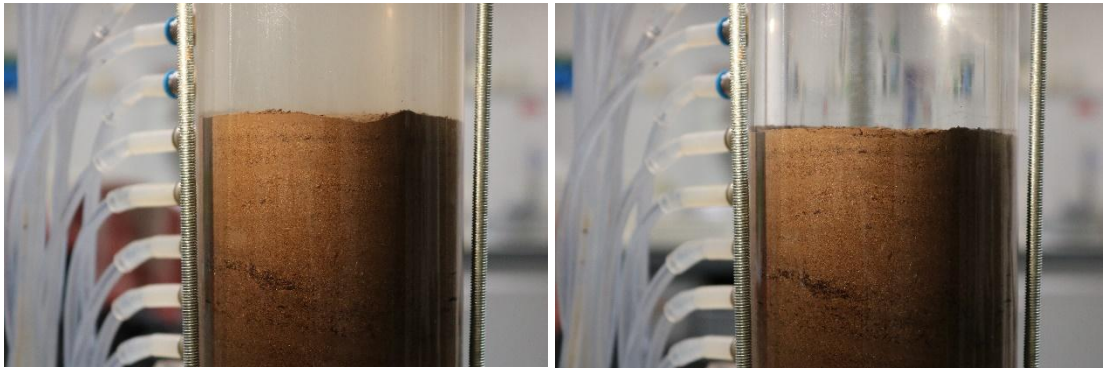
Figuur 0.73 Proef 09 – Doorlatendheid over de hoogte voor verschillende tijdstippen en verhangen.

A.9.5 Volumeverandering

Met twee camera's zijn iedere minuut foto's gemaakt aan de onderkant van het monster ingezoomd om de individuele korrels te zien (Figuur 0.74) en aan de bovenkant van het monster uitgezoomd om eventueel verzakkingen te zien (Figuur 0.75). Uit beide analyses blijkt dat er geen verandering heeft plaatsgevonden tijdens de proef.

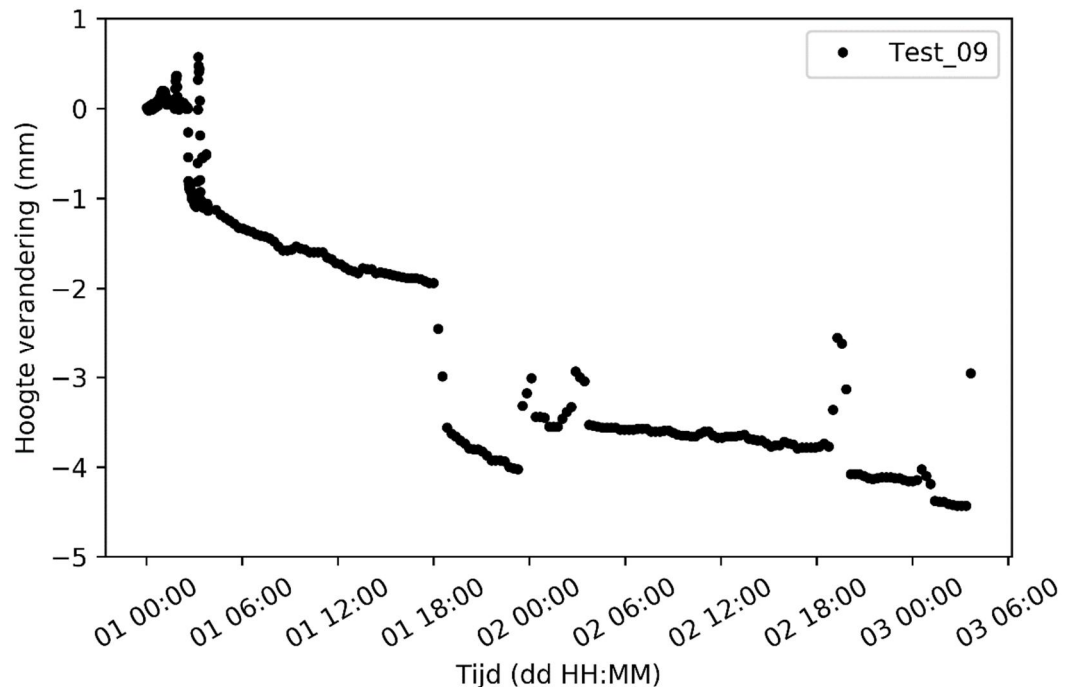


Figuur 0.74 Proef 09 – Foto gezoomd op de korrels aan de onderkant van het monster vóór (links) en na (rechts) de proef.



Figuur 0.75 Proef 09 – Foto van de bovenkant van het monster vóór (links) en na (rechts) de proef.

Met behulp van foto's van de bovenkant van het monster, was de hoogteverandering van het monster bepaald, dit is in Figuur 0.76 te zien. Deze figuur geeft in het begin veel veranderingen door een verschil in verlichting en niet door verandering in hoogte van het monsters. In de foto's zijn twee verlagingen te zien, één kleine na 24 uur en één grotere na 1 dag en 12 uur. Beide verlagingen zijn in de order van 0.1 mm. Andere verlagingen zijn door onnauwkeurigheden veroorzaakt. Verder zijn verhoging te zien in het monster waarschijnlijk door de retourstromingen.



Figuur 0.76 Proef 09 – Hoogte verandering van het monster over de duur van de proef.

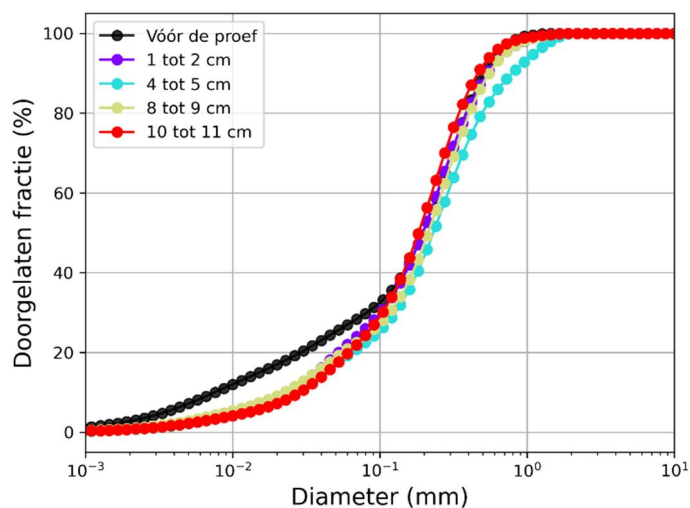
A.9.6

C.S.I. korrelverdeling

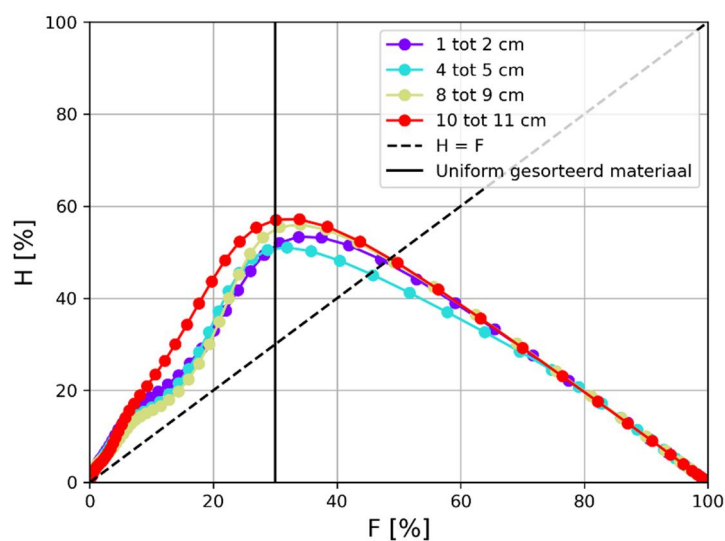
Figuur 0.77 geeft de C.S.I. korrelverdelingen per laag na de proef, en Tabel 42 geeft de D10 en D20 per laag. Deze korrelverdelingen zijn gebruikt om per laag ook een Kenney & Lau (1985) analyse te maken, zie Figuur 0.78. Uit Figuur 0.77 blijkt dat alle lagen minder fijne materiaal hebben vergelijken met vóór de proef, de redenen hiervan zijn in Sectie 3.5 toegelicht. Verder lijkt alleen de laag van 4 tot 5 cm van de bovenkant grover te zijn geworden.

Tabel 42 Proef 09 – D10 en D20 per laag na het einde van de proef. De lagen zijn vanaf de bovenkant van het monster gemeten.

C.S.I. laag	D10 (mm)	D20 (mm)
1 tot 2 cm	0.024	0.052
4 tot 5 cm	0.026	0.064
8 tot 9 cm	0.022	0.056
10 tot 11 cm	0.028	0.061



Figuur 0.77 Proef 09 – Korrelverdeling per laag na het einde van de proef. De lagen zijn vanaf de bovenkant van het monster gemeten.



Figuur 0.78 Proef 09 – Kenney & Lau (1985) criteria per laag aan het einde van de proef. De lagen zijn vanaf de bovenkant van het monster gemeten.

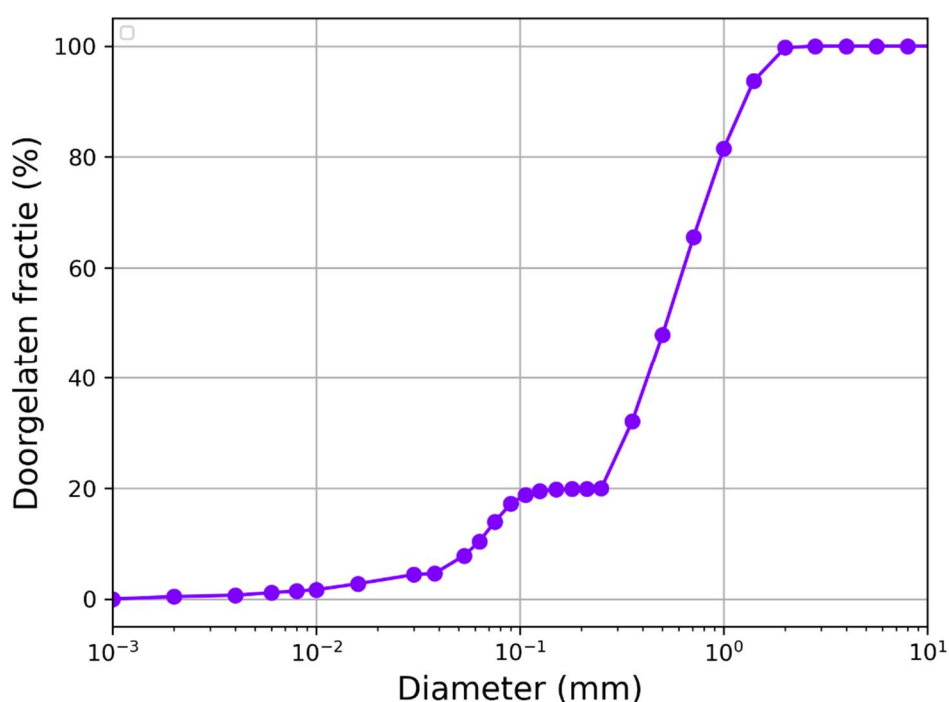
A.10 Factsheet proef 10

A.10.1 Eigenschappen proef

Proef 10 heeft plaats gevonden op 21/07/2021 tot 26/07/2021 en bestaat uit een mengsel van 80% zand van boring B07-05_7.20-8.76 m-mv afgezeefd op 0.355 mm en 20% silt. De volgende gegevens zijn voor de proef gemeten:

- Temperatuur water: 21.8 °C;
- Kamertemperatuur: 21.6 °C;
- Hoogte van het filter: 2.5 cm;
- Hoogte van het monster: 18.2 cm;
- Droog gewicht: 2139.7 g;
- Porositeit: 0.30;
- Relatieve dichtheid: 45.6%.

De zeefkromme van het monster is in Figuur 0.79 te zien en de korrelgrootte voor verschillende massa-% is in Tabel 43 te zien.



Figuur 0.79 Proef 10 – Korrelverdeling gemaakt met laser diffractie.

Tabel 43 Proef 10 – Korrelgrootte voor verschillende doorgelaten fractie-% gebaseerd op de laser diffractie.

	Korrelgrootte (mm)
D15	0.080
D30	0.433
D50	0.615
D60	0.719
D85	1.189
D90	1.328

A.10.2 Proefverloop

Proef 10 verliep over een duur van 113 uur en 32 min. Er zijn drie neerwaartse verhangen over het monster aangebracht:

- De eerste is een verhang van 0.21, aangebracht voor 30 min. Na 30 min. is een retourstroming met een verhang van 0.05 gedurende 10 min aangebracht. Daarna is opnieuw een verhang van 0.21 aangebracht, gedurende 30 minuten.
- De tweede is een verhang van 1.01, aangebracht voor ongeveer 24 uur. Na 30 min, ca. 15 u en 21 uur is een retourstroming met een verhang van 0.27 gedurende 10 min aangebracht. Ook na 24 uur is nog een retourstroming aangebracht van 10, voorafgaand aan de verhoging naar ca. 2.5.
- De derde is een verhang van 2.44-2.48, aangebracht voor ongeveer 87 uur. Na 86 uur is een retourstroming aangebracht met een verhang van 0.26.

Er was geen zichtbare uitspoeling van materiaal. De gemeten debieten en stijghoogten over de kolom en tijd zijn in Tabel 44 te zien. De locatie van elke stijghoogtebuis is in Tabel 45 weergegeven.

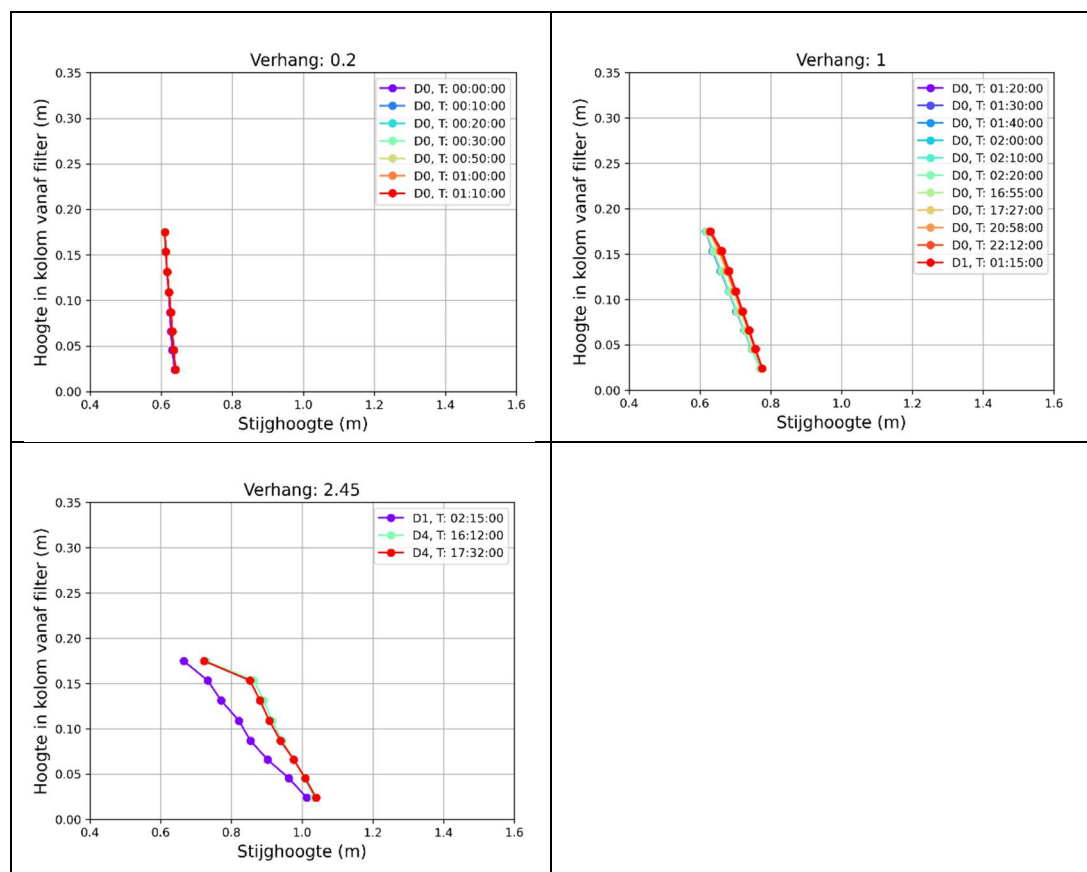
Tabel 44 Proef 10 – Verloop van de proef. De kolom 'Retour flow' geeft aan als het een neerwaartse stroming is (0) of een opwaartse stroming (1). Een hogere stijghoogte is in groen gekleurd en een lagere in rood met geel tussendoor.

Δp (cm)	i (-)	Retour Flow	stop watch	Flow (cc/min)	h1 (cm)	h2 (cm)	h3 (cm)	h4 (cm)	h5 (cm)	h6 (cm)	h7 (cm)	h8 (cm)	h9 (cm)	h10 (cm)	out (cm)	in (cm)
3.8	0.21	0	0:00:00	6.00	64.35	64.20	63.40	62.80	62.70	62.30	61.90	61.40	61.00	60.80	64.60	60.80
3.8	0.21	0	0:10:00	5.90	64.40	64.30	63.80	63.35	63.00	62.50	62.00	61.40	61.10	60.80	64.60	60.80
3.8	0.21	0	0:20:00	5.70	64.40	64.30	63.80	63.35	63.00	62.50	62.00	61.40	61.10	60.80	64.60	60.80
3.8	0.21	0	0:30:00	5.80	64.40	64.30	63.80	63.35	63.00	62.50	62.00	61.40	61.10	60.80	64.60	60.80
0.9	0.05	1	0:40:00	1.40	60.90	60.80	61.00	61.20	61.30	61.50	61.50	61.30	61.60	61.60	61.70	60.80
3.8	0.21	0	0:50:00	5.80	64.40	64.30	63.80	63.35	63.00	62.50	62.00	61.40	61.30	60.80	64.60	60.80
3.8	0.21	0	1:00:00	5.90	64.40	64.30	63.80	63.35	63.00	62.50	62.00	61.40	61.30	60.80	64.60	60.80
3.8	0.21	0	1:10:00	5.70	64.40	64.30	63.80	63.35	63.00	62.50	62.00	61.40	61.30	60.80	64.60	60.80
18.3	1.01	0	1:20:00	24.90	79.10	78.60	75.70	73.60	71.40	69.20	67.10	64.60	62.60	60.80	79.10	60.80
18.3	1.01	0	1:30:00	24.90	79.10	78.60	75.70	73.60	71.50	69.20	67.10	64.70	62.60	60.80	79.10	60.80
18.3	1.01	0	1:40:00	24.70	79.10	78.60	75.70	73.70	71.60	69.30	67.20	64.80	62.70	60.80	79.10	60.80
5	0.27	1	1:50:00	7.50	60.90	60.90	61.60	62.20	62.90	63.50	64.00	64.50	65.60	65.60	65.80	60.80
18.3	1.01	0	2:00:00	25.10	79.00	78.40	75.70	73.65	71.50	69.30	67.20	64.80	62.80	60.80	79.10	60.80
18.3	1.01	0	2:10:00	25.10	79.00	78.50	75.80	73.70	71.60	69.35	67.30	64.90	62.80	60.80	79.10	60.80
18.3	1.01	0	2:20:00	24.90	79.00	78.50	75.80	73.70	71.60	69.35	67.30	64.90	62.80	60.80	79.10	60.80
18.3	1.01	0	16:55:00	20.30	79.10	78.70	76.30	74.50	72.70	70.70	68.70	66.55	64.45	60.80	79.10	60.80
5	0.27	1	17:09:00	5.90	60.95	60.95	61.70	62.20	62.80	63.40	64.00	62.70	62.90	65.60	65.80	60.80
18.3	1.01	0	17:27:00	20.90	79.00	78.60	76.30	74.45	72.60	70.50	68.55	66.30	64.20	60.80	79.10	60.80
18.3	1.01	0	20:58:00	19.80	79.10	78.65	76.40	74.70	72.85	70.85	68.90	66.80	64.85	60.80	79.10	60.80
5	0.27	1	21:00:00	5.80	60.90	60.90	61.70	62.20	62.80	63.40	64.00	64.60	64.90	65.80	65.80	60.80
18.35	1.01	0	22:12:00	20.80	79.05	78.65	76.50	74.70	72.90	70.85	68.90	66.70	64.80	60.80	79.15	60.80
18.35	1.01	0	25:15:00	19.00	79.05	78.70	76.60	74.85	73.10	71.10	69.30	67.20	65.30	60.80	79.15	60.80
4.8	0.26	1	25:26:00	5.60	60.90	60.90	61.70	62.20	62.80	63.40	63.90	64.50	64.90	65.60	65.60	60.80
44.4	2.44	0	26:15:00	48.20	105.10	104.30	98.35	94.15	86.40	84.40	79.90	74.30	72.30	60.80	105.20	60.80
44.55	2.45	0	112:12:00	9.50	105.20	105.00	101.90	99.40	96.00	92.75	90.40	87.85	84.85	60.80	105.35	60.80
4.8	0.26	1	112:32:00	1.80	60.70	60.80	61.50	62.10	62.90	63.60	64.00	64.50	64.90	65.20	65.60	60.80
45.2	2.48	0	113:32:00	10.60	105.80	105.60	102.30	99.50	95.80	92.00	89.50	86.70	83.80	60.80	106.00	60.80

Tabel 45 Proef 10 – Positie van de stijghoogtebuizen.

Label	Afstand vanaf filter (cm)
h1	0.0
h2	1.3
h3	3.5
h4	5.6
h5	7.6
h6	9.8
h7	12.0
h8	14.3
h9	16.4
h10	18.6

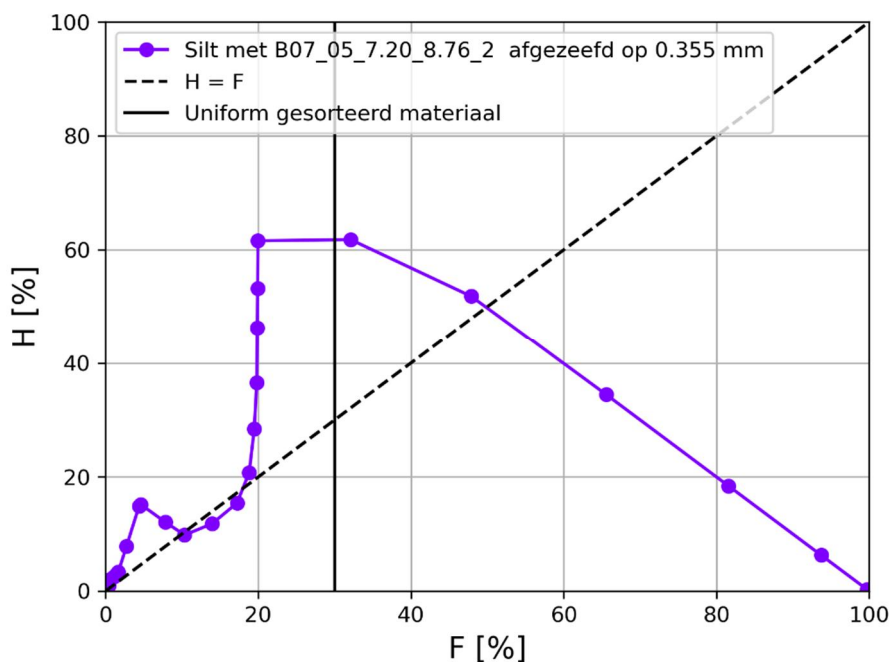
Figuur 0.80 geeft de stijghoogtemetingen aan in de loop van de tijd van proef 10 voor verschillende aangebrachte verhangen. Deze is voor een verhang van 0.2 constant over de tijd. Bij een verhang van 1 is een kleine afwijking van de stijghoogte in de tijd te zien, waarbij het verhang wat kleiner wordt over de onderkant van het monster en wat groter over de bovenkant. Bij een verhang van 2.45 is er een grote verandering in het stijghoogteverloop te zien. De verdeling van stijghoogte wordt iets meer uniform in de tijd.



Figuur 0.80 Proef 10 – Stijghoogte voor verschillende verhangen over de kolom en over de tijd.

A.10.3 Analyse Kenney & Lau en Wan & Fell

De zeefkromme van Figuur 0.79 is gebruikt om een Kenney & Lau (1985) analyse te maken en daardoor te voorspellen of het materiaal intern stabiel is. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 0.81, waar blijkt dat het materiaal intern instabiel is.

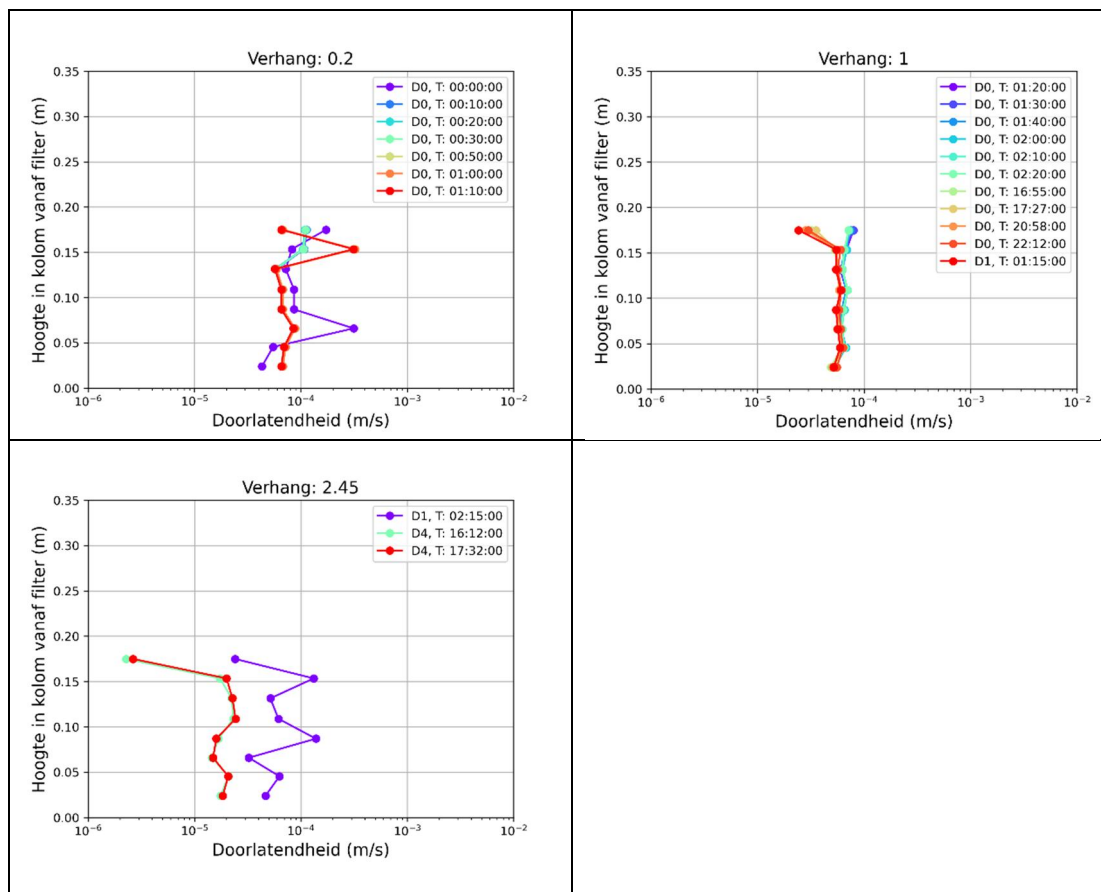


Figuur 0.81 Proef 10 – Uitwerking Kenney & Lau (1985) methode voor het monster gemaakt met zeefanalyse en laser diffractie.

Met deze zweefkromme is ook een Wan & Fell (2008) analyse gemaakt. De voorspelde kans op interne instabiliteit is 0.49, wat ook aangeeft dat het monster intern instabiel is.

A.10.4 Doorlatendheid over de hoogte en tijd

Figuur 0.82 geeft het verloop van de doorlatendheid aan over de tijd. Op de x-as staat de doorlatendheid in m/s, en op de y-as is de hoogte van de kolom in meters weergegeven. Een plot is gemaakt voor elke meting. Uit de resultaten is af te leiden dat de doorlatendheid over de kolom spreiding vertoont, vooral voor lage verhangen, dit is in Sectie 3.3 toegelicht. Verder lijkt de top van het monster bij een verhang van 1 te verstoppert over de tijd. Bij een verhang van 2.45 is er een duidelijke verlaging van de doorlatendheid over het hele monster.



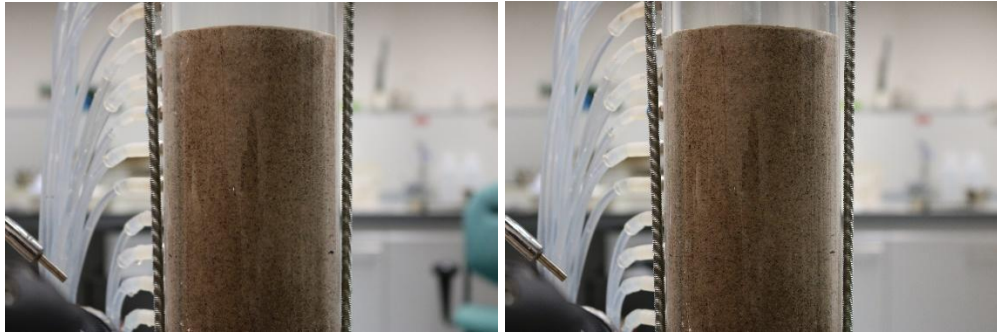
Figuur 0.82 Proef 10 – Doorlatendheid over de hoogte voor verschillende tijdstippen en verhangen.

A.10.5 Volumeverandering

Met twee camera's zijn iedere minuut foto's gemaakt aan de onderkant van het monster ingezoomd om de individuele korrels te zien (Figuur 0.83) en aan de bovenkant van het monster uitgezoomd om eventueel verzakkingen te zien (Figuur 0.84). Uit beide analyses blijkt dat er geen verandering heeft plaatsgevonden tijdens de proef.

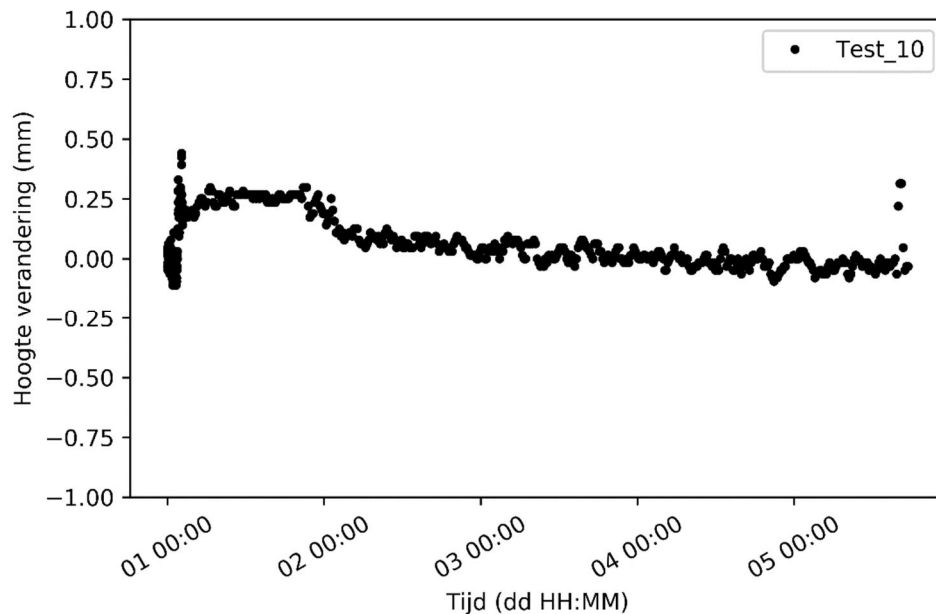


Figuur 0.83 Proef 10 – Foto gezoomd op de korrels aan de onderkant van het monster vóór (links) en na (rechts) de proef.



Figuur 0.84 Proef 10 – Foto van de bovenkant van het monster vóór (links) en na (rechts) de proef.

Met behulp van foto's van de bovenkant van het monster, was de hoogteverandering van het monster bepaald, dit is in Figuur 0.85 te zien. Deze figuur geeft in het begin veel veranderingen door een verschil in verlichting en niet door verandering in hoogte van het monster. Er is geen volumeverandering opgetreden in het monster.



Figuur 0.85 Proef 10 – Hoogte verandering van het monster over de duur van de proef.

A.10.6

C.S.I. korrelverdeling

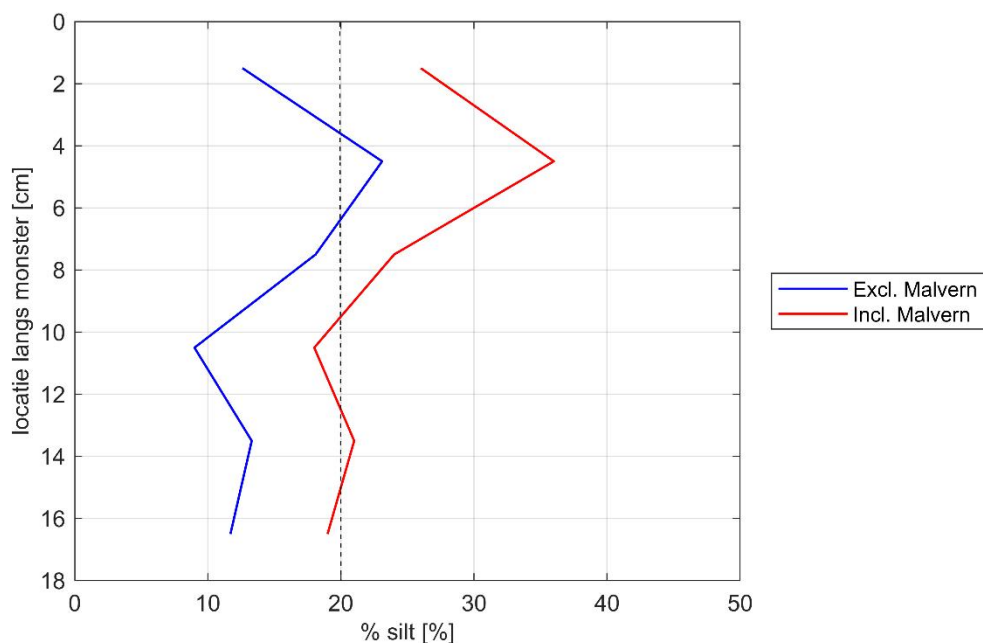
De analyse van korrelverdeling na afloop van de proef is zoals bij de andere proeven uitgevoerd met laserdiffractie. Deze analyse leverde zeer hoge percentages silt, tot wel 90%. Deze resultaten worden daardoor niet betrouwbaar geacht – vermoedelijk is de sampling van materiaal voor de laserdiffractie uit de CSI monsters niet representatief geweest. Om toch een inschatting te verkrijgen van de variatie van silt over de hoogte van het monster zijn de monsters gezeefd met de 0.355 mm zeef. Omdat de grove fractie al voorafgaand aan menging met het silt gezeefd was met deze zeef, is het percentage <0.355 mm een goede maat voor het percentage silt.

Tabel 46 geeft percentage silt per laag, wanneer alleen het resterende monster wordt gewogen en het percentage wanneer het monster dat in het Malvern analyse is verbruikt is meegewogen. In beide gevallen is geen trend over de hoogte van het monster te zien. Wel blijkt dat de monsters inclusief het Malvern materiaal meer silt bevatten. Met het Malvern materiaal is het gemiddeld silt percentage 24% en zonder 14.6%. Deze waarden zitten rondom de gemiddelde waarde van 20% voor de proef. Waarschijnlijk is er dus niet veel materiaal uitgespoeld.

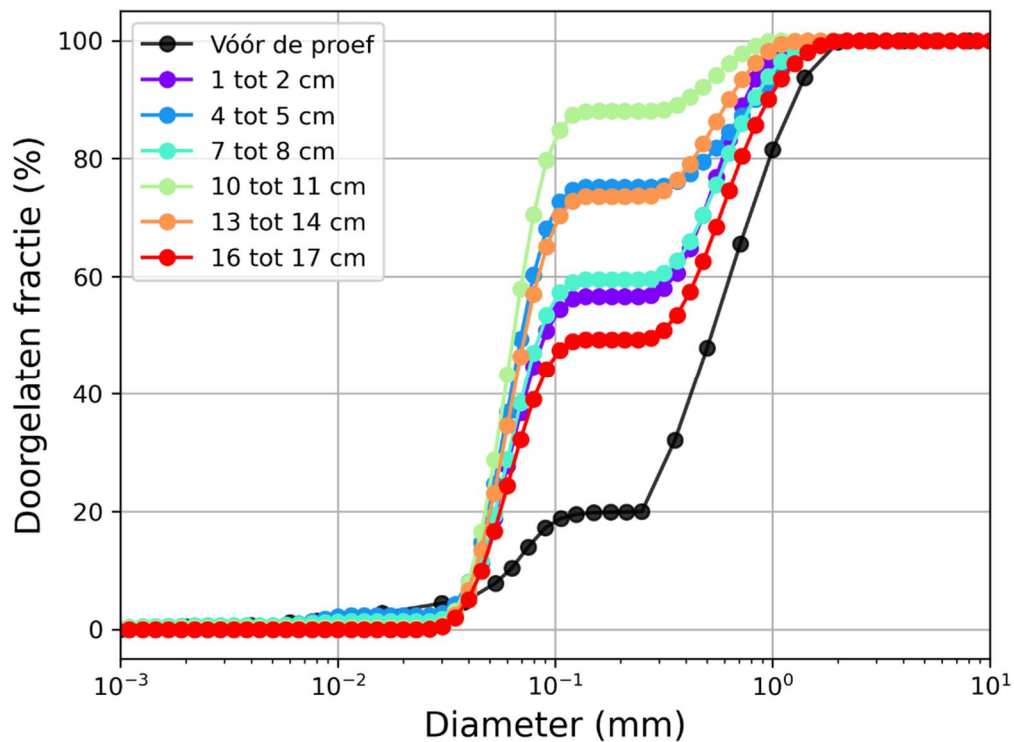
De afname in doorlatendheid over het gehele monster, gemeten bij een verhang van 2.45 is merkwaardig (Figuur 0-82). Bij lokale uitspoeling zou de doorlatendheid op sommige plaatsen moeten toenemen en op andere afnemen. Biologische verstopping of verstopping door zuurstofontwikkeling lijkt de meest aannemelijke verklaring.

Tabel 46 Silt percentages op basis van zeving. De lagen zijn vanaf de bovenkant van het monster gemeten.

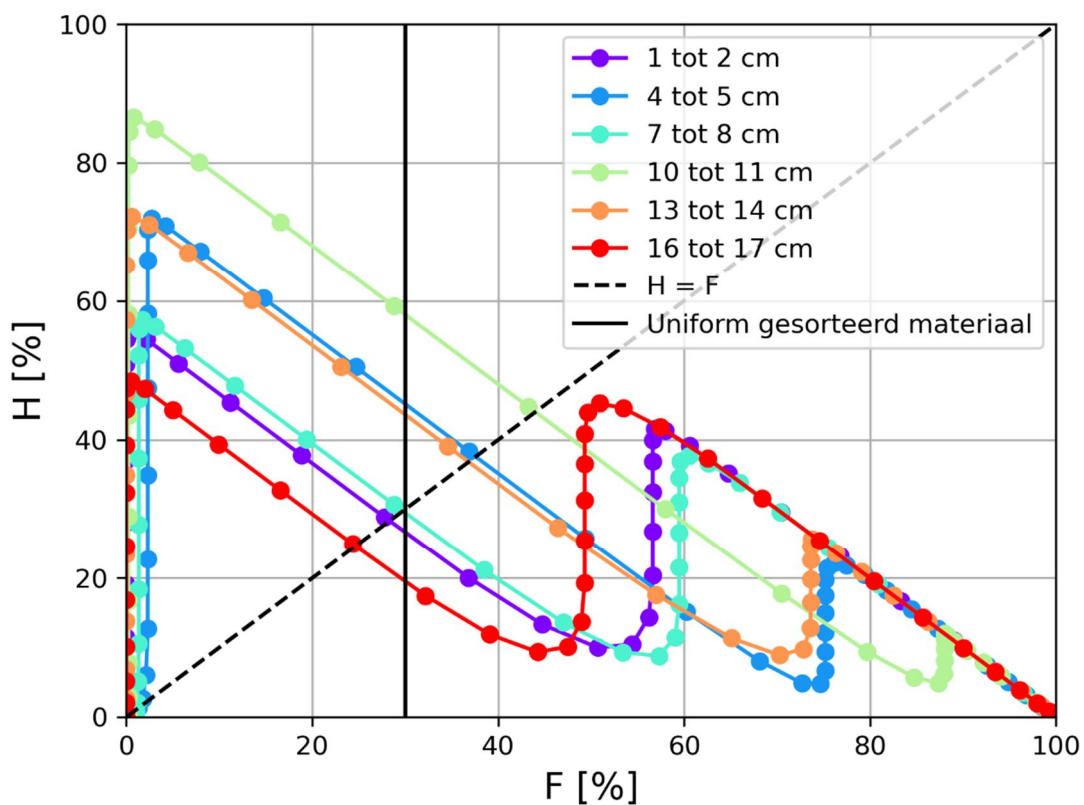
C.S.I. laag	% silt excl. Malvern materiaal	% silt incl. Malvern materiaal
1 tot 2 cm	12.6	26
4 tot 5 cm	23.1	36
7 tot 8 cm	18.1	24
10 tot 11 cm	9.0	18
13 tot 14 cm	13.3	21
16 tot 17 cm	11.7	19



Figuur 0.86 Grafische weergave van tabel 46.



Figuur 0.87 Proef 10 – Korrelverdeling per laag na het einde van de proef. De lagen zijn vanaf de bovenkant van het monster gemeten.



Figuur 0.88 Proef 10 – Kenney & Lau (1985) criteria per laag aan het einde van de proef. De lagen zijn vanaf de bovenkant van het monster gemeten.

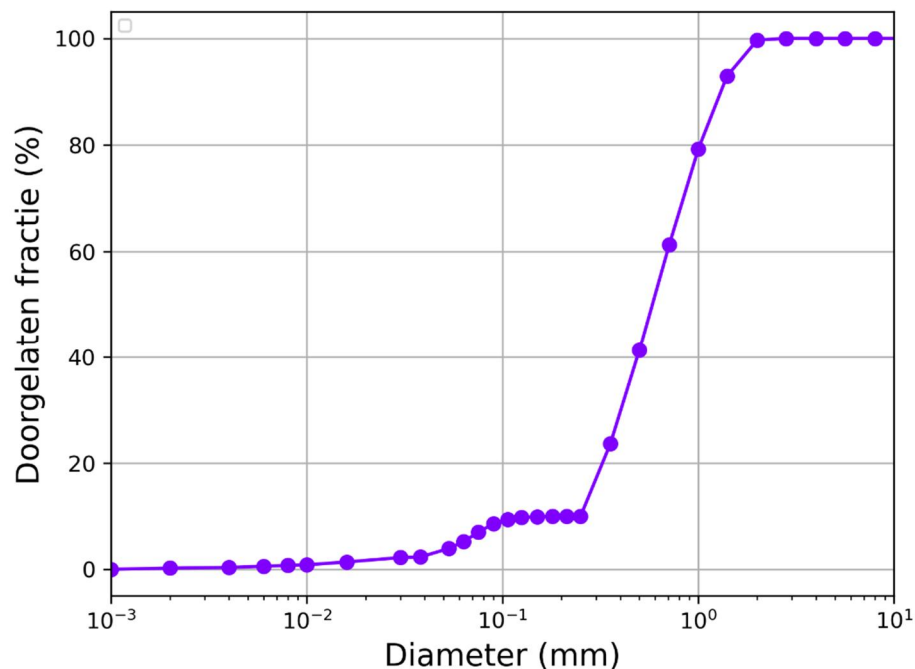
A.11 Factsheet proef 11

A.11.1 Eigenschappen proef

Proef 11 heeft plaats gevonden op 26/07/2021 tot 29/07/2021 en bestaat uit een mengsel van 90% zand van boring B07-05_7.20-8.76 m-mv afgezeefd op 0.355 mm en 10% silt. De volgende gegevens zijn voor de proef gemeten:

- Temperatuur water: 21.8 °C;
- Kamertemperatuur: 22.1 °C;
- Hoogte van het filter: 2.5 cm;
- Hoogte van het monster: 15.5 cm;
- Droog gewicht: 1724.5 g;
- Porositeit: 0.34;
- Relatieve dichtheid: 49.7%.

De zeefkromme van het monster is in Figuur 0.88 te zien en de korrelgrootte voor verschillende massa-% is in Tabel 47 te zien.



Figuur 0.89 Proef 11 – Korrelverdeling gemaakt met laser diffractie.

Tabel 47 Proef 11 – Korrelgrootte voor verschillende doorgelaten fractie-% gebaseerd op de laser diffractie.

	Korrelgrootte (mm)
D15	0.289
D30	0.407
D50	0.591
D60	0.697
D85	1.169
D90	1.315

A.11.2 Proefverloop

Proef 11 verliep over een duur van 51 uur en 5 min. Er zijn drie neerwaartse stroming over het monster aangebracht:

- De eerste is een verhang van 0.21, aangebracht voor 1 uur en 30 min. Na 30 min is een retourstroming met een verhang van 0.05 gedurende 10 min aangebracht.
- De tweede is een verhang van 1, aangebracht voor ongeveer 40 uur. Na 40 min, ca. 20 uur en 25 uur is een retourstroming met een verhang van 0.26-0.28 gedurende 10 min aangebracht.
- De derde is een verhang van 2.51, aangebracht voor ongeveer 9 uur.

Er was geen zichtbare uitspoeling van materiaal. De gemeten debieten en stijghoogten over de kolom en tijd zijn in Tabel 48 te zien. De locatie van elke stijghoogtebuis is in Tabel 49 weergegeven.

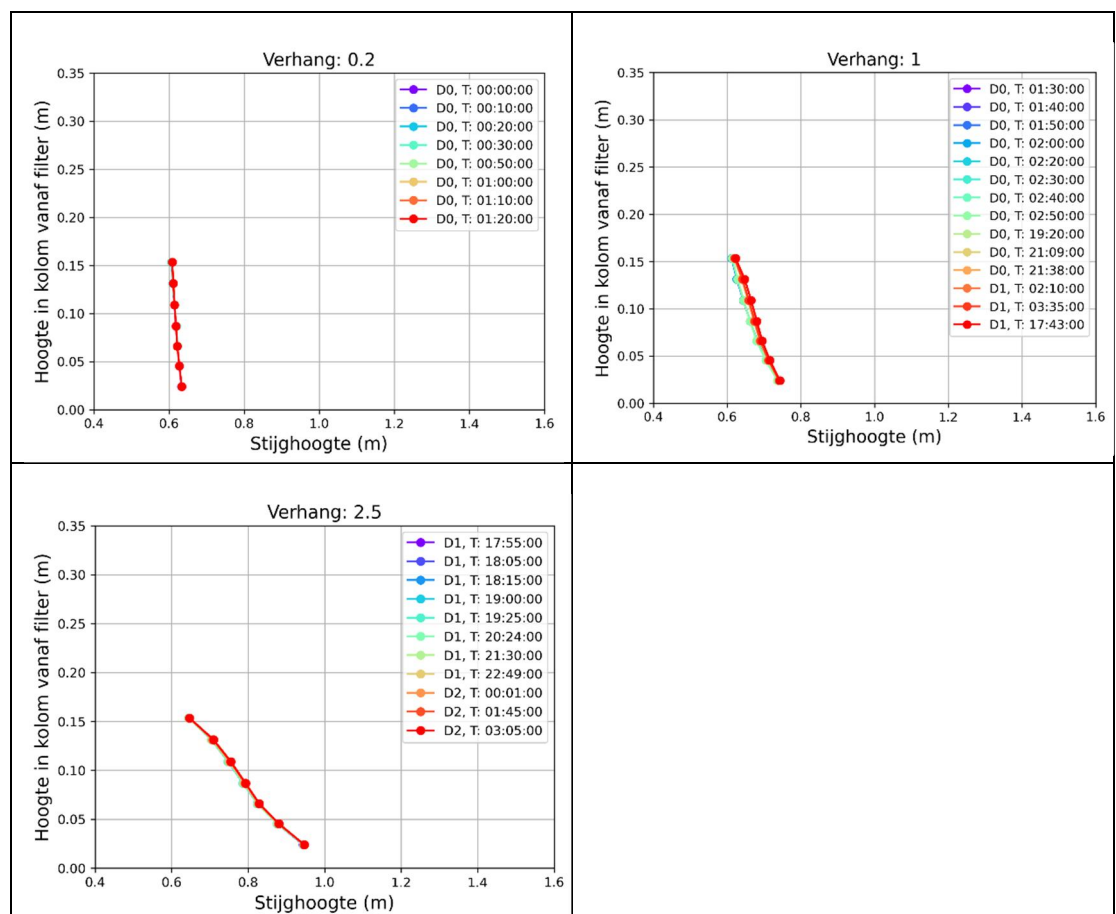
Tabel 48 Proef 11 – Verloop van de proef. De kolom 'Retour flow' geeft aan als het een neerwaartse stroming is (0) of een opwaartse stroming (1). Een hogere stijghoogte is in groen gekleurd en een lagere in rood met geel tussendoor. De stopwatch wordt na 24 uur gereset.

Δp (cm)	i (-)	Retour Flow	stop watch	Flow (cc/min)	h1 (cm)	h2 (cm)	h3 (cm)	h4 (cm)	h5 (cm)	h6 (cm)	h7 (cm)	h8 (cm)	h9 (cm)	out (cm)	in (cm)
3.2	0.21	0	0:00:00	34.70	63.85	63.60	63.10	62.40	62.10	61.60	61.30	60.70	60.70	63.90	60.70
3.2	0.21	0	0:10:00	34.60	63.85	63.70	63.20	62.40	62.20	61.70	61.30	60.70	60.70	63.90	60.70
3.3	0.21	0	0:20:00	34.60	63.85	63.70	63.20	62.40	62.20	61.70	61.30	60.70	60.70	64.00	60.70
3.3	0.21	0	0:30:00	34.70	63.85	63.70	63.20	62.40	62.20	61.70	61.30	60.70	60.70	64.00	60.70
0.85	0.05	1	0:40:00	7.90	60.80	60.80	61.05	61.20	61.40	61.30	61.30	61.20	61.30	61.55	60.70
3.2	0.21	0	0:50:00	34.70	63.75	63.65	63.20	62.40	62.10	61.70	61.35	61.00	60.80	63.90	60.70
3.2	0.21	0	1:00:00	34.60	63.75	63.65	63.20	62.40	62.10	61.70	61.35	61.00	60.80	63.90	60.70
3.2	0.21	0	1:10:00	34.60	63.75	63.65	63.20	62.40	62.10	61.70	61.35	61.00	60.80	63.90	60.70
3.2	0.21	0	1:20:00	34.60	63.75	63.65	63.20	62.40	62.10	61.70	61.35	61.00	60.80	63.90	60.70
15.5	1.00	0	1:30:00	144.60	75.85	75.20	72.30	69.00	67.30	65.25	63.60	61.70	60.80	76.20	60.70
15.5	1.00	0	1:40:00	143.50	75.85	75.20	72.30	69.00	67.30	65.25	63.60	61.70	60.80	76.20	60.70
15.5	1.00	0	1:50:00	142.40	75.85	75.20	72.30	69.00	67.30	65.25	63.60	61.70	60.80	76.20	60.70
15.5	1.00	0	2:00:00	141.30	75.85	75.20	72.30	69.00	67.30	65.30	63.60	61.70	60.80	76.20	60.70
4.1	0.26	1	2:10:00	47.70	60.80	60.90	61.90	62.80	63.30	63.50	64.00	64.50	64.60	64.80	60.70
15.5	1.00	0	2:20:00	145.40	75.85	75.20	72.20	68.90	67.20	65.30	63.70	62.00	60.80	76.20	60.70
15.5	1.00	0	2:30:00	144.80	75.85	75.20	72.20	68.90	67.20	65.30	63.70	62.00	60.80	76.20	60.70
15.5	1.00	0	2:40:00	144.50	75.85	75.20	72.20	68.90	67.20	65.30	63.70	62.00	60.80	76.20	60.70
15.5	1.00	0	2:50:00	144.20	75.85	75.20	72.20	68.90	67.20	65.30	63.70	62.00	60.80	76.20	60.70
15.5	1.00	0	19:20:00	123.40	76.00	75.40	72.60	69.50	68.10	66.40	64.90	62.90	60.90	76.20	60.70
15.5	1.00	0	21:09:00	121.70	76.00	75.45	72.70	69.60	68.20	66.50	65.00	63.00	60.90	76.20	60.70
4.4	0.28	1	21:25:00	33.90	60.80	60.90	61.80	62.70	63.20	63.60	63.80	64.30	64.70	65.10	60.70
15.5	1.00	0	21:38:00	124.40	76.00	75.40	72.70	69.60	68.20	66.45	65.00	63.10	60.90	76.20	60.70
15.5	1.00	0	26:10:00	120.60	76.00	75.50	72.70	69.70	68.35	66.60	65.10	63.15	60.90	76.20	60.70
4.4	0.28	1	26:33:00	33.60	60.80	60.90	61.50	62.60	63.10	63.50	63.80	64.30	64.80	65.10	60.70
15.5	1.00	0	27:35:00	122.10	76.00	75.50	72.80	69.80	68.40	66.70	65.20	63.20	60.90	76.20	60.70
15.5	1.00	0	41:43:00	109.40	76.00	75.60	73.10	70.20	68.90	67.30	65.80	63.80	60.90	76.20	60.70
38.9	2.51	0	41:55:00	276.50	98.80	97.60	91.20	84.10	80.80	76.60	73.00	67.85	61.20	99.60	60.70
38.9	2.51	0	42:05:00	277.60	98.80	97.70	91.20	84.10	80.80	76.60	73.00	67.80	61.20	99.60	60.70
38.9	2.51	0	42:15:00	278.00	98.80	97.70	91.20	84.10	80.80	76.60	73.00	67.80	61.20	99.60	60.70
38.9	2.51	0	43:00:00	276.10	98.80	97.80	91.20	84.10	80.80	76.60	73.00	67.80	61.20	99.60	60.70
38.9	2.51	0	43:25:00	274.10	98.80	97.80	91.25	84.10	80.80	76.60	73.00	67.80	61.20	99.60	60.70
38.9	2.51	0	44:24:00	274.30	98.80	97.80	91.30	84.15	80.85	76.80	73.10	67.80	61.20	99.60	60.70
38.9	2.51	0	45:30:00	271.20	98.80	97.80	91.35	84.20	80.95	76.90	73.20	67.85	61.20	99.60	60.70
38.9	2.51	0	46:49:00	267.50	98.85	97.85	91.40	84.30	81.05	77.00	73.30	67.95	61.20	99.60	60.70
38.9	2.51	0	48:01:00	266.70	98.85	97.90	91.45	84.40	81.15	77.10	73.40	68.00	61.20	99.60	60.70
38.9	2.51	0	49:45:00	263.70	98.90	97.90	91.50	84.50	81.25	77.25	73.55	68.25	61.20	99.60	60.70
38.9	2.51	0	51:05:00	260.90	98.90	97.90	91.55	84.60	81.35	77.35	73.70	68.25	61.20	99.60	60.70

Tabel 49 Proef 11 – Positie van de stijghoogtebuizen.

Label	Afstand vanaf filter (cm)
h1	0.0
h2	1.3
h3	3.5
h4	5.6
h5	7.6
h6	9.8
h7	12.0
h8	14.3
h9	16.4

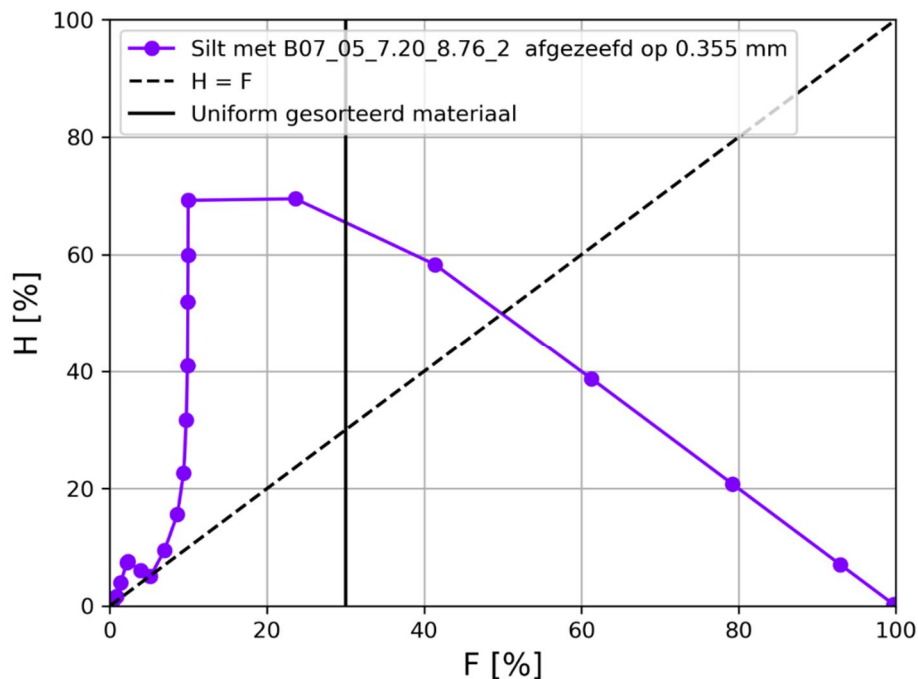
Figuur 0.89 geeft de stijghoogtemetingen aan in de loop van de tijd van proef 11 voor verschillende aangebrachte verhangen. Deze zijn voor een alle verhangen constant over de tijd. Bij een verhang van 1 is een kleine afwijking van de stijghoogte in de tijd te zien, waarbij het verhang wat kleiner wordt over de onderkant van het monster en wat groter over de bovenkant.



Figuur 0.90 Proef 11 – Stijghoogte voor verschillende verhangen over de kolom en over de tijd.

A.11.3 Analyse Kenney & Lau en Wan & Fell

De zeefkromme van Figuur 0.88 is gebruikt om een Kenney & Lau (1985) analyse te maken en daardoor te voorspellen of het materiaal intern stabiel is. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 0.90, waar blijkt dat het materiaal net niet intern stabiel is.

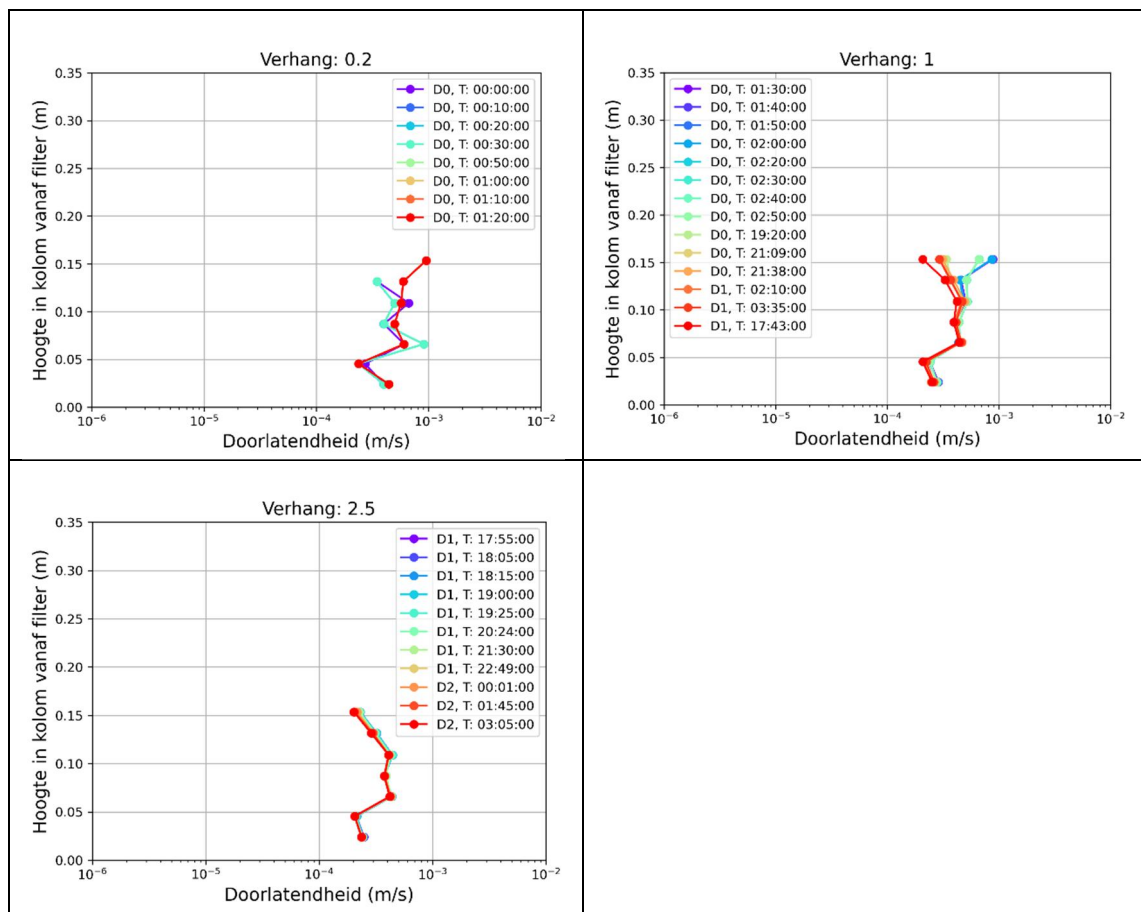


Figuur 0.91 Proef 11 – Uitwerking Kenney & Lau (1985) methode voor het monster gemaakt met zeefanalyse en laser diffractie.

Met deze zweefkromme is ook een Wan & Fell (2008) analyse gemaakt. De voorspelde kans op interne instabiliteit is 0.14, wat aangeeft dat het monster intern stabiel is.

A.11.4 Doorlatendheid over de hoogte en tijd

Figuur 0.91 geeft het verloop van de doorlatendheid aan over de tijd. Op de x-as staat de doorlatendheid in m/s, en op de y-as is de hoogte van de kolom in meters weergegeven. Een plot is gemaakt voor elke meting. Uit de resultaten is af te leiden dat de doorlatendheid over de kolom kan veranderen vooral voor lage verhangen, dit is in Sectie 3.3 toegelicht. Verder lijkt de top van het monster bij een verhang van 1 te verstoppert over de tijd.



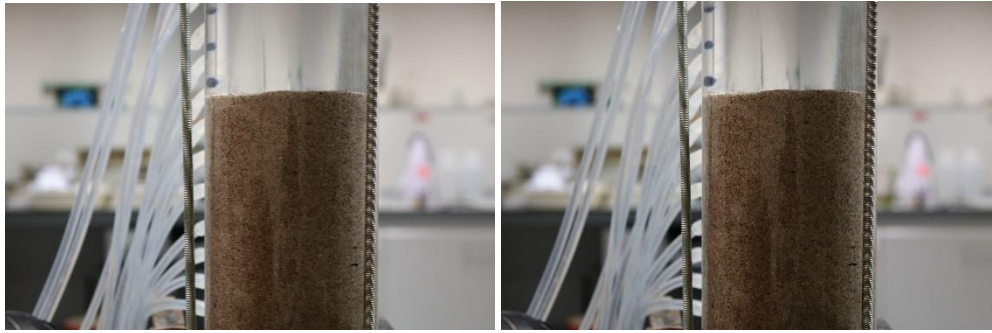
Figuur 0.92 Proef 11 – Doorlatendheid over de hoogte voor verschillende tijdstippen en verhangen.

A.11.5 Volumeverandering

Met twee camera's zijn iedere minuut foto's gemaakt aan de onderkant van het monster ingezoomd om de individuele korrels te zien (Figuur 0.92) en aan de bovenkant van het monster uitgezoomd om eventueel verzakkingen te zien (Figuur 0.93). Uit beide analyses blijkt dat er geen verandering heeft plaatsgevonden tijdens de proef.

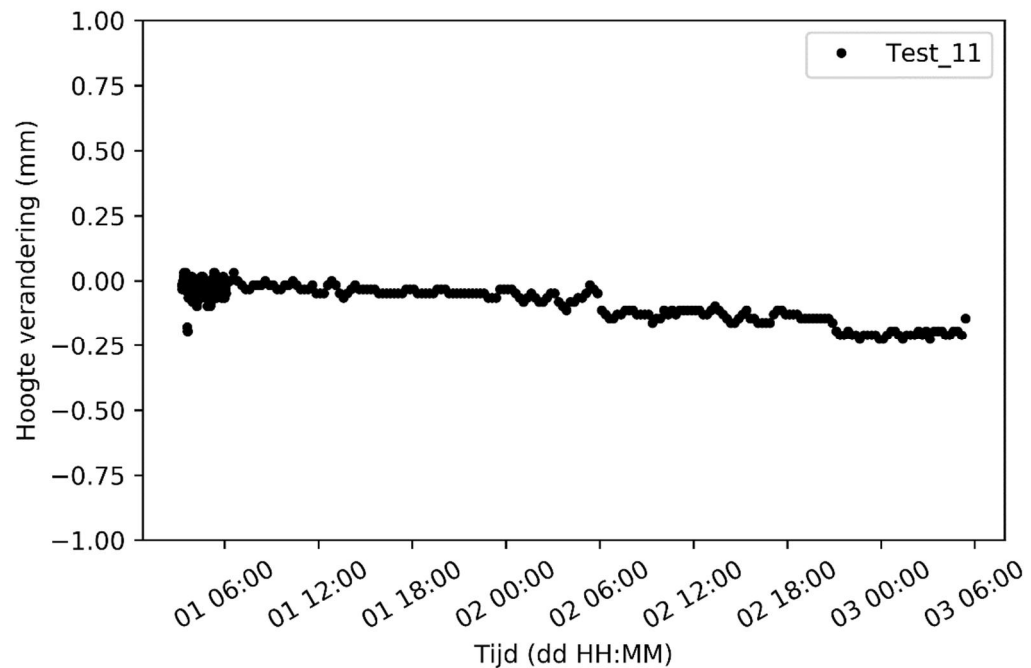


Figuur 0.93 Proef 11 – Foto gezoomd op de korrels aan de onderkant van het monster vóór (links) en na (rechts) de proef.



Figuur 0.94 Proef 11 – Foto van de bovenkant van het monster vóór (links) en na (rechts) de proef.

Met behulp van foto's van de bovenkant van het monster, was de hoogteverandering van het monster bepaald, dit is in Figuur 0.94 te zien. De veranderingen zijn binnen de meetnauwkeurigheid van de methode.



Figuur 0.95 Proef 11 – Hoogte verandering van het monster over de duur van de proef.

A.11.6 C.S.I. korrelverdeling

Figuur 0.95 geeft de C.S.I. korrelverdelingen per laag na de proef, en Tabel 50 geeft de D10 en D20 per laag. Deze korrelverdelingen zijn gebruikt om per laag ook een Kenney & Lau (1985) analyse te maken, zie Figuur 0.96. Uit Figuur 0.95 blijkt dat de fijne fractie in alle submonsters hoger is dan de initiële 10%. Mogelijk was het materiaal net als bij proef 10 moeilijk te bemonsteren. Daarom zijn er ook monsters genomen die vervolgens gezeefd zijn op 0.355 mm, om het percentage silt te bepalen. Uit deze analyse blijkt dat het percentage silt vrijwel gelijk is over de hoogte van het monster.

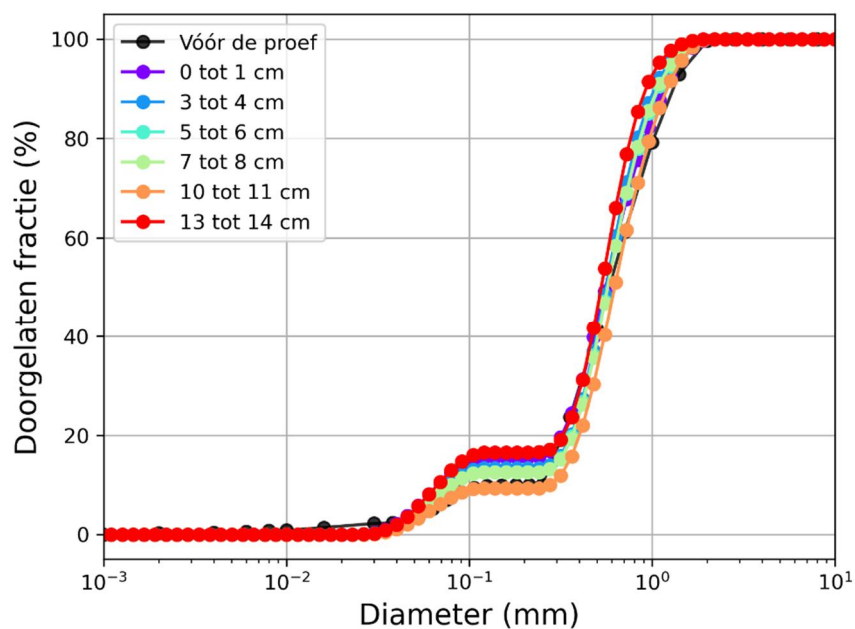
Tabel 50 Silt percentages op basis van zeving. De lagen zijn vanaf de bovenkant van het monster gemeten.

C.S.I. laag	% silt
1 tot 2 cm	14.4
4 tot 5 cm	12.3

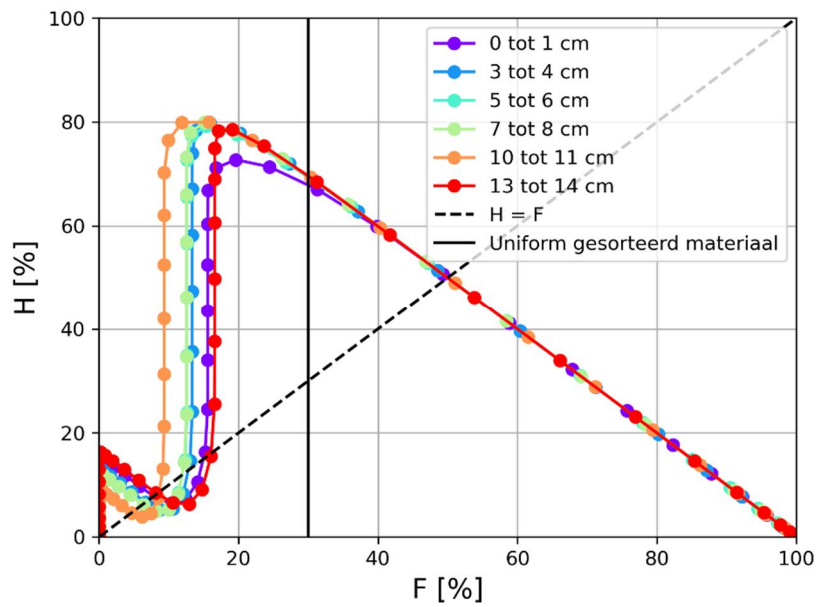
7 tot 8 cm	13.1
10 tot 11 cm	13.0
13 tot 14 cm	13.5
16 tot 17 cm	14.4

Tabel 51 Proef 11 – D10 en D20 per laag na het einde van de proef op basis van de laserdiffractie metingen. De lagen zijn vanaf de bovenkant van het monster gemeten.

C.S.I. laag	D10 (mm)	D20 (mm)
0 tot 1 cm	0.068	0.320
3 tot 4 cm	0.076	0.361
5 tot 6 cm	0.079	0.365
7 tot 8 cm	0.080	0.368
10 tot 11 cm	0.277	0.400
13 tot 14 cm	0.067	0.325



Figuur 0.96 Proef 11 – Korrelverdeling per laag na het einde van de proef. De lagen zijn vanaf de bovenkant van het monster gemeten.



Figuur 0.97 Proef 11 – Kenney & Lau (1985) criteria per laag aan het einde van de proef. De lagen zijn vanaf de bovenkant van het monster gemeten.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl

Verdiepend onderzoek Kanaal Almelo - De Haandrik

Definitief rapport Bijlage J - Grondwateranalyses



Verdiepend onderzoek Kanaal Almelo - De Haandrik
Definitief rapport Bijlage J - Grondwateranalyses

Auteur(s)

Partners

TNO, 'S-GRAVENHAGE

Verdiepend onderzoek Kanaal Almelo - De Haandrik

Definitief rapport Bijlage J - Grondwateranalyses

Opdrachtgever	Provincie Overijssel
Contactpersoon	
Referenties	Offertevraag verdiepingsonderzoek Kanaal Almelo-De Haandrik, Provincie Overijssel, 13 april 2021 Definitief Plan van Aanpak voor verdiepend onderzoek naar de schade langs het Kanaal Almelo – De Haandrik, Deltares, 4 juni 2021
Trefwoorden	Kanaal Almelo – De Haandrik, baggeren, damwanden, grondwater

Documentgegevens

Versie	3.2
Datum	10-09-2021
Projectnummer	11207155-010
Document ID	11207155-011-GEO-0002
Pagina's	131
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
3.2				

De namen van auteurs en reviewers zijn om privacy redenen niet opgenomen.

Samenvatting

In dit rapport zijn namen van betrokkenen, adressen van onderzochte panden en andere privacygevoelige informatie geanonimiseerd of verwijderd.

Dit rapport beschrijft de grondwateranalyse voor het gebied rondom Kanaal Almelo – De Haandrik. De uitgevoerde analyse is gebaseerd op metingen en berekeningen.

De belangrijkste vraag die met deze analyse beantwoord moeten worden, is:
Kan er zich een situatie hebben voorgedaan waarbij een grondwaterverhang bij de panden is opgetreden dat piping kan veroorzaken?

Om deze vraag te kunnen beantwoorden, zijn op 12 locaties meetraaien ingericht en is bij een van deze meetraaien een zeer gedetailleerd grondwatermodel opgezet. De metingen zijn uitvoerig geanalyseerd en met het gedetailleerde grondwatermodel zijn scenarioberekeningen uitgevoerd om situaties te simuleren die de grondwaterverhangen bij de panden kunnen beïnvloeden:

- De huidige situatie met een groot maaiveldverhang, gekalibreerd op basis van de meetresultaten;
- Een situatie met een lekke damwand over een grote lengte van het kanaal;
- Een situatie die kan optreden als na baggeren van het kanaal de bodem:
 - o Snel weer dichtslibt;
 - o Langzaam weer dichtslibt;
- Een situatie die kan zijn opgetreden in een extreem droge zomer.
- Een situatie die kan optreden als een korte betonnen damwand wordt vervangen door een langere stalen damwand, die:
 - o Alleen dieper in het onderliggende watervoerend pakket steekt;
 - o Daarbij een slecht doorlatende laag doorsnijdt, die onder de gehele breedte van het kanaal aanwezig is en zich in de richting van het kanaal over een langer traject uitstrekt.

Een tweede vraag die beantwoord moest worden, is:
Kan kanaalpeilverlaging de grondwaterstand dusdanig verlagen dat er op zeker geen grote grondwaterverhangen bij de panden meer kunnen optreden na werkzaamheden als baggeren en door mogelijke optredende lekkende damwanden?

Het effect van kanaalpeilverlaging op de omgeving van het kanaal is onderzocht met een bestaand regionaal grondwatermodel dat met enkele kleine aanpassingen daarvoor geschikt is gemaakt. Daarbij is het effect van een kanaalpeilverlaging van 0.5 m en van 1 m onderzocht voor een groot aantal combinaties van verschillende weerstanden van damwand en kanaalbodem.

De beschouwde metingen zijn onder te verdelen in metingen die specifiek voor dit onderzoek zijn verricht en metingen die al eerder zijn gedaan. De berekeningen zijn verricht met een regionaal model voor het gehele onderzoeksgebied en een detailmodel voor een specifieke locatie, Panden 2, 18 en 16. Op grond van het verhang in maaiveld over het pand is dit de locatie met een van de grootste potenties op het optreden van piping.

De metingen die specifiek voor dit onderzoek zijn verricht, zijn uitgebreid beschreven in de factsheets per raai en daarom niet nogmaals in dit rapport opgenomen. De metingen bij Panden 2, 18 en 16 zijn wel gebruikt in de detailmodellering en de samen met de andere metingen in deze grondwateranalyse.

De belangrijkste conclusies, die uit de grondwateranalyse volgen, zijn:

- De verhangen in grondwater over de panden zijn relatief laag (hooguit enkele procenten). Piping kan op basis van deze verhangen niet optreden. Dat geldt zowel voor de huidige situatie als voor situaties waarbij de bodemweerstand en / of de damwandweerstand laag is.
- Een lekke damwand over een langer traject van het kanaal kan tot een kleine stijging van de grondwaterstand leiden bij panden die dicht langs het kanaal staan. De grondwaterstand bij deze panden kan door een lekke damwand 10 tot 15 cm omhoog komen. Omdat deze situatie zich gedurende langere tijd voordoet, kan dat in zeer natte perioden leiden tot lichte grondwateroverlast.
- Alleen bij locaties waarbij een continue veenlaag zich uitstrekt van het kanaal tot voorbij het pand, kan de grondwaterstand door een lekke damwand nog wat verder oplopen (tot ca 30 cm) en is de kans op grondwateroverlast door een lekke damwand groot.
- Bij het (langdurig) ontbreken van een bodemweerstand is de potentiële grondwateroverlast een stuk groter. Het is echter onwaarschijnlijk dat een dergelijke situatie zich door het baggeren van de kanaalbodem heeft voorgedaan.
- Als na baggeren de bodem snel weer dichtslibt, geleidelijk in ca 2,5 dagen, is de stijging van de grondwaterstand bij de panden relatief klein (orde 10 à 20 cm) en wordt er geen wateroverlast verwacht. Alleen als dat net samenvalt met een zeer natte periode is er kans op enige grondwateroverlast.
- Als na het baggeren de bodem langzaam dichtslibt, geleidelijk in ca 2 maanden, is het effect bij de panden relatief groot (orde 1 m) en kan er (gedurende enkele weken) grondwateroverlast optreden.
- Er zijn geen aanwijzingen (metingen), die eenduidig aantonen dat de bodem van het kanaal in het verleden na baggeren gedurende langere tijd open is gebleven.
- De extreme droogte in het groeiseizoen van 2018 heeft relatief weinig effect op de grondwaterstand. Ook bij relatief hoge weerstanden van de bodem en de damwand wordt het grondwater door het kanaal voldoende aangevuld om heel diep uit te zakken te voorkomen. In dergelijke droge zomers zakt de grondwaterstand wel een paar decimeter verder uit dan in gemiddelde zomers, maar dat blijft door de aanvulling uit het kanaal beperkt tot hooguit een halve meter onder de grondwaterstand in het voorjaar.
- Het aanbrengen van een langere damwand heeft nagenoeg geen effect op de grondwaterstand. Alleen als daarbij een slecht doorlatende laag, die onder de gehele kanaalbodem over grotere lengte van het kanaal aanwezig is, wordt doorsneden, zal de grondwaterstand in de buurt van het kanaal een paar decimeter kunnen dalen. In dat geval zal het effect van baggeren van de kanaalbodem op de grondwaterstand echter een stuk kleiner zijn. De aanwezigheid van een dergelijke slecht doorlatende laag onder de gehele breedte van het kanaal is aannemelijk voor slechts één locatie in het gebied. Deze situatie komt dus waarschijnlijk niet of slechts zeer lokaal voor.
- Door de relatief hoge weerstanden van de kanaalbodem en de damwand, is het effect van kanaalpeilverlaging (als mogelijke maatregel tegen piping) op de grondwaterstand klein tot verwaarloosbaar, zeker zolang de peilverlaging beperkt blijft tot 50 cm.
- Alleen als de bodemweerstand van het kanaal gedurende lange periode na het baggeren klein is, kan het effect van kanaalpeilverlaging tijdelijk relevant zijn.

Datzelfde geldt in veel minder mate op plekken waar de damwand over grotere lengte langs het kanaal lek is. Gezien de verwachte snelheid van het sedimentatieproces, is het minder waarschijnlijk dat de bodemweerstand gedurende lange periode laag blijft dan dat de damwand over grotere lengtes lek is.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	10
2	Aanpak grondwatermodelleringen	12
2.1	Regionale modellering	12
2.2	Detailmodellering	13
3	Analyse met het regionale model	16
3.1	Beschrijving van het regionale model	16
3.1.1	Model opbouw	18
3.1.2	Model aanpassingen	29
3.2	Validatie van het regionale model	31
3.2.1	Stationaire validatie	31
3.2.2	Stationaire gevoeligheid kanaalweerstand	32
3.2.3	Tijdsafhankelijke validatie	33
3.2.4	Tijdsafhankelijke gevoeligheidsanalyse damwandweerstand	36
3.2.5	Gevoeligheidsanalyse damwandweerstand op afzonderlijke peilbuizen	39
4	Berekeningen met het regionale model	53
4.1	Stationaire berekeningen	53
4.1.1	Kanaalpeilverlaging 50 cm	53
4.1.2	Kanaalpeilverlaging 1 m	58
4.2	Tijdsafhankelijke berekeningen	62
4.3	Conclusies regionale modellering	63
5	Analyse met het detailmodel	66
5.1	Modelbeschrijving	66
5.2	Kalibratie (1 juni t/m 23 juli 2021)	68
5.2.1	Initiële toestand	71
5.2.2	Kalibratie resultaat	72
5.2.3	Gevoeligheidsanalyse modelparameters	77
5.3	Scenarioberekeningen	80
5.3.1	Scenario lekke / afwezige damwand	82
5.3.1.1	Aanpassing model voor scenario zonder goed functionerende damwand	82
5.3.1.2	Tijdsafhankelijke berekeningen bij compleet lekke damwand	85
5.3.2	Scenario's open bodem	92
5.3.2.1	Stationaire check met het 4-lagen model	93
5.3.2.2	Permanent open bodem	95
5.3.2.3	Snel dichtslibbende bodem	100
5.3.2.4	Langzaam dichtslibbende bodem	105
5.3.3	Scenario droogte	110
5.3.4	Scenario verlengen damwand	112
5.3.4.1	Damwand doorsnijdt geen slecht doorlatende laag	112

5.3.4.2	Damwand doorsnijdt wel een slechtdoorlatende laag	112
5.3.5	Effect lengte veenlaag	114
5.4	Evaluatie	118
5.4.1	Metingen	118
5.4.2	Berekeningen	119
5.5	Conclusies detailmodellering	120
6	Aanvullende peilbuisanalyse	121
7	Evaluatie en conclusies grondwateranalyse	127

In dit rapport zijn namen van betrokkenen, adressen van onderzochte panden en andere privacygevoelige informatie geanonimiseerd of verwijderd.

1 Inleiding

Deze bijlage van het hoofdrapport beschrijft de grondwateranalyse die is uitgevoerd voor het onderzoek naar oorzaken van opgetreden schades bij de panden langs het Kanaal Almelo – De Haandrik.

De belangrijkste vraag die met deze analyse beantwoord moeten worden, is:

Kan er zich een situatie hebben voorgedaan waarbij een grondwaterverhang bij de panden is opgetreden dat piping kan veroorzaken?

Om deze vraag te kunnen beantwoorden, zijn op 12 locaties meetraaien ingericht en is bij een van deze meetraaien een zeer gedetailleerd grondwatermodel opgezet. De metingen zijn uitvoerig geanalyseerd en met het gedetailleerde grondwatermodel zijn scenarioberekeningen uitgevoerd om situaties te simuleren die de grondwaterverhangen bij de panden kunnen beïnvloeden:

- De huidige situatie met een groot maaiveldverhang, gekalibreerd op basis van de meetresultaten;
- Een situatie met een lekke damwand over een grote lengte van het kanaal;
- Een situatie die kan optreden als na baggeren van het kanaal de bodem:
 - o Snel weer dichtslibt;
 - o Langzaam weer dichtslibt;
- Een situatie die kan zijn opgetreden in een extreem droge zomer.
- Een situatie die kan optreden als een korte betonnen damwand wordt vervangen door een langere stalen damwand, die:
 - o Alleen dieper in het onderliggende watervoerend pakket steekt;
 - o Daarbij een slecht doorlatende laag doorsnijdt, die onder de gehele breedte van het kanaal aanwezig is en zich in de richting van het kanaal over een langer traject uitstrekt.

Een tweede vraag die beantwoord moest worden, is:

Kan kanaalpeilverlaging de grondwaterstand dusdanig verlagen dat er op zeker geen grote grondwaterverhangen bij de panden meer kunnen optreden na werkzaamheden als baggeren en door mogelijke optredende lekkende damwanden?

Het effect van kanaalpeilverlaging op de omgeving van het kanaal is onderzocht met een bestaand regionaal grondwatermodel dat met enkele kleine aanpassingen daarvoor geschikt is gemaakt. Daarbij is het effect van een kanaalpeilverlaging van 0.5 m en van 1 m onderzocht voor een groot aantal combinaties van verschillende weerstanden van damwand en kanaalbodem.

De beschouwde metingen zijn onder te verdelen in metingen die specifiek voor dit onderzoek zijn verricht en metingen die al eerder zijn gedaan. De berekeningen zijn verricht met een regionaal model voor het gehele onderzoeksgebied en een detailmodel voor een specifieke locatie, Panden 2, 18 en 16. Op grond van het verhang in maaiveld over het pand is dit de locatie met een van de grootste potenties op het optreden van piping.

De metingen die specifiek voor dit onderzoek zijn verricht, zijn uitgebreid beschreven in de factsheets per raai en daarom niet nogmaals in dit rapport opgenomen. De metingen bij Panden 2, 18 en 16 zijn wel gebruikt in de detailmodellering en de samen met de andere metingen in deze grondwateranalyse.

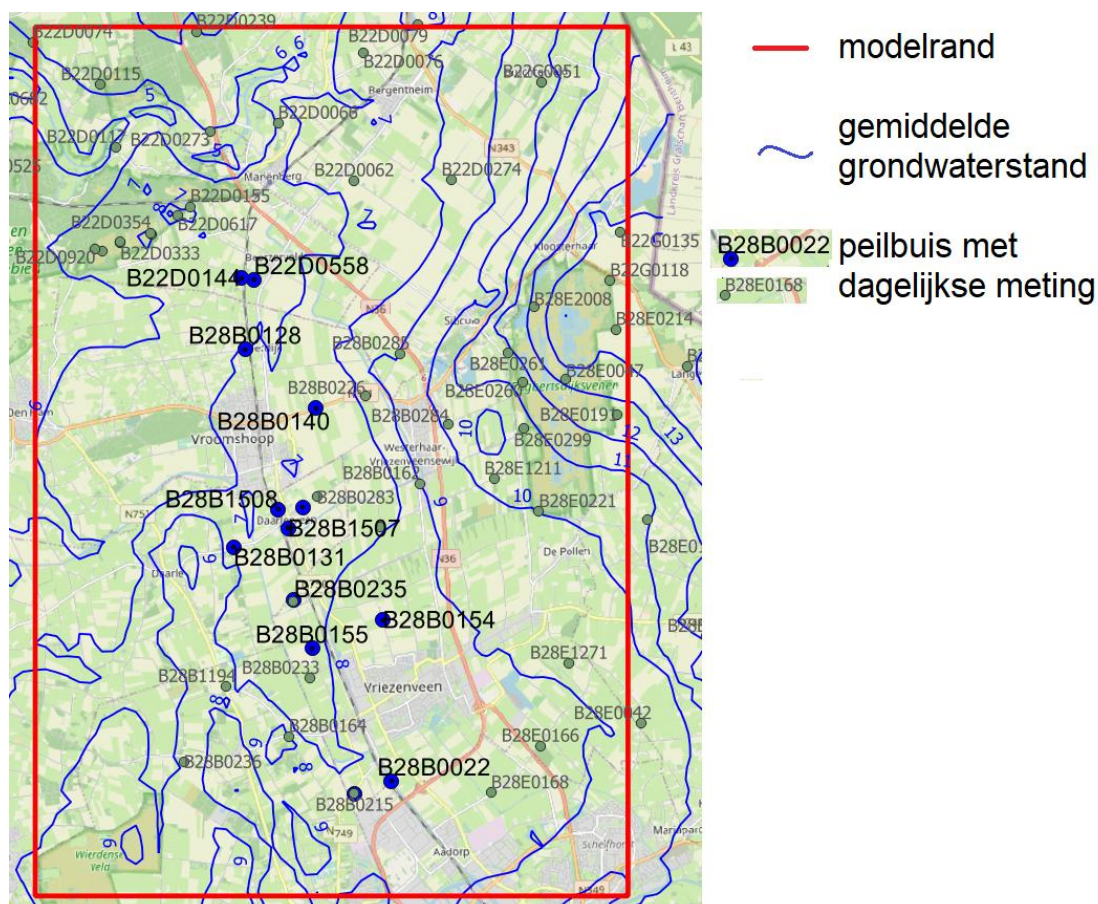
Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft de aanpak van de modelleringen. Hoofdstuk 3 bevat de analyse met het regionale model. De bepaling van het effect van kanaalpeilverlaging voor verschillende combinaties van bodemweerstand en damwandweerstand die met dit model is uitgevoerd, staat in hoofdstuk 4. In hoofdstuk 5 staat het detailmodel beschreven en de analyses die daarmee zijn uitgevoerd. Hoofdstuk 6 beschrijft een heranalyse van enkele peilbuismetingen ten tijde van de baggerwerkzaamheden in 2011-2012. Hoofdstuk 7 tenslotte bevat een evaluatie van de voornaamste bevindingen en conclusies.

2

2.1 Regionale modellering

Er is voor dit onderzoek gebruik gemaakt van een regionaal grondwatermodel, dat gebaseerd is op het MIPWA model voor Noord Nederland (<https://www.mipwa.nl>). Figuur 2-1 geeft een overzicht van de ligging van het regionale model. Het model is gemaakt in MODFLOW (<https://www.usgs.gov/software/modflow-2005-usgs-three-dimensional-finite-difference-ground-water-model>) en opgebouwd uit 9 watervoerende pakketten en 8 weerstand biedende lagen daartussen. De ondergrens van het model bestaat uit een ondoorlatende basis. Aan de bovenzijde wisselt het model water uit met de atmosfeer. De uitwisseling wordt bepaald met MetaSWAP (https://content.oss.deltares.nl/imod/iMOD_Manual_actual/imod-um-CAP-MetaSWAP-Unsaturated-zone-module.html), een model voor de onverzadigde zone.



Figuur 2-1 Locatie van het regionale model. De rode rechthoek geeft de modelgrenzen weer. De blauwe lijnen geven een indicatie van de gemiddelde grondwaterstand (berekend met het landelijk grondwatermodel LHM 4.1). De blauwe en groen stippen geven de locaties van peilbuizen met frequente waarnemingen (elk uur tot elke dag).

Het kanaal in het regionale model is gecheckt op oppervlaktewaterpeilen en hydraulische weerstanden tussen dit oppervlaktewater en het omliggende grondwater. In dat kader is een aantal benodigde aanpassingen gedaan aan waterpeil en weerstand van kanaalbodem en damwanden. Uit een vorige studie voor dit kanaal kwam naar voren dat de weerstand van de kanaalbodem waarschijnlijk in de orde van 100 dagen ligt en de weerstand van de

damwanden in de orde van 10000 dagen. Deze waarden zijn toegekend aan het regionale model.

Met dit tijdsafhankelijke model is de periode 2009 t/m 2018 doorgerekend met tijdstappen van 1 dag. Elke dag wordt de grondwateraanvulling berekend met MetaSWAP. Op deze wijze zijn 2 berekeningen uitgevoerd. Een voor de meest waarschijnlijke huidige situatie (met een bodemweerstand van 100 dagen en een damwandweerstand van 10000 dagen) en een met een kanaalpeil verlaging van 50 cm. Hieruit is het effect van kanaalpeilverlaging op de grondwaterstand bepaald. Daarbij is gekeken naar de gemiddelde verlaging en naar de laagste en de hoogste berekende grondwaterstanden. Ook is het verloop in de tijd van de grondwaterstand en de verandering daarvan in de aanwezige meetpunten onderzocht. Ter validatie van het model zijn voor de aangenomen huidige situatie de berekende grondwaterstanden vergeleken met de gemeten waarden. Onder validatie wordt in dit document een plausibiliteitscontrole op de modeluitkomsten verstaan.

Omdat dit soort tijdsafhankelijke berekeningen lang duren, is het regionale model ook gebruikt om een groot aantal stationaire berekeningen mee uit te voeren. Daartoe is de grondwateraanvulling over de periode 2009 t/m 2018 uit het metamodel gemiddeld en als invoer voor het stationaire model gebruikt. Ter validatie van het model zijn de berekende stationaire grondwaterstanden voor de aangenomen huidige situatie (bodem 100 d, damwand 10000 d) vergeleken met de gemiddelde gemeten grondwaterstanden in de meetpunten.

Met het stationaire model is voor een groot aantal varianten het effect van kanaalpeil verlaging doorgerekend. De doorgerekende varianten zijn alle mogelijke combinaties van:

- Bodemweerstand: 1 d, 10 d, 100 d en 1000 d;
- Damwandweerstand: 1 d, 10 d, 100 d, 1000 d en 10000 d;
- Kanaalpeilverlaging: 50 cm en 1 m.

Hoofdstuk 3 beschrijft uitvoerig de modelaanpassingen. Hoofdstuk 4 behandelt de resultaten van de uitgevoerde berekeningen.

2.2 Detailmodellering

Omdat het opzetten van een detailmodel, gevoeligheidsanalyses, kalibratie, validatie en betrouwbaarheidsanalyse van totaal nieuwe modellen veel tijd kost en omdat het in deze situatie extreem belangrijk is een zo groot mogelijke nauwkeurigheid te bereiken zijn voor de detailmodellering in eerste instantie 2 locaties geselecteerd. Het zijn locaties waar we inschatten dat de grootste kans bestaat op het optreden van grote verhangen in het grondwater, of wel in de huidige situatie, of wel in een in het verleden mogelijk opgetreden andere situatie. Uiteindelijk is er slechts 1 locatie (Pand 2, 18 en 16) in detail doorgerekend. Voor de tweede geselecteerde locatie (100 m ten zuiden van Pand 14), waar over een langer traject een lekke damwand is aangetroffen, bleken de beschikbare hoeveelheid metingen uiteindelijk ontoereikend om het model te kunnen kalibreren. De situatie met lekke damwand is uiteindelijk nagebootst met het gekalibreerde detailmodel van Panden 2, 18 en 16.

Voor het detailmodel is gebruik gemaakt van aanvullende data (t.o.v. het regionale model) op perceelsniveau, die in het kader van dit onderzoek zijn verzameld. Het betreft:

- Geologische laagopbouw en lokale variatie daarin, vooral van veen-, klei- en leemlagen (boringen en sonderingen en interpretatie daarvan door geologische experts).
- Tijdreeksen van:
 - o Waterstand in het kanaal en de variatie daarvan;

- o Stijghoogte direct naast het kanaal, ondiep (bovenste paar meter) en diep (onder damwand niveau);
- o Stijghoogte direct voor het pand, ondiep en diep;
- o Stijghoogte direct achter het pand, ondiep en diep;
- o Stijghoogte ca 20 m achter het pand, ondiep en diep;
- o Waterstand in een watervoerende sloot verder achter het pand;
- o Neerslag en verdamping.
- Zeer gedetailleerd maaiveldniveau (AHN3, opgeschaald naar 50 bij 50 cm).
- Bodemhoogte van aanwezige sloten.
- Niveau en locatie van eventueel aanwezige drainage en riolering rondom het pand.
- Niveau van eventueel aanwezige kruipruimtes onder het pand.

Doel van de detailmodellering is om de grondwaterstroming zo nauwkeurig mogelijk te kunnen beschrijven met een grondwatermodel. Dit is nodig om vast te kunnen stellen wat het effect is geweest van het baggeren en om een gedetailleerd inzicht te verkrijgen in de grootte en richting van aanwezige grondwaterverhangen.

Bij de modellering is gebruik gemaakt van 2 typen datasets:

- 1 Geologische metingen: eenmalig
- 2 Hydro(geo)logische metingen: groeiende tijdseries

Op basis van de geologische metingen is de laagopbouw van de detailmodellen vastgesteld. Op basis van de hydrologische metingen vindt kalibratie van de modelparameters plaats. De uitgevoerde kalibratie is afhankelijk van de hoeveelheid aangeleverde betrouwbare metingen. Deze metingen zijn medio juni 2021 begonnen.

De uitgevoerde stappen in het modelleringsproces van de detailmodellen zijn:

1. Analyseren van geologische metingen;
2. Modelconcept maken op basis van de analyse van de geologische metingen:
 - a. Modelareaal en vorm.
 - b. Aantal lagen.
 - c. Celgrootte.
 - d. Randvoorwaarden.
 - e. Stationair / Niet-Stationair.
 - f. Onverzadigde zone model / freatische bergingscoëfficiënt.
 - g. Tijdstapgrootte.
 - h. Minimum periode.
3. Modelbouw:
 - a. Modelgrid maken: aantal cellen in lengte en breedte richting.
 - b. Schematisatie: aantal lagen, laterale verschillen per laag.
 - c. Parameterwaarden toekennen (bv. $k_{H_zand} = 10$ m/d).
 - d. Realistische bandbreedtes van de parameterwaarden bepalen (bv. $k_{H_zand} = 5 - 15$ m/d).
4. Randvoorwaarden definiëren:
 - a. Modelranden in horizontale richting (per laag): H-rand, Q-rand, Qnul-rand.
 - b. Onderrand: kwelflux?
 - c. Bovenrand: neerslag – verdamping, afstroming over verharding (daken en wegen).
 - d. Drainagemiddelen: drains, riolering, sloten, maaiveld, kruipruimtes (?).
5. Gevoelighedsanalyse modelparameters: voor welke parameters zijn de modelresultaten gevoelig, en hoe kunnen we daar de bandbreedte van beperken?
6. Analyseren van de eerste set hydrologische metingen.
7. Eerste modelkalibratie op basis van de analyse van de hydrologische metingen.

8. Betrouwbaarheidsanalyse eerste modelresultaten, met behulp van de eerder bepaalde bandbreedte van de gevoelige parameters. Hierdoor worden de bandbreedtes door de hydrologische metingen verder beperkt. Deze analyse levert een bandbreedte van de eerste modelresultaten.
9. Eerste modelresultaten analyseren: kunnen op basis hiervan al uitspraken gedaan worden / zaken uitgesloten worden?
10. Aanvullende hydrologische metingen analyseren.
11. Modelverificatie op basis van analyse van aanvullende hydrologisch metingen.
12. Meest waarschijnlijke grondwaterstroming rapporteren.
13. Resultaten bediscussiëren.
14. Op basis van discussie aanvullende zaken onderzoeken met het grondwatermodel dan wel proberen eventuele onduidelijkheden nader uit te zoeken.

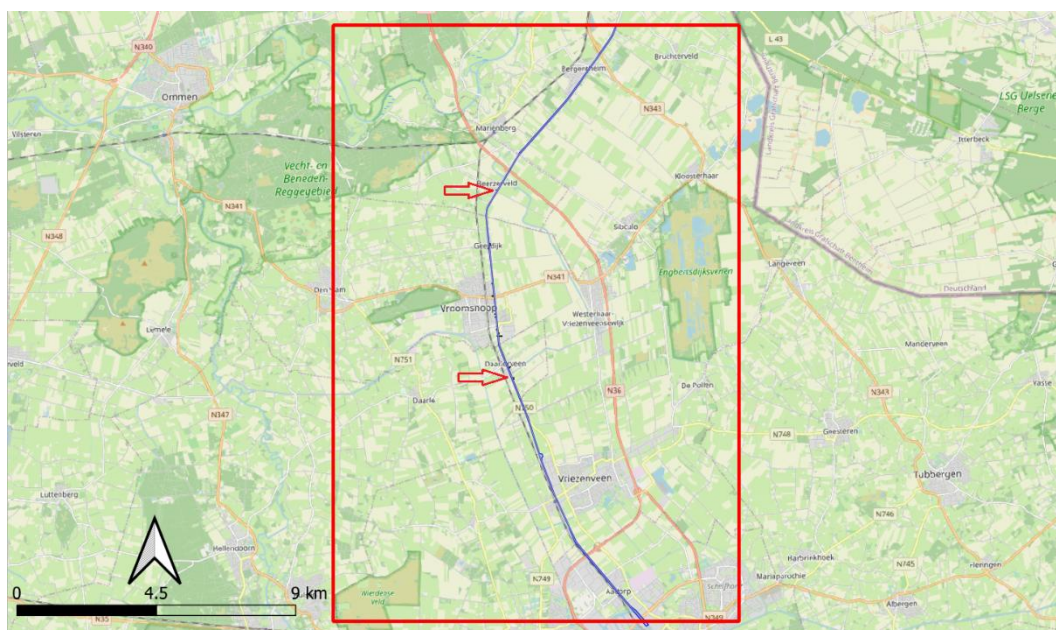
Hoofdstuk 5 beschrijft uitvoerig de modelopzet van de detailmodellering en de resultaten van de uitgevoerde berekeningen.

3 Analyse met het regionale model

Dit hoofdstuk beschrijft de analyse die is uitgevoerd met het regionale grondwatermodel. Daarvoor wordt eerst de opzet van het model beschreven en de aanpassingen die zijn gedaan om het kanaal zo goed mogelijk in het model te krijgen.

3.1 Beschrijving van het regionale model

Het regionale model beslaat een oppervlak van 13.1 bij 19.2 km (Figuur 3-1). Het Kanaal Almelo – De Haandrik dat in het model is opgenomen, beslaat een lengte van bijna 22 km. In het zuiden beginnend in Almelo, 900 m ten zuiden van sluis Aadorp, en in het noorden eindigend op ca 10 km ten zuiden van sluis De Haandrik. Het onderzoeksgebied loopt ongeveer van Daarleveen in het zuiden tot Beezerveld in het noorden (de twee rode pijlen in Figuur 3-1).

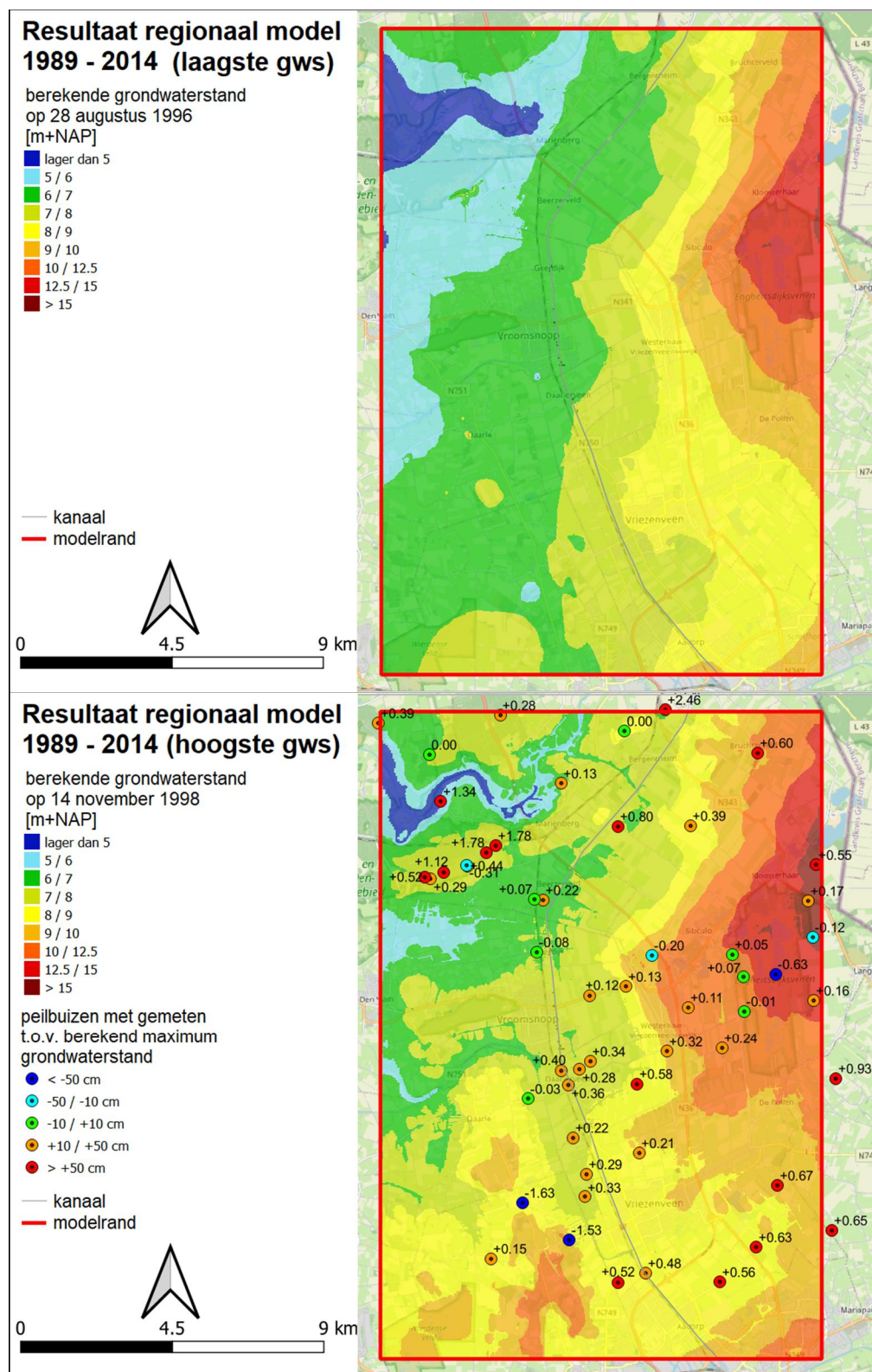


Figuur 3-1 Locatie van het regionale model. De rode rechthoek geeft de modelgrenzen weer. De blauwe lijn geeft de ligging van het kanaal weer. De twee rode pijlen geven de locaties van de meest noordelijke en meest zuidelijke onderzochte panden weer.

Als basis is het regionale model gebruikt dat tijdens de vorige studie is gebruikt. Dit regionale model is uit het Noord Nederland model (MIPWA) getrokken en besloeg de rekenperiode van 1989 tot en met 2014. Figuur 3-2 geeft een overzicht van de grondwaterstanden voor de met dit model berekende natste en droogste periode, eindigend respectievelijk medio november 1998 en eind augustus 1996. Figuur 3-3 geeft het verschil tussen deze twee berekende grondwaterstanden en daarmee een orde van grootte van de lokale variatie die kan zijn opgetreden. In deze figuren zijn ook de maximaal gemeten grondwaterstanden (Figuur 3-2) en het verschil tussen hoogst en laagst gemeten peil (Figuur 3-3) over de periode 2005 tot en met 2018 weergegeven.

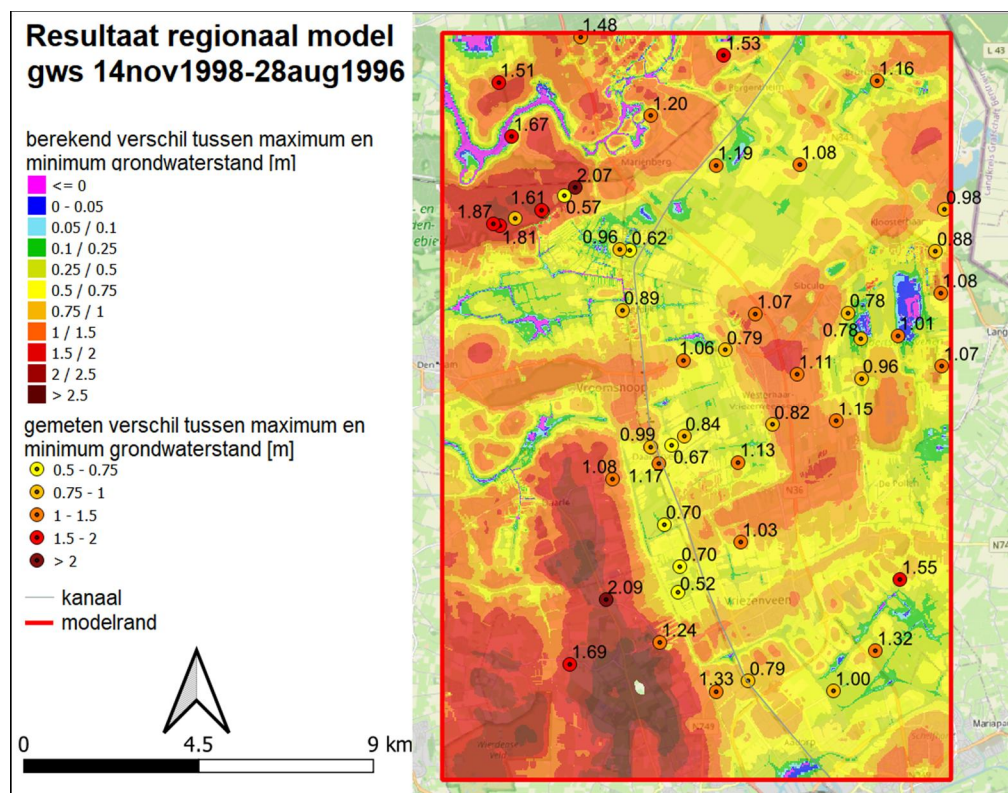
Het blijkt dat in het MIPWA model het waterpeil in een deel van het kanaal ruim 80 cm lager is aangehouden dan het werkelijke kanaalpeil (Figuur 3-2). Dat blijkt ook duidelijk uit de berekende grondwaterstanden, die daar in dezelfde mate van afwijken. Het enige meetpunt dat in deze regio in de buurt van het kanaal ligt geeft een 80 cm hogere gemeten

grondwaterstand dan de maximaal berekende waarde. In de andere meetpunten is dit verschil een stuk kleiner.



Figuur 3-2 Laagste (boven) en hoogste (onder) grondwaterstand over de periode 1989 t/m 2014, zoals berekend met het vorige regionale model. De meetpunten in de onderste figuur geven het verschil met de maximaal gemeten grondwaterstand over de periode 2005 t/m 2018 (gemeten – berekend).

De verschillen tussen de hoogste en laagste metingen komen over het algemeen redelijk overeen met de berekende verschillen (Figuur 3-3).



Figuur 3-3 Verskil tussen hoogste en laagste grondwaterstand over de periode 1989 t/m 2014, zoals berekend met het vorige regionale model. De meetpunten in de figuur geven het verschil tussen de maximaal en de minimaal gemeten grondwaterstand over de periode 2005 t/m 2018.

Uit dit regionale model is in de vorige studie een detail model gemaakt voor een kleiner gebied (3 bij 8 km). In dat detail model zijn de waterpeilen van het kanaal en de weerstanden van de kanaalbodem en de damwanden aangepast aan de meest waarschijnlijke situatie. Voor de in voorliggend rapport beschreven studie is hetzelfde gedaan voor het complete regionale model. De beschrijving van de modelaanpassingen van voorliggend onderzoek staat in paragraaf 3.1.2.

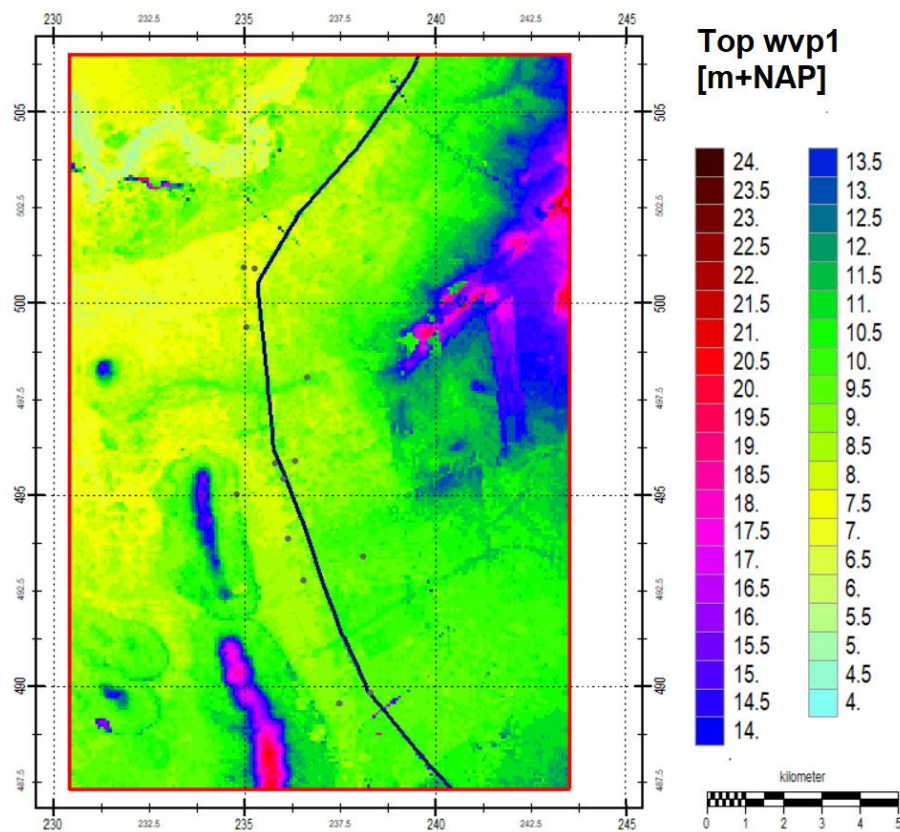
3.1.1 Model opbouw

Het regionale model bestaat uit 9 watervoerende pakketten met daartussen 8 slecht doorlatende lagen. Figuur 3-4 geeft de ligging van de bovenzijde van het model, het maaiveldniveau, weer. Figuur 3-5 geeft het niveau van de geohydrologische basis. Figuur 3-6 geeft de hieruit resulterende dikte. Die varieert van slechts 25 m in het zuidoosten van het model tot ruim 125 m in het noordwesten van het model. Figuur 3-18 geeft een overzicht van het gezamenlijke doorlaatvermogen van de watervoerende pakketten in het model. Figuur 3-19 doet hetzelfde voor de gezamenlijke hydraulische weerstand van de al dan niet geschematiseerde tussenliggende weerstand biedende lagen. Laatstgenoemde figuur laat zien dat er in grote delen in de zuidelijke helft van het kanaal weinig weerstand biedende lagen voorkomen en hier dus feitelijk sprake is van 1 groot watervoerend pakket waar het kanaal in de bovenkant doorheen snijdt.

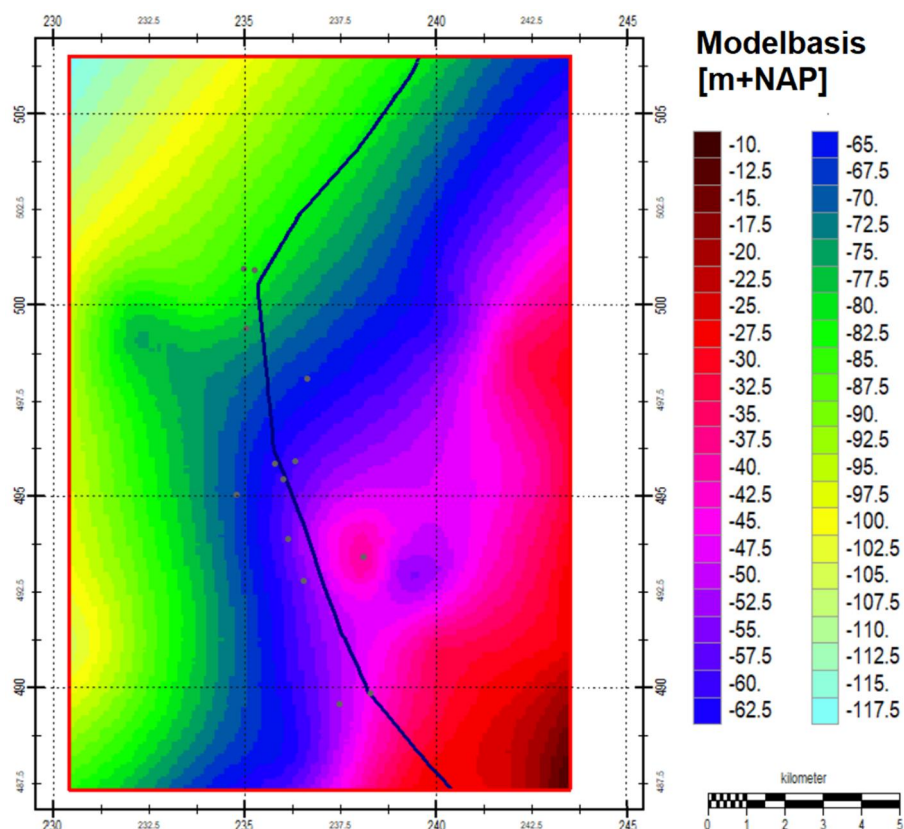
Slecht doorlatende lagen 2, 3, 4 en 5 hebben een fysieke dikte en bijhorende hydraulische weerstand (Figuur 3-10, Figuur 3-12, Figuur 3-14 en Figuur 3-16). De andere slecht doorlatende lagen zijn schematisch en gebaseerd op de verticale doorlatendheid, dikte (en

eventueel aanwezige storende lagen) van de boven en onderliggende watervoerende pakketten (b.v. Figuur 3-8 voor weerstand biedende laag 1).

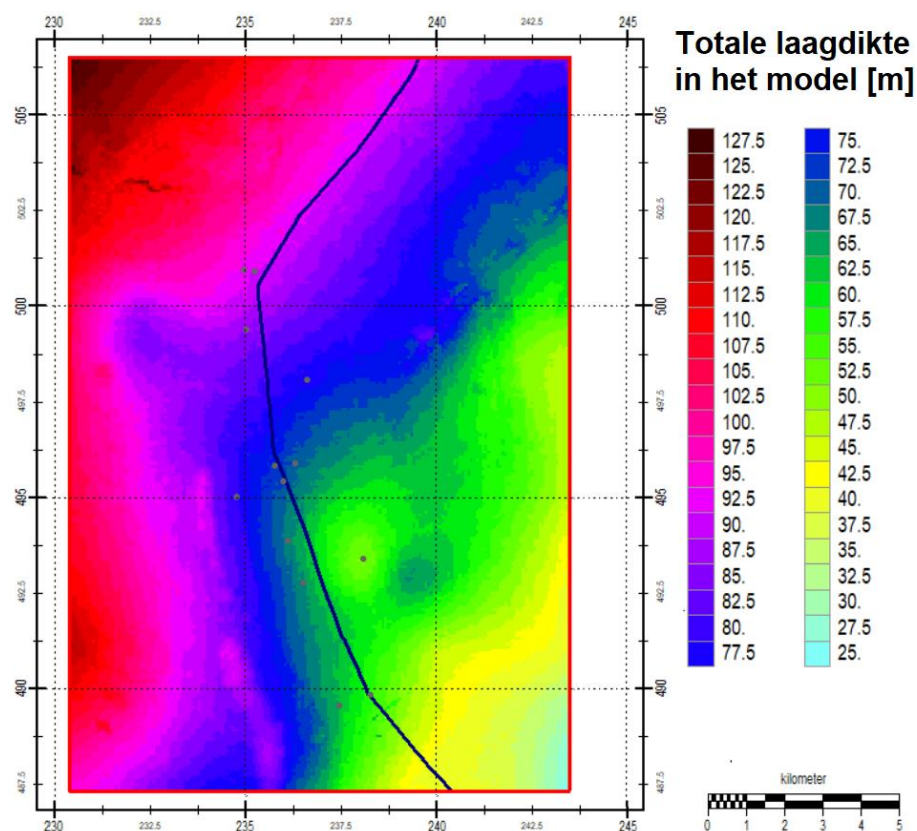
Voor een meer uitgebreide beschrijving van de geohydrologische opbouw van het model met onder andere aanwezigheid van gestuwde gebieden, bijbehorende stuwingsrichtingen en doorlatendheidsreducties van de diverse watervoerende pakketten wordt verwezen naar de modelbeschrijving van het MIPWA model. Aan het eind van deze paragraaf, onder de hierin opgenomen figuren wordt nog kort ingegaan op enkele voor het kanaal relevante zaken.



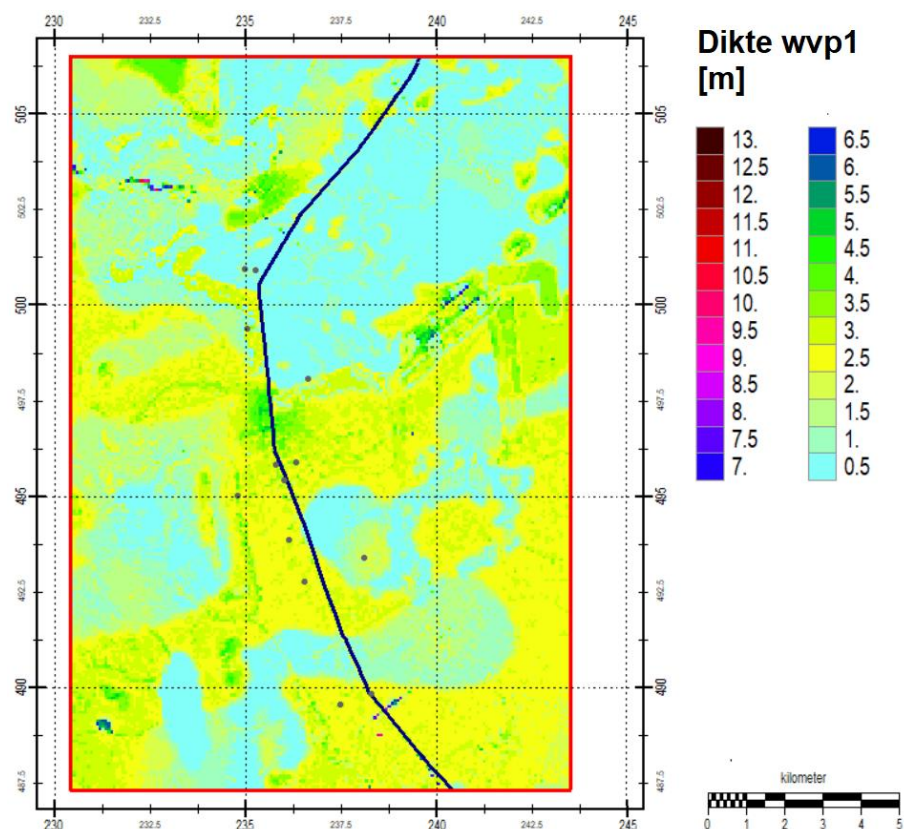
Figuur 3-4 Hoogte van de top van het bovenste (freatische) watervoerend pakket en tevens maaiveld van het regionale model.



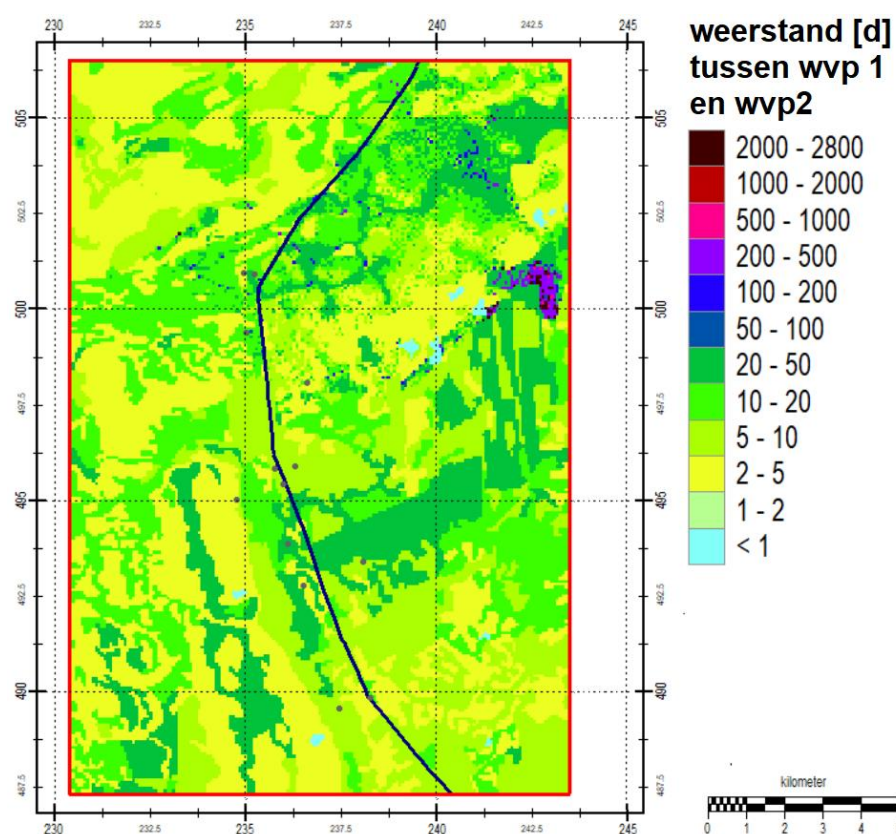
Figuur 3-5 Hoogte van de geohydrologische basis van het regionale model.



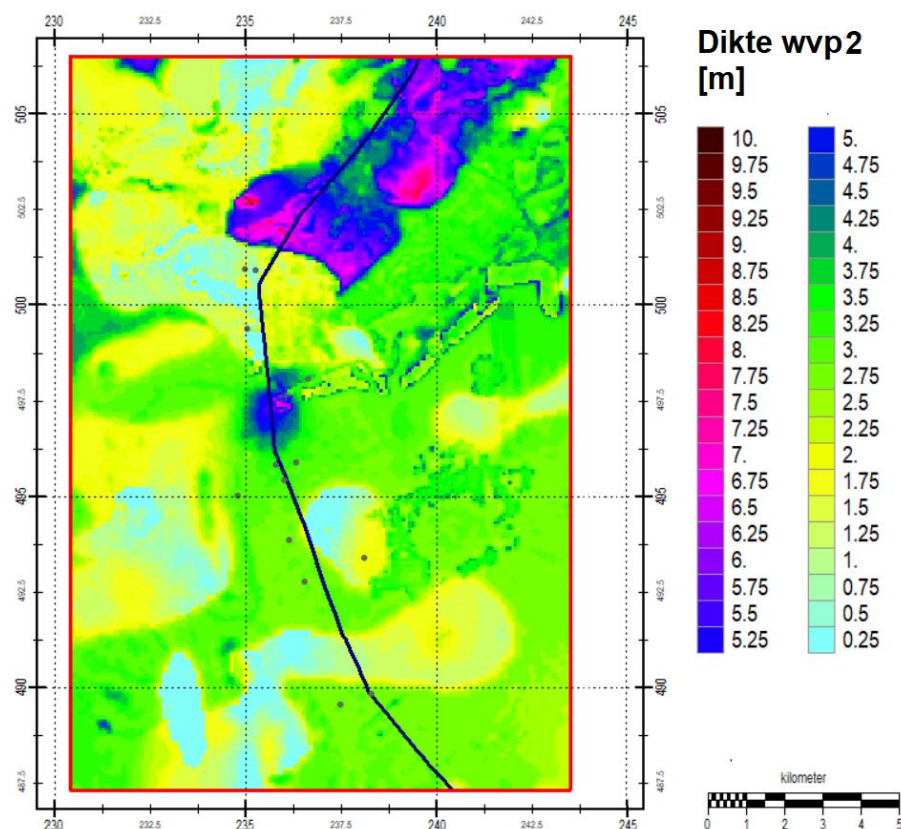
Figuur 3-6 Totale dikte van het regionale model.



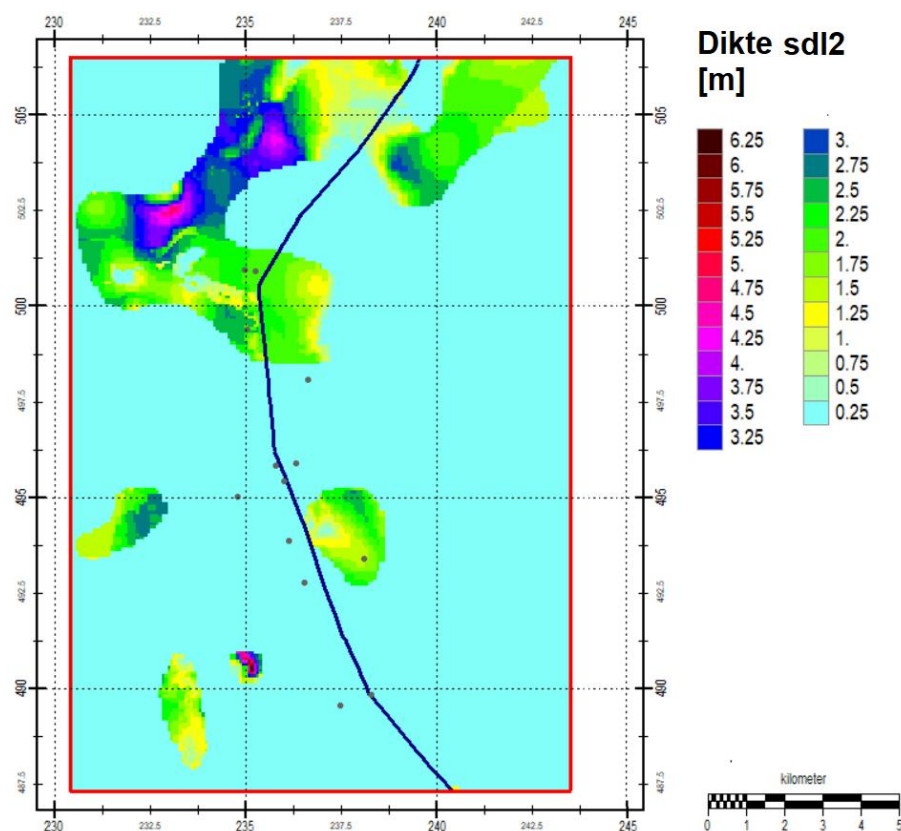
Figuur 3-7 Dikte van watervoerend pakket 1 in het regionale model.



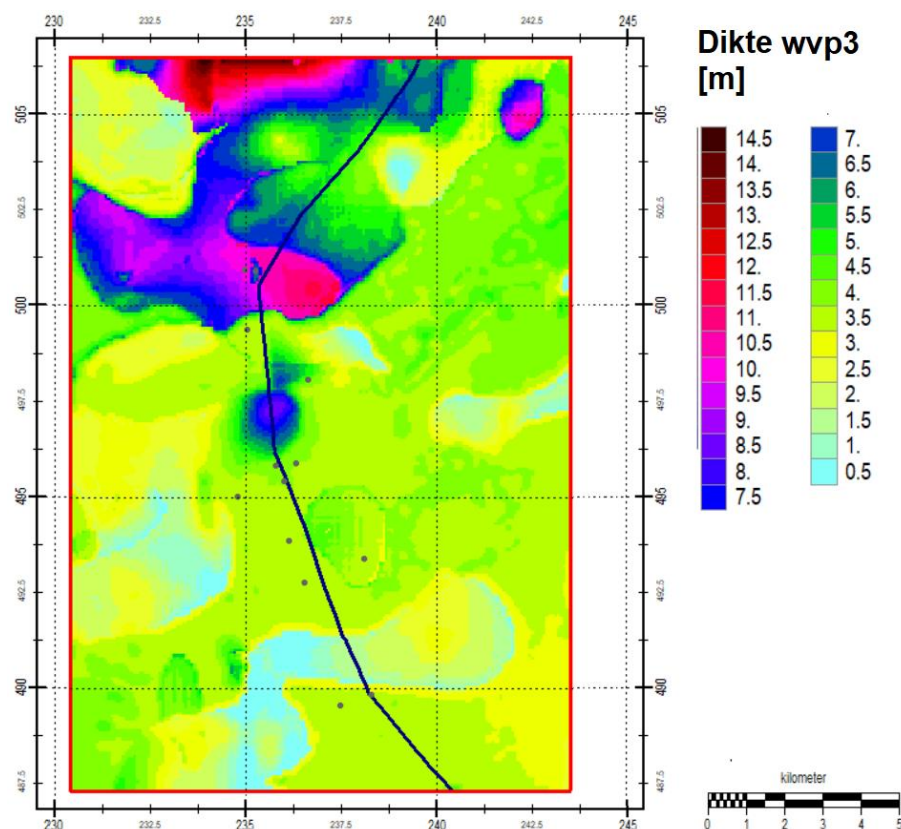
Figuur 3-8 Hydraulische weerstand tussen watervoerend pakket 1 en 2 in het regionale model.



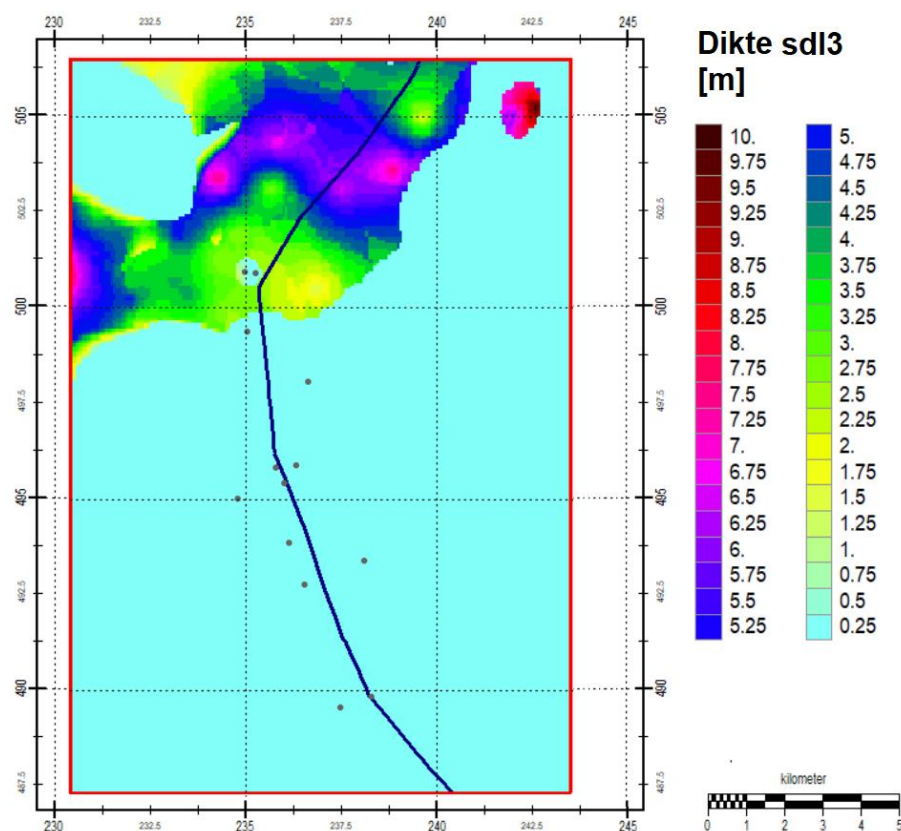
Figuur 3-9 Dikte van watervoerend pakket 2 in het regionale model.



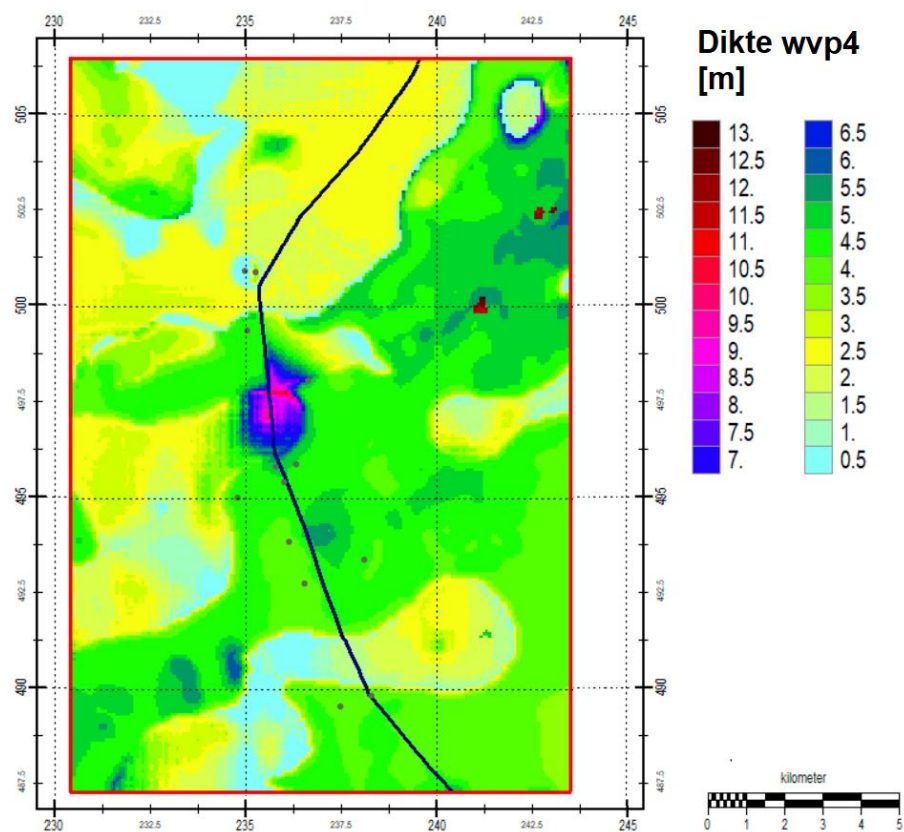
Figuur 3-10 Dikte van slecht doorlatende laag 2 in het regionale model.



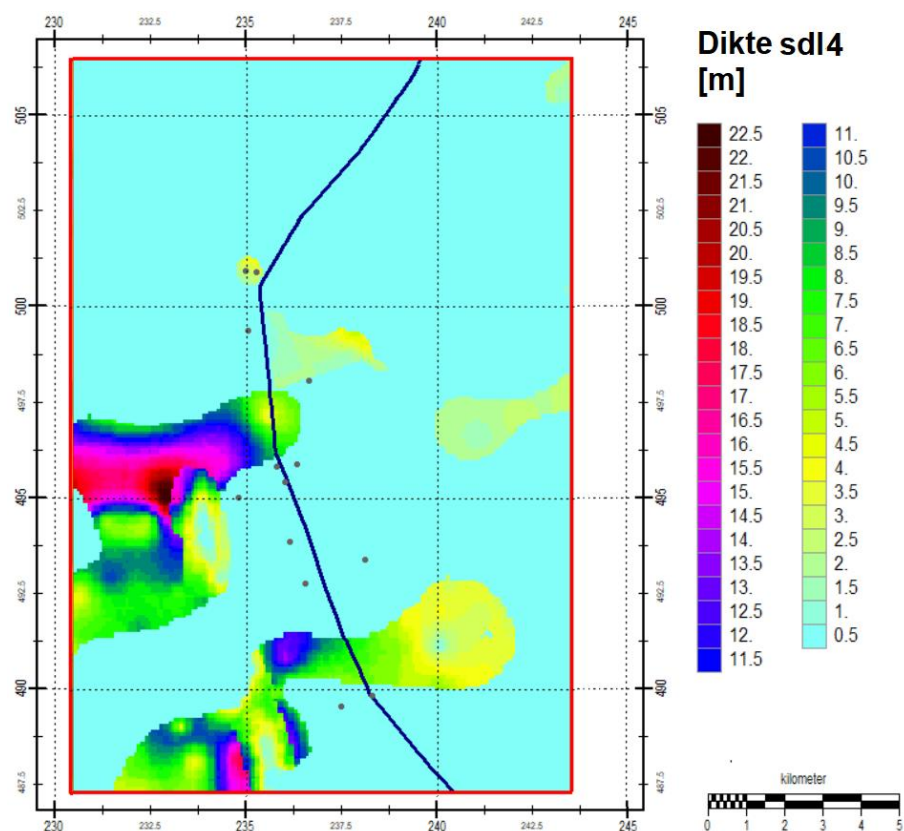
Figuur 3-11 Dikte van watervoerend pakket 3 in het regionale model.



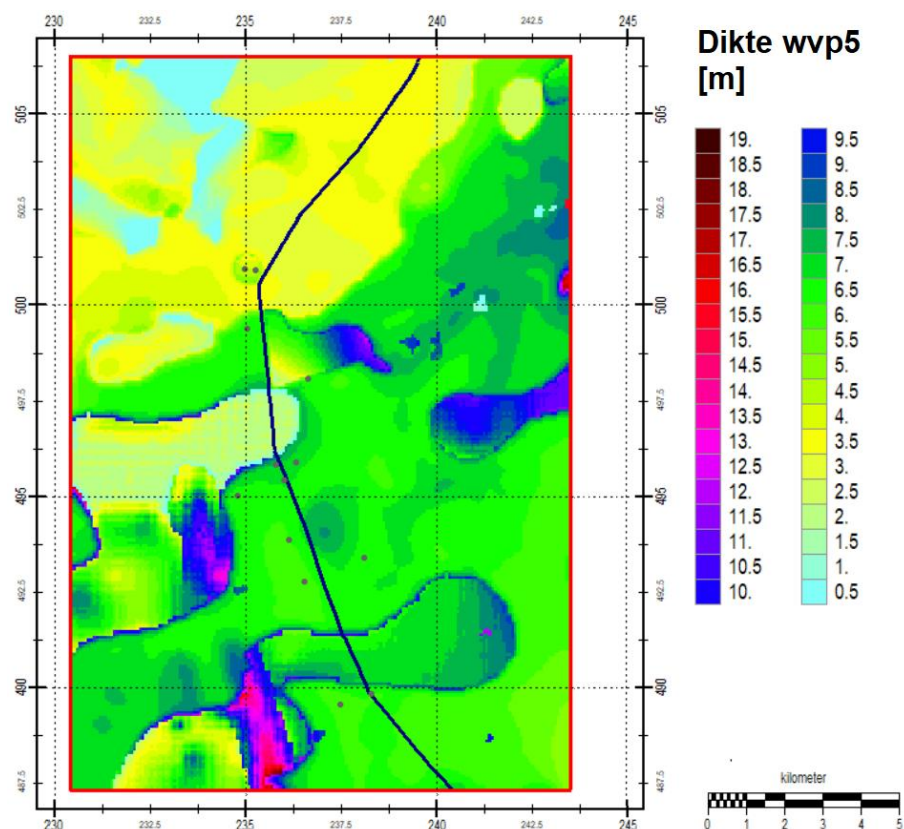
Figuur 3-12 Dikte van slecht doorlatende laag 3 in het regionale model.



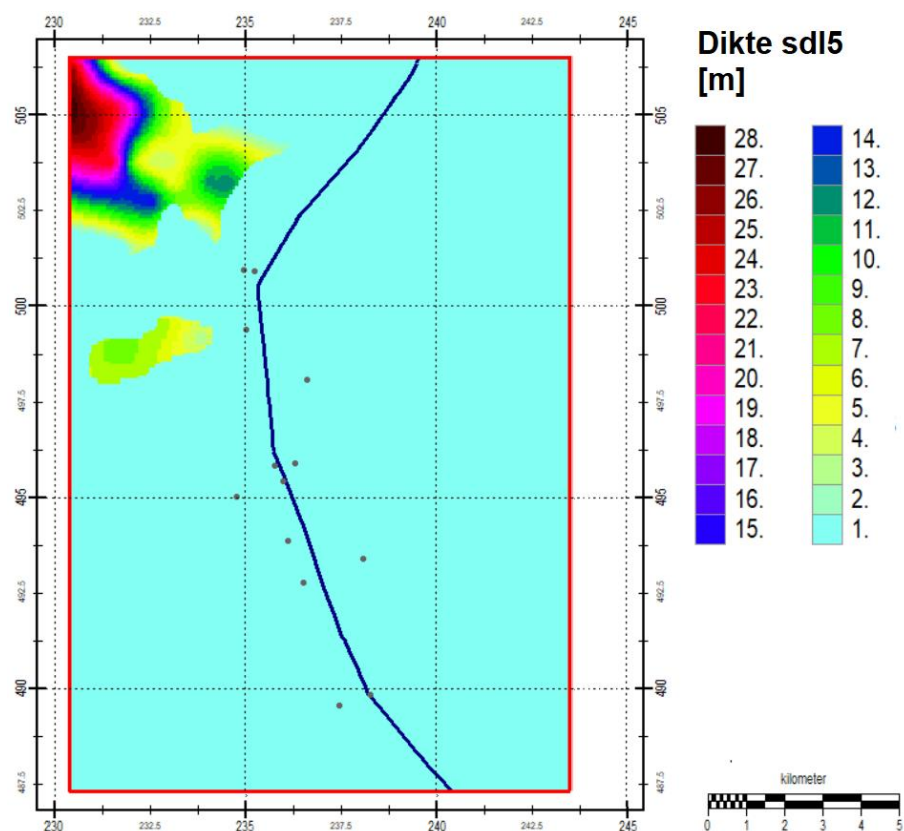
Figuur 3-13 Dikte van watervoerend pakket 4 in het regionale model.



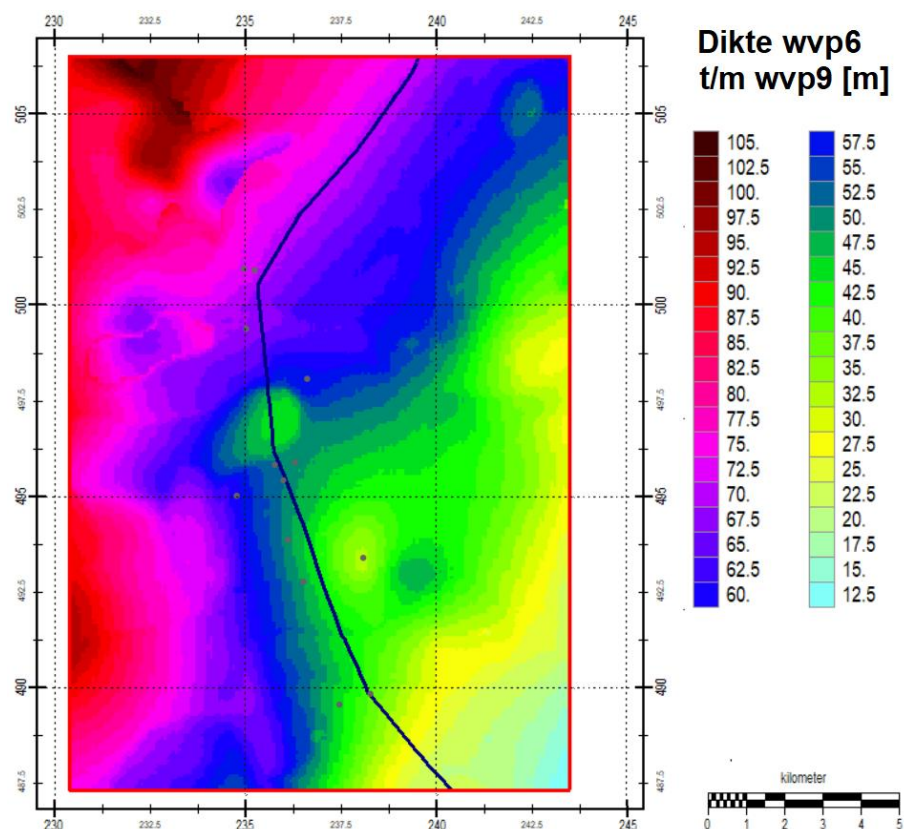
Figuur 3-14 Dikte van slecht doorlatende laag 4 in het regionale model.



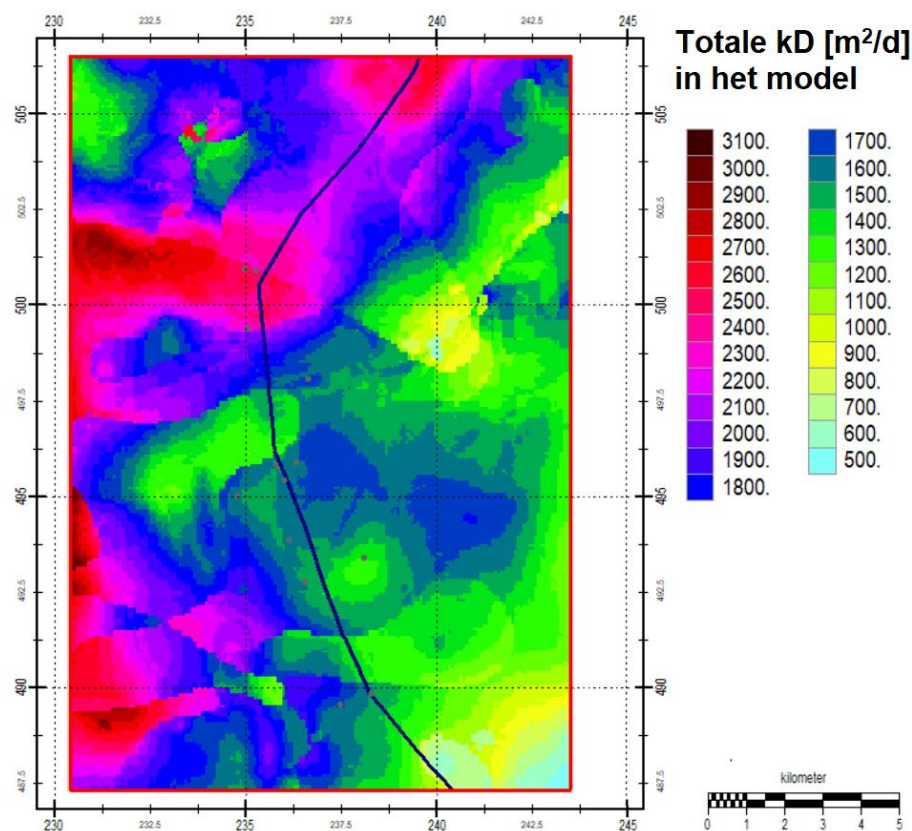
Figuur 3-15 Dikte van watervoerend pakket 5 in het regionale model.



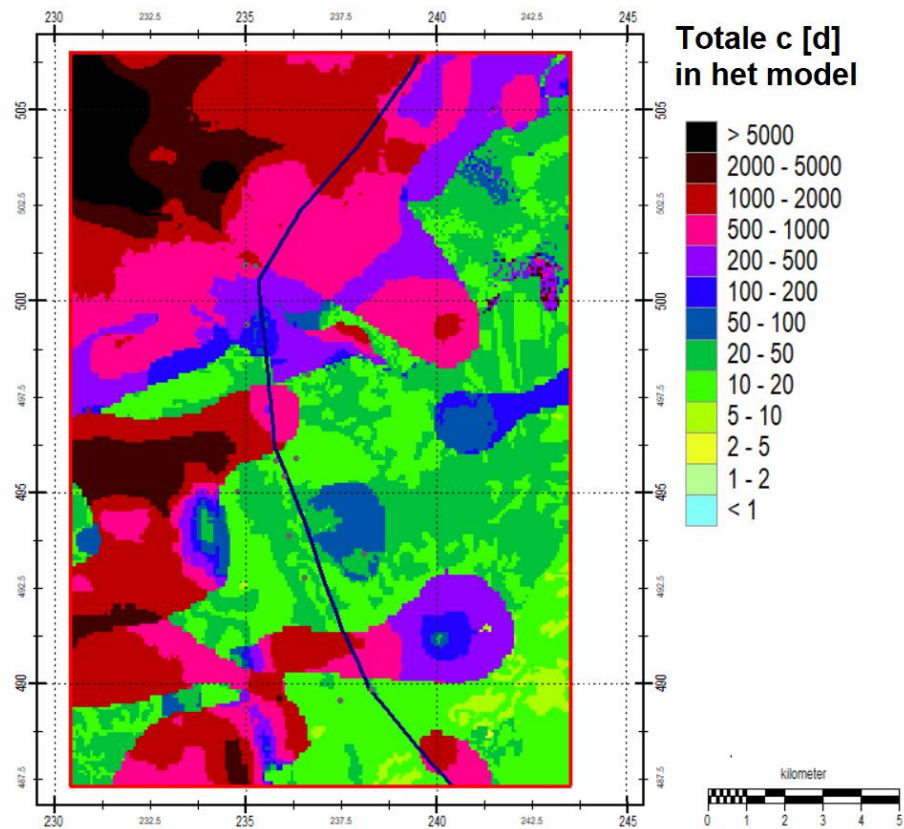
Figuur 3-16 Dikte van slecht doorlatende laag 5 in het regionale model.



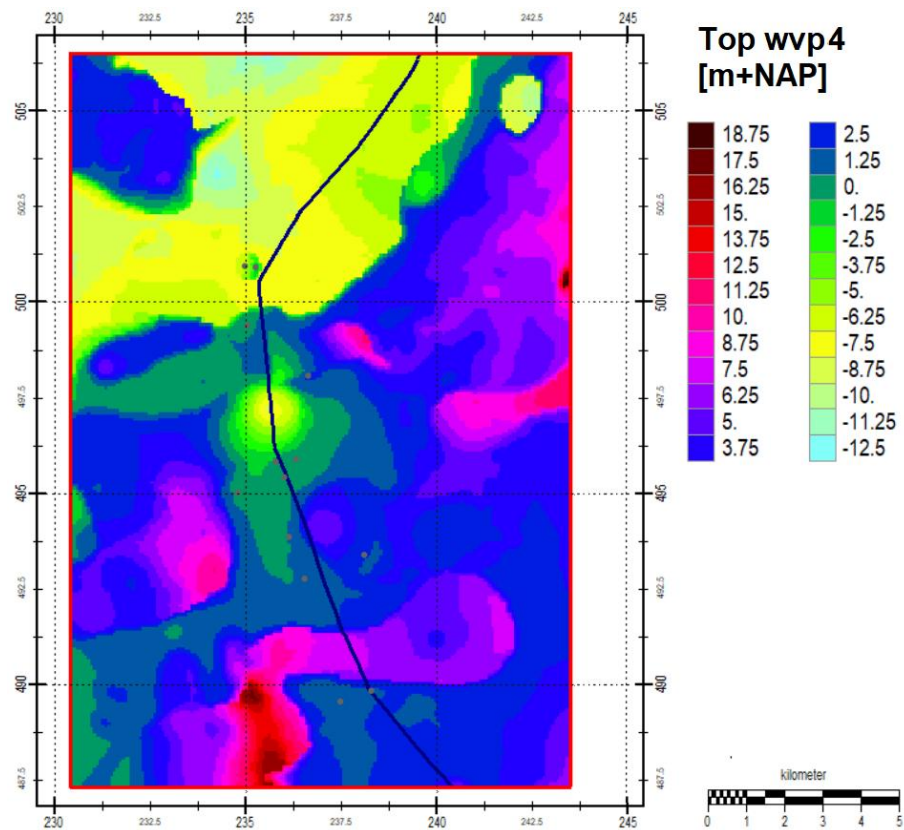
Figuur 3-17 Totale dikte van watervoerende pakketten 6, 7, 8 en 9 in het regionale model. In dit deel van het MIPWA model komen geen noemenswaardige slechtdoorlatende lagen voor tussen deze pakketten.



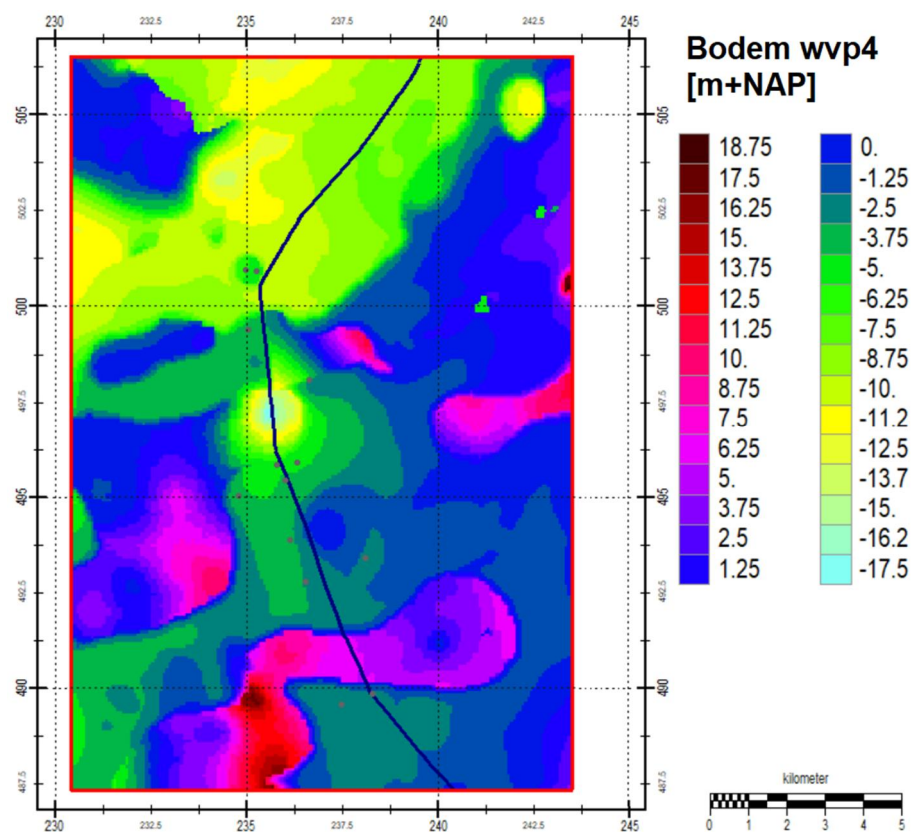
Figuur 3-18 Gesommeerde doorlaatvermogen (kD) van alle watervoerende pakketten in het regionale model.



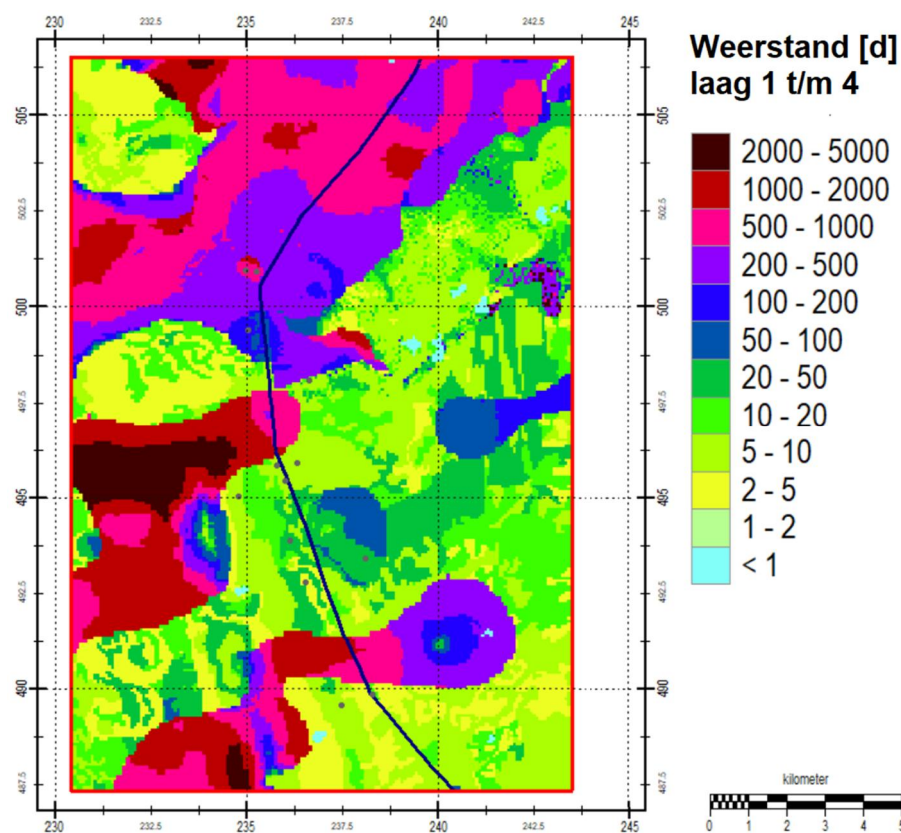
Figuur 3-19 Gesommeerde weerstand (c) van alle slecht doorlatende lagen in het regionale model.



Figuur 3-20 Top van watervoerend pakket 4 in het regionale model.



Figuur 3-21 Bodem van watervoerend pakket 4 in het regionale model. De diepste laag die door het kanaal op sommige plaatsen nog doorsneden wordt.



Figuur 3-22 Gesommeerde weerstand (c) van slecht doorlatende lagen 1 t/m 4 in het regionale model.

Voor het kanaal relevante zaken

Het Kanaal Almelo – De Haandrik, waarvan de kanaalbodem in het model op NAP +5.60 m is geschematiseerd, ligt in het model in 1 of meer van de vier bovenste watervoerende pakketten (Figuur 3-7, Figuur 3-9, Figuur 3-11, Figuur 3-13, Figuur 3-20 en Figuur 3-21). Figuur 3-20 en Figuur 3-21 geven de top en de bodem van watervoerend pakket 4 in het model weer. Hierin is te zien dat de kanaalbodem in het model alleen in het zuiden over een kleine kilometer lengte tot in dit watervoerend pakket snijdt.

Figuur 3-22 geeft een overzicht van de totale hydraulische weerstand van de vier bovenste slecht doorlatende lagen in het model. Dit is de maximale weerstand die, in het model, het gezamenlijke watervoerend pakket waar het kanaal in ligt kan scheiden van de diepere watervoerende pakketten daaronder. Alleen in de noordelijke helft van het kanaal en op de eerder genoemde locatie in het zuiden is sprake van een relevante waarde van deze potentieel aanwezige weerstand. In de overige gebieden ligt het kanaal dus feitelijk aan de bovenzijde van een groot watervoerend pakket zonder enige relevante hydraulische weerstand daartussen (Figuur 3-19).

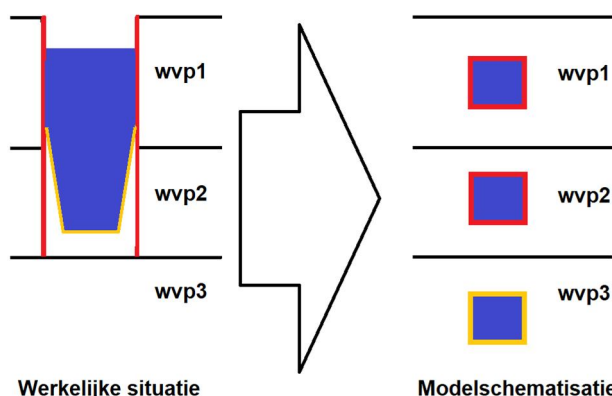
3.1.2 Model aanpassingen

Zoals reeds eerder gemeld komt het kanaalpeil in het vorige regionale model en dus ook in het Mipwa model in de noordelijke helft niet overeen met in werkelijkheid gehandhaafde kanaalpeil. Datzelfde geldt voor de bodemhoogte van het kanaal, wat relevant kan zijn als met het model scenario's met peilverlaging worden doorgerekend. Daarnaast liggen de gehanteerde hydraulische weerstanden tussen kanaal en grondwater (bodem en damwanden) in het vorige regionale model en in het Mipwa model in de orde van 3 tot 6 dagen. De vorige detailstudie resulteerde in weerstanden tussen kanaalwater en grondwater van orde 100 dagen voor de kanaalbodem en 10000 dagen voor de damwand.

Hieronder is beschreven op welke wijze het in voorliggend onderzoek gebruikte regionale model hierop is gecorrigeerd.

kanaalweerstanden

Figuur 3-23 laat zien hoe de bodem- en damwandweerstanden van het kanaal in het regionale model zijn geschematiseerd.



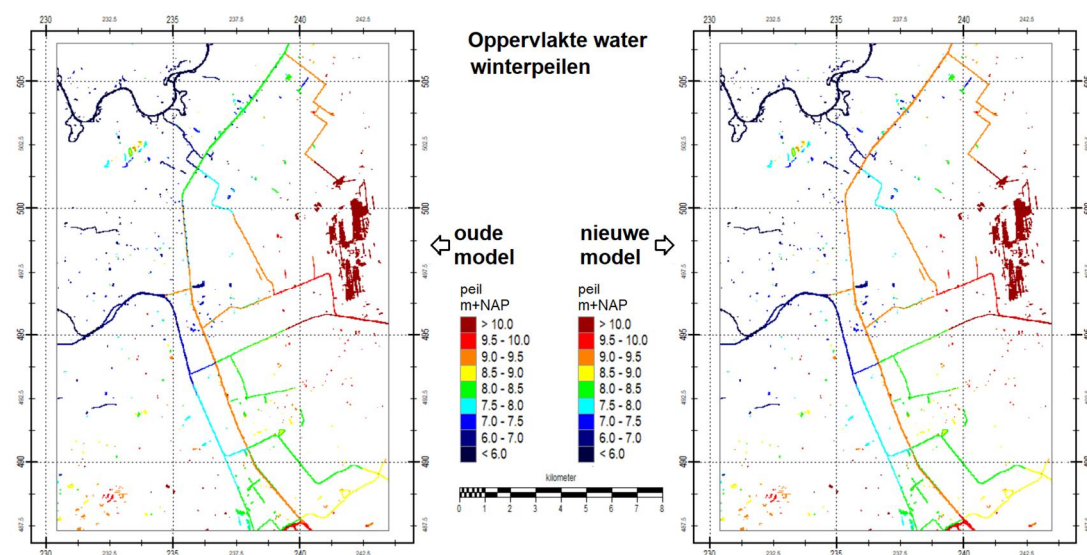
Figuur 3-23 Schematische weergave van de wijze waarop de bodemweerstand (oranje lijnen) en damwandweerstanden (rode lijnen) van het kanaal (blauwe vlakken) in het regionale model zijn opgenomen.

In het regionale model zijn de damwandweerstanden gebruikt als weerstand tussen kanaalwater en grondwater voor alle watervoerende pakketten waar het kanaal in het vorige regionale model is geschematiseerd (de rood omlijnde blauwe vlakken in het rechterdeel van Figuur 3-23). De bodemweerstand is geschematiseerd door het kanaal toe te voegen in het

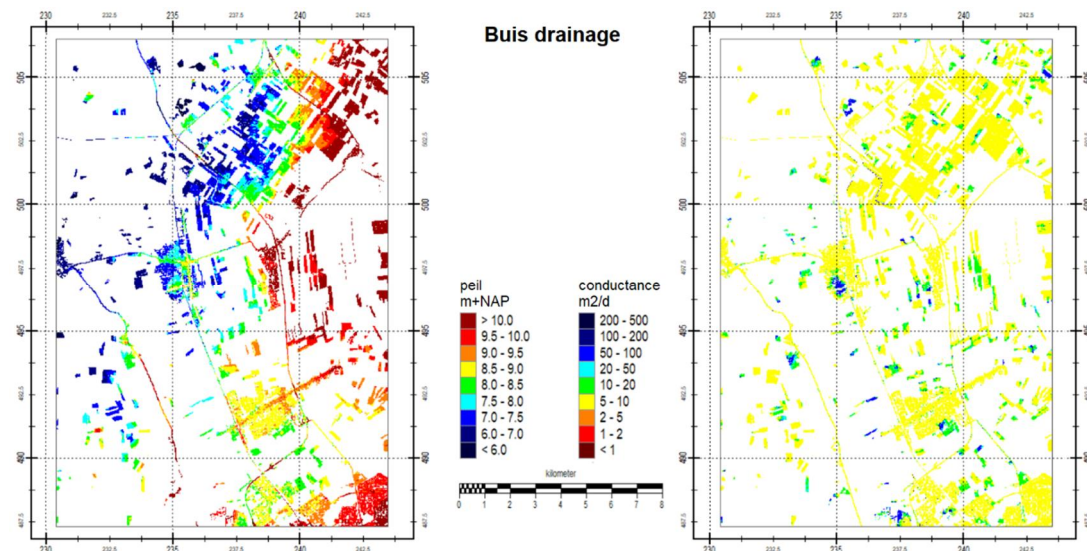
onderliggende watervoerend pakket (wvp3 in de figuur) en daar de bodemweerstand te gebruiken voor de weerstand tussen kanaalwater en grondwater (het oranje omlijnde blauwe vlak in het rechterdeel van Figuur 3-23).

Kanaalpeil en bodemhoogte

Figuur 3-24 geeft een overzicht van de oppervlaktewaterpeilen zoals die in het vorige (links) en huidige (rechts) regionale model gehanteerd worden. De belangrijkste veranderingen zijn de verbeterde kanaalpeilen ten noorden van Vroomshoop en de juiste locatie van de sluis bij Aadorp. Verder zijn bij de kruisingen met andere watergangen kleine verbeteringen doorgevoerd op locaties waar het peil van de kruisende watergang werd gehanteerd. In het model is het winterpeil van NAP +9.10 m gehanteerd als kanaalpeil ten noorden van de sluis bij Aadorp. Ten zuiden daarvan is een peil van NAP + 10.00 meter aangehouden.



Figuur 3-24 Oppervlaktewaterpeilen in het oude regionale model (links) en het nieuwe model (rechts), dat in deze studie gebruikt is.



Figuur 3-25 Buis drainage in het regionale model, met links het ontwateringspeil en rechts het doorlaatvermogen (drainageweerstand = drainerend oppervlak in de modelcel / doorlaatvermogen).

Daarnaast zijn in het model gedraineerde gebieden aanwezig. Figuur 3-25 geeft daarvan een overzicht, met in het linkerdeel de gehandhaafde drainageniveaus en in het rechterdeel de bijbehorende drainageweerstand (weergegeven als doorlaatvermogens). Hierop is

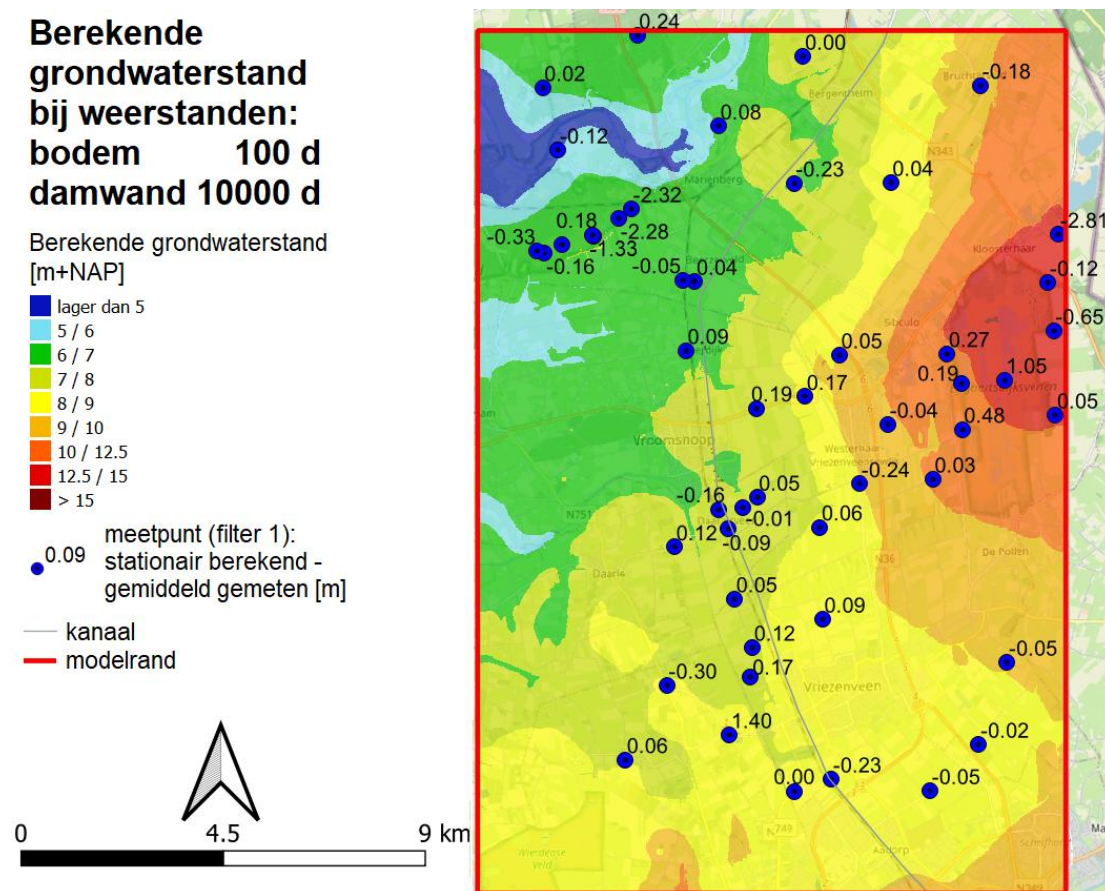
duidelijk zichtbaar dat er met name ten noorden van Vroomshoop drainageniveaus worden gehandhaafd die orde 2 meter onder het kanaalpeil liggen. Dit kan mogelijk resulteren in relatief grote verhangen in het grondwater.

3.2 Validatie van het regionale model

Met het model is een groot aantal stationaire berekeningen uitgevoerd, die in hoofdstuk 4 aan bod komen. Voorafgaande daaraan is het model gevalideerd. Dat is zowel tijdsafhankelijk als stationair gebeurd. Met het tijdsafhankelijke model is de periode 2009 t/m 2018 doorgerekend met tijdstappen van 1 dag, waarbij voor elke modelcel elke dag de grondwateraanvulling (+ of -) wordt berekend met het model MetaSWAP. Voor de stationaire berekening is voor elke modelcel de gemiddelde grondwateraanvulling over deze periode gebruikt.

3.2.1 Stationaire validatie

De stationaire berekeningsresultaten zijn vergeleken met de gemiddelde gemeten waarden van de bovenste filters van de in dit gebied aanwezige peilbuizen die een meetfrequentie hebben van 1 keer per dag of meer. Figuur 3-26 geeft een overzicht van het resultaat.



Figuur 3-26 Stationair berekende grondwaterstand vergeleken met de gemeten waarden in de aanwezige peilbuizen. De blauwe stippen geven de locaties van de peilbuizen weer. De getallen geven de afwijkingen met de gemiddelde waarden van de metingen (berekend – gemeten).

Het model bevat 50 meetpunten, waarvan er 7 in het waterwingebied van drinkwaterwinning Hammerflie liggen en 8 op de hoger gelegen stuwwal in het oosten van het model. Op deze locaties is een meer gedetailleerd model (met kleinere cellen) nodig om de optredende lokale verschillen goed te kunnen berekenen. Zo geven bijvoorbeeld bij de drinkwaterwinning Hammerflie twee peilbuizen, die in dezelfde modelcel liggen, gemiddelde meetwaarden die

1.5 meter verschillen (afwijkingen +0.18 m en –1.33 m). Als we bovengenoemde 15 meetpunten buiten beschouwing laten, blijven er 35 relevante meetpunten over.

Tabel 3-1 geeft een statistisch overzicht van de afwijkingen van de berekende grondwaterstanden in de meetpunten, zowel voor alle 50 locaties, als voor de 35 relevante locaties.

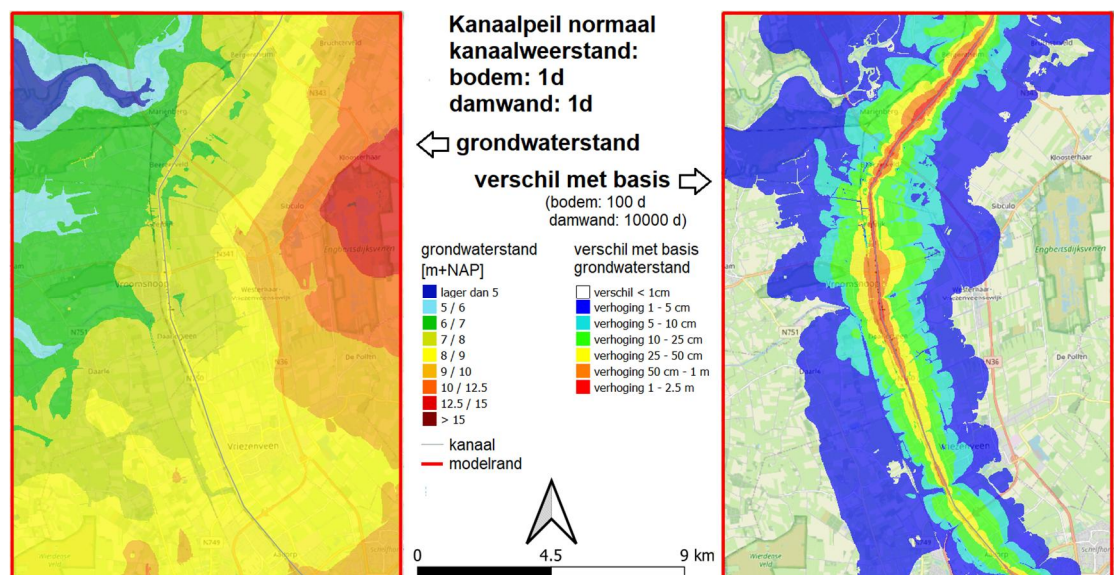
Tabel 3-1 Samenvatting stationaire validatie (berekend – gemeten)

	Alle meetpunten	Relevante meetpunten
Aantal meetpunten	50	35
Gemiddelde afwijking	–0.17 m	+0.02 m
Gemiddeld absolute afwijking	0.38 m	0.14 m
Minimum waarde afwijking	–2.81 m	–0.33 m
Maximum waarde afwijking	+1.40 m	+1.40 m

Uit de 35 relevante meetpunten kan worden afgeleid dat het stationaire model de gemeten gemiddelden goed benadert. Er is 1 echte uitschieter, een afwijking van +1.40 m, die de gemiddelde en absoluut gemiddelde afwijking met (+0.04 m) relatief sterk beïnvloedt. De reden van deze ene peilbuis met grote afwijking is nog onbekend. Waarschijnlijk is die peilbuis niet representatief voor de grondwaterstand ter plekke (om wat voor reden dan ook), want de omliggende peilbuizen laten heel andere waarden zien. Gezien het kader van deze studie heeft, voert het hier te ver om hier tijd aan te besteden.

3.2.2 Stationaire gevoeligheid kanaalweerstand

De damwanden langs het kanaal zijn niet overal nagenoeg waterdicht. De bodemweerstand van het kanaal is niet met zekerheid vast te stellen en kan na baggeren tijdelijk een stuk lager zijn. Daarom is een berekening uitgevoerd waarbij de weerstanden van damwand en kanaalbodem zijn weggenomen (op 1 dag zijn gezet). Figuur 3-27 geeft een beeld van het effect van de bodem- en damwandweerstand van het kanaal op de grondwaterstand. Het linkerdeel in deze figuur toont de berekende grondwaterstand voor deze situatie, het rechterdeel laat het verschil met de aangenomen kanaalweerstand (Figuur 3-26) zien.



Figuur 3-27 Stationair berekende grondwaterstand bij een ongewijzigd (normaal) kanaalpeil voor een situatie zonder bodemweerstand en damwandweerstand, beide geschematiseerd als 1 dag, (links) en het verschil in

grondwaterstand met de aangenomen weerstanden van 100 d voor de bodem en 10000 d voor de damwand (rechts).

De berekende grondwaterstand bij het kanaal ligt dan tussen de NAP +8 en +9 m en komt in grote delen bij het kanaal met meer dan 1 meter omhoog ten opzichte van de aangenomen situatie. Het maximale verschil bedraagt meer dan 2 m. Dat de grondwaterstand in het regionale model niet tot NAP +9 m rijkt, wordt veroorzaakt door de ontwateringsniveaus van de omliggende watergangen en drains (Figuur 3-24 en Figuur 3-25). Alleen een detailmodel met veel kleinere rekencellen kan resulteren in grondwaterstanden die direct naast het kanaal tot boven de NAP +9 m uitkomen.

Relevante effecten van de kanaalweerstanden reiken tot ongeveer 1 km afstand van het kanaal. Daarbuiten zijn de effecten in de meeste gebieden kleiner dan 10 cm. Daarbinnen lijdt het tot grondwaterstanden die ruim boven de gemeten waarden uitkomen. Bovenstaande duidt erop dat de kanaalweerstanden een aanzienlijke waarde moeten hebben. Hoe groot de waarde van de kanaalweerstanden exact moet zijn, is niet met het regionale model vast te stellen. Daarom is bij de berekening van de effecten van kanaalpeilverlaging op de grondwaterstand een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd voor een breed scala aan kanaalweerstanden (par. 4.1).

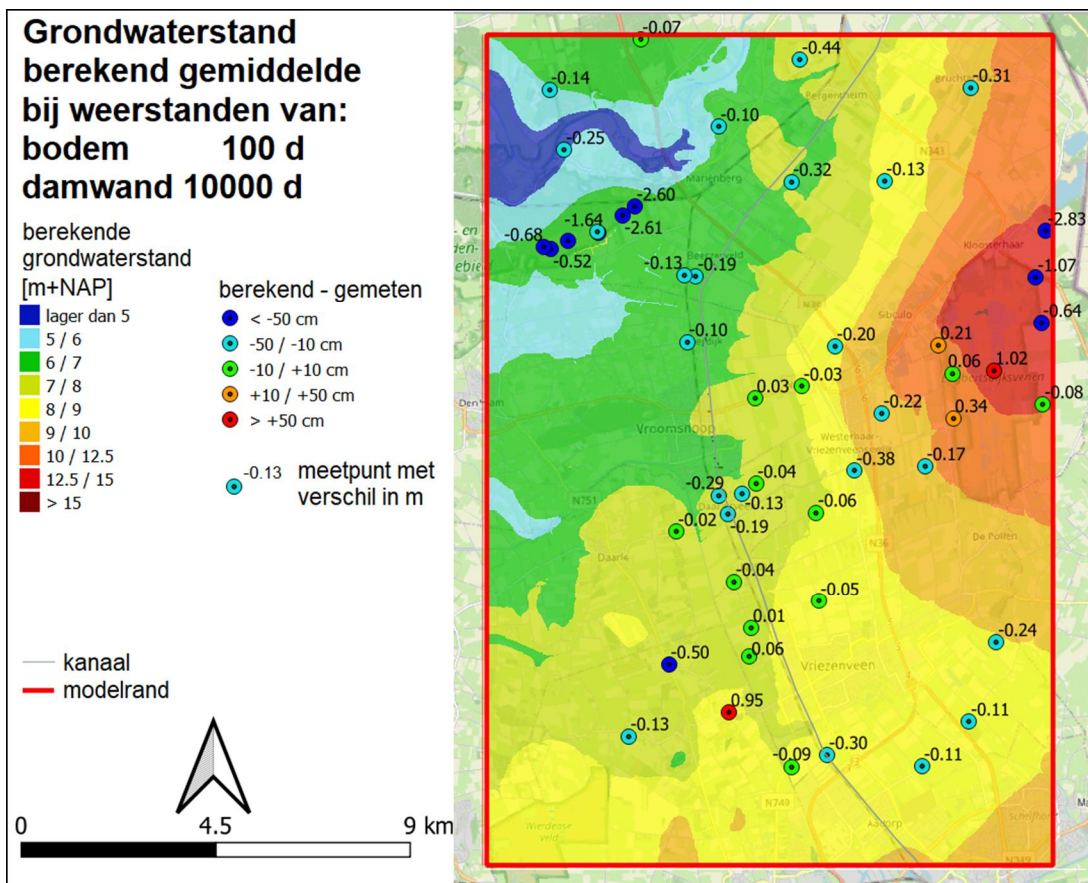
3.2.3 Tijdsafhankelijke validatie

Rond het kanaal kunnen zowel hoge als lage grondwaterstanden potentiële oorzaken zijn geweest van de opgetreden schades aan de panden. Daarom is het relevant tijdsafhankelijke berekeningen uit te voeren en het regionale model daarop ook te valideren. Daarvoor is een periode van 10 jaar doorgerekend, lopend van 1 maart 2009 tot 1 maart 2019. Het resultaat van deze berekening is vergeleken met de metingen uit de eerder genoemde peilbuizen. Figuur 3-28 geeft een overzicht van de berekende gemiddelde grondwaterstand over deze periode en vergelijkt de berekende gemiddelde grondwaterstand met het gemeten gemiddelde in de beschikbare peilbuizen. Figuur 3-29 doet hetzelfde voor de berekende laagste grondwaterstand en Figuur 3-30 voor de berekende hoogste grondwaterstand.

Gemiddelde grondwaterstanden

Figuur 3-28 laat zien dat de berekende gemiddelde grondwaterstand over deze periode wat lager ligt dan de stationair berekende grondwaterstand (Figuur 3-26). Vooral in gedraineerde gebieden is dat het geval. Dat is een bekend fenomeen, dat wordt veroorzaakt doordat hoge grondwaterstanden in natte tijden worden afgetopt door aanwezige drainage en er daardoor netto minder grondwateraanvulling optreedt. Bij een stationaire berekening met een gemiddelde neerslag en verdamping treedt dat niet op.

Uit de figuur blijkt dat de berekende gemiddelde grondwaterstanden in deze periode in het algemeen iets onder de gemeten waarden liggen. Over het algemeen zijn deze verschillen in de omgeving van het kanaal relatief klein. Tabel 3-2, die de resultaten samenvat, geeft hiervan een statistisch overzicht, zowel voor alle 50 peilbuizen, als voor de 35 relevante locaties. De gemiddelde absolute afwijking van de 35 relevante peilbuizen bedraagt 20 cm, die gemiddeld (-0.14 m) lager berekend worden dan de metingen weergegeven.



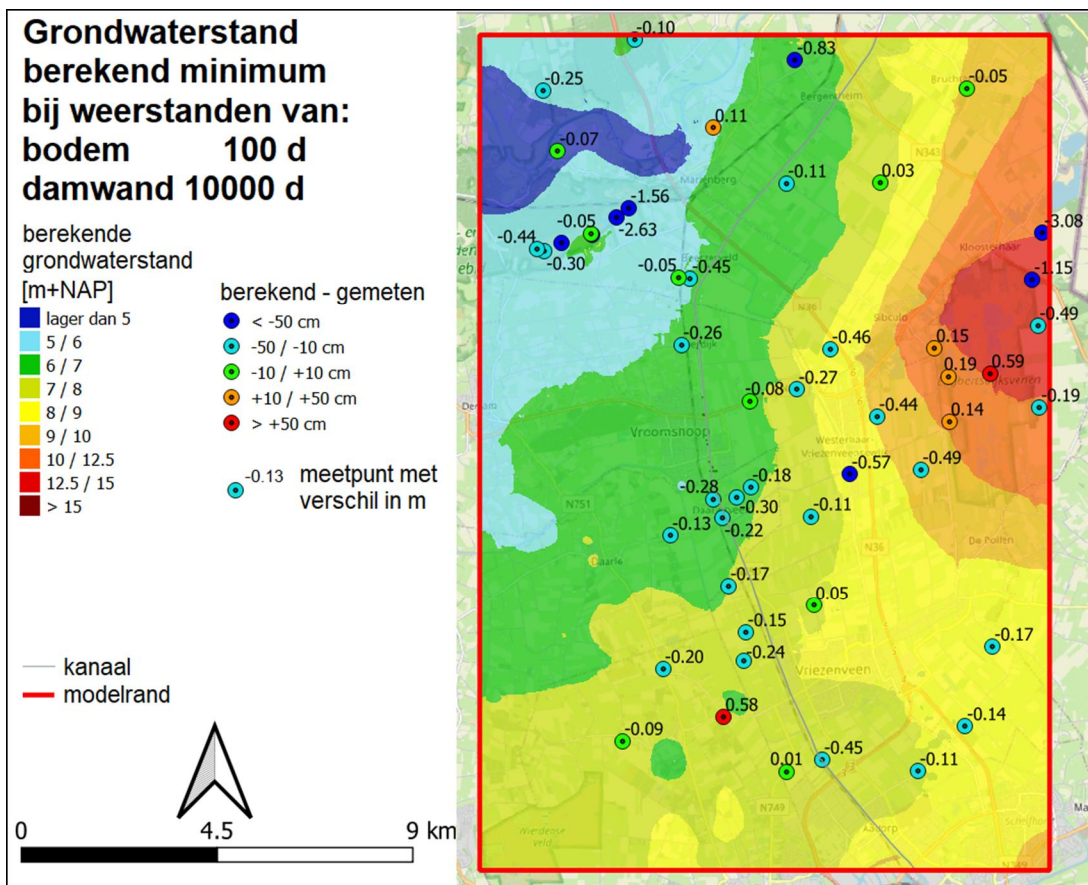
Figuur 3-28 Gemiddelde berekende grondwaterstand over de periode 1 maart 2009 – 1 maart 2019 voor de aangenomen weerstanden van 100 d voor de bodem en 10000 d voor de damwand. De gekleurde stippen geven de locaties van de peilbuizen weer. De getallen geven de afwijkingen met de gemiddelde waarden van de metingen (berekend – gemeten).

Tabel 3-2 Samenvatting tijdafhankelijke validatie gemiddelde grondwaterstanden (berekend – gemeten)

Gemiddelde grondwaterstanden	Alle meetpunten	Relevante meetpunten
Aantal meetpunten	50	35
Gemiddelde afwijking	-0.36	-0.14
Gemiddeld absolute afwijking	0.46	0.20
Minimum waarde afwijking	-2.83	-0.68
Maximum waarde afwijking	+1.02	+0.95

Laagste grondwaterstanden

Figuur 3-29 en Tabel 3-3 laten zien dat de berekende laagste grondwaterstanden in het algemeen wat lager zijn dan de gemeten laagste grondwaterstanden. De afwijkingen zijn wat groter dan voor de gemiddelde grondwaterstanden. Dat geldt zowel voor de absolute afwijkingen (0.24 m tegen 0.20 m) als voor de gemiddelde afwijkingen (-0.20 m tegen -0.14 m).



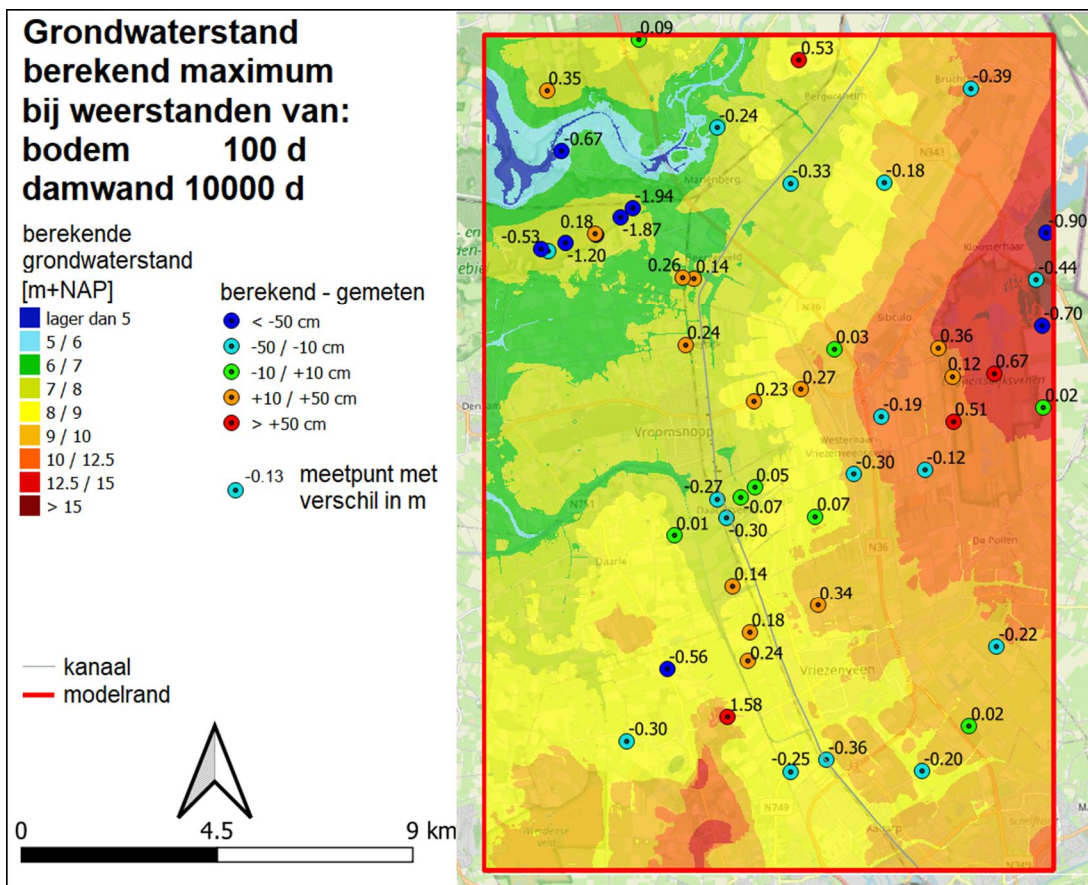
Figuur 3-29 Berekende laagste grondwaterstand (minimum) over de periode 1 maart 2009 – 1 maart 2019 voor de aangenomen weerstanden van 100 d voor de bodem en 10000 d voor de damwand. De gekleurde stippen geven de locaties van de peilbuizen weer. De getallen geven de afwijkingen met de laagste waarden van de metingen (berekend – gemeten).

Tabel 3-3 Samenvatting tijdafhankelijke validatie laagste grondwaterstanden (berekend – gemeten)

Laagste grondwaterstanden	Alle meetpunten	Relevante meetpunten
Aantal meetpunten	50	35
Gemiddelde afwijking	-0.38	-0.20
Gemiddeld absolute afwijking	0.46	0.24
Minimum waarde afwijking	-3.08	-0.83
Maximum waarde afwijking	+0.59	+0.58

Hoogste grondwaterstanden

Figuur 3-30 en Tabel 3-4 laten zien dat de berekende hoogste grondwaterstanden in het algemeen wat lager zijn dan de gemeten laagste grondwaterstanden. De afwijkingen zijn absoluut gezien met 0.29 m nog wat groter maar zijn met gemiddeld -0.02 m wat evenrediger verdeeld.



Figuur 3-30 Berekende hoogste grondwaterstand (maximum) over de periode 1 maart 2009 – 1 maart 2019 voor de aangenomen weerstanden van 100 d voor de bodem en 10000 d voor de damwand. De gekleurde stippen geven de locaties van de peilbuizen weer. De getallen geven de afwijkingen met de hoogste waarden van de metingen (berekend – gemeten).

Tabel 3-4 Samenvatting tijdafhankelijke validatie hoogste grondwaterstanden (berekend – gemeten)

Hoogste grondwaterstanden	Alle meetpunten	Relevante meetpunten
Aantal meetpunten	50	35
Gemiddelde afwijking	-0.14	-0.02
Gemiddeld absolute afwijking	0.40	0.29
Minimum waarde afwijking	-1.94	-0.67
Maximum waarde afwijking	+1.58	+1.58

In het algemeen kan gesteld worden dat het regionale model het grondwatersysteem redelijk goed beschrijft. In het regionale model is voor de weerstanden van kanaalbodem en damwand overal dezelfde waarde aangehouden. Voor de kanaalbodem is dat meer waarschijnlijk dan voor de damwand, waarvan op basis van waarnemingen en uitgevoerde metingen bekend is dat er sterke verschillen in waterdichtheid daarvan kunnen optreden.

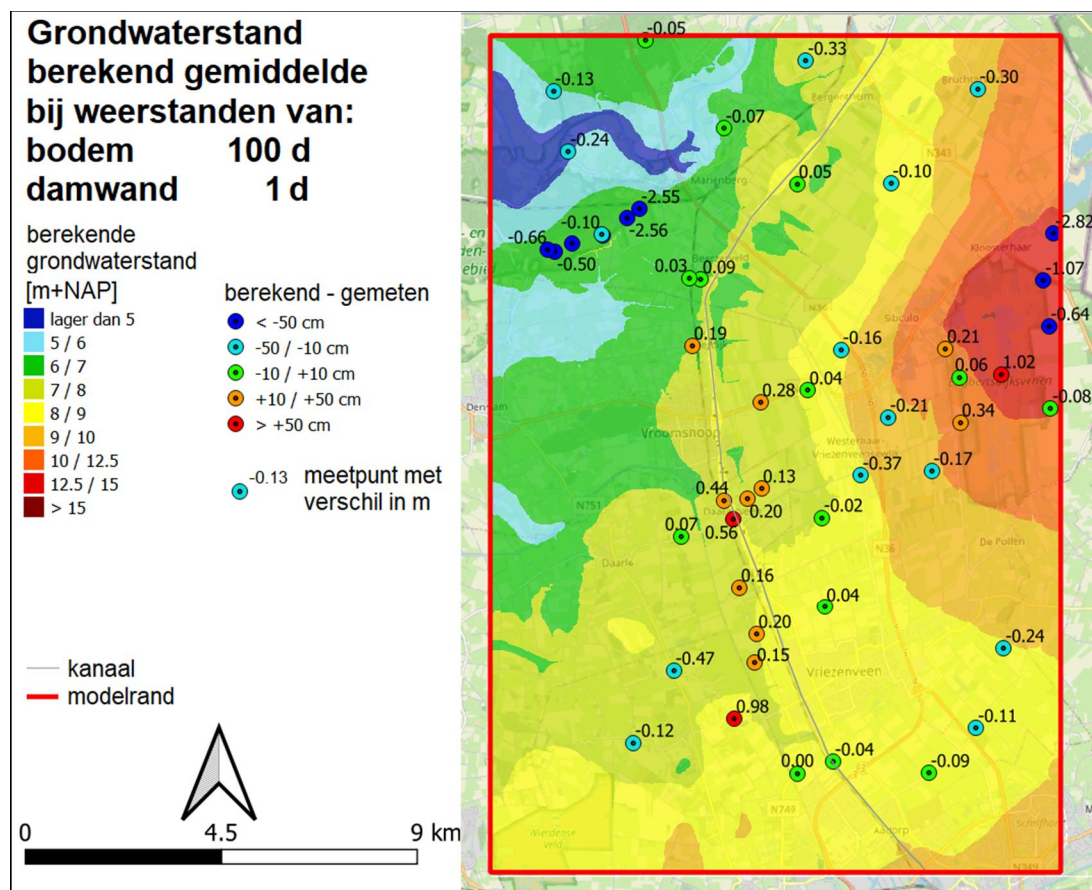
3.2.4 Tijdsafhankelijke gevoeligheidsanalyse damwandweerstand

Om de gevoeligheid daarvan te onderzoeken op de grondwaterstand ter plaatse van de peilbuizen is een tijdsafhankelijke berekening uitgevoerd waarbij de weerstand van de damwand overal is weggenomen (veranderd van 10000 dagen naar 1 dag).

Figuur 3-31 geeft het resultaat van deze berekening voor de gemiddelde grondwaterstanden. Figuur 3-32 doet dat voor de laagste grondwaterstanden en Figuur 3-33 voor de hoogste grondwaterstanden.

Figuur 3-31 laat zien dat de berekende gemiddelde grondwaterstanden, vooral in de omgeving van het kanaal, duidelijk hoger liggen dan bij de berekening met 10000 d damwand weerstand (Figuur 3-28).

Tabel 3-5 geeft een statistisch overzicht van de verschillen voor de 35 relevante peilbuizen. Uit de tabel blijkt dat vooral de gemiddelde afwijkingen van beide berekeningen verschillen.

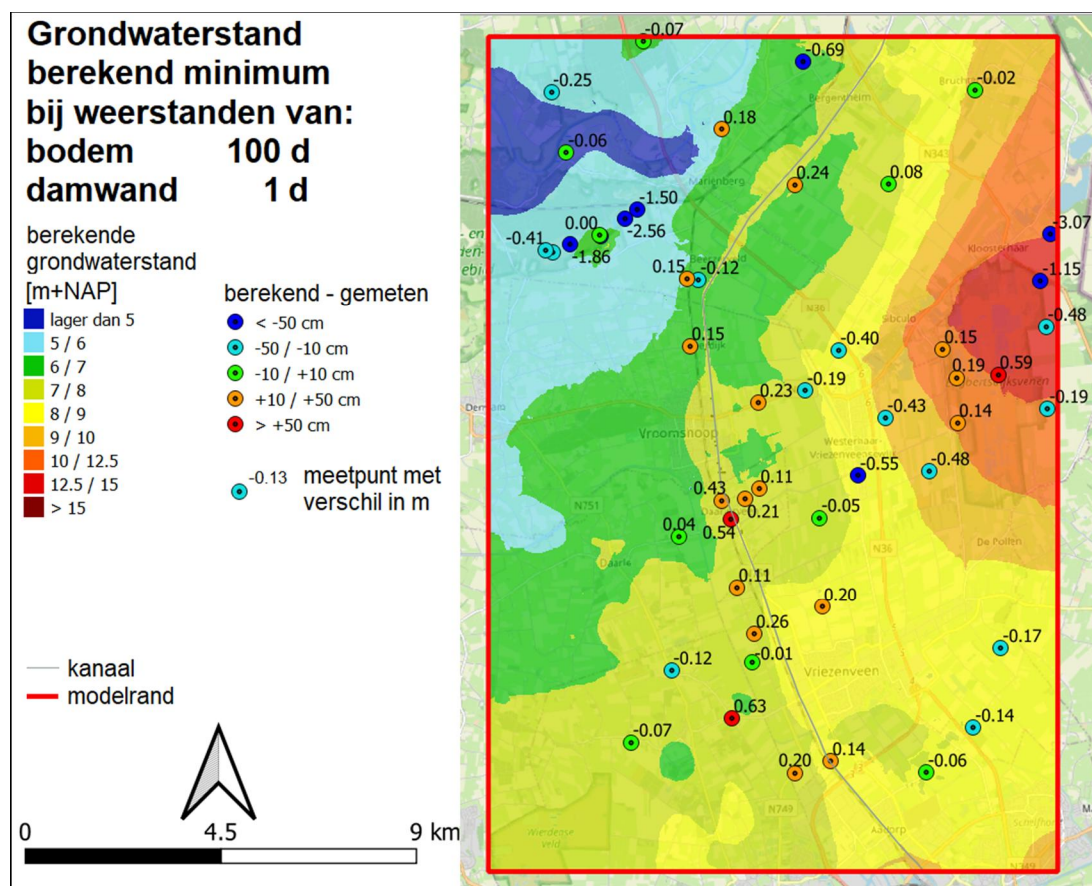


Figuur 3-31 Gemiddelde berekende grondwaterstand over de periode 1 maart 2009 – 1 maart 2019 voor een situatie met bodemweerstand (100 d), maar zonder damwandweerstand (1 dag). De gekleurde stippen geven de locaties van de peilbuizen weer. De getallen geven de afwijkingen met de gemiddelde waarden van de metingen (berekend – gemeten).

Tabel 3-5 Samenvatting tijdafhankelijke gevoeligheidsanalyse damwand weerstand voor de gemiddelde grondwaterstanden (berekend – gemeten) in de relevante meetpunten

Gemiddelde grondwaterstanden	Damwandweerstand = 10000 d	Damwandweerstand = 1 d
Aantal meetpunten	35	35
Gemiddelde afwijking	-0.14	-0.01
Gemiddeld absolute afwijking	0.20	0.21
Minimum waarde afwijking	-0.68	-0.66
Maximum waarde afwijking	+0.95	+0.98

Figuur 3-32 en Tabel 3-6 laten zien dat dat voor de laagste grondwaterstanden nog sterker geldt. Statistisch gezien (Tabel 3-6) geeft de berekening zonder damwand weerstand voor de laagste grondwaterstanden zelfs een beter resultaat. In de peilbuizen rond het kanaal (Figuur 3-32) worden echter duidelijk minder lage grondwaterstanden berekend dan gemeten.

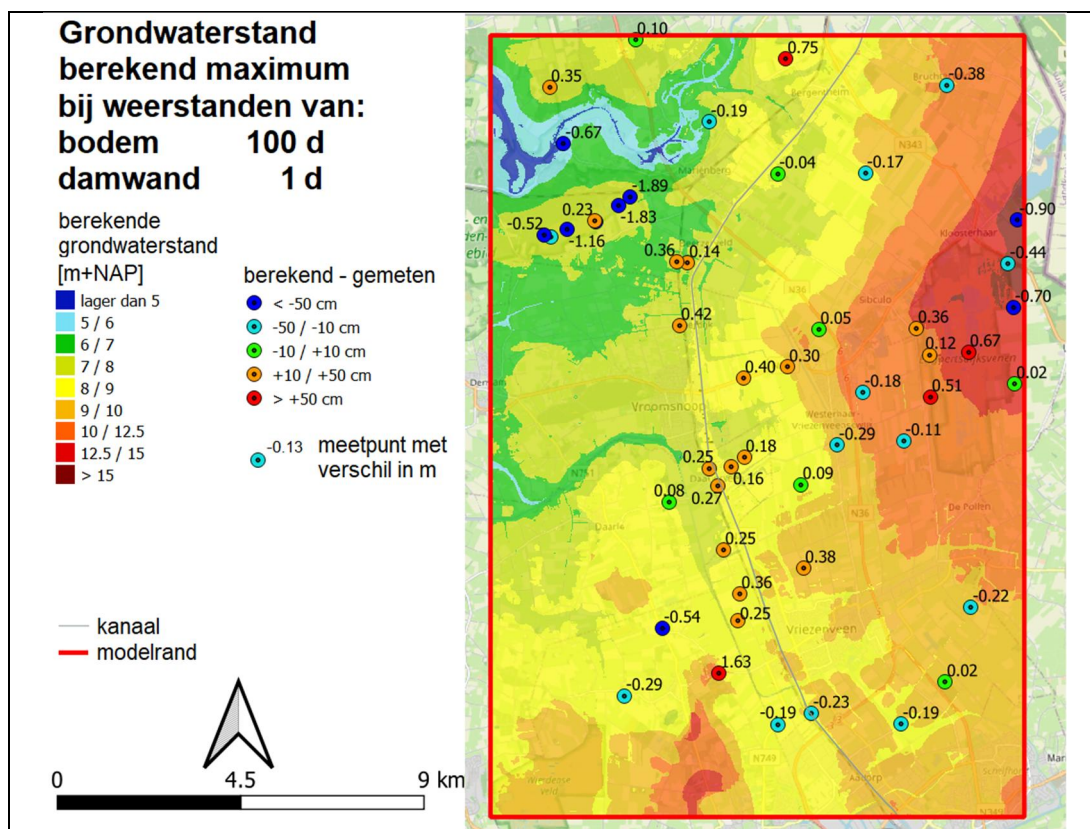


Figuur 3-32 Berekende laagste grondwaterstand over de periode 1 maart 2009 – 1 maart 2019 voor een situatie met bodemweerstand (100 d), maar zonder damwandweerstand (1 dag). De gekleurde stippen geven de locaties van de peilbuizen weer. De getallen geven de afwijkingen met de laagste waarden van de metingen (berekend – gemeten).

Tabel 3-6 Samenvatting tijdafhankelijke gevoeligheidsanalyse damwand weerstand voor de laagste grondwaterstanden (berekend – gemeten) in de relevante meetpunten

Laagste grondwaterstanden	Damwandweerstand = 10000 d	Damwandweerstand = 1 d
Aantal meetpunten	35	35
Gemiddelde afwijking	-0.20	-0.01
Gemiddeld absolute afwijking	0.24	0.23
Minimum waarde afwijking	-0.83	-0.69
Maximum waarde afwijking	+0.58	+0.63

Figuur 3-33 en Tabel 3-7 laten zien dat voor de hoogste grondwaterstanden de verschillen tussen berekend en gemeten wat groter worden.



Figuur 3-33 Berekende hoogste grondwaterstand over de periode 1 maart 2009 – 1 maart 2019 voor een situatie met bodemweerstand (100 d), maar zonder damwandweerstand (1 dag). De gekleurde stippen geven de locaties van de peilbuizen weer. De getallen geven de afwijkingen met de hoogste waarden van de metingen (berekend – gemeten).

Tabel 3-7 Samenvatting tijdafhankelijke gevoeligheidsanalyse damwand weerstand voor de hoogste grondwaterstanden (berekend – gemeten) in de relevante meetpunten

Hoogste grondwaterstanden	Damwandweerstand = 10000 d	Damwandweerstand = 1 d
Aantal meetpunten	35	35
Gemiddelde afwijking	-0.02	0.07
Gemiddeld absolute afwijking	0.29	0.31
Minimum waarde afwijking	-0.67	-0.67
Maximum waarde afwijking	+1.58	+1.63

Bovenstaande resultaten laten zien dat de weerstand van de damwand, zonder uitgebreide kalibratie, niet eenduidig met het regionale model vast is te stellen, gegeven de nauwe invloedzone van kanaal en een relatief gering aantal peilbuizen dichtbij kanaal.

3.2.5 Gevoeligheidsanalyse damwandweerstand op afzonderlijke peilbuizen

Voor een aantal geselecteerde peilbuizen is het effect van de weerstand van de damwand op het verloop van de grondwaterstand nader onderzocht. Het betreft (Figuur 3-34):

- Meetpunten dichtbij kanaal dan 250 m, van noord naar zuid: B22D0062, B22D0558, B28D1508, B28D1507, B28E0022
- Meetpunten verder van kanaal dan 250 m, van noord naar zuid: B28B0140, B28D1478, B28D0154, B28D0215
- Meetpunten op meer dan 2 km van het kanaal: B22D0274, B28E0166, B28B023

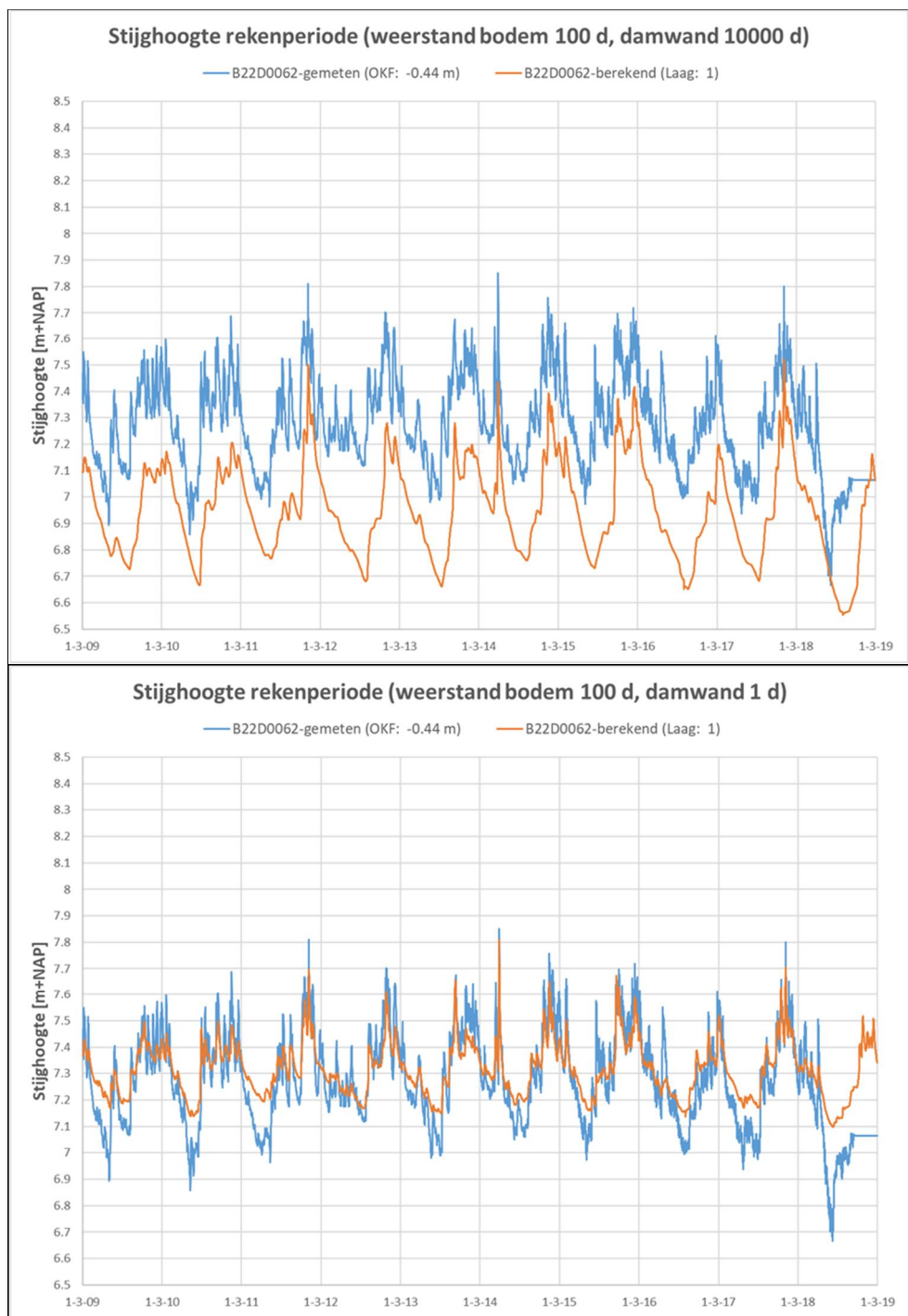


Figuur 3-34 Selectie van meetpunten voor beoordeling tijdsafhankelijke validatie, waarbij voor de gele punten geldt dat de afstand tot kanaal minder is dan 250 m en voor de rode punten meer dan 250 m. Drie daarvan liggen op meer dan 2 km afstand van het kanaal.

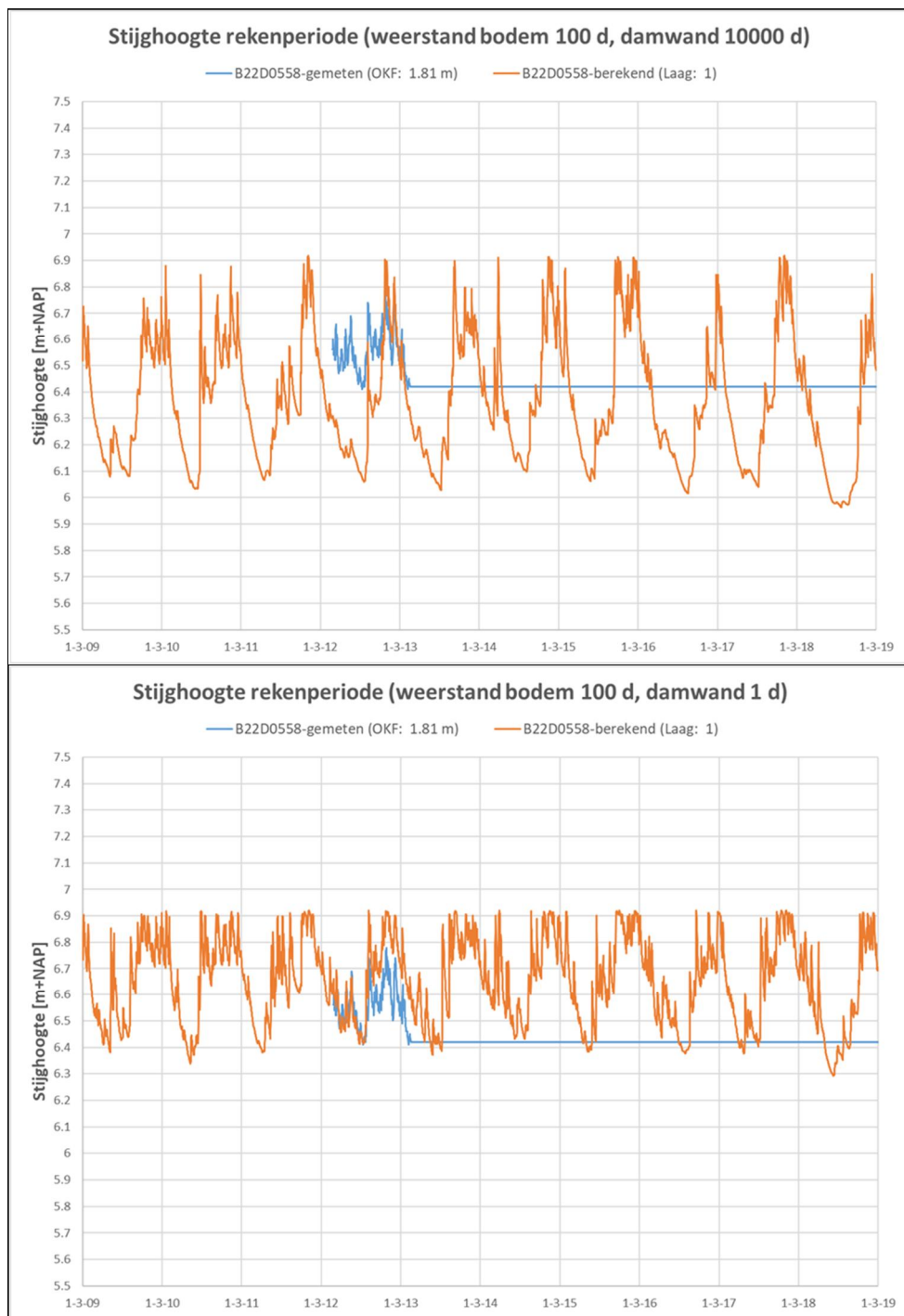
Figuur 3-35, Figuur 3-36, Figuur 3-37, Figuur 3-38 en Figuur 3-39 geven de resultaten voor de peilbuizen die dichterbij het kanaal liggen. Hierin is de gevoeligheid voor de damwandweerstand het grootst. Bij een lage damwandweerstand is de berekende grondwaterstand in al deze meetpunten hoger en varieert die minder. Voor sommige meetpunten lijkt dit een verbetering ten opzichte van de gemeten waarden, voor sommigen een verslechtering. Voor sommigen wordt het gemiddelde beter, maar de variatie slechter of omgekeerd. Figuur 3-40, Figuur 3-41, Figuur 3-42 en Figuur 3-43 laten zien dat hetzelfde geldt voor de peilbuizen die op iets grotere afstand van het kanaal liggen, maar dat het effect al wat kleiner is. Bij de peilbuizen op grote afstand van het kanaal (Figuur 3-44, Figuur 3-45

en Figuur 3-46) zijn de verschillen nauwelijks waarneembaar. Dat duidt erop dat de regionale grondwaterstroming daar onafhankelijk is van wat er in het kanaal gebeurt.

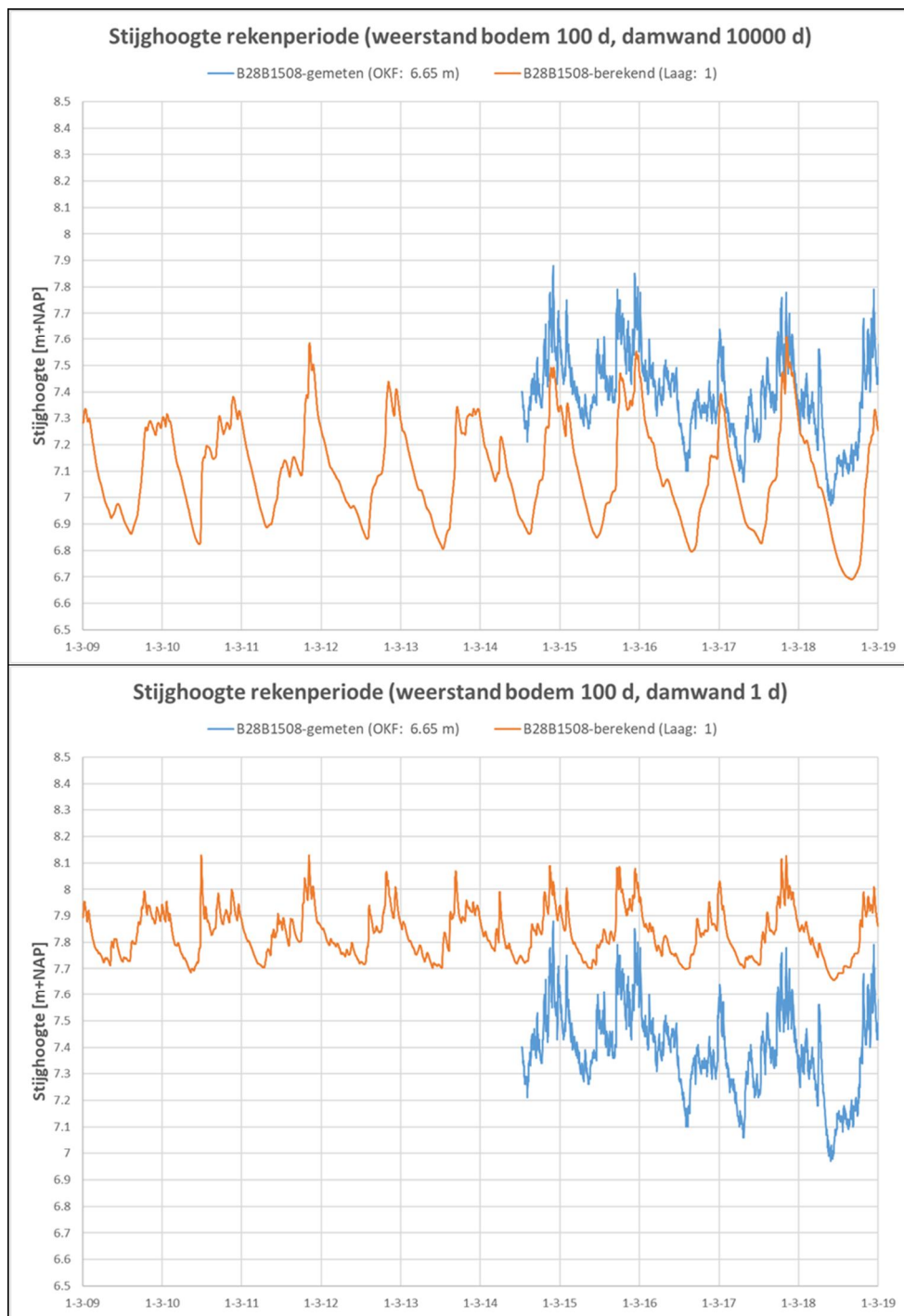
Peilbuizen op minder dan 250 m afstand van het kanaal



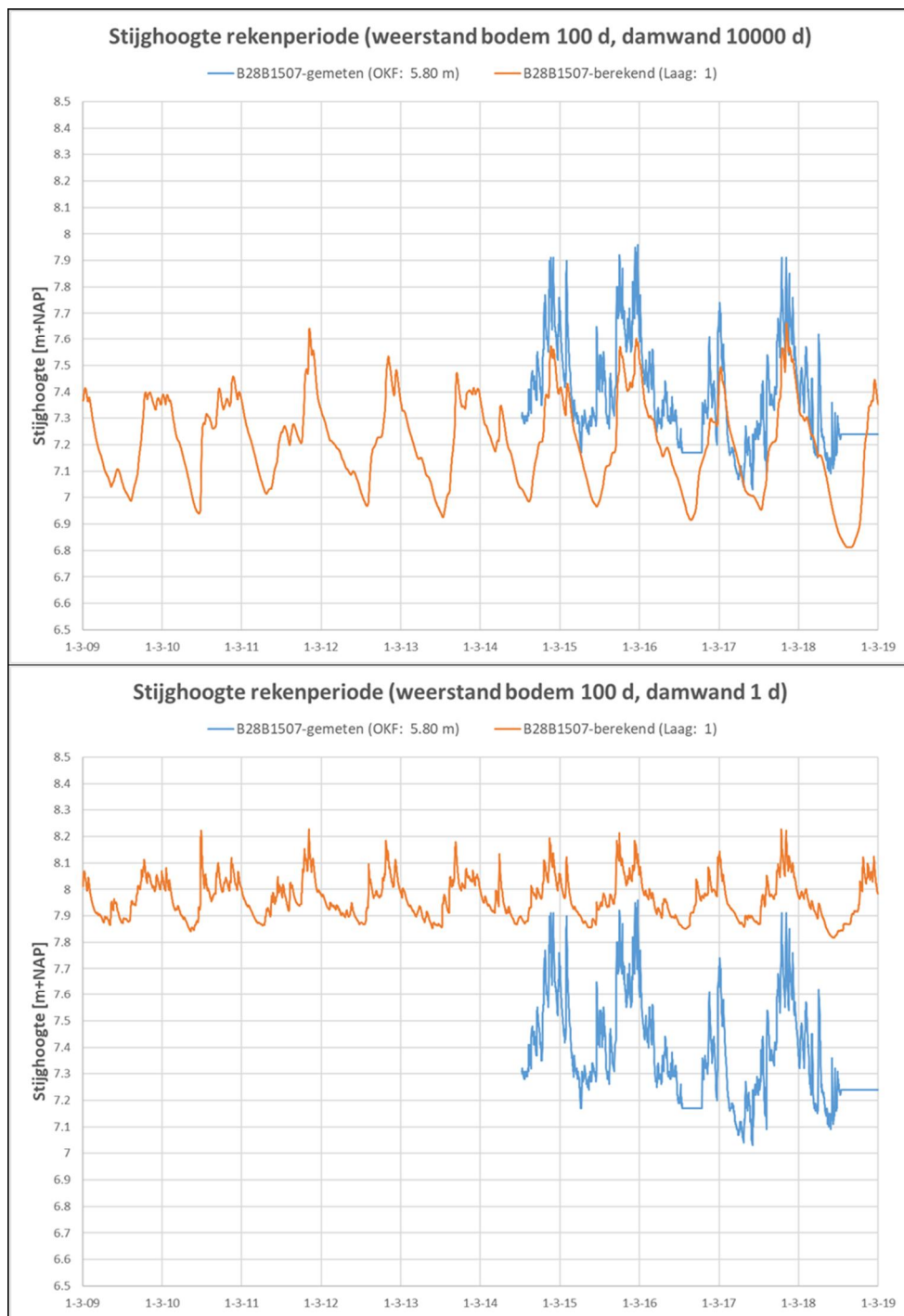
Figuur 3-35 Peilbuis B28B0022. Gevoeligheid Damwandweerstand op grondwaterstand. Boven: damwandweerstand = 10000 d. Onder damwandweerstand = 1d.



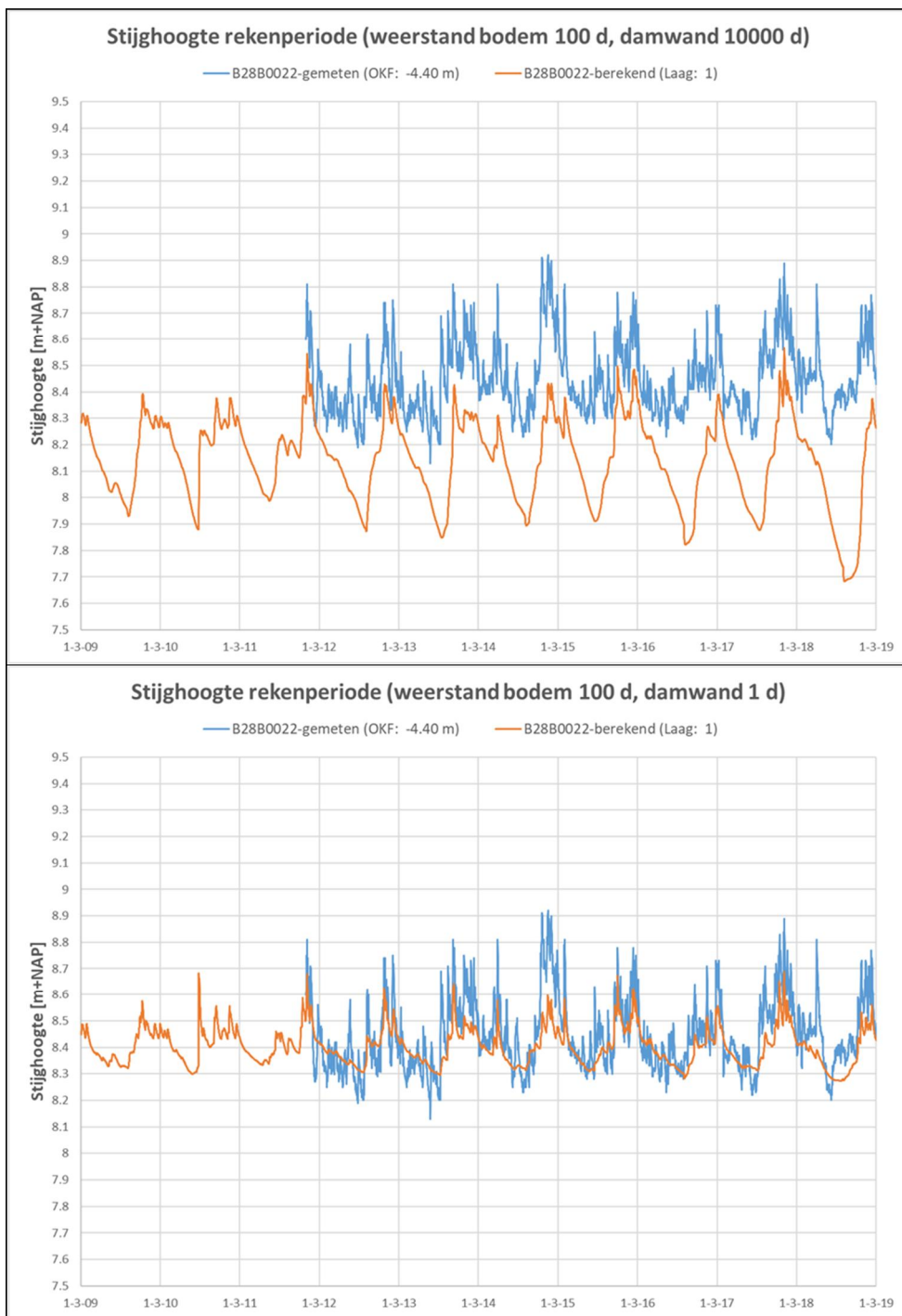
Figuur 3-36 Peilbuis B22D0558. Gevoeligheid Damwandweerstand op grondwaterstand. Boven: damwandweerstand = 10000 d. Onder damwandweerstand = 1d.



Figuur 3-37 Peilbuis B28D1508. Gevoeligheid Damwandweerstand op grondwaterstand. Boven: damwandweerstand = 10000 d. Onder damwandweerstand = 1d.

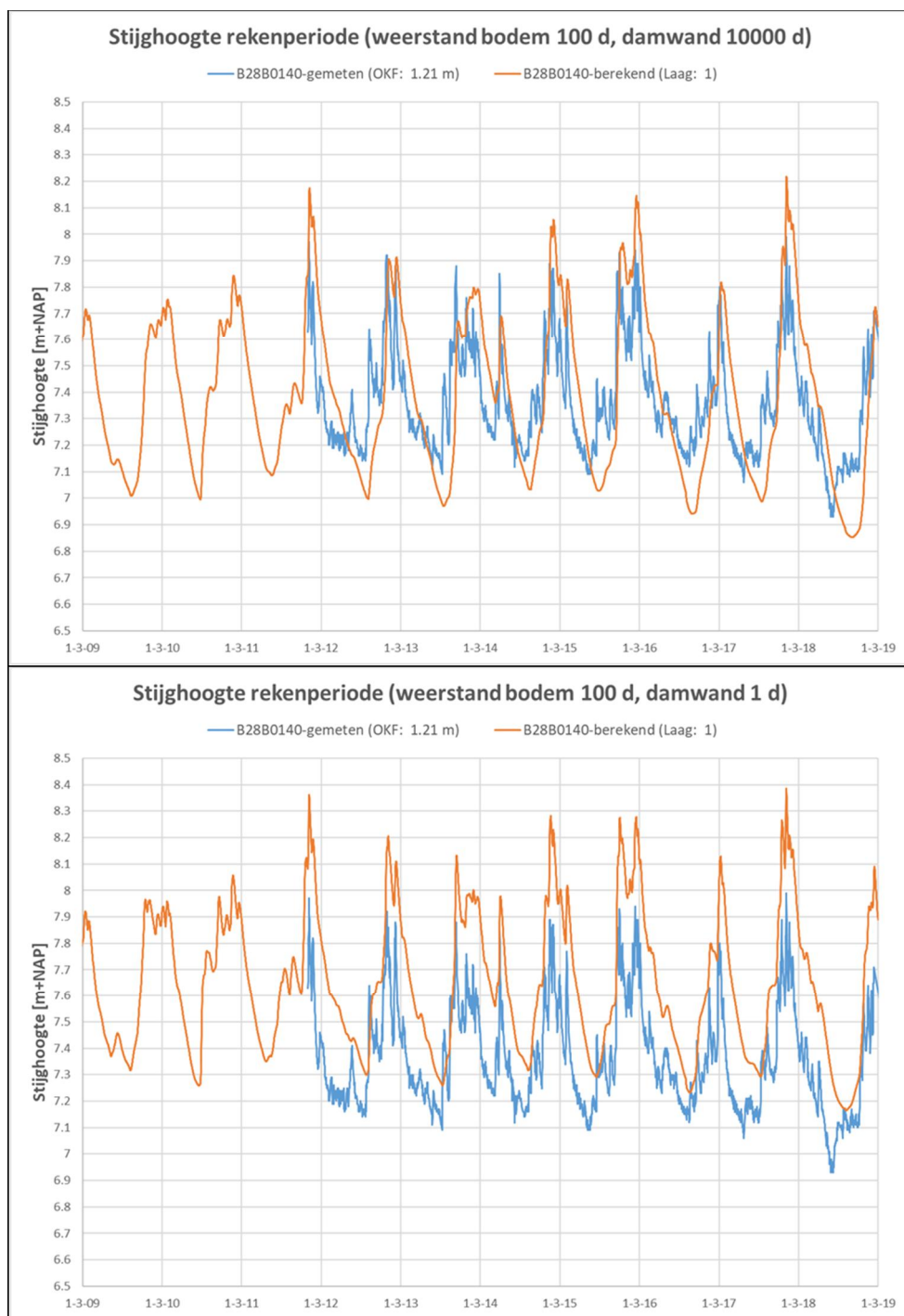


Figuur 3-38 Peilbuis B28D1507. Gevoeligheid Damwandweerstand op grondwaterstand. Boven: damwandweerstand = 10000 d. Onder damwandweerstand = 1 d.

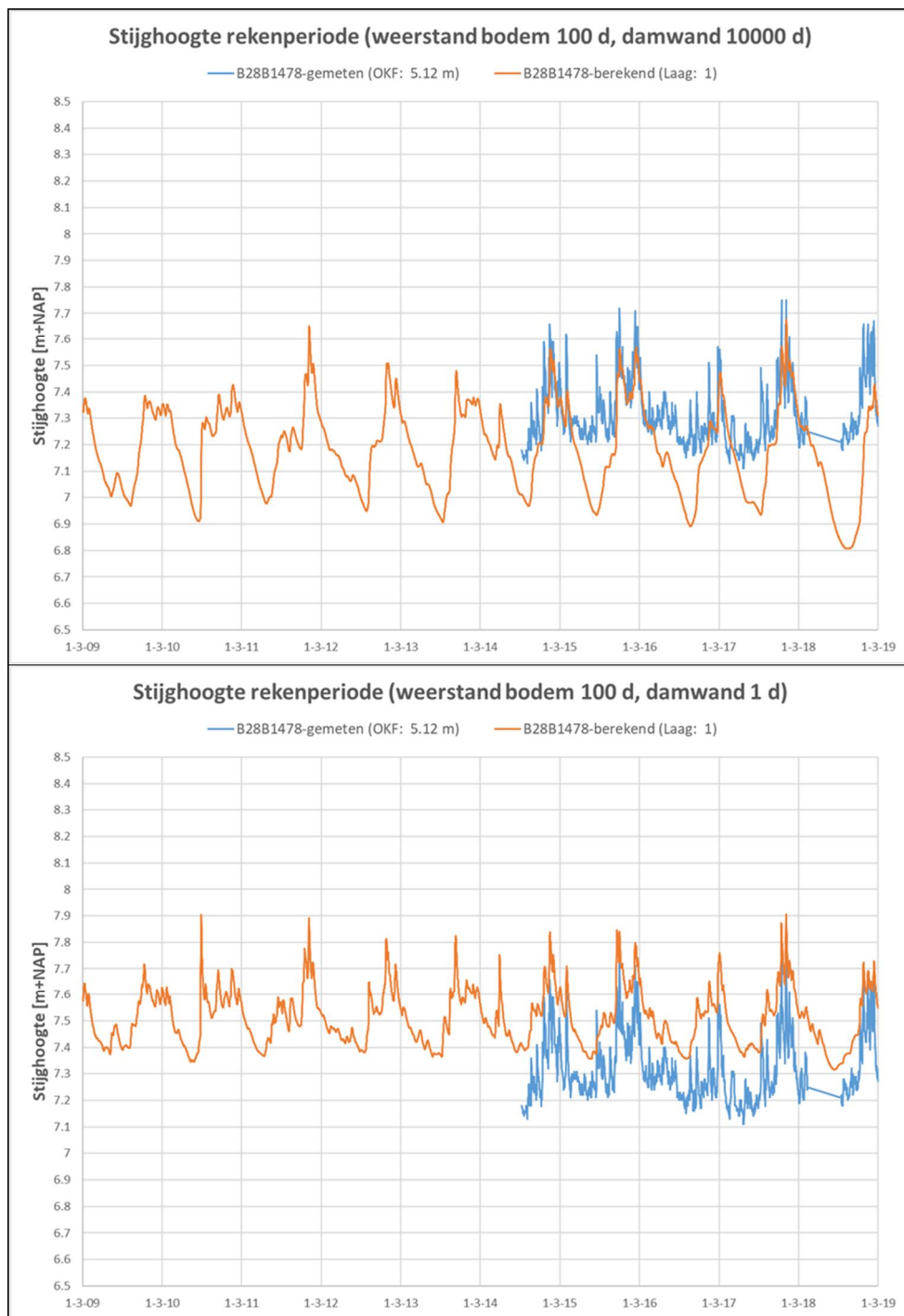


Figuur 3-39 Peilbuis B28E0022. Gevoeligheid Damwandweerstand op grondwaterstand. Boven: damwandweerstand = 10000 d. Onder damwandweerstand = 1d.

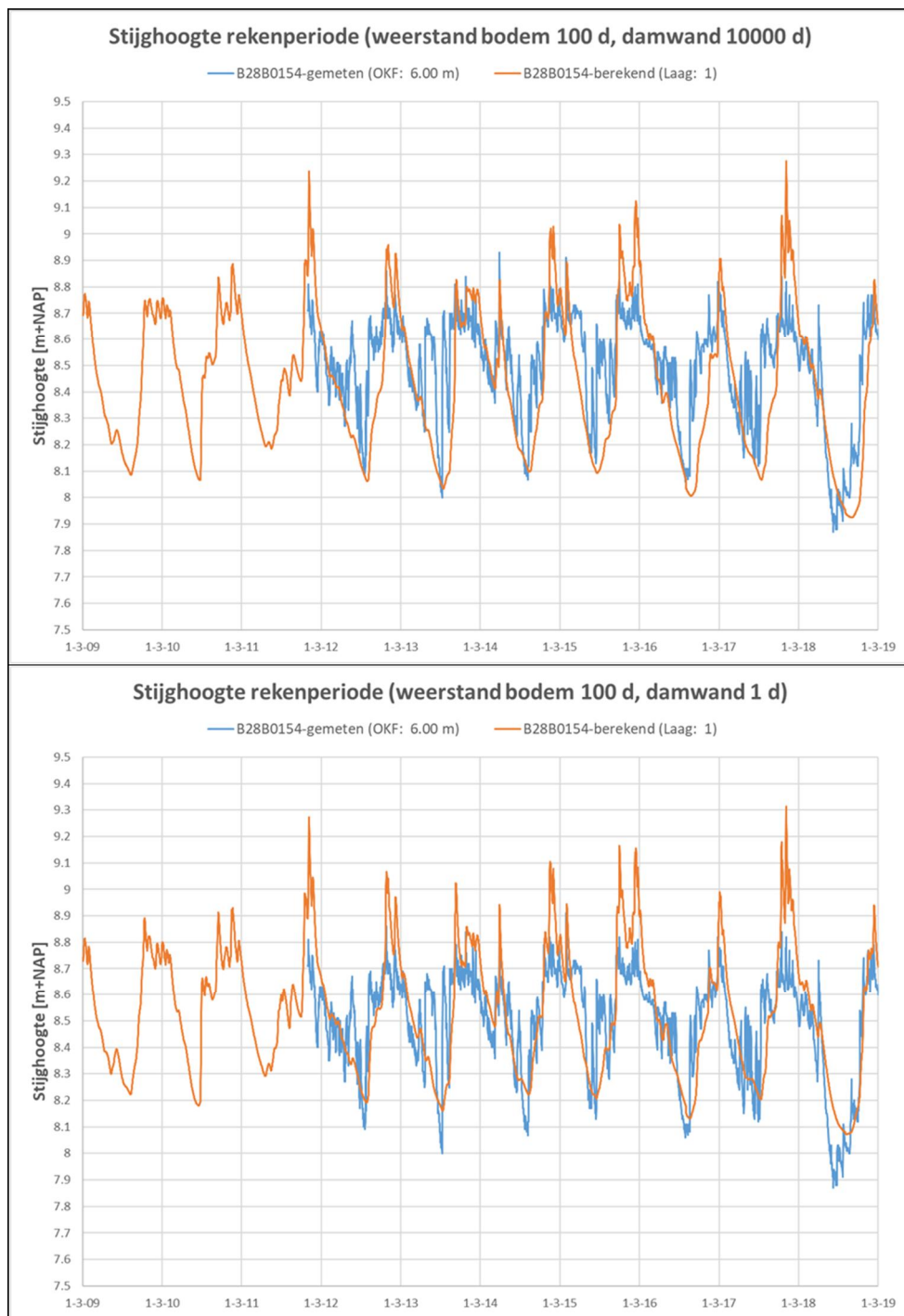
Peilbuizen op meer dan 250 m afstand van het kanaal



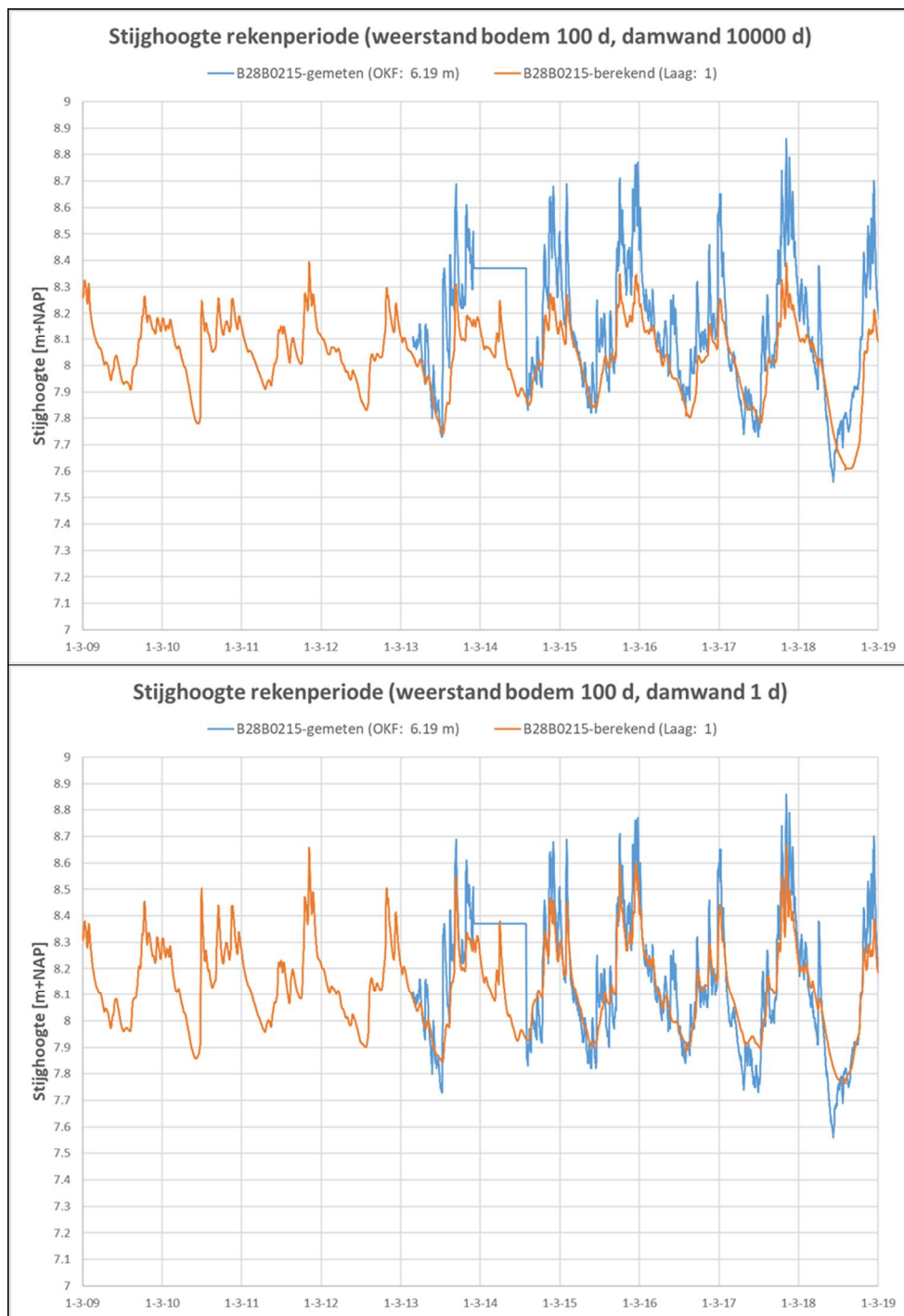
Figuur 3-40 Peilbuis B28B0140. Gevoeligheid Damwandweerstand op grondwaterstand. Boven: damwandweerstand = 10000 d. Onder damwandweerstand = 1 d.



Figuur 3-41 Peilbuis B28D1478. Gevoeligheid Damwandweerstand op grondwaterstand. Boven: damwandweerstand = 10000 d. Onder damwandweerstand = 1d.

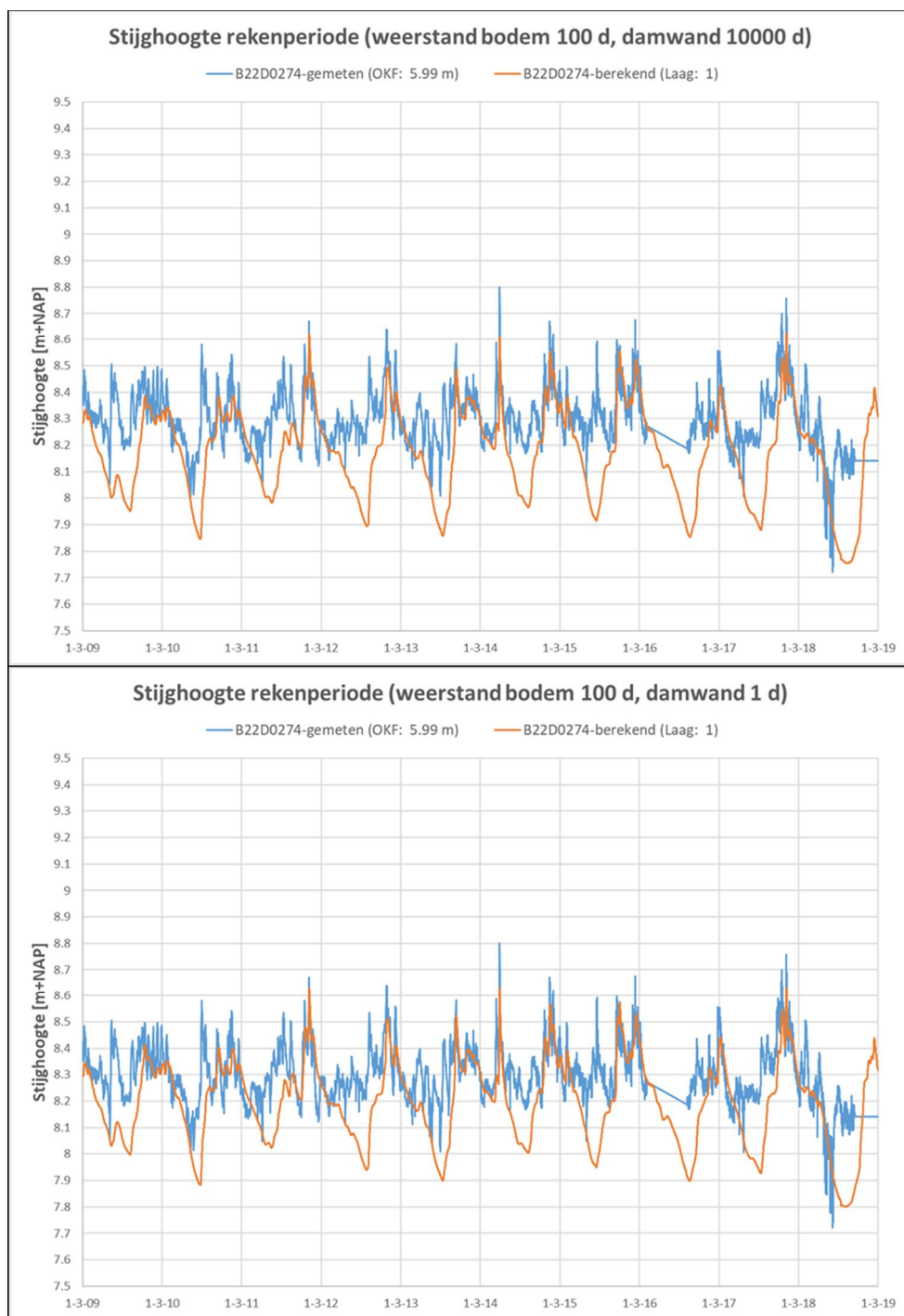


Figuur 3-42 Peilbuis B28D0154. Gevoeligheid Damwandweerstand op grondwaterstand. Boven: damwandweerstand = 10000 d. Onder damwandweerstand = 1d.

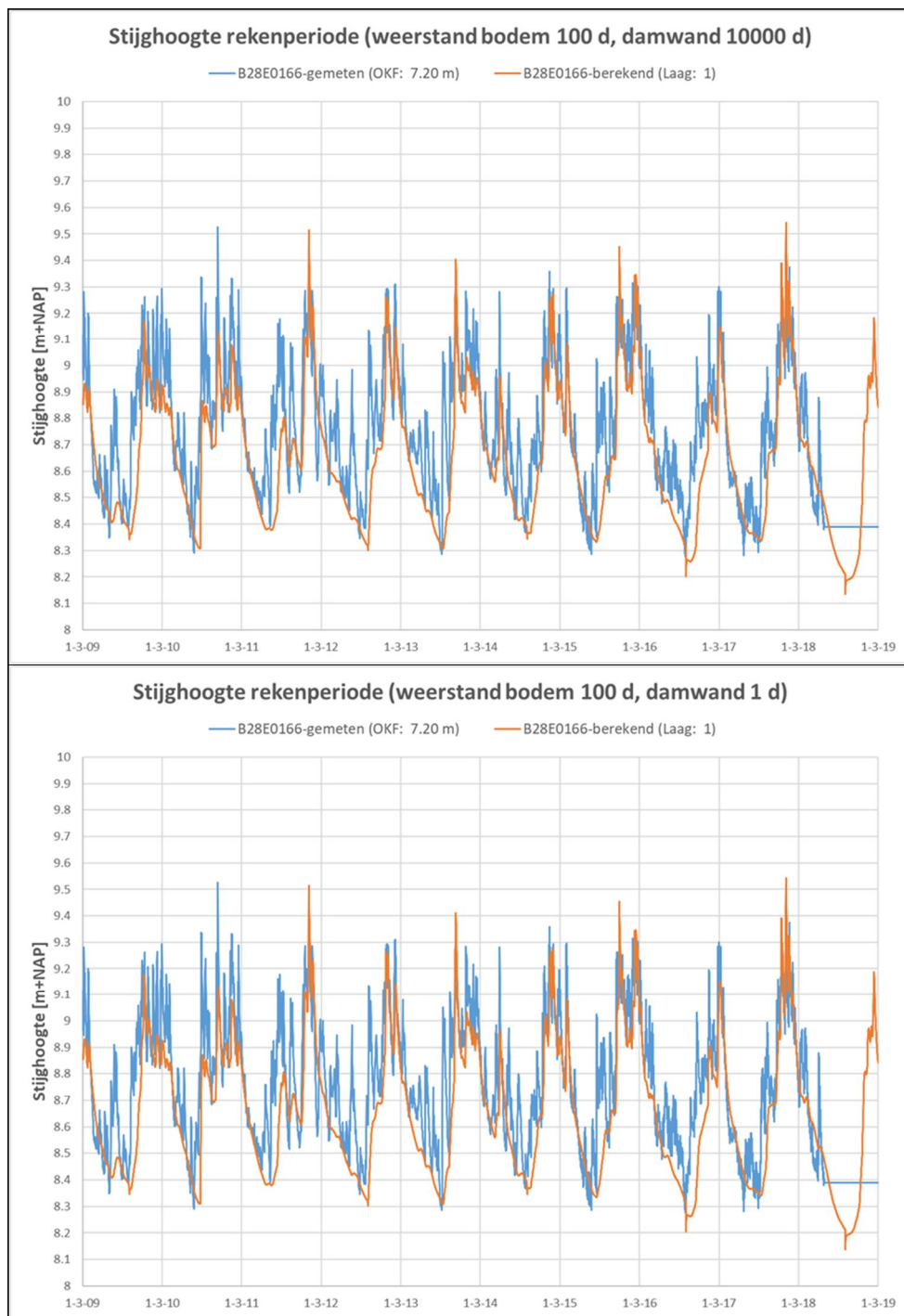


Figuur 3-43 Peilbuis B28D0215. Gevoeligheid Damwandweerstand op grondwaterstand. Boven: damwandweerstand = 10000 d. Onder damwandweerstand = 1d.

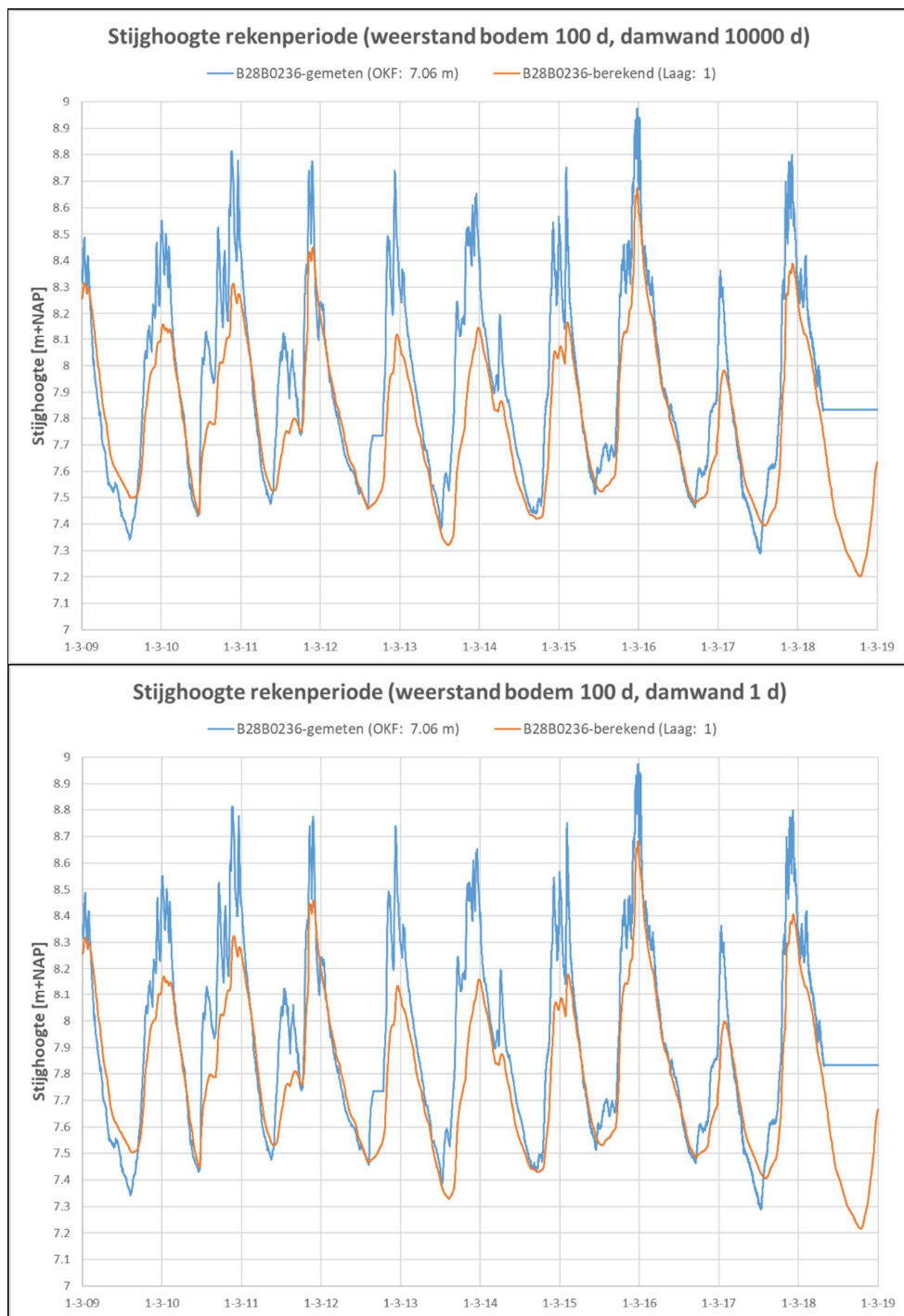
Peilbuizen op minder dan 2 km afstand van het kanaal



Figuur 3-44 Peilbuis B22D0274. Gevoeligheid Damwandweerstand op grondwaterstand. Boven: damwandweerstand = 10000 d. Onder damwandweerstand = 1 d.



Figuur 3-45 Peilbuis B28E0166. Gevoeligheid Damwandweerstand op grondwaterstand. Boven: damwandweerstand = 10000 d. Onder damwandweerstand = 1d.



Figuur 3-46 Peilbuis B28B0236. Gevoeligheid Damwandweerstand op grondwaterstand. Boven: damwandweerstand = 10000 d. Onder damwandweerstand = 1d.

4 Berekeningen met het regionale model

Met dit tijdsafhankelijke model zijn 2 berekeningen uitgevoerd. Een voor de meest waarschijnlijke huidige situatie (met een bodemweerstand van 100 dagen en een damwandweerstand van 10000 dagen) en een met een kanaalpeil verlaging van 50 cm. Hieruit is het effect van kanaalpeilverlaging op de grondwaterstand bepaald. Daarbij is gekeken naar de gemiddelde verlaging en naar de laagste en de hoogste berekende grondwaterstanden. Ook is het verloop in de tijd van de grondwaterstand en de verandering daarvan in de aanwezige meetpunten onderzocht.

Omdat dit soort tijdsafhankelijke berekeningen lang duren, is het regionale model ook gebruikt om een groot aantal stationaire berekeningen mee uit te voeren. Het betreft hier alle mogelijke combinaties van kanaalbodemweerstand (1, 10, 100 en 1000 dagen), damwandweerstand (1, 10, 100, 1000 en 10000 dagen) en kanaalpeilverlaging (0, 50 cm en 1 m). Dat resulteert in 60 berekeningen. Hieronder worden de meest relevante resultaten van deze berekeningen gepresenteerd.

4.1 Stationaire berekeningen

Hieronder worden eerst de berekende effecten van een kanaalpeilverlaging met 50 cm beschreven en daarna de berekende effecten van een kanaalpeilverlaging met 1 m.

4.1.1 Kanaalpeilverlaging 50 cm

Figuur 4-1, Figuur 4-2, Figuur 4-3, Figuur 4-4 en Figuur 4-5 laten voor de meest relevante varianten het berekende effect op de grondwaterstand zien van een kanaalpeilverlaging met 50 cm. Figuur 4-1 doet dat voor de basisvariant met een bodemweerstand van 100 dagen en een damwandweerstand van 10000 dagen. De andere vier figuren doen hetzelfde voor de vier uiterste varianten ten opzichte van de basisvariant, te weten:

- Bodemweerstand 1000 dagen en damwandweerstand 10000 dagen (Figuur 4-2);
- Bodemweerstand 1 dag en damwandweerstand 1 dag (Figuur 4-3);
- Bodemweerstand 100 dagen en damwandweerstand 1 dag (Figuur 4-4);
- Bodemweerstand 1 dag en damwandweerstand 10000 dagen (Figuur 4-5);

Tabel 4-1 geeft een statistisch overzicht van alle doorgekende varianten.

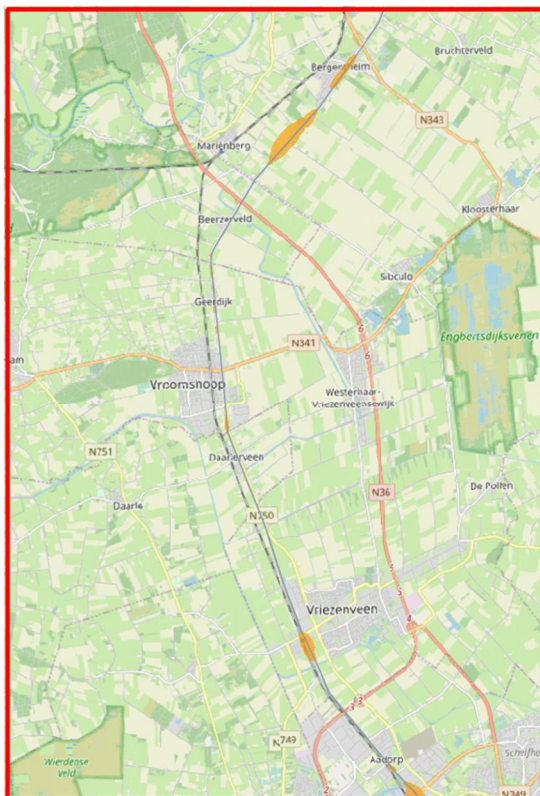
kanaalpeilverlaging 50 cm

bij weerstanden van:
bodem 100 d
damwand 10000 d

effect op grondwaterstand

- verlaging 50 - 100 cm
- verlaging 25 - 50 cm
- verlaging 10 - 25 cm
- verlaging 5 - 10 cm
- verlaging 1 - 5 cm
- verandering < 1 cm
- verhoging

— kanaal
— modelrand



Figuur 4-1 Stationair berekende verlaging van de grondwaterstand voor een kanaalpeilverlaging van 50 cm, uitgaande van een bodemweerstand van 100 dagen en een damwandweerstand van 10000 dagen.

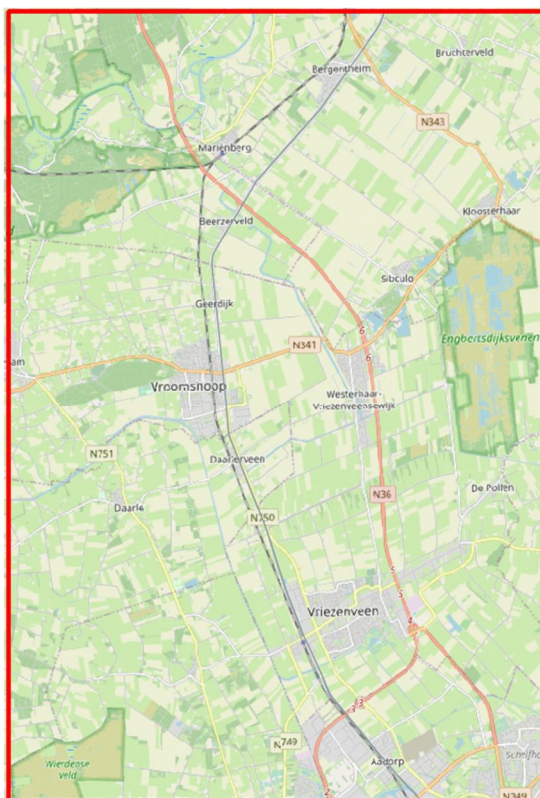
kanaalpeilverlaging 50 cm

bij weerstanden van:
bodem 1000 d
damwand 10000 d

effect op grondwaterstand

- verlaging 50 - 100 cm
- verlaging 25 - 50 cm
- verlaging 10 - 25 cm
- verlaging 5 - 10 cm
- verlaging 1 - 5 cm
- verandering < 1 cm
- verhoging

— kanaal
— modelrand



Figuur 4-2 Stationair berekende verlaging van de grondwaterstand voor een kanaalpeilverlaging van 50 cm, uitgaande van een bodemweerstand van 1000 dagen en een damwandweerstand van 10000 dagen.

kanaalpeilverlaging 50 cm

bij weerstanden van:

bodem 1 d

damwand 1 d

effect op grondwaterstand

verlaging 50 - 100 cm

verlaging 25 - 50 cm

verlaging 10 - 25 cm

verlaging 5 - 10 cm

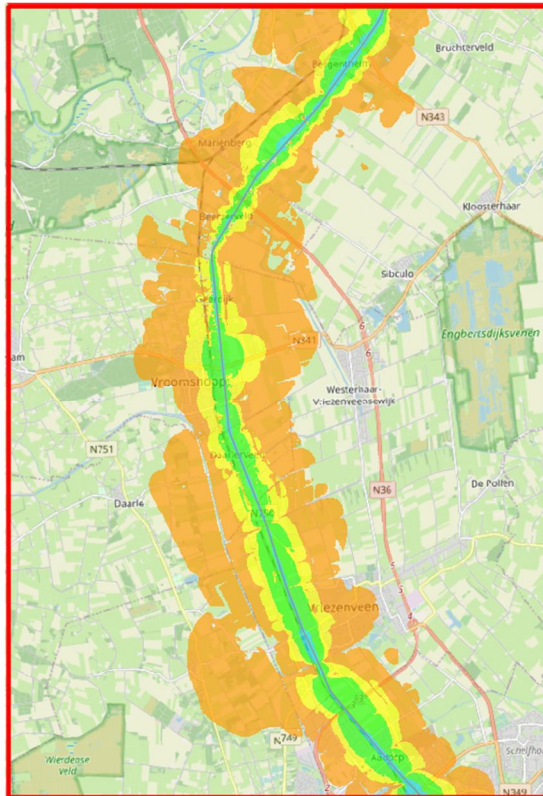
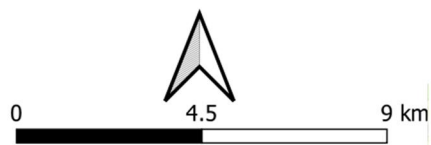
verlaging 1 - 5 cm

verandering < 1 cm

verhoging

kanaal

modelrand



Figuur 4-3 Stationair berekende verlaging van de grondwaterstand voor een kanaalpeilverlaging van 50 cm, uitgaande van een bodemweerstand van 1 dag en een damwandweerstand van 1 dag.

kanaalpeilverlaging 50 cm

bij weerstanden van:

bodem 100 d

damwand 1 d

effect op grondwaterstand

verlaging 50 - 100 cm

verlaging 25 - 50 cm

verlaging 10 - 25 cm

verlaging 5 - 10 cm

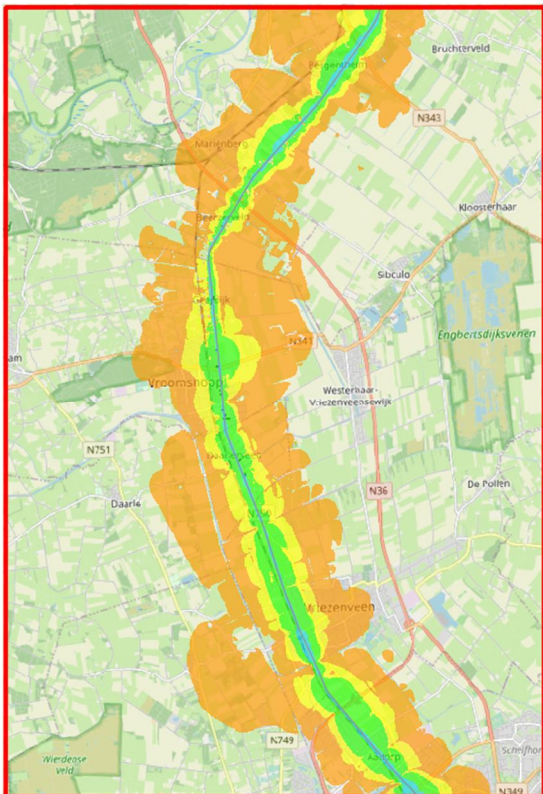
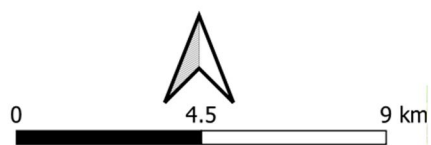
verlaging 1 - 5 cm

verandering < 1 cm

verhoging

kanaal

modelrand



Figuur 4-4 Stationair berekende verlaging van de grondwaterstand voor een kanaalpeilverlaging van 50 cm, uitgaande van een bodemweerstand van 100 dagen en een damwandweerstand van 1 dag.

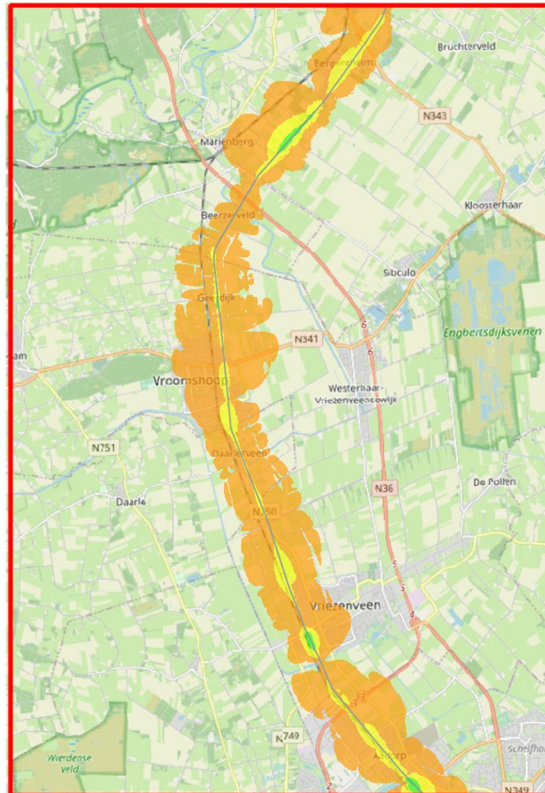
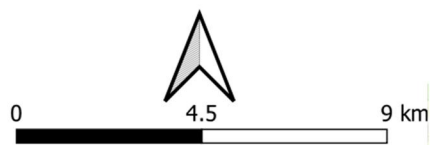
kanaalpeilverlaging 50 cm

bij weerstanden van:
bodem 1 d
damwand 10000 d

effect op grondwaterstand

- verlaging 50 - 100 cm
- verlaging 25 - 50 cm
- verlaging 10 - 25 cm
- verlaging 5 - 10 cm
- verlaging 1 - 5 cm
- verandering < 1 cm
- verhoging

— kanaal
— modelrand



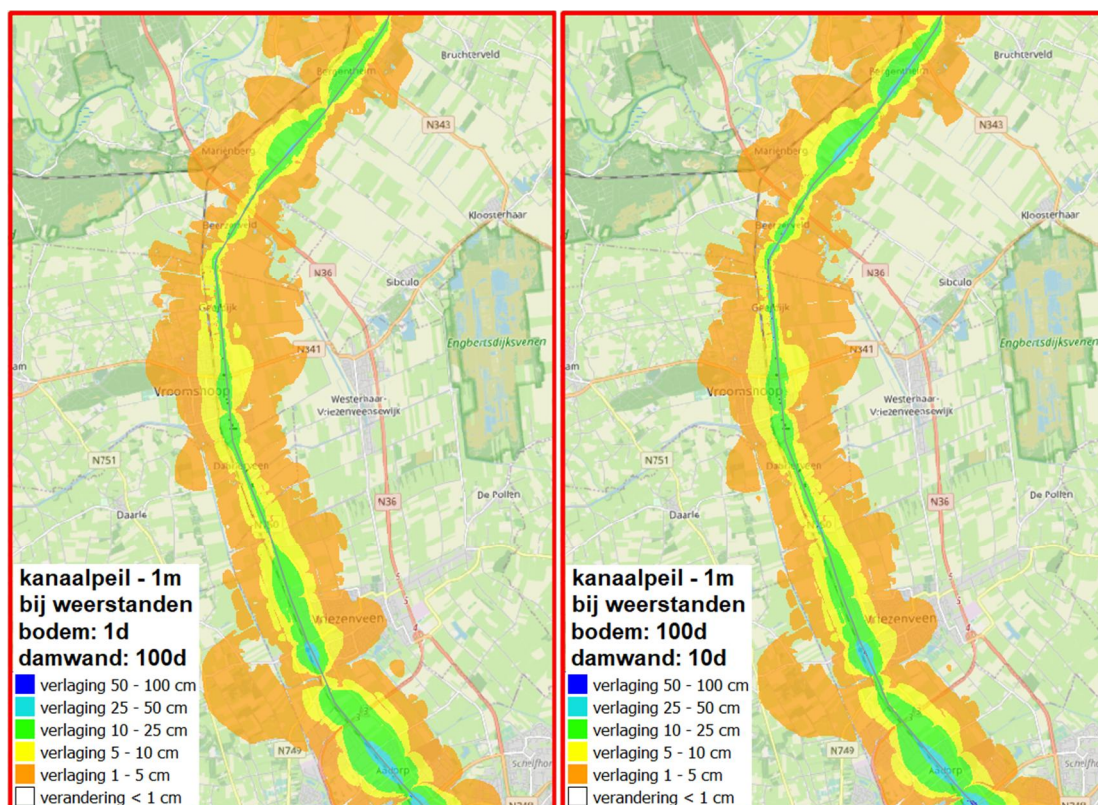
Figuur 4-5 Stationair berekende verlaging van de grondwaterstand voor een kanaalpeilverlaging van 50 cm, uitgaande van een bodemweerstand van 1 dag en een damwandweerstand van 10000 dagen.

Uitgaande van de kanaalweerstand van de basisvariant is het berekende effect van een kanaalpeilverlaging met 50 cm verwaarloosbaar (Figuur 4-1). De maximaal berekende verlaging is minder dan 2 cm (Tabel 4-1). Bij een nog hogere bodemweerstand (1000 dagen) wordt dit met 3 mm nog kleiner. Als er nagenoeg geen bodem- en damwandweerstand zijn is het effect groot (Figuur 4-3). De maximaal berekende verlaging bedraagt dan 49 cm. Figuur 4-4, Figuur 4-5 en Tabel 4-1 laten zien dat deze verlaging voornamelijk wordt veroorzaakt door de damwandweerstand. Als alleen de bodemweerstand wordt verwijderd (Figuur 4-5), is het beïnvloede gebied een stuk kleiner en is de maximaal berekende verlaging met 21.8 cm meer dan gehalveerd. Terwijl bij het verwijderen van de damwandweerstand het beïnvloede gebied (Figuur 4-4) nauwelijks kleiner wordt en de maximaal berekende verlaging met 49 cm zelfs gelijk blijft.

Dat is een interessante constatering, omdat dat zou betekenen dat het effect van relevante gaten in de damwand of zelfs het ontbreken daarvan beduidend groter is dan het ontbreken van een bodemweerstand, zoals dat bij baggeren mogelijk, gedurende een beperkte tijd, optreedt. Het contactoppervlak tussen kanaalwater en grondwater over de bodem is een orde groter dan over de damwand. Dat zou duiden op een additionele hydraulische weerstand tussen het diepere en het freatische grondwater. Ten noorden van Vroomshoop is daar nog sprake van, maar ten zuiden van Vroomshoop niet of nauwelijks (in het model orde 5 tot 10 dagen weerstand).

Figuur 4-6 geeft een vergelijking van de effecten van een kanaalpeilverlaging van 1 m voor een situatie met een bodemweerstand van 1 dag en een damwandweerstand van 100 dagen en voor een situatie van een bodemweerstand van 100 dagen en een damwandweerstand van 10 dagen. Als de resterende damwand weerstand (10 dagen) in dezelfde orde ligt als bovengenoemde additionele hydraulische weerstand tussen het diepere en het freatische grondwater, zijn de berekende effecten van kanaalpeilverlaging ongeveer gelijk. Als de aanname klopt dat de damwandweerstand 1 à 2 ordes groter is dan de bodemweerstand zijn

de effecten van het wegnemen van de damwandweerstand (weerstand verlagen naar 1 dag) beduidend groter.



Figuur 4-6 Vergelijking van een stationair berekende verlaging van de grondwaterstand voor een kanaalpeilverlaging van 1 m, uitgaande van een bodemweerstand van 1 dag en een damwandweerstand van 100 dagen (links) en uitgaande van een bodemweerstand van 100 dagen en een damwandweerstand van 10 dagen (rechts).

Statistiek

Tabel 4-1 geeft een overzicht van de berekende grondwaterstand door een kanaalpeilverlaging van 50 cm voor alle berekende varianten van bodem- en damwandweerstand. De eerste twee kolommen beschrijven de variant. De derde kolom geeft de minimale waarde van de berekende verlaging. Kleine negatieve getallen in deze kolom worden veroorzaakt door numerieke oorzaken en dienen gelezen te worden als 0. De vierde kolom geeft de gemiddelde verlaging over het complete model. De twee laatste kolommen zijn het meest relevant. Deze geven de maximum berekende verlaging en het totaal verlaagde volume. De gele rij in deze tabel is de basisvariant.

Tabel 4-1 Statistiek van de berekende grondwaterstandsverlaging door kanaalpeilverlaging met 50 cm

Weerstand bodem [d]	Weerstand damwand [d]	Minimum waarde [m]	Gemiddelde waarde [m]	Maximum waarde [m]	Volume [miljoen m³]
1	1	-0.002	0.018015	0.490	4.531
1	10	0.000	0.009198	0.384	2.313
1	100	0.000	0.005799	0.230	1.459
1	1000	0.000	0.005342	0.219	1.344
1	10000	0.000	0.005293	0.218	1.331
10	1	0.000	0.017701	0.490	4.452

10	10	0.000	0.007734	0.379	1.945
10	100	0.000	0.003645	0.148	0.917
10	1000	0.000	0.003060	0.083	0.770
10	10000	0.000	0.003000	0.081	0.755
100	1	0.000	0.017398	0.490	4.376
100	10	-0.001	0.006391	0.373	1.608
100	100	0.000	0.001473	0.113	0.370
100	1000	0.000	0.000733	0.025	0.184
100	10000	0.000	0.000655	0.019	0.165
1000	1	-0.001	0.017353	0.490	4.365
1000	10	0.000	0.006140	0.371	1.544
1000	100	0.000	0.000950	0.105	0.239
1000	1000	0.000	0.000171	0.014	0.043
1000	10000	0.000	0.000087	0.003	0.022

4.1.2 Kanaalpeilverlaging 1 m

Figuur 4-7, Figuur 4-8, Figuur 4-9, Figuur 4-10 en Figuur 4-11 laten voor de meest relevante varianten het berekende effect op de grondwaterstand zien van een kanaalpeilverlaging met 1 m. Figuur 4-7 doet dat voor de basisvariant met een bodemweerstand van 100 dagen en een damwandweerstand van 10000 dagen. De andere vier figuren doen hetzelfde voor de vier uiterste varianten ten opzichte van de basisvariant, te weten:

- Bodemweerstand 1000 dagen en damwandweerstand 10000 dagen (Figuur 4-8);
- Bodemweerstand 1 dag en damwandweerstand 1 dag (Figuur 4-9);
- Bodemweerstand 100 dagen en damwandweerstand 1 dag (Figuur 4-10);
- Bodemweerstand 1 dag en damwandweerstand 10000 dagen (Figuur 4-11);

Tabel 4-2 geeft een statistisch overzicht van alle doorerekende varianten.

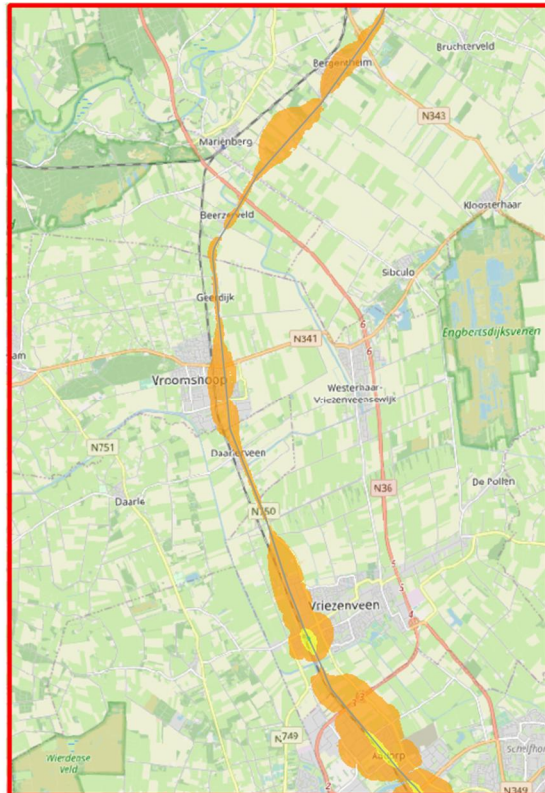
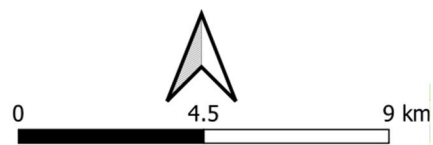
kanaalpeilverlaging 1 m

bij weerstanden van:
bodem 100 d
damwand 10000 d

effect op grondwaterstand

- verlaging 50 - 100 cm
- verlaging 25 - 50 cm
- verlaging 10 - 25 cm
- verlaging 5 - 10 cm
- verlaging 1 - 5 cm
- verandering < 1 cm
- verhoging

— kanaal
— modelrand



Figuur 4-7 Stationair berekende verlaging van de grondwaterstand voor een kanaalpeilverlaging van 1 m, uitgaande van een bodemweerstand van 100 dagen en een damwandweerstand van 10000 dagen.

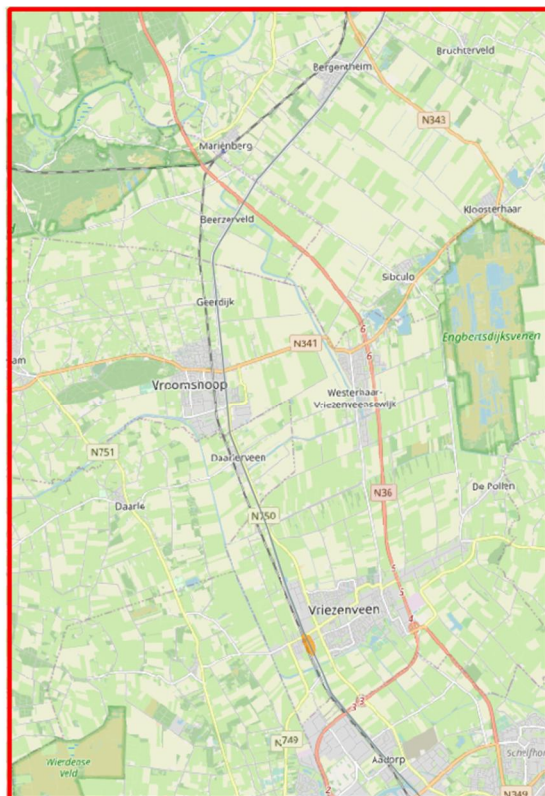
kanaalpeilverlaging 1 m

bij weerstanden van:
bodem 1000 d
damwand 10000 d

effect op grondwaterstand

- verlaging 50 - 100 cm
- verlaging 25 - 50 cm
- verlaging 10 - 25 cm
- verlaging 5 - 10 cm
- verlaging 1 - 5 cm
- verandering < 1 cm
- verhoging

— kanaal
— modelrand



Figuur 4-8 Stationair berekende verlaging van de grondwaterstand voor een kanaalpeilverlaging van 1 m, uitgaande van een bodemweerstand van 1000 dagen en een damwandweerstand van 10000 dagen.

kanaalpeilverlaging 1 m

bij weerstanden van:

bodem 1 d

damwand 1 d

effect op grondwaterstand

verlaging 50 - 100 cm

verlaging 25 - 50 cm

verlaging 10 - 25 cm

verlaging 5 - 10 cm

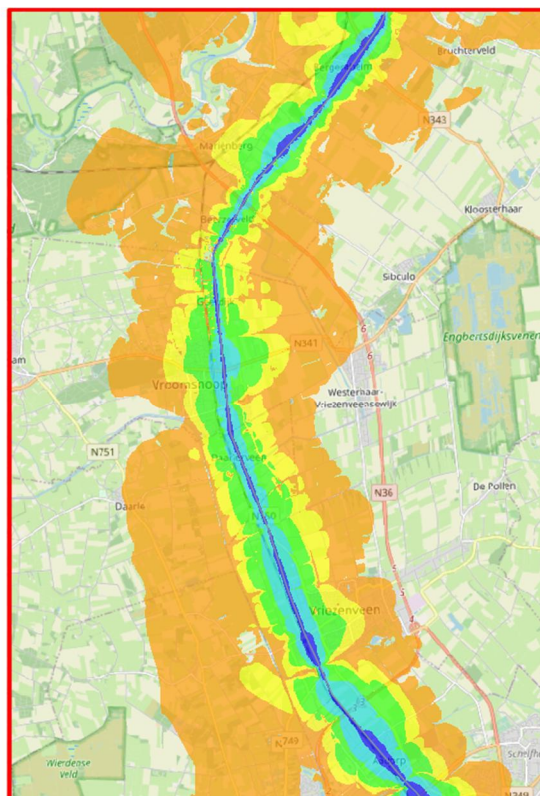
verlaging 1 - 5 cm

verandering < 1 cm

verhoging

kanaal

modelrand



Figuur 4-9 Stationair berekende verlaging van de grondwaterstand voor een kanaalpeilverlaging van 1 m, uitgaande van een bodemweerstand van 1 dag en een damwandweerstand van 1 dag.

kanaalpeilverlaging 1 m

bij weerstanden van:

bodem 100 d

damwand 1 d

effect op grondwaterstand

verlaging 50 - 100 cm

verlaging 25 - 50 cm

verlaging 10 - 25 cm

verlaging 5 - 10 cm

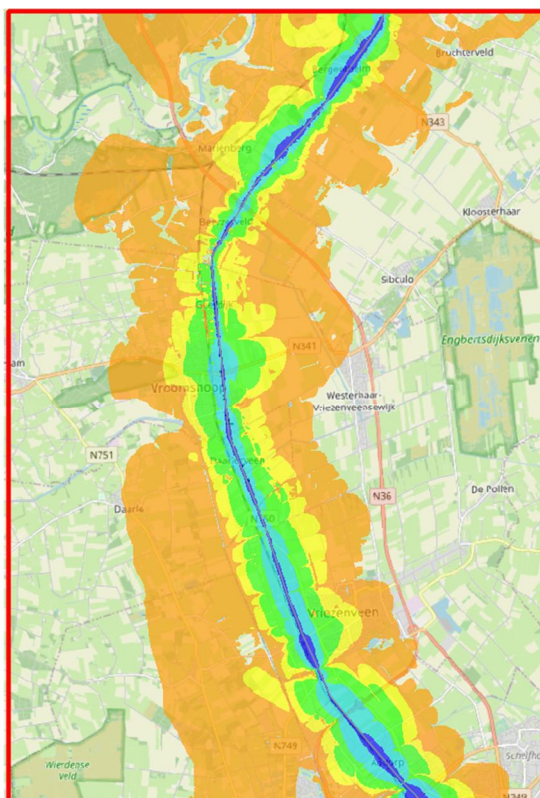
verlaging 1 - 5 cm

verandering < 1 cm

verhoging

kanaal

modelrand



Figuur 4-10 Stationair berekende verlaging van de grondwaterstand voor een kanaalpeilverlaging van 1 m, uitgaande van een bodemweerstand van 100 dagen en een damwandweerstand van 1 dag.

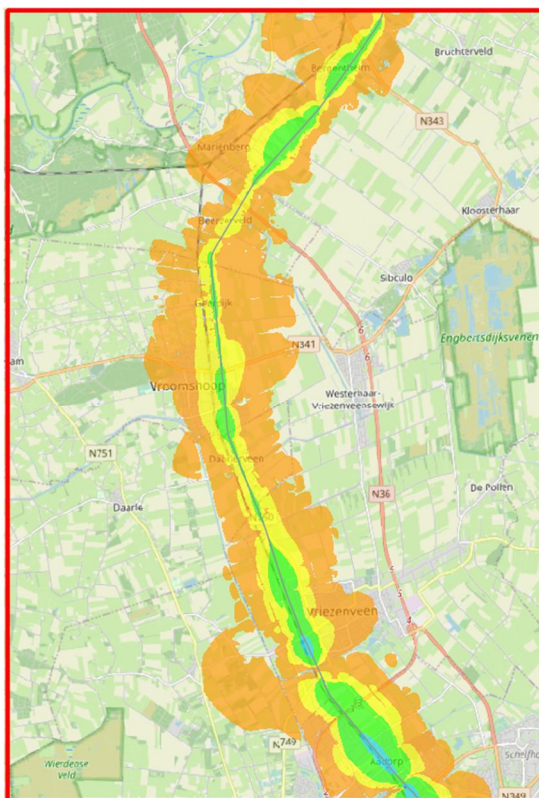
kanaalpeilverlaging 1 m

bij weerstanden van:
bodem 1 d
damwand 10000 d

effect op grondwaterstand

- verlaging 50 - 100 cm
- verlaging 25 - 50 cm
- verlaging 10 - 25 cm
- verlaging 5 - 10 cm
- verlaging 1 - 5 cm
- verandering < 1 cm
- verhoging

— kanaal
— modelrand



Figuur 4-11 Stationair berekende verlaging van de grondwaterstand voor een kanaalpeilverlaging van 1 m, uitgaande van een bodemweerstand van 1 dag en een damwandweerstand van 10000 dagen.

Uitgaande van de kanaalweerstanden van de basisvariant is het berekende effect van een kanaalpeilverlaging met 1 m vrij klein (Figuur 4-7). De maximaal berekende verlaging is iets meer dan 10 cm (Tabel 4-2). Bij een nog hogere bodemweerstand (1000 dagen) wordt dit met 1.7 cm verwaarloosbaar. Als er nagenoeg geen bodem- en damwandweerstanden zijn is het effect groot (Figuur 4-9). De maximaal berekende verlaging bedraagt dan 98.1 cm. Figuur 4-10, Figuur 4-11 en Tabel 4-2 laten zien dat deze verlaging voornamelijk wordt veroorzaakt door de damwandweerstand. Als alleen de bodemweerstand wordt verwijderd (Figuur 4-11), is het beïnvloede gebied een stuk kleiner en is de maximaal berekende verlaging met 52.5 cm bijna gehalveerd. Terwijl bij het verwijderen van de damwandweerstand het beïnvloede gebied (Figuur 4-10) nauwelijks kleiner wordt en de maximaal berekende verlaging met 98 cm is slechts 1 mm minder.

Statistiek

Tabel 4-2 geeft een overzicht van de berekende grondwaterstand door een kanaalpeilverlaging van 1 m voor alle berekende varianten van bodem- en damwandweerstanden. De eerste twee kolommen beschrijven de variant. De derde kolom geeft de gemiddelde verlaging over het complete model. De twee laatste kolommen zijn het meest relevant. Deze geven de maximum berekende verlaging en het totaal verlaagde volume. De gele rij in deze tabel is de basisvariant.

Tabel 4-2 Statistiek van de berekende grondwaterstandsverlaging door kanaalpeilverlaging met 1 m. De basisvariant is geel gearceerd.

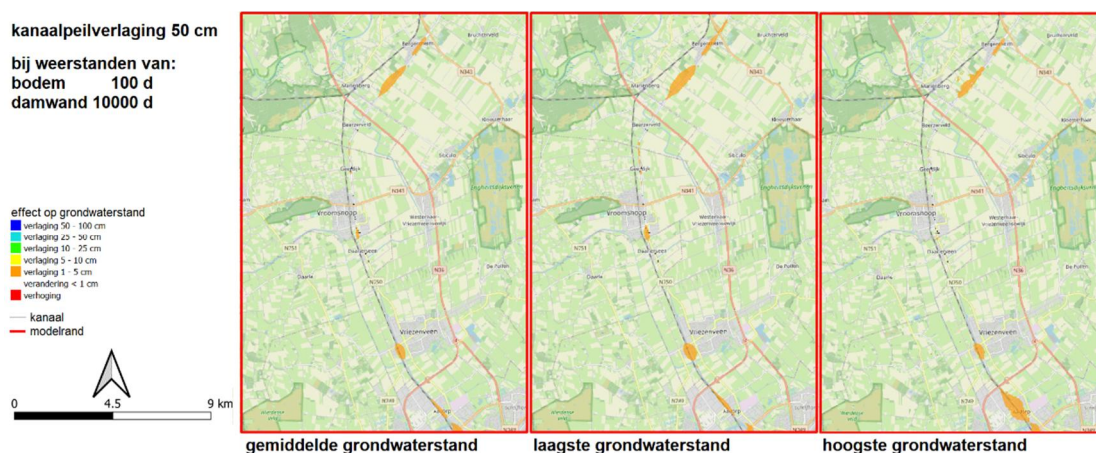
Weerstand bodem [d]	Weerstand damwand [d]	Gemiddelde waarde [m]	Maximum waarde [m]	Volume [miljoen m ³]
1	1	0.040282	0.981	10.132
1	10	0.021526	0.773	5.414

1	100	0.014268	0.552	3.589
1	1000	0.013248	0.528	3.332
1	10000	0.013141	0.525	3.305
10	1	0.039381	0.981	9.905
10	10	0.018380	0.762	4.623
10	100	0.009399	0.348	2.364
10	1000	0.008017	0.311	2.016
10	10000	0.007870	0.307	1.979
100	1	0.038638	0.980	9.718
100	10	0.015396	0.748	3.872
100	100	0.004040	0.226	1.016
100	1000	0.002095	0.115	0.527
100	10000	0.001882	0.105	0.473
1000	1	0.038488	0.980	9.681
1000	10	0.014732	0.744	3.705
1000	100	0.002652	0.210	0.667
1000	1000	0.000504	0.031	0.127
1000	10000	0.000262	0.017	0.066

4.2 Tijdsafhankelijke berekeningen

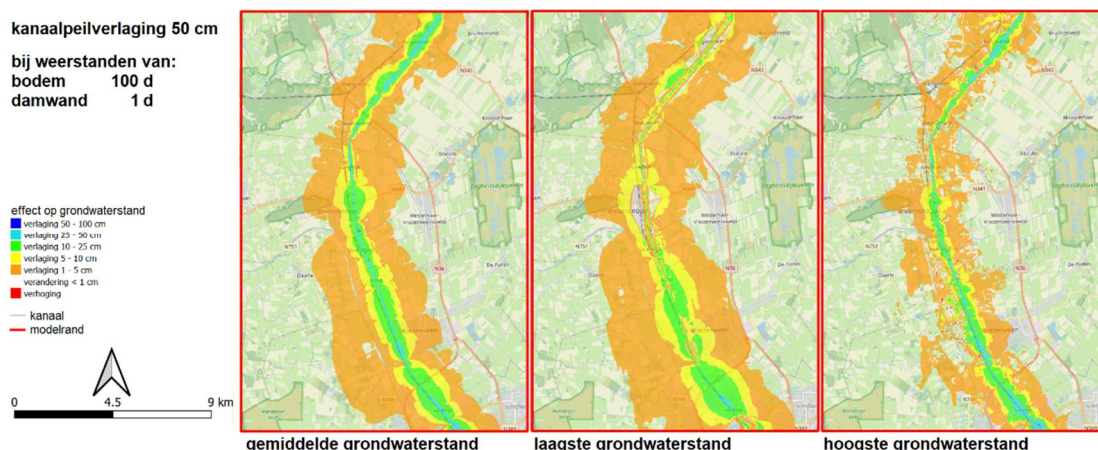
Ter verificatie en om te zien in hoeverre de effecten op de laagste en hoogste grondwaterstand verschillen van die van de gemiddelde grondwaterstand zijn twee tijdsafhankelijke berekeningen uitgevoerd voor een kanaalpeilverlaging van 50 cm. Beide berekeningen gaan uit van een kanaalbodemweerstand van 100 dagen. Bij een berekening is de damwandweerstand op 10000 dagen gezet, bij de andere berekening op 1 dag.

Figuur 4-12 geeft het resultaat voor de berekening met een damwandweerstand van 10000 dagen. Figuur 4-13 doet dat voor de berekening met een damwandweerstand van 1 dag.



Figuur 4-12 Tijdsafhankelijk berekende verlaging van de grondwaterstand voor een kanaalpeilverlaging van 50 cm, uitgaande van een bodemweerstand van 100 dagen en een damwandweerstand van 10000 dagen. Links voor de gemiddelde grondwaterstand. Midden voor de laagste grondwaterstand. Rechts voor de hoogste grondwaterstand.

Figuur 4-12 laat zien dat het effect van kanaalpeilverlaging verwaarloosbaar bij een bodemweerstand van 100 dagen en een dichte damwandweerstand (weerstand is 10000 dagen). Het resultaat is nagenoeg gelijk aan het stationair berekende effect (Figuur 4-1).



Figuur 4-13 Tijdsafhankelijk berekende verlaging voor een kanaalpeilverlaging van 50 cm, uitgaande van een bodemweerstand van 100 dagen en een damwandweerstand van 1 dag. . Links voor de gemiddelde grondwaterstand. Midden voor de laagste grondwaterstand. Rechts voor de hoogste grondwaterstand.

Figuur 4-13 laat zien dat het effect van kanaalpeilverlaging bij een lekke damwand (weerstand is 1 dag) behoorlijk groot is. Zoals verwacht is de reikwijdte van het effect groter voor de laagste grondwaterstand en kleiner voor de hoogste grondwaterstand. Het effect op de gemiddelde grondwaterstand is vergelijkbaar met het stationair berekende effect (Figuur 4-4).

4.3 Conclusies regionale modellering

Hieronder volgen de belangrijkste conclusies die op basis van de regionale grondwatermodellering kunnen worden getrokken.

Kanttekening bij conclusies regionale modellering

De manier waarop de weerstanden van de kanaalbodem en de damwand in het regionale model zijn geschematiseerd beïnvloedt het effect van beide weerstanden op de grondwaterstand. In het detailmodel, dat in het volgende hoofdstuk is beschreven, zijn die weerstanden op een reëlere manier in het model geschematiseerd. Daardoor is een deel van de conclusies, die op basis van de resultaten van het regionale model worden getrokken in tegenspraak met de meer correcte conclusies, die op basis van de resultaten van het detailmodel worden getrokken. Concreet gaat het erom dat het effect verandering van de bodemweerstand op de grondwaterstand groter is dan het effect van verandering van de damwandweerstand, terwijl uit de resultaten van het regionale model het omgekeerde blijkt. Omdat het hieronder conclusies betreft die uit de resultaten van het regionale model getrokken worden, zijn deze conclusies hier toch vermeld.

- De aangenomen waarden van bodemweerstand (100 dagen) en damwandweerstand (10000 dagen) leiden tot plausibele stationair berekende grondwaterstanden, die vrij goed overeenkomen met de gemeten gemiddelde grondwaterstanden.
- Uit tijdsafhankelijke berekeningen blijkt dat de berekende gemiddelde grondwaterstanden wat lager zijn dan de gemeten waarden. De berekende laagste grondwaterstanden zijn gemiddeld wat lager dan de gemeten waarden. De berekende hoogste grondwaterstanden zijn gemiddeld van de zelfde orde als de gemeten waarden. Dat betekent dat het regionale model een iets grotere variatie in grondwaterstanden berekent dan er in de peilbuizen gemeten wordt. Omdat zowel

hoge als lage grondwaterstanden van belang kunnen zijn, zal het regionale model dus eerder een kleine overschatting dan onderschatting van de extreme grondwaterstanden geven en daarmee een kleine veiligheidsmarge hebben ten opzichte van de werkelijk optredende grondwaterstanden.

- De gevoeligheidsanalyse met betrekking tot de weerstand van de damwand lijkt samen met de peilbuismetingen aan te tonen dat de damwand niet op alle plekken waterdicht is. Het effect van een lekke damwand op de grondwaterstand (stijging groter dan 1 cm) blijft in het regionale model beperkt tot maximaal ongeveer 2 km afstand van het kanaal (zie bovenstaande kanttekening bij conclusies regionale modellering).
- Het nagenoeg ontbreken van zowel bodemweerstand als damwandweerstand van het kanaal leidt tot onwaarschijnlijk hoge grondwaterstanden in de buurt van het kanaal. Het is daarom aannemelijk dat beide weerstanden over het merendeel van het kanaal een relevante waarde hebben. Over de exacte waarde van deze weerstanden en de spreiding daarvan langs het kanaal kan met het regionale model geen uitspraak worden gedaan.
- Uit de berekeningen blijkt dat, voor de aangenomen weerstanden van kanaalbodem en damwand, de invloed van het wegnemen van de damwandweerstand op de grondwaterstand duidelijk hoger is dan de invloed van het wegnemen van de bodemweerstand (zie bovenstaande kanttekening bij conclusies regionale modellering). Daarbij moet wel vermeld worden dat we hierbij uitgaan van nagenoeg waterdichte damwanden (weerstand 10000 d) en een bodem die nog enigszins waterdoorlatend is (weerstand 100 d).
- Gezien het feit dat hele lage weerstanden niet plausibel zijn, is het effect van kanaalpeilverlaging op de grondwaterstand klein tot verwaarloosbaar, zeker zolang de peilverlaging beperkt blijft tot 50 cm.
- Alleen indien lokaal over een grotere lengte van het kanaal gaten in de damwand voorkomen, of indien er geen waterkerende damwand aanwezig is, kan het effect van kanaalpeilverlaging op die plekken relevant zijn. Datzelfde geldt voor het voorkomen van plekken zonder relevante bodemweerstand, maar dat is, gezien het sedimentatieproces, minder waarschijnlijk dan gaten in de damwand.
- Een kanaalpeilverlaging van 50 cm heeft alleen effect bij een open damwand. De reikwijdte van het effect is iets groter voor de laagste grondwaterstanden dan voor de hoogste grondwaterstanden. Het effect van kanaalpeilverlaging op de gemiddelde grondwaterstand komt goed overeen met het stationair berekende effect.
- De berekeningen met het regionale model tonen wel aan dat een kanaalpeilverlaging effect heeft als de bodem open is. Dat is echter alleen het geval na baggeren. Dat geldt dan echter voor een beperkte lengte van het kanaal en voor een beperkte tijd. Gezien de verwachte snelheid van het weer dichtslippen van de bodem na het baggeren, zal het effect van een kanaalpeilverlaging op de grondwaterstand in die situaties hoogstwaarschijnlijk beperkt en kortdurend zijn.

Afgeleide conclusies:

- Een waterkerende damwand heeft een sterk grondwater verlagende werking direct achter die damwand. Dat kan in het verleden ertoe hebben geleid dat door plaatsing van een dergelijke damwand de grondwaterstand daar met 1.5 tot 2 meter omlaag is gegaan, met mogelijk gevolgen voor het aanwezige veen in de bovenste 2 à 3 meter van de bodem. Daarom is het moment in tijd dat de damwand is veranderd van slechts grondkerende constructie tot ook waterkerende constructie belangrijk. Belangrijke kanttekening daarbij is dat de verlaging door het aanbrengen van damwanden met toenemende afstand tot het kanaal heel snel kleiner wordt, tot een paar decimeter bij de panden.
- Een eerste meetronde op 3 juni 2021 liet zien dat er in het zuidelijke deel van het kanaal op meerdere plekken een grondwaterstand van slechts enkele cm onder

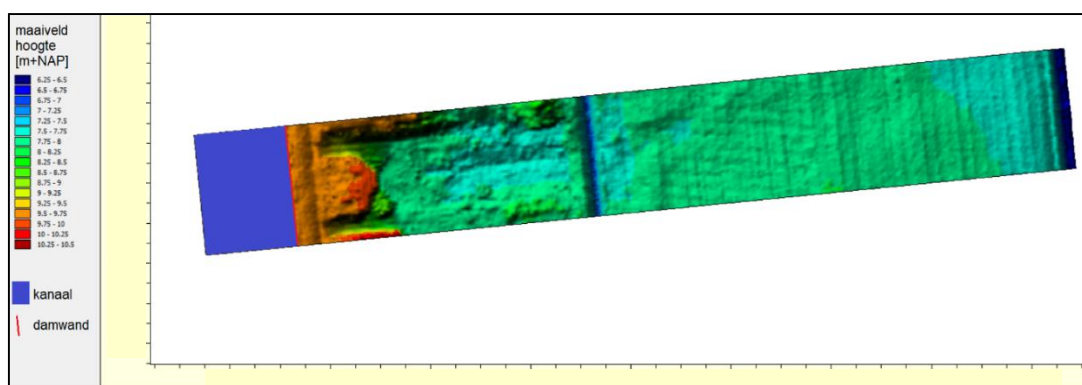
kanaalpeil is aangetroffen. Dat duidt op het ontbreken van een relevante weerstand op die plekken. Dat zou ook op andere locaties langs het kanaal kunnen voorkomen, dan wel in het verleden het geval zijn geweest.

5 Analyse met het detailmodel

Het detailmodel is opgezet voor de locatie van het pand Panden 2, 18 en 16. Bij deze locatie schatten we op voorhand in dat hier de grootste kans bestaat op het optreden van grote verhangen in het grondwater, dan wel in de huidige situatie, dan wel in een in het verleden mogelijk opgetreden andere situatie. Bij deze locatie ligt meetraai 7, met 4 ondiepe en 4 diepe peilbuizen. De ondiepe peilbuizen, met filters tot ongeveer 4 m onder maaiveld, zijn HB07-04 vlakbij het kanaal, HB07-05 aan de voorzijde van het pand, HB07-06 aan de achterzijde van het pand en HB07-07 op ruim 15 m achter het pand. De diepe peilbuizen, met filters tot ongeveer 9 m onder maaiveld zijn B07-04, B07-05, B07-06 en B07-07. De diepe peilbuizen liggen allen op ongeveer 1 m afstand ten noorden van de ondiepe peilbuizen met dezelfde nummers.

5.1 Modelbeschrijving

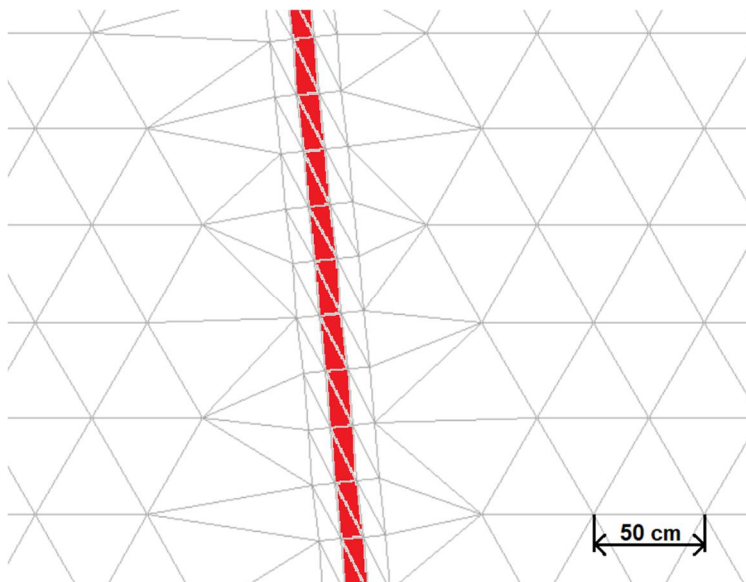
Het model is 218 m lang en 30 m breed (Figuur 5-1). Het loopt vanaf de westzijde van het kanaal tot aan een permanent watervoerende sloot in het oosten. Deze drainerende sloot vormt een lokale waterscheiding die ook in het regionale model is terug te vinden (Figuur 2-1, rechts naast peilbuis B28B0128).



Figuur 5-1 Overzicht van het model met maaiveld hoogte

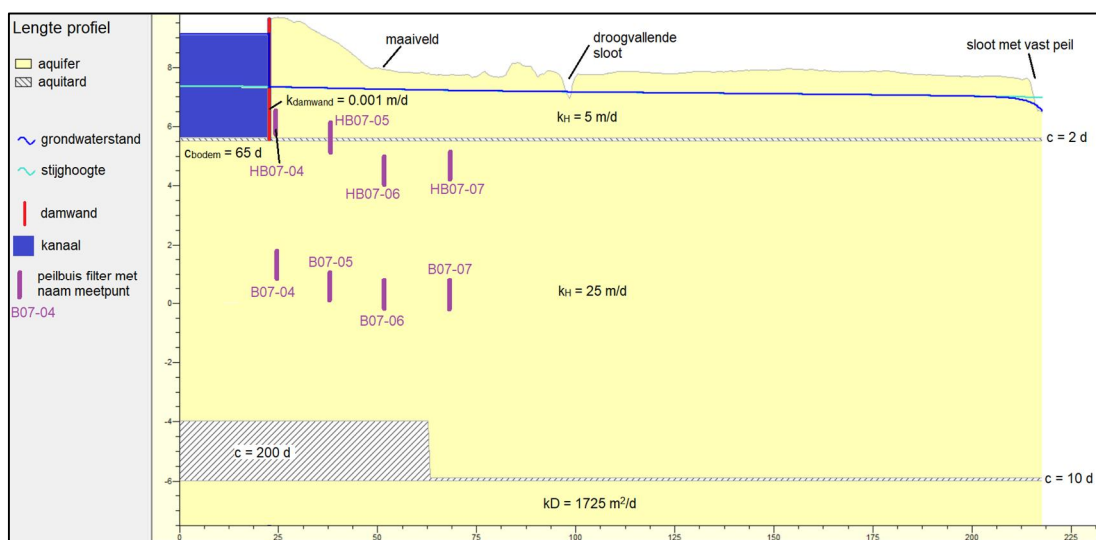
De gebruikte modelsoftware is Triwaco, een eindige elementen model dat gebruik maakt van driehoeken, waarmee de ligging en dikte van de damwand optimaal gevolgd kan worden. Het model maakt gebruik van watervoerende pakketten met een doorlatendheid (k) of een doorlaatvermogen (kD). Tussen de watervoerende pakketten bevinden zich slechtdoorlatende lagen met een weerstand (c), waarin alleen verticale stroming kan optreden.

Het model is opgebouwd uit driehoekige elementen met knopen in de hoeken, die de parameterwaarden bevatten. De knoofafstand in het model is 0,5 m (Figuur 5-2). Alleen bij de damwand is afstand kleiner. De damwand tussen kanaal en oever, die bij Panden 2, 18 en 16 ongeveer 4 meter lang is, bestaat uit een elementenrij van ongeveer 10 cm breed. De hydraulische weerstand van de damwand wordt in het model geschematiseerd door een lage k -waarde toe te kennen aan alle knopen van de damwandelementen.



Figuur 5-2 Model elementen rond de damwand (rode vlakken)

Het model bestaat uit 3 watervoerende pakketten, waarvan het bovenste watervoerend pakket freatisch is gemodelleerd (Figuur 5-3). Dat betekent dat het doorlaatvermogen van dit pakket (kD_1) mede bepaald wordt door de berekende grondwaterstand. De basis van dit pakket ligt op NAP +5.6 m, gelijk aan de bodemhoogte van het kanaal. De weerstand tegen verticale stroming tussen watervoerend pakket 1 en 2 is geschematiseerd in een 10 cm dikke weerstand biedende laag, waarin ter plekke van het kanaal ook de bodemweerstand van het kanaal is opgenomen. De veenlaag, die lokaal in de bovenlaag aanwezig is, ligt boven de gemeten grondwaterstand en is daarom niet in het model opgenomen. Omdat deze veenlaag zeer discontinu aanwezig is, zal het effect ervan waarschijnlijk klein zijn, ook in het geval grondwaterstanden boven deze veenlaag zouden uitkomen.



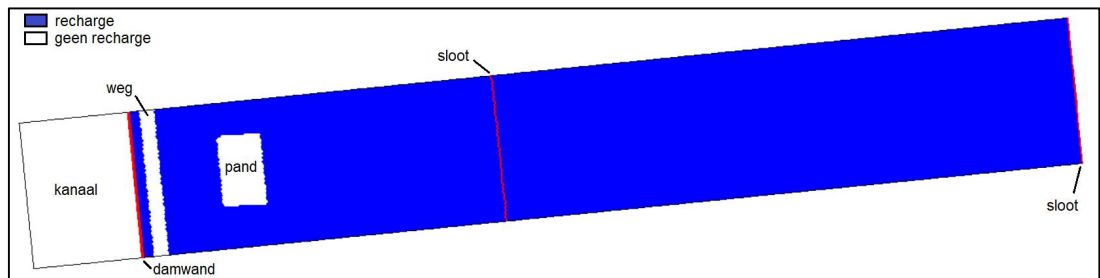
Figuur 5-3 Dwarsdoorsnede in lengte richting met modelschematisatie en locatie meetpunten.

Kanttekening bij de gehanteerde schematisatie

Het weglaten van deze veenlaag maakt (numeriek stabiel) freatisch rekenen mogelijk. Freatisch rekenen betekent dat de dikte D uit het doorlaatvermogen (kD) van de bovenste watervoerende pakket wordt bepaald door de berekende grondwaterstand en de onderkant van dit pakket. Als de berekende grondwaterstand zich rond de onderkant van het freatisch pakket beweegt (deels erboven en deels eronder), wordt het numerieke model minder stabiel, duren de berekeningen langer en zijn de uitkomsten minder betrouwbaar. Vooral bij tijdsafhankelijk rekenen is dat een probleem.

Voor een situatie waarbij de grondwaterstand niet boven de weggelaten veenlaag uitkomt, geeft het model betrouwbare resultaten. Voor een situatie waarbij dit (deels) wel het geval is, bv. als de damwand compleet lek is en de grondwaterstand achter de damwand op kanaalpeil ligt, zijn de resultaten minder betrouwbaar. Voor die situatie is een andere manier van modelleren gebruikt, die wel betrouwbare resultaten geeft. Deze manier van modelleren is verderop in dit rapport uitgelegd.

Neerslag en verdamping worden in het model per tijdstap ingevoerd als grondwateraanvulling op het bovenste watervoerend pakket, met uitzondering van het kanaal, de weg en het pand (Figuur 5-4). Daarbij wordt er vanuit gegaan dat neerslag op de weg en het pand naar het riool wordt afgevoerd. Het kanaal wordt in het model geschematiseerd door een rand met een vast peil en een watervoerend pakket met een extreem hoge doorlatendheid op de locatie van het kanaalwater.



Figuur 5-4 Vlakken waarin grondwateraanvulling (neerslag – verdamping) het model wordt ingevoerd

Relevante andere parameters:

- Modelranden:
 - o Laag 1: Kanaal met H-rand op NAP +9.15 m (en $k_1 = 10000$ m/d)
 - o Laag 1: Overige plaatsen Q-rand met $0 \text{ m}^3/\text{d}$
 - o Andere lagen: Q-rand met $0 \text{ m}^3/\text{d}$
- Sloot langs ooststrand:
 - o Actief in laag 1
 - o Peil: NAP +6.25 m
 - o Breedte: 3.5 m
 - o Drainage- en infiltratie-weerstand: 1 d
- Sloot in het midden:
 - o Actief in laag 1
 - o Peil: NAP +6.90 m
 - o Breedte: 1.5 m
 - o Drainage-weerstand: 1 d
 - o Infiltratie-weerstand: $1\text{E}+20$ d
- Drainage over maaiveld:
 - o Peil: Maaiveld + 5 cm
 - o Drainage-weerstand: 0.1 d
- Bergingscoëfficiënten:
 - o Freatisch (laag 1): 16%
 - o Elastisch laag 1: 100% (als water boven maaiveld komt)
 - o Andere lagen: 0.1% (alleen elastisch)

5.2 Kalibratie (1 juni t/m 23 juli 2021)

De kalibratie van het model is uitgevoerd op de waargenomen stijghoogten van de meetpunten die er voor dit onderzoek zijn geplaatst. Deze meetpunten bevinden zich in de bovenste twee watervoerende pakketten. De waarnemingen in deze meetpunten zijn gestart in de middag van 9 juni 2021. De metingen worden gedaan door middel van

waterstandsliggers, die automatisch registreren. Elk uur worden de waarden van deze divers in een database opgeslagen. Deze uur-waarden worden gebruikt om het model te kalibreren. Kanttekeningen bij de meetpunten zijn:

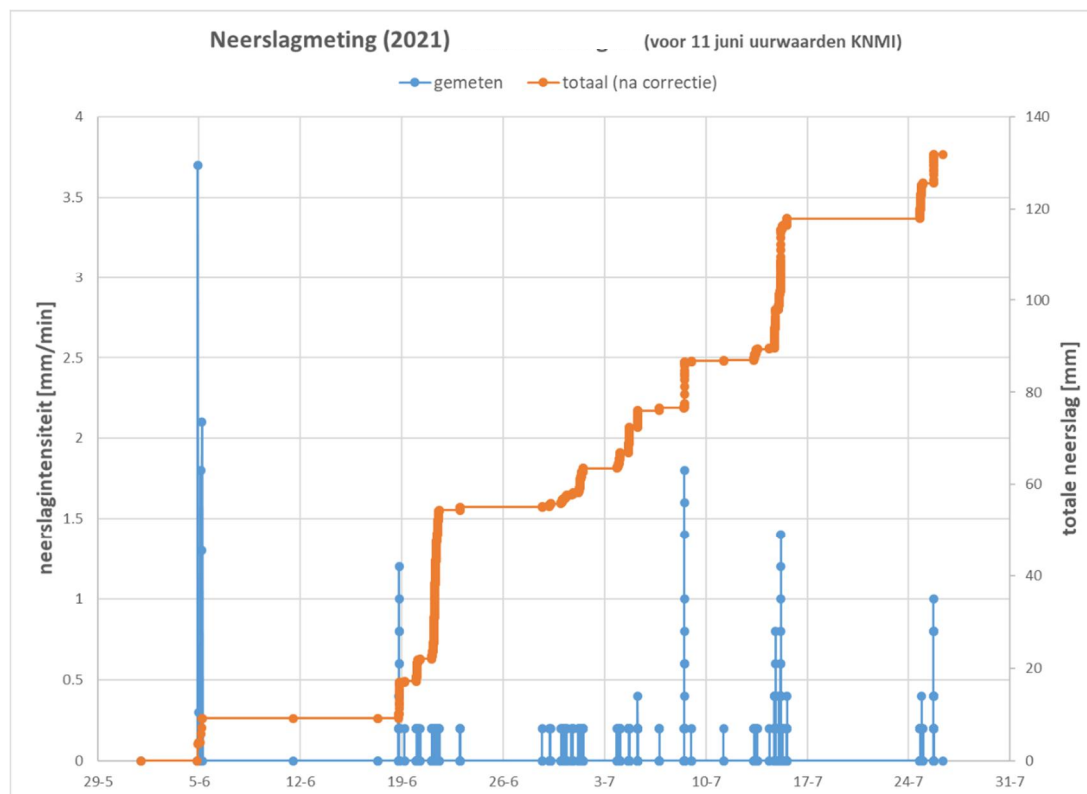
- De meetpunten liggen feitelijk allemaal in een en hetzelfde watervoerend pakket. Op de meetpunten is geen weerstandbiedende laag (klei, leem of veen) tussen beide niveaus aangetroffen.
- De meetpunten ondiep en diep zitten niet exact op dezelfde locatie. Ze liggen alle vier ongeveer 1 meter uit elkaar. Dat betekent dat ze net andere grondwaterstanden meten.
- Alle meetpunten hebben een referentieniveau, bovenkant buis. Doordat de ondiepe en diepe meetpunten niet op dezelfde locatie zitten, zijn er twee metingen nodig met bijbehorende onnauwkeurigheid. Dat vergroot de kans op onnauwkeurigheid in onderlinge referentieniveaus.

De enige variabelen gedurende de kalibratieperiode zijn het kanaalpeil en de neerslag en verdamping. Het kanaalpeil gedurende deze periode is nagenoeg constant op NAP +9.15 m. De neerslag wordt gemeten door een neerslagmeter, die voor dit onderzoek is geplaatst 100 m ten zuiden van Pand 14 en die vanaf 11 juni operationeel is. De neerslag van de periode daarvoor is afkomstig van KNMI neerslagstation Vroomshoop, waarvan de uur-data met 3 weken vertraging beschikbaar komen omdat die eerst door het KNMI geverifieerd worden. Voor de verdamping is gebruik gemaakt van de data van KNMI weerstation Heino, waarvan op dag-basis de totale verdamping gemeten wordt en op uur-basis de globale straling. Deze data komen met een vertraging van ruim 1 dag beschikbaar. Op basis van de globale straling wordt de dag-verdamping omgerekend naar uur-verdamping.

In het model wordt per tijdstap alleen een grondwateraanvulling ingevoerd. Die wordt bepaald door de verdamping van de neerslag af te trekken.

Neerslag (Figuur 5-5):

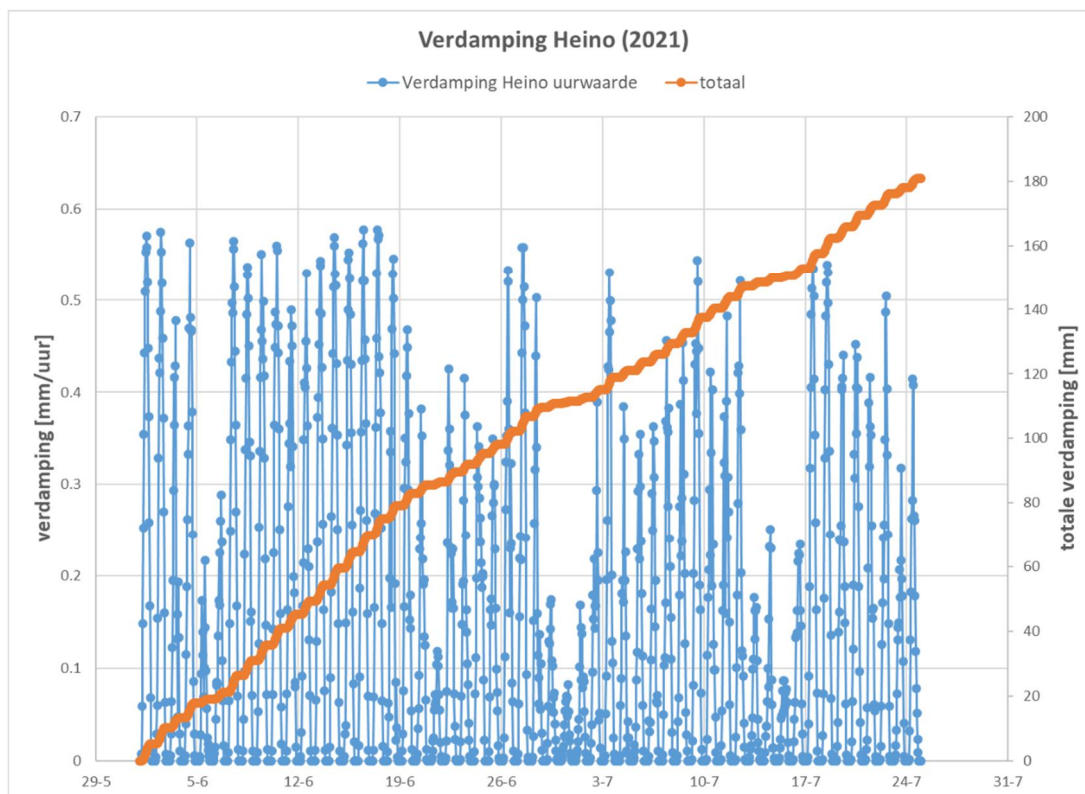
- KNMI neerslagstation Vroomshoop op uur-basis (1 – 11 juni)
- Neerslagmeter 100 m ten zuiden van Pand 14 op minuten-basis (11 juni t/m 23 juni) omgerekend naar uur-waarden. Deze neerslag wordt gemeten met een tipping bucket regenmeter die elke 0.2 mm tipt. Per tip gaat daarbij ongeveer 0.4 seconde aan neerslag verloren. Daarvoor zijn de minuut-waarden gecorrigeerd.



Figuur 5-5 Gebruikte neerslag waarnemingen

Verdamping KNMI weerstation Heino (Figuur 5-6):

- Verdamping op dag-basis
- Globale straling op uur-basis en op dag-basis
- $\text{Uur-verdamping} = \text{dag-verdamping} \times (\text{uur-straling} / \text{dag-straling})$



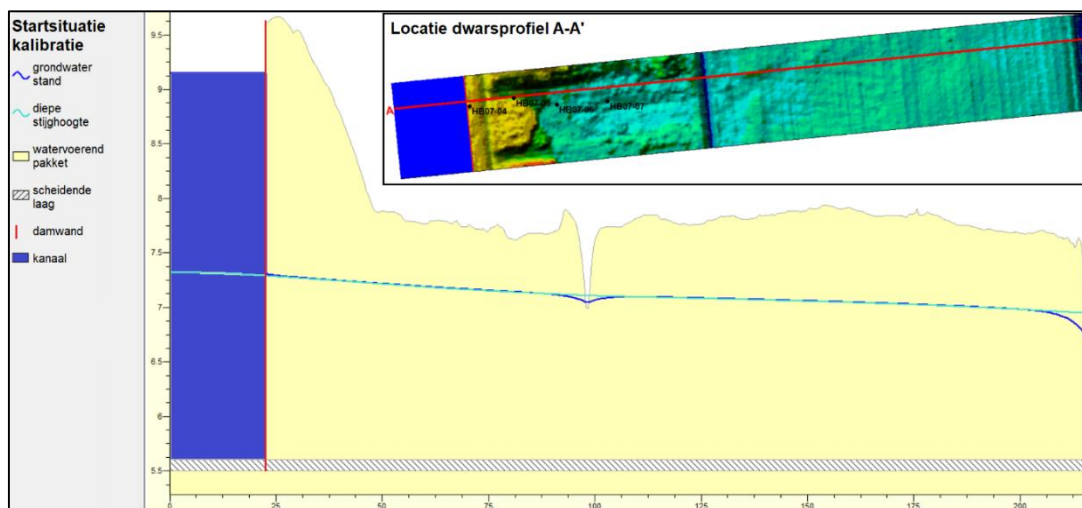
Figuur 5-6 Gebruikte verdampingswaarnemingen

5.2.1 Initiële toestand

De metingen van neerslagstation Vroomshoop laten zien dat er kort voor het begin van de kalibratieperiode een periode met veel neerslag is geweest

- Neerslag mei 2021: 107.3 mm, waarvan 15.7 mm op 26 mei en 16.3 mm op 27 mei
- Verdamping mei 2021: 74.6 mm

Het verloop van de stijghoogtemetingen vanaf 9 juni in de tweede helft van de middag geven ook aan de begin situatie relatief nat moet zijn geweest. Daarom is er voor de startwaarde van de stijghoogten uitgegaan van een stationaire berekening met een neerslagoverschot van 2 mm/dag (Figuur 5-7).



Figuur 5-7 Startsituatie kalibratie

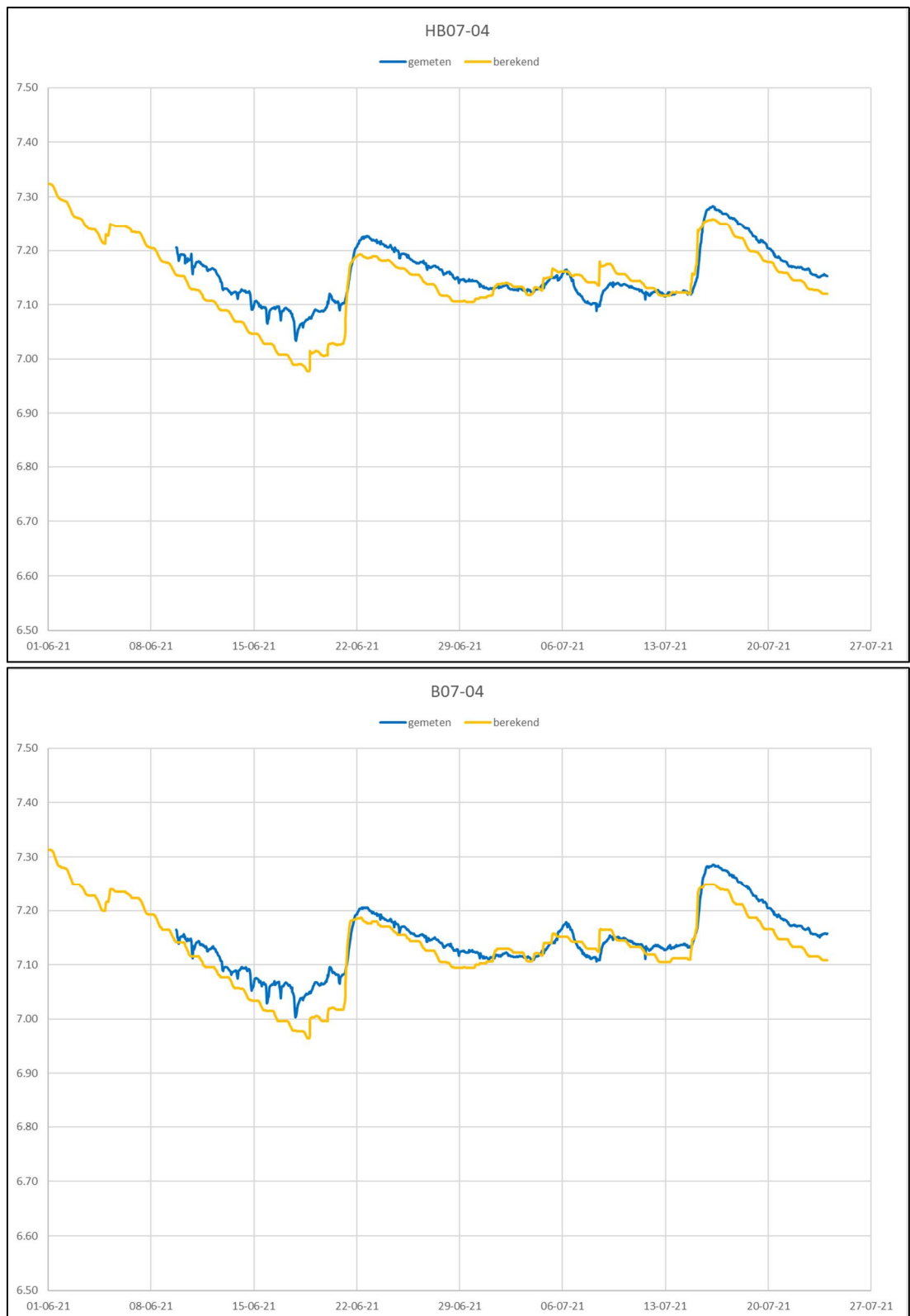
5.2.2 Kalibratie resultaat

De belangrijkste modelparameters bij de kalibratie zijn de bodemweerstand van het kanaal, de damwandweerstand en de freatische bergingscoëfficiënt. Andere relevante parameters zijn de doorlatendheid van het bovenste matig doorlatende watervoerend pakket en de daarmee samenhangende weerstand tussen dit pakket en het daaronder gelegen goed doorlatende watervoerend pakket.

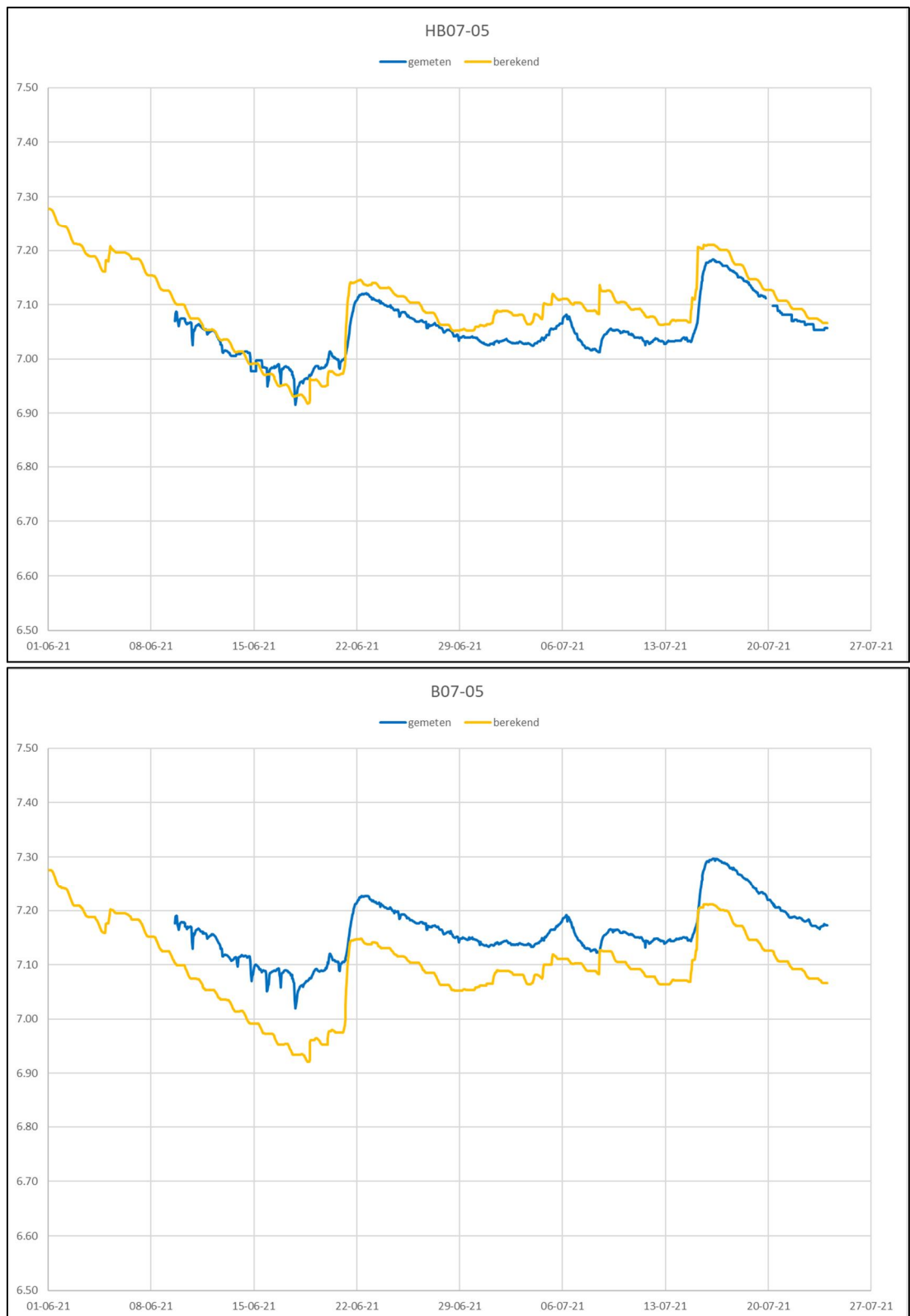
De gekalibreerde parameterwaarden zijn (zie ook Figuur 5-3):

- Damwandweerstand: 100 d ($k = 0.001$ m/d over een dikte van 10 cm).
- Bodemweerstand: 65 d
- Freatische bergingscoëfficiënt: 16%
- Doorlatendheid bovenste watervoerend pakket: 5 m/d
- Verticale weerstand naar onderliggend watervoerend pakket: 2 d

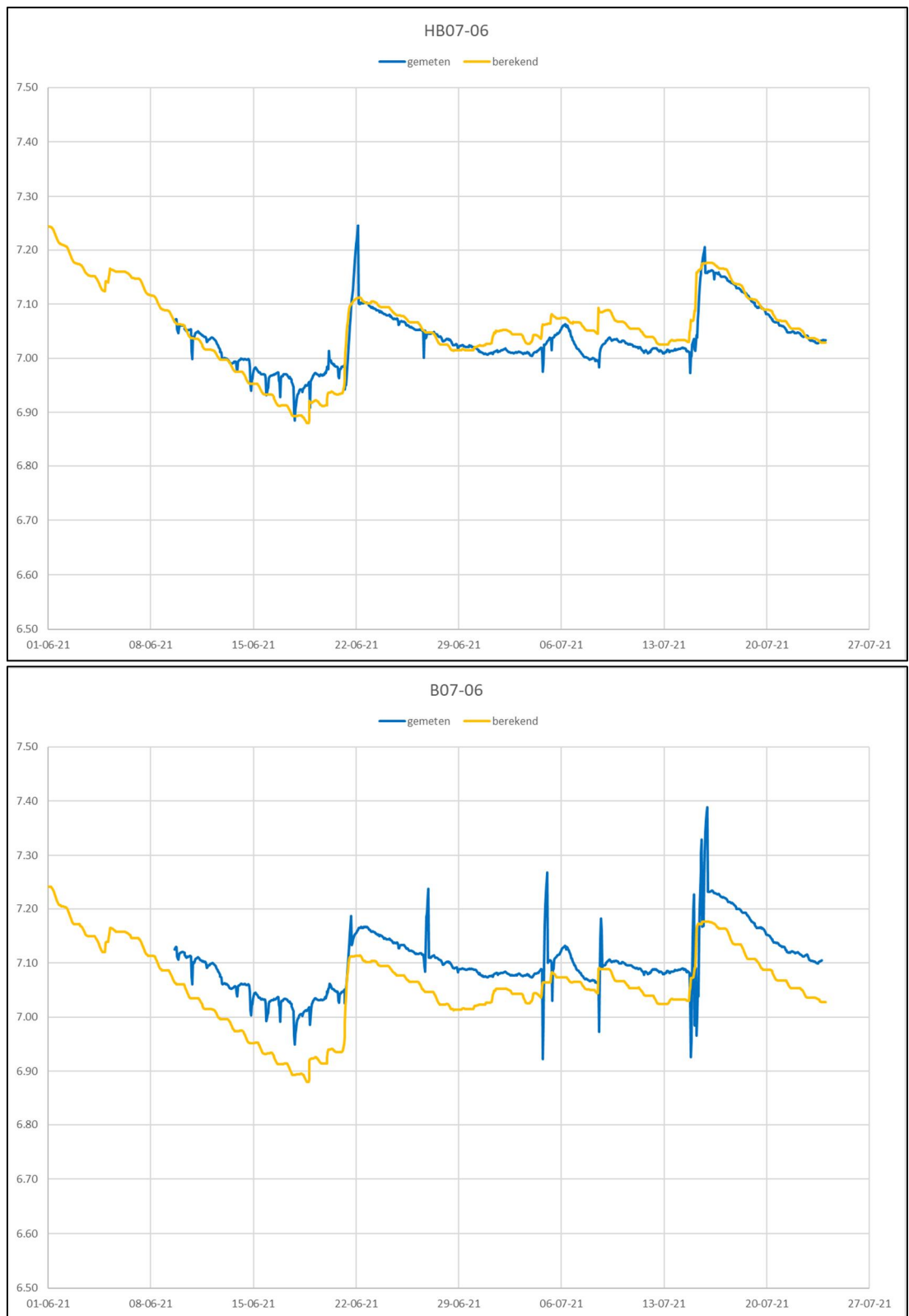
De onderliggende figuren (Figuur 5-8, Figuur 5-9, Figuur 5-10 en Figuur 5-11) geven het resultaat van de kalibratie, met daarin de berekende stijghoogten (oranje) en de gemeten waarden (blauw).



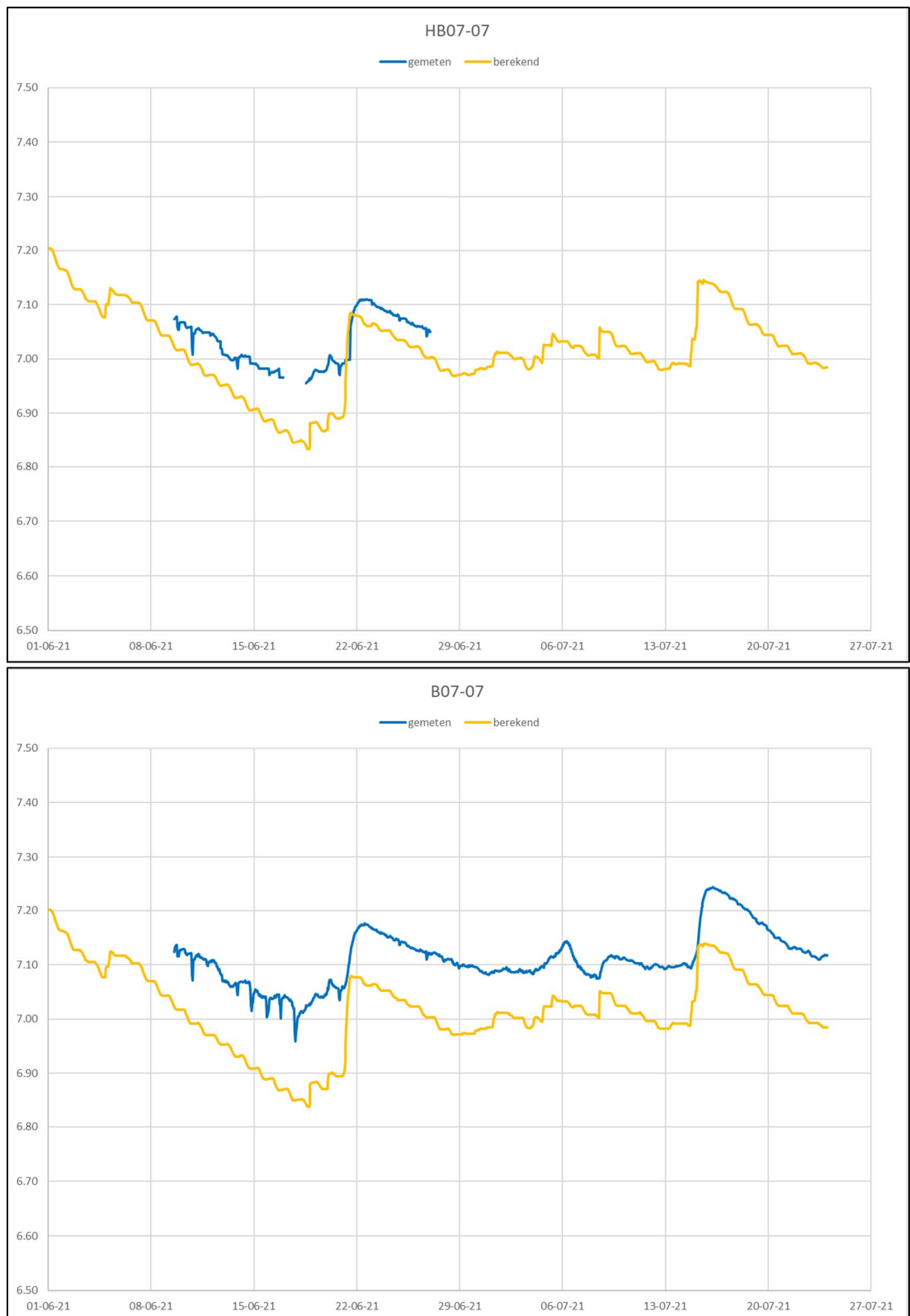
Figuur 5-8 Kalibratieresultaat meetpunten HB07-04 en B07-04



Figuur 5-9 Kalibratieresultaat meetpunten HB07-05 en B07-05



Figuur 5-10 Kalibratieresultaat meetpunten HB07-06 en B07-06



Figuur 5-11 Kalibratieresultaat meetpunten HB07-07 en B07-07

Belangrijkste constatering is dat het verloop in de tijd (stijging en daling) van de berekende waarden goed overeenkomt met dat van de gemeten waarden. Ook de absolute berekende waarden komen vrij goed overeen met de gemeten waarden. De verschillen zijn bijna altijd kleiner dan 10 cm.

Opvallend is dat de berekende verschillen tussen de ondiepe en diepe meetpunten klein zijn, orde 1 cm, en op meetpunt 04 (Figuur 5-8) na duidelijk kleiner dan de gemeten verschillen. Daarbij moet worden aangetekend dat de verschillen tussen de ondiepe en diepe metingen mede kunnen worden veroorzaakt door onnauwkeurigheden in de referentieniveaus van deze meetpunten.

5.2.3 Gevoeligheidsanalyse modelparameters

De gebruikte modelparameters zijn onderworpen aan een gevoeligheidsanalyse. Daarbij is steeds de verandering ten opzichte van de gekalibreerde stijghoogten bepaald op de locaties van de meetpunten. Neerslag en verdamping zijn niet meegenomen in deze analyse. De berekeningen voor de gevoeligheidsanalyse zijn stationaire berekeningen. Alleen de gevoeligheid van de freatische bergingscoëfficiënt is met tijdsafhankelijke berekeningen uitgevoerd.

Onderstaande tabellen geven de resultaten van de uitgevoerde gevoeligheidsanalyse. In de tabellen staat in de eerste twee kolommen steeds de naam van het meetpunt en de berekende stationaire stijghoogte met het gekalibreerde model. In de kolommen daarachter staan de afwijkingen in meter ten opzichte van de gekalibreerde stijghoogten. In de kop boven deze kolommen staat de naam van de parameter, de gekalibreerde waarde en de waarden waarmee de gevoeligheidsanalyse voor die parameter is uitgevoerd.

Bij de gevoeligheidsanalyse van de freatische bergingscoëfficiënt is gekeken naar de variatie van de stijghoogte in de tijd. Daarvoor is per locatie het verschil tussen de hoogste en de laagste berekende stijghoogte bepaald en vergeleken met het verschil tijdens de kalibratie.

Tabel 5-1 Gevoeligheid van de weerstand van de kanaalbodem

Meetpunt	Kalibratie waarde [m+ NAP]	c-kanaalbodem [d] = 65			
		30	50	75	100
HB07-04	7.30	+0.29	+0.09	-0.05	-0.13
B07-04	7.29	+0.31	+0.09	-0.05	-0.13
HB07-05	7.25	+0.28	+0.08	-0.05	-0.12
B07-05	7.25	+0.28	+0.08	-0.05	-0.12
HB07-06	7.21	+0.25	+0.08	-0.04	-0.11
B07-06	7.21	+0.25	+0.08	-0.04	-0.11
HB07-07	7.17	+0.22	+0.07	-0.04	-0.10
B07-07	7.17	+0.22	+0.07	-0.04	-0.10

Tabel 5-2 Gevoeligheid van de weerstand tussen watervoerende pakketten 1 (freatisch) en 2

Meetpunt	Kalibratie waarde [m+ NAP]	c1 [d] = 2			
		0.5	1	4	8
HB07-04	7.30	-0.11	-0.07	+0.07	+0.17
B07-04	7.29	-0.11	-0.06	+0.07	+0.15
HB07-05	7.25	-0.11	-0.06	+0.07	+0.17
B07-05	7.25	-0.11	-0.06	+0.07	+0.15
HB07-06	7.21	-0.11	-0.06	+0.07	+0.17
B07-06	7.21	-0.11	-0.06	+0.07	+0.16
HB07-07	7.17	-0.12	-0.07	+0.07	+0.17
B07-07	7.17	-0.11	-0.06	+0.07	+0.16

Tabel 5-3 Gevoeligheid van de doorlatendheid van de damwand

Meetpunt	Kalibratie waarde [m+ NAP]	k-damwand [m/d] = 0.001			
		0.0001	0.0005	0.005	0.01
HB07-04	7.30	-0.04	-0.03	+0.15	+0.31
B07-04	7.29	-0.03	-0.02	+0.09	+0.18

HB07-05	7.25	-0.03	-0.02	+0.08	+0.18
B07-05	7.25	-0.03	-0.02	+0.08	+0.17
HB07-06	7.21	-0.02	-0.01	+0.07	+0.16
B07-06	7.21	-0.02	-0.01	+0.07	+0.16
HB07-07	7.17	-0.02	-0.01	+0.07	+0.14
B07-07	7.17	-0.02	-0.01	+0.07	+0.14

Tabel 5-4 Gevoeligheid van de doorlatendheid van watervoerend pakket 1 (freatisch)

Meetpunt	Kalibratie waarde [m+ NAP]	k1 [m/d] = 5			
		1	2.5	7.5	10
HB07-04	7.30	+0.17	+0.08	-0.05	-0.08
B07-04	7.29	+0.16	+0.07	-0.04	-0.07
HB07-05	7.25	+0.16	+0.07	-0.05	-0.07
B07-05	7.25	+0.16	+0.07	-0.05	-0.07
HB07-06	7.21	+0.16	+0.07	-0.05	-0.07
B07-06	7.21	+0.16	+0.07	-0.05	-0.07
HB07-07	7.17	+0.16	+0.07	-0.05	-0.07
B07-07	7.17	+0.16	+0.07	-0.05	-0.07

Tabel 5-5 Gevoeligheid van de doorlatendheid van watervoerend pakket 2

Meetpunt	Kalibratie waarde [m+ NAP]	k2 [m/d] = 25			
		5	15	35	45
HB07-04	7.30	+0.28	+0.08	-0.04	-0.07
B07-04	7.29	+0.31	+0.08	-0.04	-0.07
HB07-05	7.25	+0.22	+0.06	-0.04	-0.06
B07-05	7.25	+0.22	+0.06	-0.04	-0.06
HB07-06	7.21	+0.15	+0.04	-0.03	-0.04
B07-06	7.21	+0.15	+0.04	-0.03	-0.04
HB07-07	7.17	+0.06	+0.02	-0.02	-0.03
B07-07	7.17	+0.06	+0.02	-0.02	-0.03

Tabel 5-6 Gevoeligheid van de weerstand van de kleilaag tussen watervoerend pakketten 2 en 3

Meetpunt	Kalibratie waarde [m+ NAP]	c2 [d] = 200			
		50	100	400	800
HB07-04	7.30	-0.03	-0.01	+0.00	+0.00
B07-04	7.29	-0.03	-0.01	+0.00	+0.00
HB07-05	7.25	-0.03	-0.01	+0.00	+0.00
B07-05	7.25	-0.03	-0.01	+0.00	+0.00
HB07-06	7.21	-0.02	-0.01	+0.00	+0.00
B07-06	7.21	-0.02	-0.01	+0.00	+0.00
HB07-07	7.17	-0.02	-0.01	+0.00	+0.00
B07-07	7.17	-0.02	-0.01	+0.00	+0.00

Tabel 5-7 Gevoeligheid van de weerstand tussen watervoerend pakketten 2 en 3 (naast de kleilaag)

Meetpunt	Kalibratie waarde [m+ NAP]	c2 [d] = 10			
		2	5	20	50
HB07-04	7.30	-0.04	-0.02	+0.01	+0.02
B07-04	7.29	-0.04	-0.02	+0.01	+0.02
HB07-05	7.25	-0.04	-0.02	+0.01	+0.02
B07-05	7.25	-0.04	-0.02	+0.01	+0.02
HB07-06	7.21	-0.04	-0.02	+0.01	+0.02
B07-06	7.21	-0.04	-0.02	+0.01	+0.02
HB07-07	7.17	-0.04	-0.02	+0.01	+0.02
B07-07	7.17	-0.04	-0.02	+0.01	+0.02

Tabel 5-8 Gevoeligheid van het doorlaatvermogen van watervoerend pakket 3

Meetpunt	Kalibratie waarde [m+ NAP]	kD3 [m ² /d] = 1725			
		500	1000	2500	5000
HB07-04	7.30	+0.00	+0.00	-0.00	-0.00
B07-04	7.29	+0.00	+0.00	-0.00	-0.00
HB07-05	7.25	+0.00	+0.00	-0.00	-0.00
B07-05	7.25	+0.00	+0.00	-0.00	-0.00
HB07-06	7.21	+0.00	+0.00	-0.00	-0.00
B07-06	7.21	+0.00	+0.00	-0.00	-0.00
HB07-07	7.17	+0.00	+0.00	-0.00	-0.00
B07-07	7.17	+0.00	+0.00	-0.00	-0.00

Tabel 5-9 Gevoeligheid van de freatische bergingscoëfficiënt op variatie in grondwaterstand

Meetpunt	Kalibratie waarde [m]	Freatische bergingscoëfficiënt = 16%	
		10%	20%
HB07-04	0.29	+0.18	-0.07
B07-04	0.30	+0.19	-0.07
HB07-05	0.30	+0.19	-0.07
B07-05	0.32	+0.20	-0.07
HB07-06	0.29	+0.19	-0.07
B07-06	0.30	+0.19	-0.07
HB07-07	0.30	+0.19	-0.07
B07-07	0.31	+0.19	-0.07

Uit de resultaten van de gevoeligheidsanalyse blijkt dat:

- De bodemweerstand kanaal is dusdanig gevoelig dat die goed te bepalen is (Tabel 5-1).
- De doorlatendheid damwand is laag (orde 0.001 m/d = 100 d weerstand). Een nog lagere doorlatendheid (grotere weerstand) doet weinig op de stijghoogte, een hogere doorlatendheid wel (Tabel 5-3).
- De doorlatendheid van watervoerend pakket 2 is bepalend voor het verhang tussen kanaal en modelrand (Tabel 5-5).
- Kanaalbodemweerstand ook enigszins (Tabel 5-1).
- De doorlatendheid van watervoerend pakket 1 (freatisch) en bijbehorende weerstand tussen watervoerend pakket 1 en 2 zijn gevoelige parameters, en versterken elkaar in effect op de stijghoogte (Tabel 5-4 en Tabel 5-2).
- Verhoging van de weerstand van de aanwezige kleilaag onder een deel van het gebied heeft geen invloed, verlaging wel enigszins (Tabel 5-6).
- Verandering van de weerstand tussen watervoerend pakket 2 en 3 in de rest van het gebied heeft weinig invloed (Tabel 5-7).
- Het doorlaatvermogen van watervoerend pakket 3 heeft geen invloed (Tabel 5-8).
- De freatische bergingscoëfficiënt bepaalt de stijghoogtevariatie in de tijd (Tabel 5-9).

Gevoeligheid meewerkende kanaalbreedte

In de berekeningen met het detailmodel is de gehele breedte van het kanaal bij Panden 2, 18 en 16 opgenomen. Dat betekent dat in het model uit het kanaal over de gehele breedte water naar het onderliggende watervoerend pakket infiltreert en in oostelijke richting wegstroomt. Zeer waarschijnlijk zorgt het hoge waterpeil in het kanaal in werkelijkheid voor een waterscheiding in het watervoerend pakket onder het kanaal, waarbij infiltrerend water uit het westelijke deel van het kanaal in westelijke richting door het watervoerend pakket wordt afgevoerd. Daarmee zou in het detailmodel de toevoer van water uit het kanaal dat richting Panden 2, 18 en 16 stroomt overschat kunnen worden. Omdat het model is gekalibreerd wordt die overschatting echter gecompenseerd door een hogere gekalibreerde weerstand van de kanaalbodem.

Door de modelkalibratie is de totale hoeveelheid water die uit het kanaal infiltreert wel correct berekend, maar is het bodemoppervlak waarover die infiltratie plaatsvindt te groot gekozen. Om dezelfde hoeveelheid water door een kleiner bodemoppervlak te laten infiltreren is een lagere weerstand van de kanaalbodem nodig. Omdat onzeker is over welk bodemoppervlak de infiltratie bijdraagt aan de grondwaterstroming richting Panden 2, 18 en 16, is een berekening uitgevoerd waarbij de westelijke helft van de kanaalbodem in het detailmodel compleet dicht is gemaakt. In eerste instantie is gerekend zonder aanpassing van de kanaalbodemweerstand.

Het resultaat van deze gevoeligheidsberekening is dat de berekende grondwaterstand bij de meetpunten voor de kalibratiesituatie gemiddeld 15 cm omlaag gaat, variërend van 17 cm in het meetpunt direct naast het kanaal tot 14 cm in het meetpunt dat de grootste afstand tot het kanaal verwijderd heeft. Als de bodemweerstand vervolgens verlaagd wordt van 65 dagen naar 35 dagen wordt er bij alle vier de meetpunten weer dezelfde grondwaterstand berekend als tijdens de kalibratie. Dit komt overeen met een bijna de halvering die we a priori zouden verwachten op basis van de verandering van het doorstroomde oppervlak.

Bij onderstaande scenarioberekeningen is met een kanaalbodemweerstand van 65 dagen gewerkt over de gehele kanaalbreedte. Dat betekent dat bij de scenarioberekeningen met een (tijdelijk) verlaagde bodemweerstand de effecten op de grondwaterstand eerder worden overschat dan onderschat. Daarnaast zal de tijd dat de bodemweerstand zich herstelt na baggeren van de kanaalbodem korter zijn, naarmate deze weerstand kleiner is.

5.3 Scenarioberekeningen

De kalibratieberekening laat zien dat het grondwater in de huidige situatie in de periode van 1 juni tot en met 23 juli 2021 geen problemen bij de panden kan veroorzaken. Zowel de kanaalbodem als de damwand hebben een dusdanig hydraulische weerstand dat de grondwaterstand vlakbij het kanaal zich beweegt rond een niveau dat ongeveer 2 meter lager is dan het kanaalpeil. De gemeten stijghoogtes onderschrijven dat.

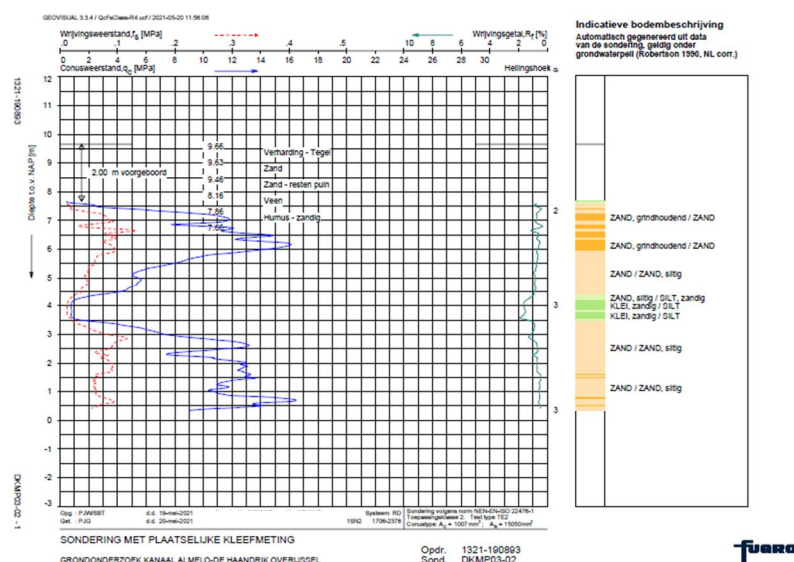
Deze situatie kan in het verleden anders zijn geweest en kan zich mogelijk in de toekomst wijzigen. Daarbij kan gedacht worden aan zaken als verwijderen van de bodemweerstand door baggeren, grootschalige lekkage van de damwand, optreden van extreme droogte, e.d. Daarom is met het gekalibreerde model een aantal tijdsafhankelijke scenarioberekeningen uitgevoerd.

Tijdsafhankelijke scenario's:

- Compleet lekke damwand / situatie voor plaatsen damwanden.
- Verwijderen van de bodemweerstand
 - o Permanent
 - o Tijdelijk (na baggeren) met snel dichtslibbende bodem (in ca 2.5 dag)
 - o Tijdelijk (na baggeren) met langzaam dichtslibbende bodem (in ca 2 maanden)
- De extreme droogte in het groeiseizoen van 2018 heeft relatief weinig effect op verlaging van de grondwaterstand. Het kanaal geeft voldoende aanvulling om diep uitzakken van de grondwaterstanden te voorkomen.

Bij een afwezige of sterk lekkende damwand gaat er in ieder geval vlak naast het kanaal grondwater boven de veenlaag stromen. Daarom is voor het scenario met lekke damwand is het bovenste watervoerend pakket in twee delen gesplitst en zijn de aanwezige veenlaag en het kanaaltalud aangebracht. Een beschrijving van dit aangepaste model staat in par 5.3.1.1.

Daarnaast is het model gebruikt om een aantal specifieke vragen te beantwoorden naar mogelijk optredende situaties, waarbij de vraag is wat het effect daarvan is op de grondwaterstand. Twee vragen betreffen het vervangen van een 4 meter lange betonnen damwand door een 9 meter lange stalen damwand. De eerste daarvan beschrijft de meest voorkomende situatie met enkel zandpakketten onder het kanaal. De tweede betreft een situatie waarbij een langere damwand tot in een aanwezige slechtdoorlatende klei of leemlaag steekt, die zich onder het gehele kanaal uitstrekt. Dit is een meer hypothetische situatie, die mogelijk op enkele plekken voorkomt, maar nergens onomstotelijk is aangetoond. Bij sondering bij Panden 10 en 8 op ongeveer 25 m afstand van het kanaal is een kleilaag aangetroffen (Figuur 5-12). Er is echter geen bewijs hier een kleilaag aanwezig is die zich onder het hele kanaal uitstrekt.



Figuur 5-12 Sondering bij Panden 10 en 8.

De andere vragen betreffen een situatie waar de aanwezige veenlaag zich vanaf het kanaal uitstrekt tot ruim voorbij de panden, zoals bijvoorbeeld bij Pand 20 het geval is. Hierop aansluitend is het mogelijk optreden van schijngrondwaterspiegels boven op de veenlaag onderzocht.

Voor al deze vragen volstaan stationaire berekeningen.

Stationaire scenario's:

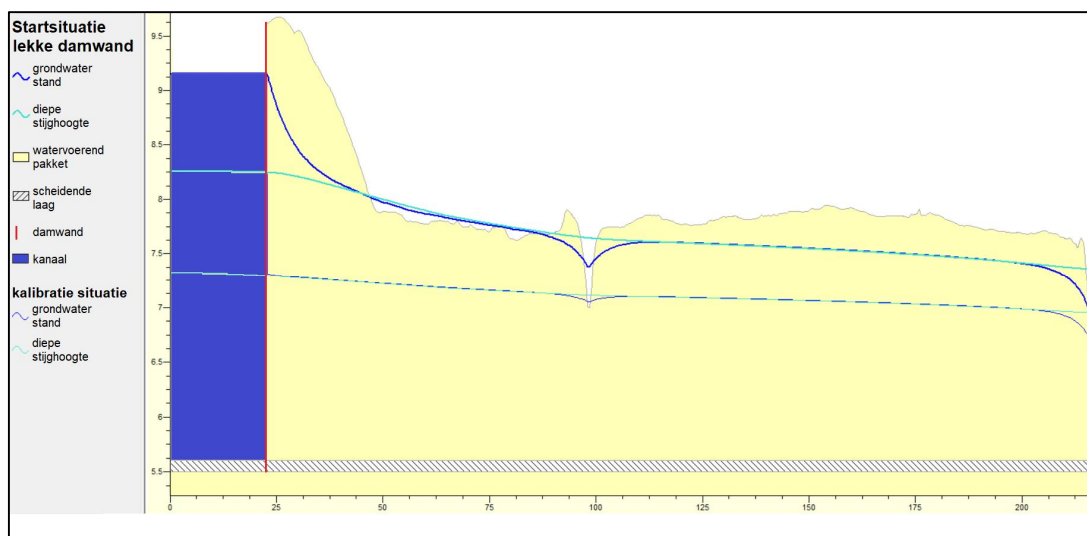
- Verlengen van de damwand (van 4 tot 9 meter) in het watervoerend pakket
- Verlengen van de damwand (van 4 tot 9 meter) tot in een weerstand biedende laag (toegevoegd in het model).
- Situatie met een veenlaag die zich vanaf het kanaal 50 meter uitstrekt (inclusief aangepaste maaiveldhoogte):
 - o Met een goed functionerende damwand;
 - o Zonder damwand, waarbij de weerstand van het veen 20 d is;
 - o Zonder damwand, waarbij de weerstand van het veen 100 d is;

Voor de scenario's met verlengde damwand is het diepere watervoerend pakket dat zich uitstrekt onder de kanaalbodem in het model in twee delen gesplitst. Voor de scenario's zonder damwand is het ondiepe watervoerend pakket gesplitst in een deel boven en een deel onder de veenlaag.

Zoals in de kanttekening bij de modelbeschrijving (par 5.1) al aangegeven zijn de resultaten voor situaties waar de grondwaterstanden boven de ondiepe veenlagen uitkomen door de gekozen modelschematisatie minder betrouwbaar. Daarom zijn de scenario's met een compleet lekke damwand doorgerekend met een model met 4 watervoerende pakketten. In dit 4-lagen model is het freatische watervoerend pakket van het 3-lagen model gesplitst in twee watervoerende pakketten, gescheiden door de ondiepe veenlagen. Een beschrijving van dit model staat in par 5.3.1.1.

5.3.1 Scenario lekke / afwezige damwand

Voor de situatie zonder goed functionerende damwand is de doorlatendheid van de damwand in het model gelijk gesteld aan die van het bovenste watervoerend pakket. In de gehanteerde schematisatie van het 3-lagen model (Figuur 5-3) zou dat erin resulteren dat er over de gehele kanaaldiepte water ongehinderd naar het grondwater kan stromen. De grondwaterstand aan de landzijde van de damwand is dan over een diepte van 3.5 meter gelijk is aan kanaalpeil. Figuur 5-13 laat zien dat dit een groot effect heeft op de grondwaterstand.



Figuur 5-13 Scenario lekke damwand met het 3-lagen model

In deze figuur is met dunne lijnen ook de kalibratiesituatie weergegeven. Duidelijk is dat de grondwaterstand en de stijghoogte in het onderliggende pakket sterk omhoog komen als de damwand verwijderd is. Aan de voorzijde van het pand bedraagt de stijging ongeveer 85 cm. Achter het pand wordt het grondwater gedraineerd door het maaiveld.

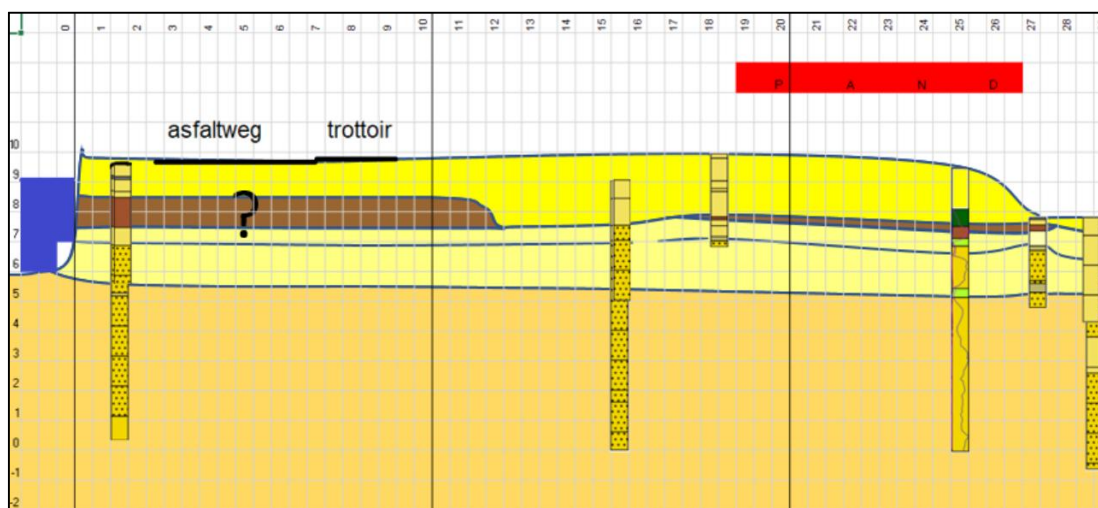
Dit is echter geen reële situatie, omdat er alleen boven de aanwezige veenlaag water ongehinderd van het kanaal de bodem kan instromen. Daaronder wordt de instroom sterk geremd door de weerstand die ook op het naar de oever oplopende talud van de kanaalbodem bevindt. Daarnaast gaat de boven de grondwaterstand aanwezige veenlaag in dit scenario een rol spelen. Daarom is het 3-lagen model voor dit scenario omgebouwd naar een meer realistisch 4-lagen model, dat voor de andere scenario's niet nodig is. Onderstaande paragraaf geeft een beschrijving van dit 4-lagen model.

5.3.1.1 Aanpassing model voor scenario zonder goed functionerende damwand

Het scenario zonder goed functionerende damwand zoals dat met het 3-lagen model is berekend en in Figuur 5-13 is gepresenteerd, beschrijft feitelijk geen reële situatie:

- In de modelschematisatie is de aanwezige veenlaag (Figuur 5-14) niet is opgenomen. Voor de huidige situatie, waarbij de grondwaterstand ruim onder het veen zit is dat voldoende.

- In werkelijkheid loopt de bodem vanaf het lage middendeel van het kanaal op naar de oever, waar het kanaal orde 2 meter minder diep is (Figuur 5-15). In de modelschematisatie loopt de bodem op het laagste niveau door tot tegen de damwand (Figuur 5-13). Voor de huidige situatie met een goed werkende damwand is dat voldoende.
- Als de damwandweerstand verwaarloosbaar klein wordt (bij een lekke of afwezige damwand), zal de weerstand op het bodemtalud (tussen het diepere middendeel van het kanaal en het ondiepere deel bij de damwand) de instroom van kanaalwater beperken. In de modelschematisatie is die weerstand tussen kanaalwater en grondwater dan echter niet aanwezig. Dat betekent dat bij een lekke damwand het kanaalwater in het model over een veel grotere diepte zonder noemenswaardige weerstand de bodem intrekt dan in werkelijkheid het geval zal zijn.
- Daarnaast zal de waterinstroom ter plekke van de veenlaag (ca 1 m dik) door de lagere doorlatendheid van het veen in werkelijkheid ook minder zijn dan in het model zonder damwand, waar die veenlaag niet in is opgenomen. In het model is voor het hele freatische pakket een doorlatendheid van 5 m/d aangehouden.
- Tenslotte is niet bekend dat er in de tijd voordat er damwanden stonden sprake was van grootschalige wateroverlast. In zo'n geval zou het ook bijna onmogelijk zijn geweest om huizen met kelders te bouwen.



Figuur 5-14 Geologisch profiel bij Panden 2, 18 en 16. De donkerbruine kleur geeft de veenlaag aan die in de boringen naast het kanaal is aangetroffen. Het vraagteken duidt erop dat het onzeker is hoe ver die veenlaag doorloopt.

Daarom is een wat meer realistische berekening uitgevoerd naar de situatie van voor de betonnen damwanden. Daarbij hebben we aangenomen dat er een houten beschoeiing aanwezig was, waarvan we aannemen dat die niet waterkerend was. Daarvoor is het freatische pakket uit het 3-lagen model in tweeën gesplitst met de veenlaag daartussen. Verder is uitgegaan van het oude kanaalprofiel met een breedte van 6.6 m op het diepste niveau (NAP +5.6 m) en een talud naar de oever van 1 op 4. Dat is het profiel van voor het verbredende baggeren rond 2012.

In het model is aangenomen dat de beschoeiing geen water tegenhoudt en doorloopt tot de onderkant van het veen. De weerstand van de veenlaag bij het kanaal is geschat op 100 dagen. Een grotere weerstand (200 dagen) geeft maar marginaal andere resultaten.

Rekenwijze

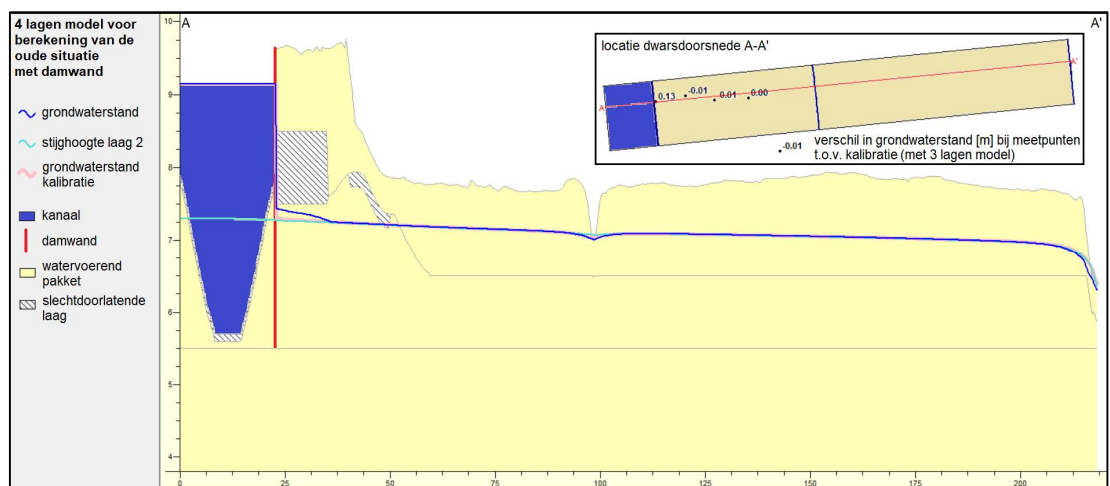
Door het splitsen van het bovenste watervoerend pakket van het 3-lagen model kan het voorkomen dat het bovenste watervoerend pakket van het 4-lagen model op een aantal plekken droogvalt, waardoor

freatisch rekenen sterk bemoeilijkt wordt. Uit oogpunt van numerieke stabiliteit is daarom “confined” gerekend. Daarbij is het doorlaatvermogen van het bovenste watervoerend pakket ($kD1$) berekend door de doorlatendheid van het pakket ($k1$) te vermenigvuldigen met het verschil tussen berekende grondwaterstand en basis van het pakket ($D1$), waarvoor een minimale watervoerende dikte van 10 cm is aangehouden. Het doorlaatvermogen van het daaronder gelegen watervoerende pakket ($kD2$) is berekend door de doorlatendheid van dit pakket ($k2$) te vermenigvuldigen met het verschil tussen de top en basis van het pakket ($D2$), waarbij de top van het pakket is vervangen door de berekende grondwaterstand op plekken in het model waar die lager is. De modelberekeningen zijn voor elk scenario net zolang herhaald ($kD1$ en $kD2$ berekenen $\rightarrow$ grondwaterstand berekenen $\rightarrow$ $kD1$ en $kD2$ berekenen $\rightarrow$ grondwaterstand berekenen, etc.) totdat de berekende grondwaterstand niet meer veranderde.

Bij de tijdsafhankelijke berekening met dit model zijn de kD waardes gebruikt die uit de stationaire berekening volgen. Daarmee is confined gerekend waarbij de freatische bergingscoëfficiënt van het 3-lagen model is toegekend aan de elastische bergingscoëfficiënt van het confined 4-lagen model. De fout die daarmee gemaakt wordt, is relatief klein omdat de grondwaterstanden tijdens de rekenperiode relatief weinig veranderen.

Met dit aangepaste model is eerst de situatie met huidige damwand doorgerekend en is het resultaat daarvan vergeleken de kalibratiesituatie, waarvan het resultaat eerder in Figuur 5-7 is gepresenteerd.

Figuur 5-15 geeft het resultaat van de stationaire berekening van de startsituatie voor de tijdsafhankelijke kalibratie met het aangepaste model (4 lagen) en de vergelijking met het resultaat van het eerdere model (3 lagen).



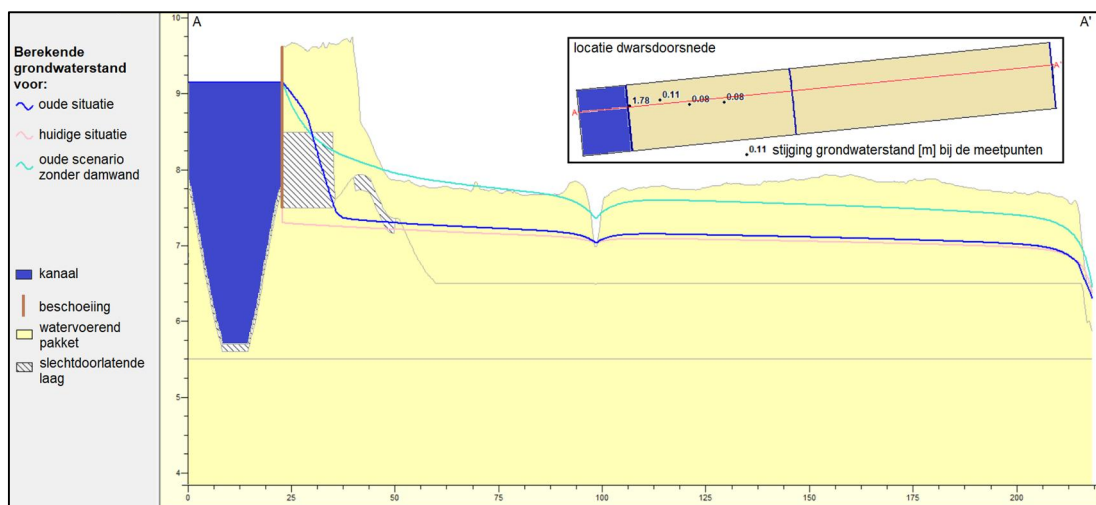
Figuur 5-15 Vergelijking van de resultaten van het 4-lagen model (met damwand) en het 3-lagen model. De donkerblauwe lijn is de grondwaterstand (stijghoogte in de bovenste helft van het opgedeelde pakket). De lichtblauwe lijn is de stijghoogte in de onderste helft van het opgedeelde pakket. De roze lijn is de berekende grondwaterstand tijdens de kalibratie met het 3-lagen model.

De grijze arcering in deze figuur geeft de aanwezige veenlagen uit het geologische profiel aan (zie ook Figuur 5-14). Figuur 5-15 laat zien dat de kanaalbodem, die met een talud van 1 op 4 oploopt van het diepere middendeel naar de oever, aansluit op de aanwezige veenlaag. Daardoor is ook bij het ontbreken van een damwand nog een aanzienlijke weerstand aanwezig tussen kanaalwater en grondwater. Iets wat in het gebruikte 3-lagen model niet het geval is.

Uit Figuur 5-15 blijkt dat de stationair berekende grondwaterstand met het 4-lagen model (donkerblauwe lijn) bijna overall nagenoeg gelijk is aan die met het 3-lagen model (roze lijn). De verschillen bij de panden zijn in de orde van 1 cm. Alleen bij de veenlaag direct naast het

kanaal zijn de verschillen iets groter, maar feitelijk geeft daar de stijghoogte van het pakket eronder (lichtblauwe lijn) de grondwaterstand weer. Want de donkerblauwe lijn geeft de berekende stijghoogte boven de veenlaag weer, die wordt veroorzaakt door het confined rekenen (met minimale $kD1 = 0.5 \text{ m}^2/\text{d}$). Dit laat ook zien dat de gehanteerde schematisatie van het 3-lagen model voor de huidige situatie met goed werkende damwand prima voldoet.

Figuur 5-16 geeft het resultaat van de berekening voor de situatie zonder damwand weer.



Figuur 5-16 Resultaat van het 4-lagen model, oude situatie zonder damwand. De donkerblauwe lijn is de grondwaterstand (stijghoogte in de bovenste helft van het opgedeelde pakket). De lichtblauwe lijn is de grondwaterstand zonder damwand, zoals die is berekend met het 3-lagen model. De roze lijn is de berekende grondwaterstand tijdens de kalibratie met het 3-lagen model.

De roze lijn in deze figuur geeft de berekende grondwaterstand met het 3-lagen model voor de huidige situatie, met goed werkende damwand. Daarin blijft de grondwaterstand onder de veenlaag, wat aantoont dat het weglaten van die veenlaag voor de huidige situatie een goede aanname is om toch freatisch te kunnen rekenen.

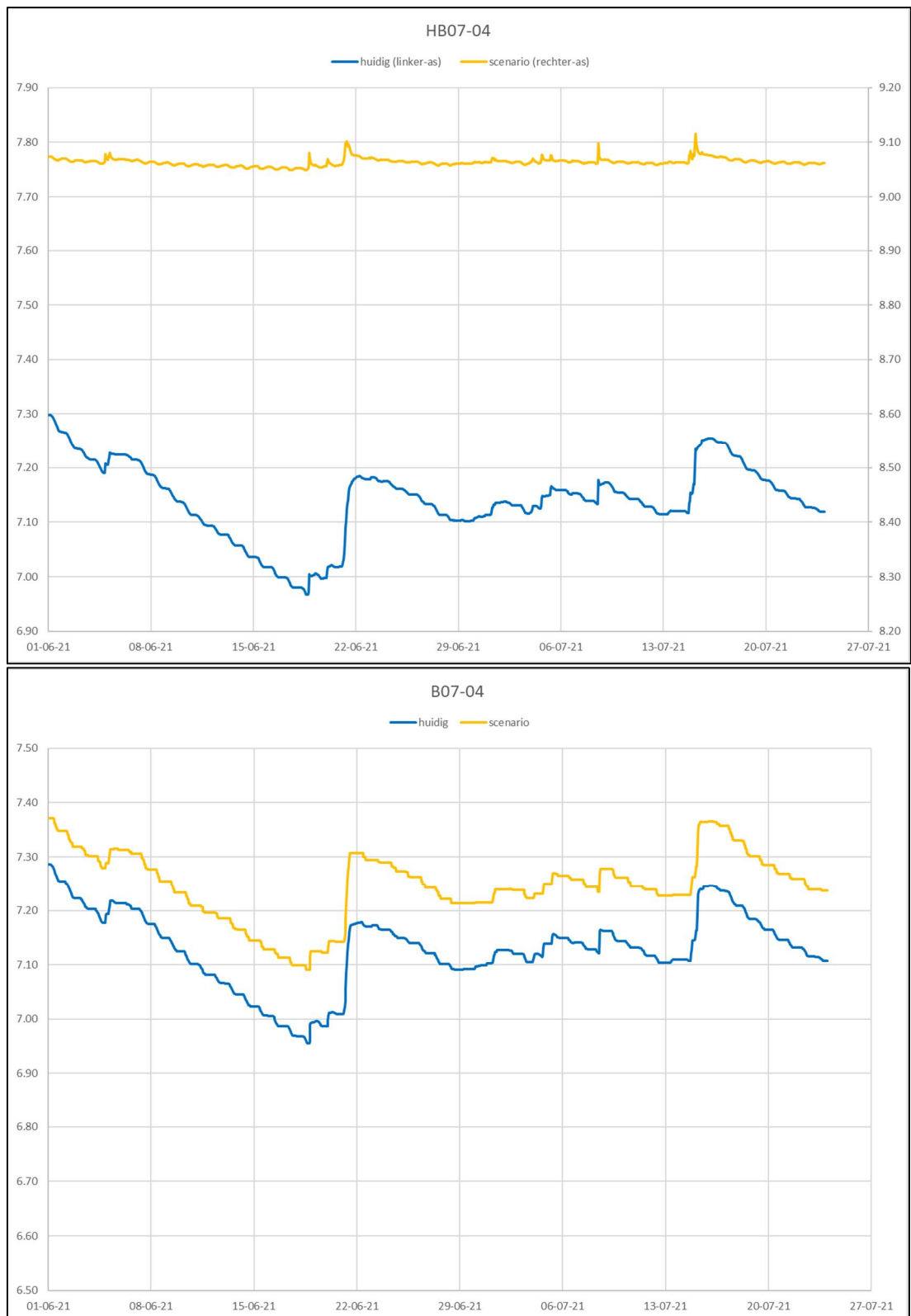
De grondwaterstand in een situatie voordat er een damwand was (donkerblauwe lijn) blijkt niet boven maaiveld uit te komen. Sterker nog de stijging ten opzichte van de huidige situatie bedraagt bij de panden maar ongeveer 10 cm. Alleen vlakbij het kanaal is de berekende stijging van de grondwaterstand hoog, tot bijna 2 m.

Dit is een betere benadering van een situatie met een totaal lekke damwand dan de eerder berekende situatie met het 3-lagen model (lichtblauwe lijn in Figuur 5-16). Het is een benadering van de situatie zoals die vroeger moet zijn geweest, voor er damwanden geplaatst werden. Dit resultaat strookt met de sterke grondwaterstandgradiënt tussen kanaal en weg, zoals die gemeten is 100 m ten zuiden van Pand 14, waar een lekke damwand is aangetroffen.

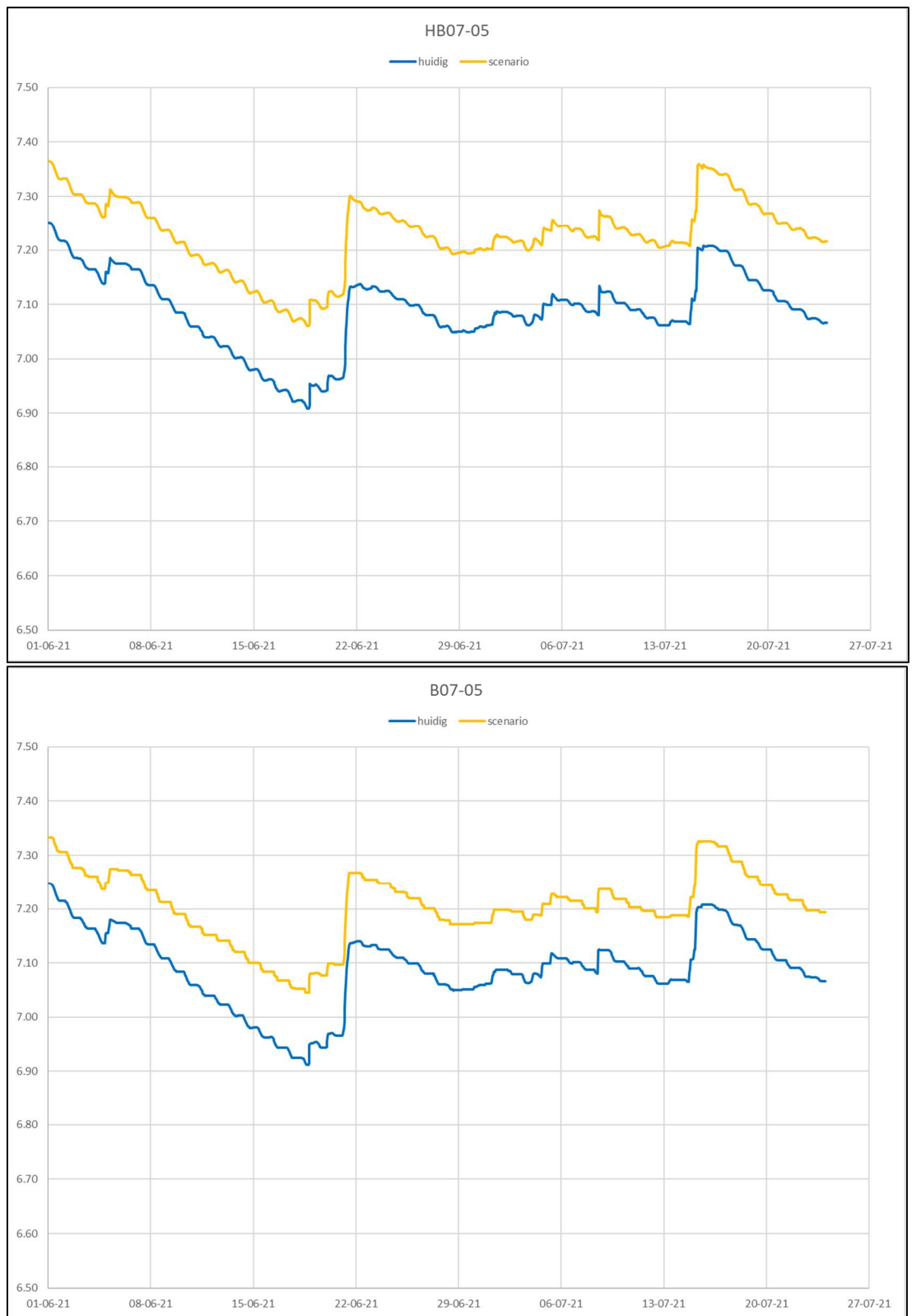
5.3.1.2 Tijdsafhankelijke berekeningen bij compleet lekke damwand

Met het 4-lagen model zijn ook tijdsafhankelijke berekeningen uitgevoerd voor de situatie dat er kanaalwater boven de veenlaag ongehinderd de oever in kan stromen.

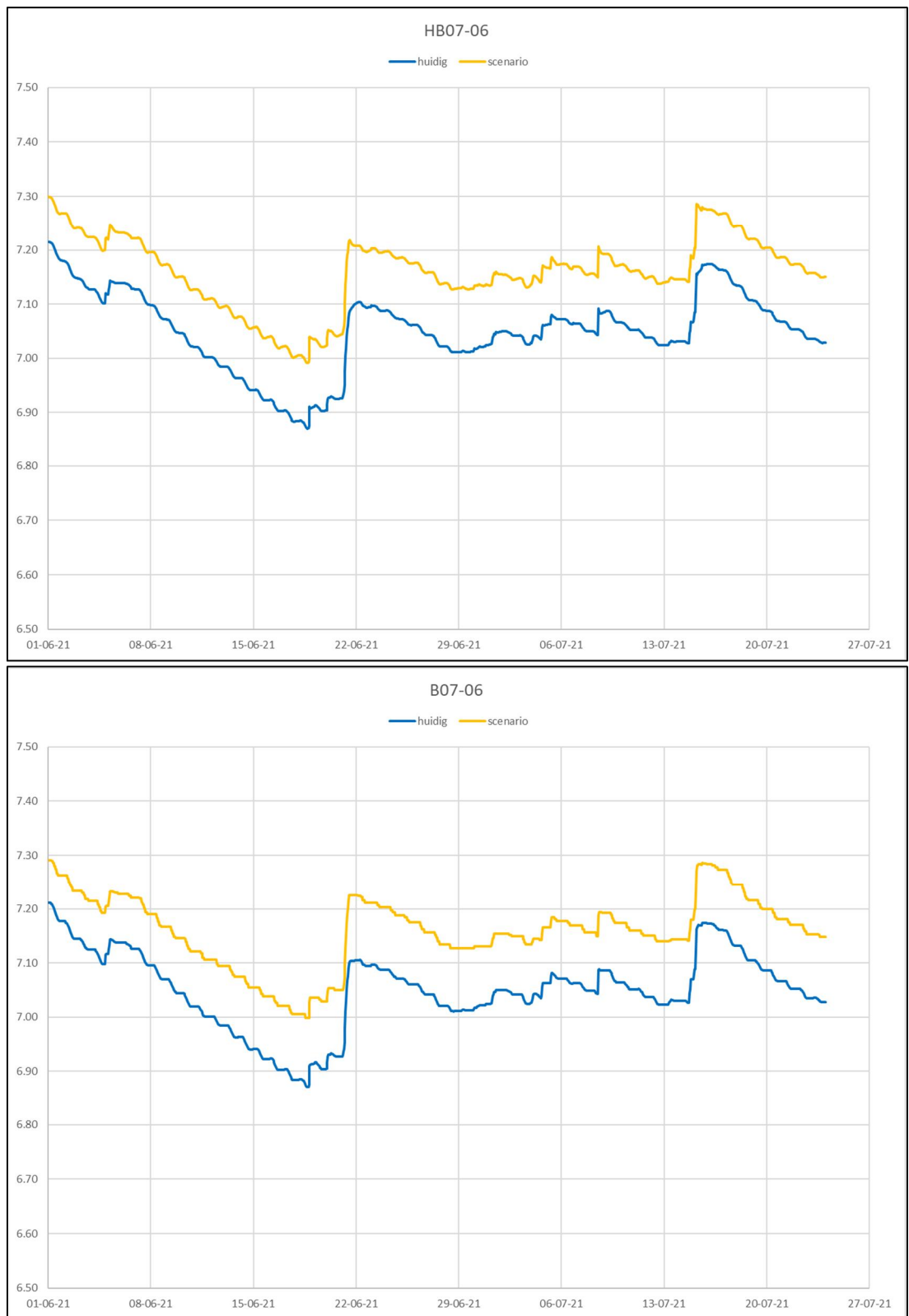
Figuur 5-17, Figuur 5-18, Figuur 5-19 en Figuur 5-20 geven de resultaten van de tijdsafhankelijke berekeningen voor de meetpunten voor dit scenario weer. Daarbij zijn in de bovenste helft van Figuur 5-17 twee verticale assen gebruikt, omdat de verschillen in grondwaterstand in meetpunt HB07-04 tussen huidig (blauwe lijn) en scenario (oranje lijn) rond de 2 meter schommelen.



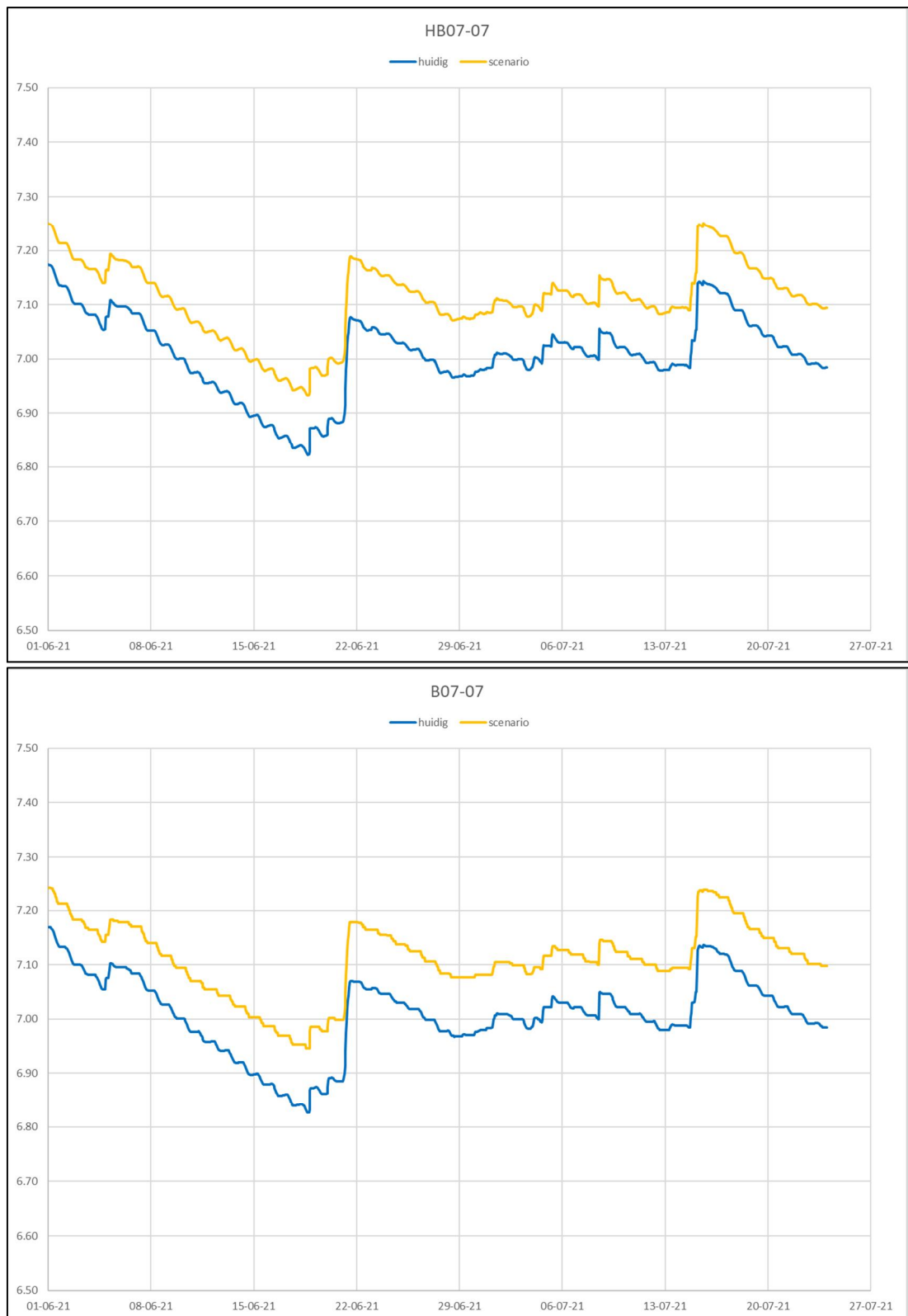
Figuur 5-17 Scenario met lekke damwand (oranje) en kalibratie (blauw) voor meetpunten HB07-04 en B07-04. Bij meetpunt HB07-04 zijn 2 verticale assen gebruikt: oranje lijn op rechter-as (8.20 – 9.20), blauwe lijn op linker-as (6.90 – 7.90).



Figuur 5-18 Scenario met lekke damwand (oranje) en kalibratie (blauw) voor meetpunten HB07-05 en B07-05



Figuur 5-19 Scenario met lekkende damwand (oranje) en kalibratie (blauw) voor meetpunten HB07-06 en B07-06



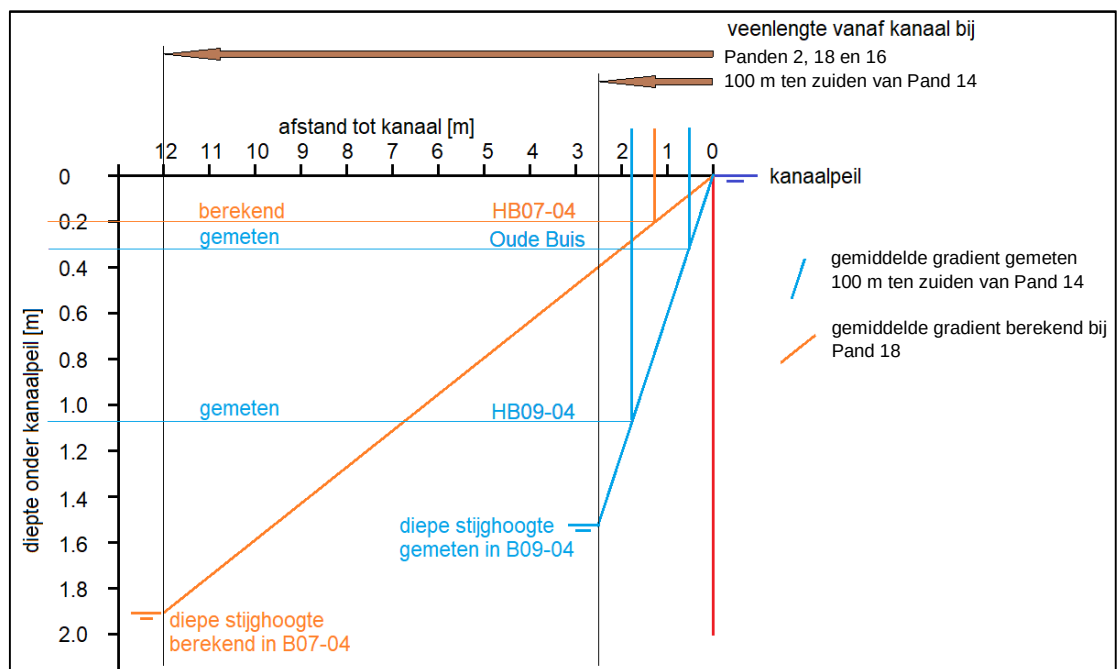
Figuur 5-20 Scenario met lekke damwand (oranje) en kalibratie (blauw) voor meetpunten HB07-07 en B07-07

Vlakbij de damwand komt de grondwaterstand duidelijk omhoog terwijl de stijghoogte in het onderliggende pakket maar weinig verandert. Alleen vlakbij het kanaal is er een groot verschil tussen de grondwaterstand boven het veen en de stijghoogte in het onderliggende pakket (gemiddeld bijna 2 m, zie Figuur 5-17). Het effect van neerslag en verdamping is hier een

stuk kleiner dan in de situatie met damwand. Dat wordt veroorzaakt door de grotere instroom van water uit het kanaal. Bij locatie 05 is de berekende grondwaterstand (HB) nog maar een paar cm hoger dan de berekende diepe stijghoogte (B). Bij locaties 06 en 07 zijn de berekende grondwaterstanden nagenoeg gelijk aan de berekende diepe stijghoogten.

De berekende stijging van de grondwaterstand aan de voorzijde van het pand bedraagt ongeveer 15 cm. Aan de achterzijde van het pand is dat enkele cm minder. Daardoor neemt het verhang over het pand met ongeveer 0.25% toe.

De enige bemonsterde locatie waar de damwand aantoonbaar lek is, is 100 m ten zuiden van Pand 14. Daar is over een strook van ongeveer 100 m op vier plaatsen water op kanaalpeil aangetroffen aan de landzijde van de damwand. Dat was bij twee spoelgaten en in twee handboringen tegen de damwand aan ter plekke van meetpunten die dichtbij het kanaal staan. De gemeten grondwaterstanden in deze meetpunten zijn beduidend lager dan de berekende grondwaterstanden voor meetpunt HB07-04 bij Pand 18, dat op ongeveer 1.25 m afstand van de damwand ligt. In het meetpunt Oude Buis 100 m ten zuiden van Pand 14, dat op ongeveer 0.5 m afstand van de damwand ligt, variëren de gemeten waarden tussen 36 en 62 cm onder kanaalpeil. In meetpunt HB09-04 (ca 16 m noordelijker), dat op ongeveer 1.75 m afstand van de damwand ligt, worden grondwaterstanden gemeten die variëren tussen 77 en 92 cm onder kanaalpeil. In het scenario lekke damwand varieert de berekende grondwaterstand bij meetpunt HB07-04 tussen 3 en 10 cm onder kanaalpeil. Het is aannemelijk dat de beduidend grotere gemeten gradiënt 100 m ten zuiden van Pand 14 wordt veroorzaakt doordat de veenlaag hier maar tot ongeveer 2.5 m afstand van de damwand doorloopt, waar dat bij Pand 18 ongeveer 12 m is. Figuur 5-21 geeft een schematische weergave van het effect van de lengte van de veenlaag op de gradiënt in het grondwater.



Figuur 5-21 Schematische weergave van het effect van de lengte van de veenlaag op de gemiddelde gradiënt van de grondwaterstand bij afwezigheid van een waterkerende damwand. De lichtblauwe gradiënt is gebaseerd op de gemeten stijghoogte in B09-04 100 m ten zuiden van Pand 14. De oranje gradiënt is gebaseerd op de berekende stijghoogte in B07-04 bij Pand 18. De bijbehorende horizontale lijnen geven de grondwaterstand van de genoemde meetpunten weer, zoals die zijn afgeleid uit de gradiënt-lijnen.

Bij de kanaaloever is de grondwaterstand gelijk aan kanaalpeil. Daar waar de veenlaag eindigt is de grondwaterstand gelijk aan de stijghoogte in het onderliggende watervoerend pakket. Naarmate de veenlaag over een grotere lengte aanwezig is, wordt de gradiënt van de grondwaterstand dus kleiner (minder steil).

De schematische weergave in Figuur 5-21 gaat uit compleet homogene omstandigheden, die op beide locaties identiek zijn. De gemeten waterhoogtes in HB09-04 en Oude Buis, die 16 meter van elkaar verwijderd liggen, en de berekende waterhoogtes in HB07-04 wijken daarom 1 à 2 decimeter af van de rechte gradiënt-lijnen in deze figuur.

De berekende stijghoogten in het onderliggende watervoerend pakket (B07-04) liggen een stuk lager, 1.78 tot 2.06 m onder kanaalpeil. 100 m ten zuiden van Pand 14 zijn in het diepe meetpunt B09-04 stijghoogten gemeten tussen 1.47 en 1.63 m onder kanaalpeil. Het verschil tussen de diepe meetpunten (B07-04 en B09-04) wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat Pand 14 ruim 3 km zuidelijker ligt dan Pand 18 en de regionale stijghoogte hier enkele decimeters hoger is (zie ook Figuur 3-26).

De meest waarschijnlijke oorzaak voor de grote grondwatergradiënt bij een lekke damwand is de combinatie van het regionale drainageniveau, dat 2 tot 2.5 m onder kanaalpeil ligt, en de hoge doorlatendheid van de onderliggende zandpakketten. Daarnaast zorgt een relatief grote weerstand in de kanaalbodem er voor dat de stijghoogte van het grondwater in het onderliggende zandpakket ook onder het kanaal relatief laag blijft. Alle waterspanningsmeters, die voor dit onderzoek aan de rand van het kanaal zijn geplaatst in het zandpakket onder de kanaalbodem, laten een groot verschil zien met het kanaalpeil.

5.3.2 Scenario's open bodem

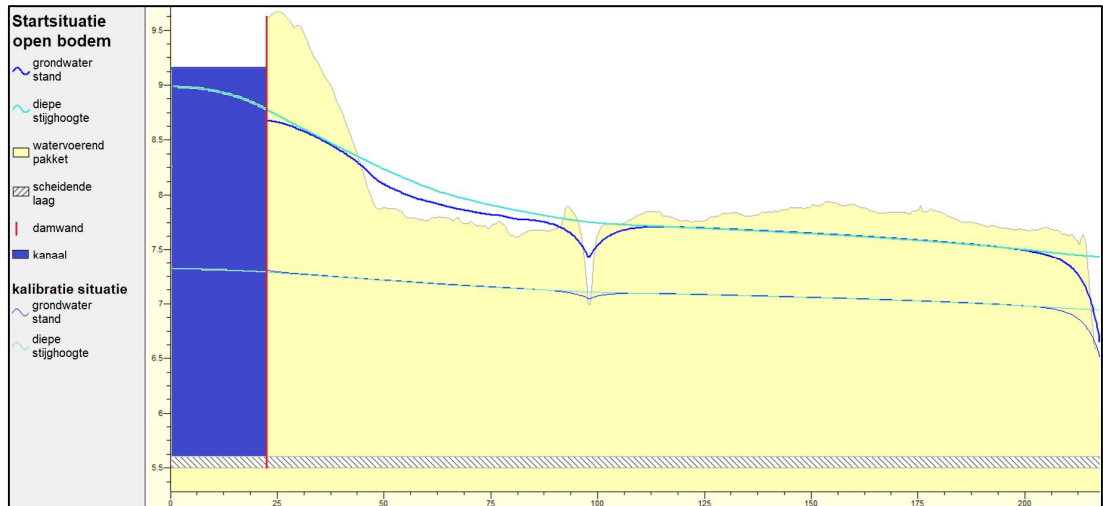
Er zijn 3 scenario's doorgerekend met een open bodem.

- Permanent open bodem. Hiervoor is de weerstand van de kanaalbodem in het model permanent verlaagd naar 1 dag.
- Open bodem door baggeren, die relatief snel weer dicht slaat. Hiervoor is de weerstand initieel verlaagd naar 1 dag en vervolgens ieder uur verhoogd met 1 dag totdat de gekalibreerde weerstand van 65 dagen weer is bereikt.
- Open bodem door baggeren, die langzaam weer dicht slijt. Hiervoor is de weerstand initieel verlaagd naar 1 dag en vervolgens elke dag verhoogd met 1 dag totdat de gekalibreerde weerstand van 65 dagen weer is bereikt. Omdat het model maar een rekenperiode van 53 dagen beslaat is de eindsituatie net niet bereikt.

Voor de situatie met een permanente open bodem is een startsituatie berekend door in het stationaire model, waarmee de initiële situatie voor de kalibratie is berekend, de weerstand van de bodem te verlagen naar 1 dag. Voor beide andere situaties is ervan uitgegaan dat de bodem pas aan het begin van de berekening (1 juni 2021) is open gebaggerd. Daardoor is voor deze berekeningen dezelfde initiële situatie gebruikt als voor de kalibratie.

Kanttekening is dat het scenario met permanent open bodem zeer onwaarschijnlijk is en dat deze slechts is meegenomen om het effect van de bodemweerstand op de grondwaterstand te bepalen.

Figuur 5-22 geeft de twee startsituaties voor de scenario's met een open bodem weer.



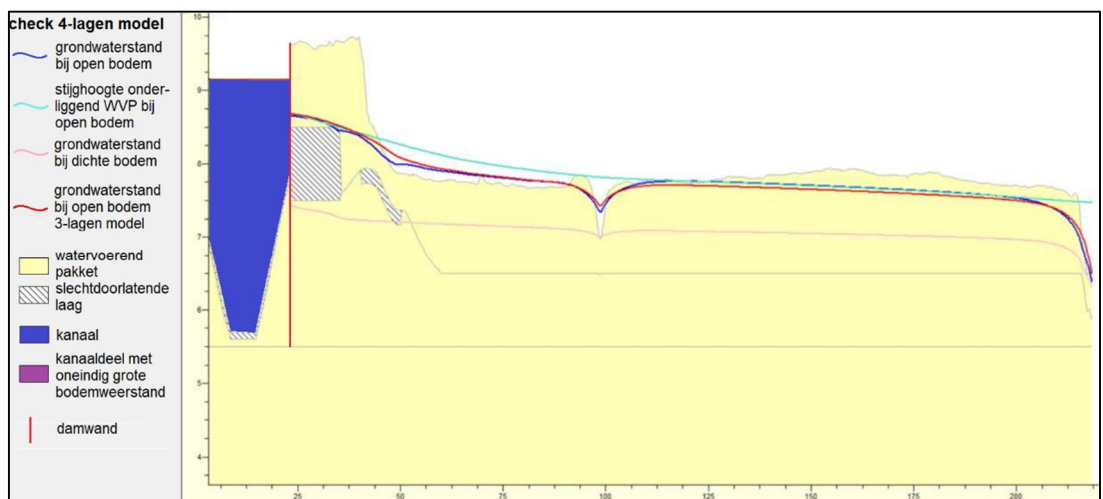
Figuur 5-22 Startsituatie permanent open bodem (dikke lijnen) en tijdelijk open bodem (dunne lijnen).

In de figuur is met de dikke lijnen de initiële situatie voor een permanent open bodem weergegeven en met de dunne lijnen de initiële situatie voor een tijdelijk open bodem (net voordat er gebaggerd is) weergegeven. Deze situatie is identiek aan de initiële situatie voor kalibratie.

De stijghoogte in het onderliggende watervoerend pakket is door het verwijderen van de weerstand van de kanaalbodem sterk omhoog gekomen. Ruim een halve meter meer dan bij het verwijderen van de damwand. Dat vertaalt zich door in een stijging van de grondwaterstand. Aan de voorzijde van het pand bedraagt de stijging van de grondwaterstand ongeveer 110 cm. Achter het pand wordt het grondwater gedraineerd door het maaiveld.

5.3.2.1 Stationaire check met het 4-lagen model

Figuur 5-22 laat zien dat ook in deze situatie de met het 3-lagen model berekende grondwaterstand boven de ondiepe veenlagen uit kan komen. Daarom is ook deze situatie gecheckt door met het eerder beschreven 4-lagen model een stationaire berekening uit te voeren.

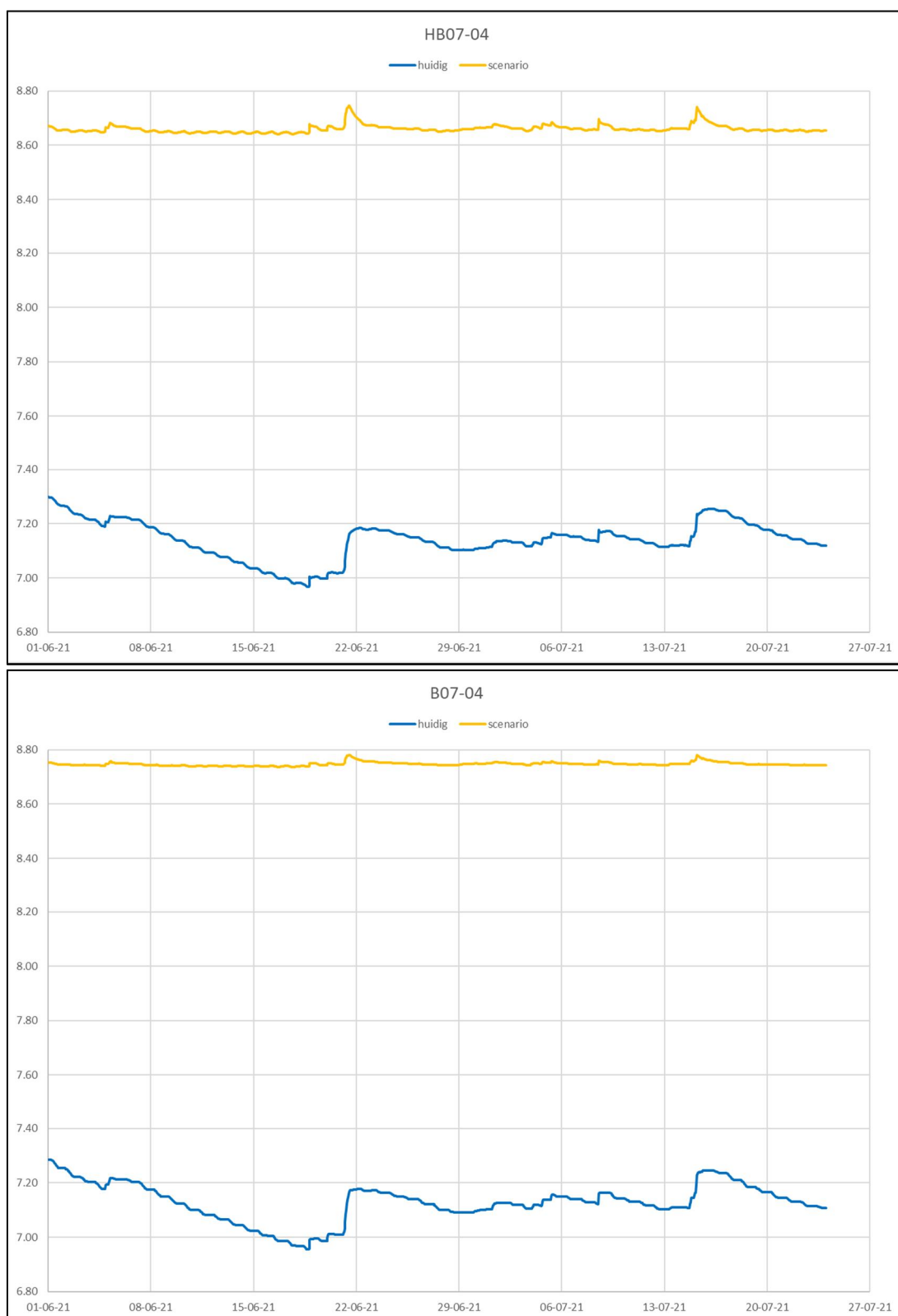


Figuur 5-23 Resultaat van het 4-lagen model, open bodem. De donkerblauwe lijn is de grondwaterstand berekend met het 4-lagen model. De lichtblauwe lijn is de bijbehorende stijghoogte van het watervoerend pakket onder het opgedeelde pakket. De donkerrode lijn de grondwaterstand berekend met het 3-lagen model. De roze lijn is de berekende grondwaterstand met het 4-lagen model bij een dichte bodem.

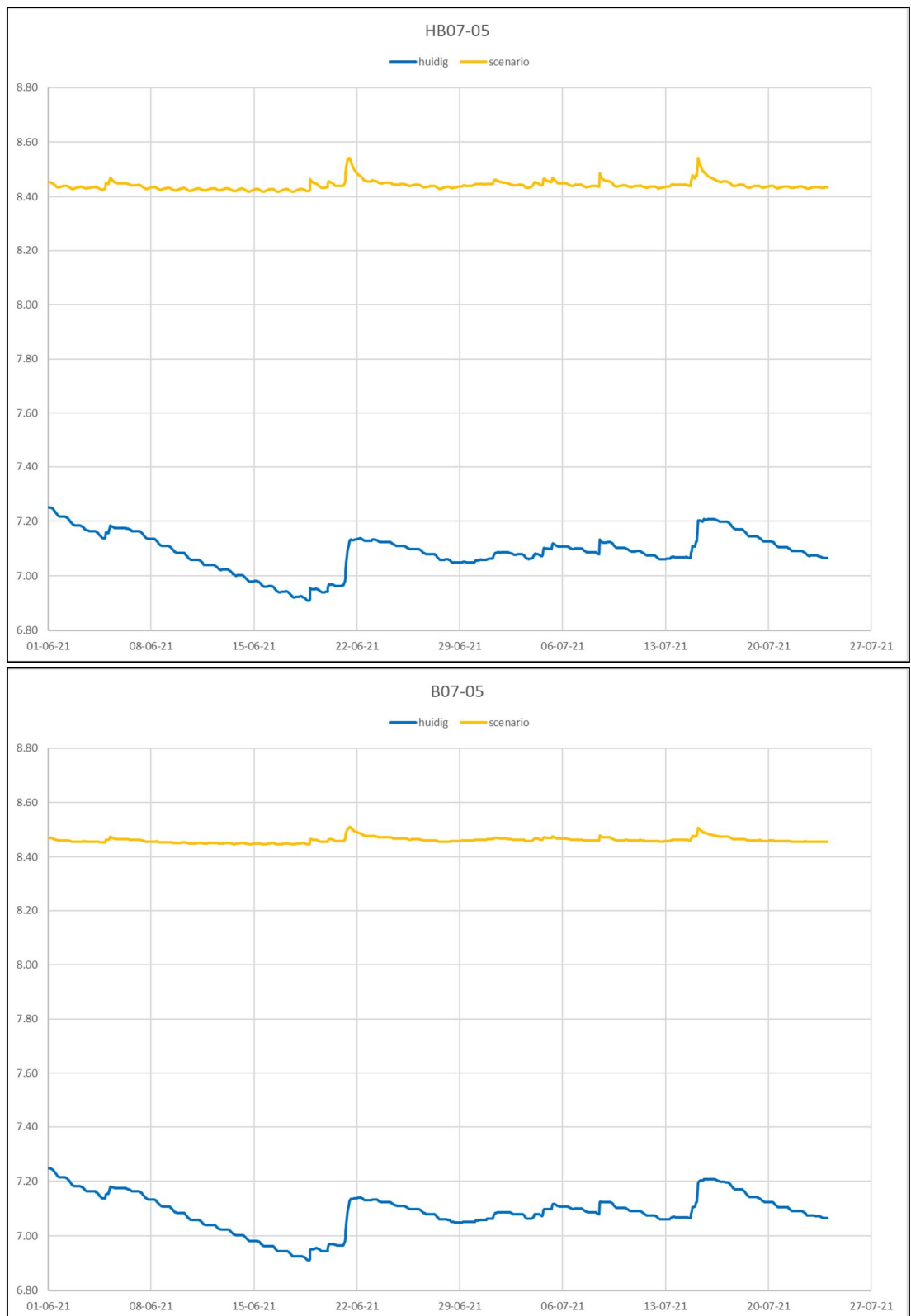
Uit de check met het 4-lagen model blijkt dat de resultaten tussen beide modellen weinig van elkaar verschillen. Dat duidt erop dat de berekeningsresultaten met het 3-lagen model goed te gebruiken zijn voor de analyse van een open bodem.

5.3.2.2 Permanent open bodem

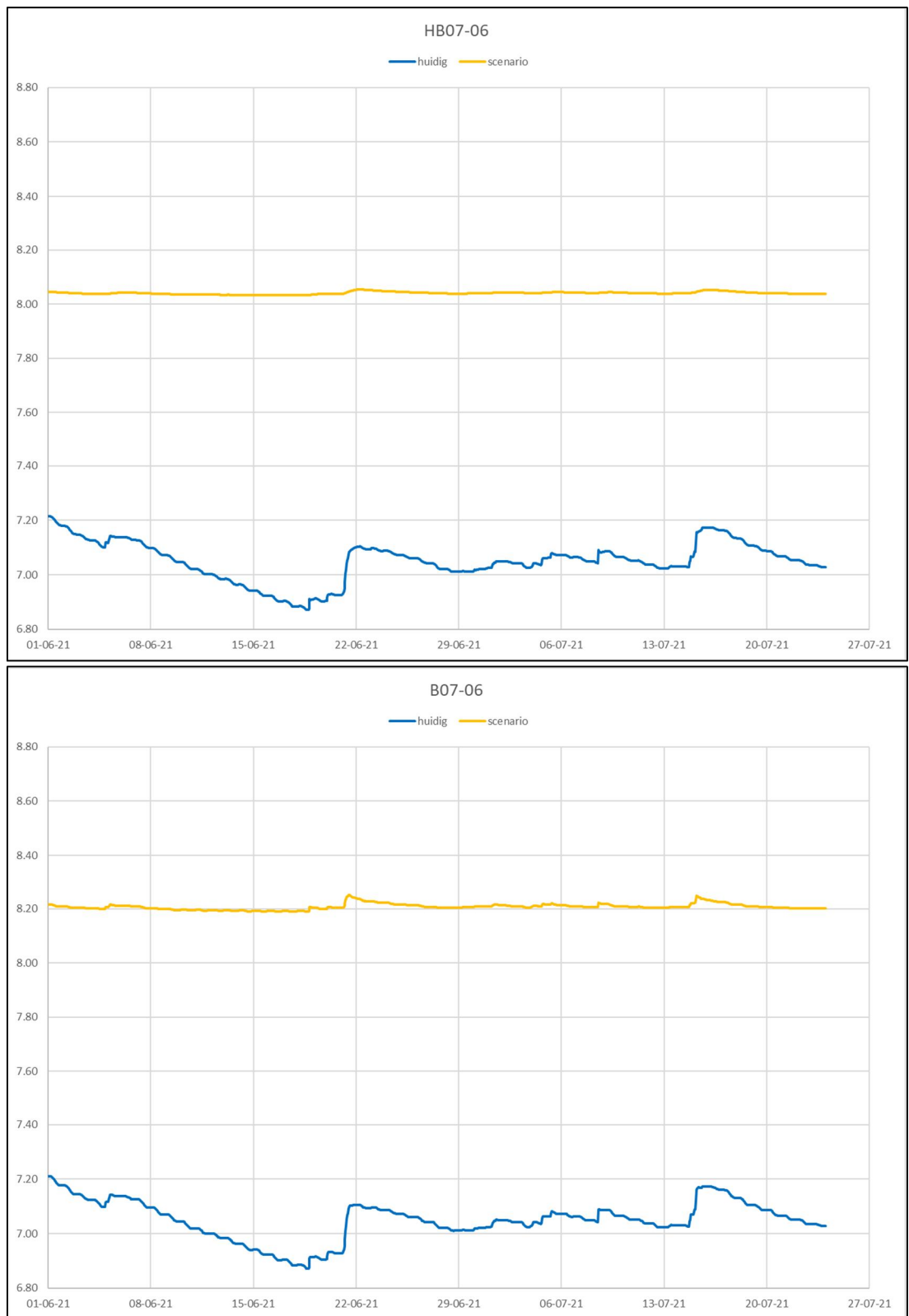
Figuur 5-24, Figuur 5-25, Figuur 5-26 en Figuur 5-27 geven de resultaten van de tijdsafhankelijke berekeningen voor de meetpunten voor dit scenario weer.



Figuur 5-24 Scenario met permanent open bodem (oranje) en kalibratie (blauw) voor meetpunten HB07-04 en B07-04



Figuur 5-25 Scenario met permanent open bodem (oranje) en kalibratie (blauw) voor meetpunten HB07-05 en B07-05



Figuur 5-26 Scenario met permanent open bodem (oranje) en kalibratie (blauw) voor meetpunten HB07-06 en B07-06



Figuur 5-27 Scenario met permanent open bodem (oranje) en kalibratie (blauw) voor meetpunten HB07-07 en B07-07

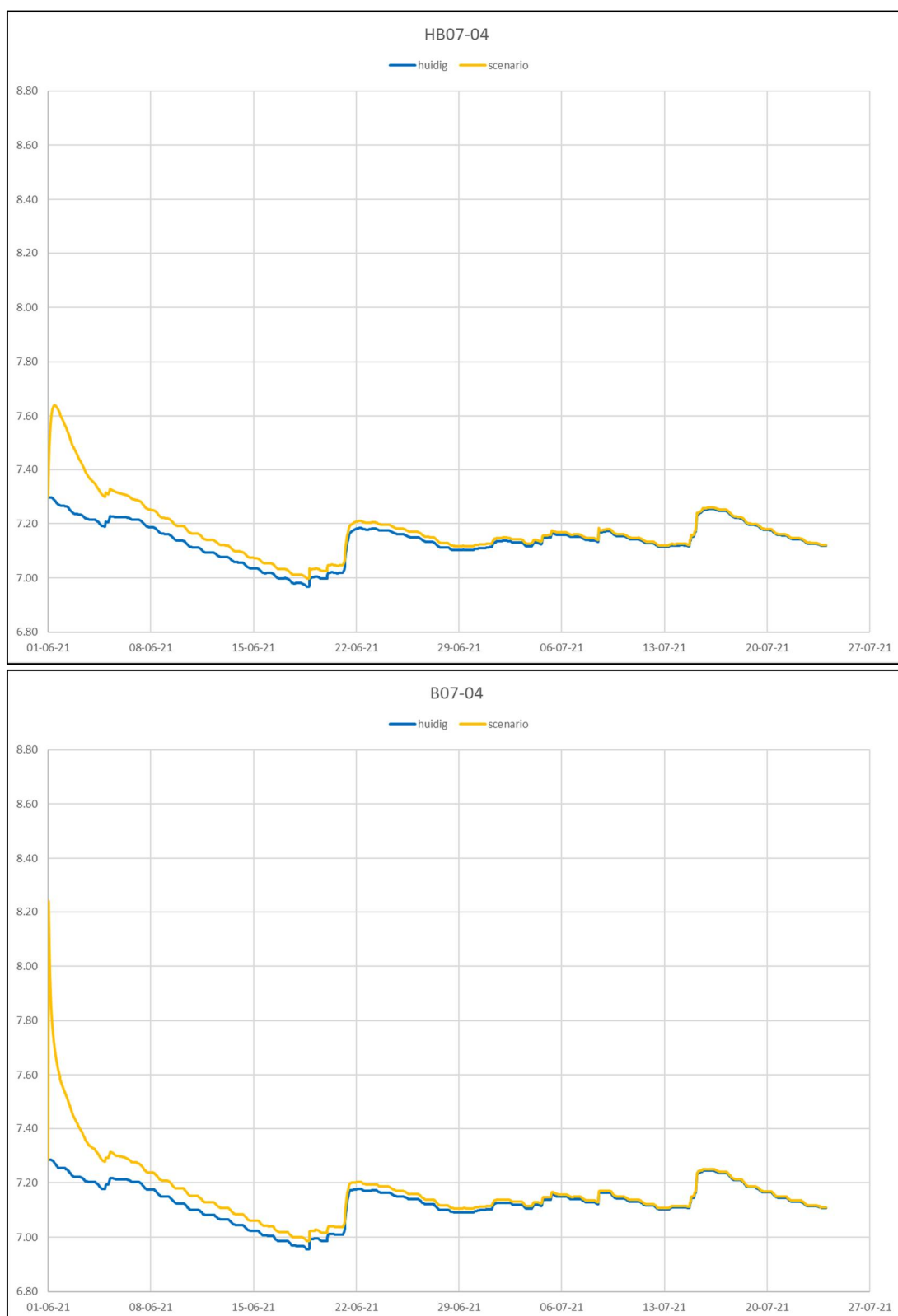
De stijghoogte in het onderliggende pakket komt duidelijk omhoog en de grondwaterstand ook. Vlakbij het kanaal is er het verschil tussen de grondwaterstand en de stijghoogte in het onderliggende pakket het grootst (een kleine 10 cm). Het effect van neerslag en verdamping

is een stuk kleiner dan in de situatie met dicht geslibde bodem. De berekende stijging van de grondwaterstand aan de voorzijde van het pand bedraagt ongeveer 1.4 meter. Aan de achterzijde van het pand is dat ongeveer 30 cm minder. Daardoor neemt het verhang over het pand met ongeveer 2.5% toe.

In deze situatie zal er zeer waarschijnlijk wateroverlast optreden. Bij deze berekening is er geen rekening gehouden met mogelijk aanwezige drainage, zoals een lekkende rioolbuis onder de weg, drainagebuizen in iemands tuin, een pomp in iemands kelder. Er zijn geen gegevens beschikbaar die erop duiden dat dergelijke drainerende middelen hier aanwezig zijn.

5.3.2.3 Snel dichtslibbende bodem

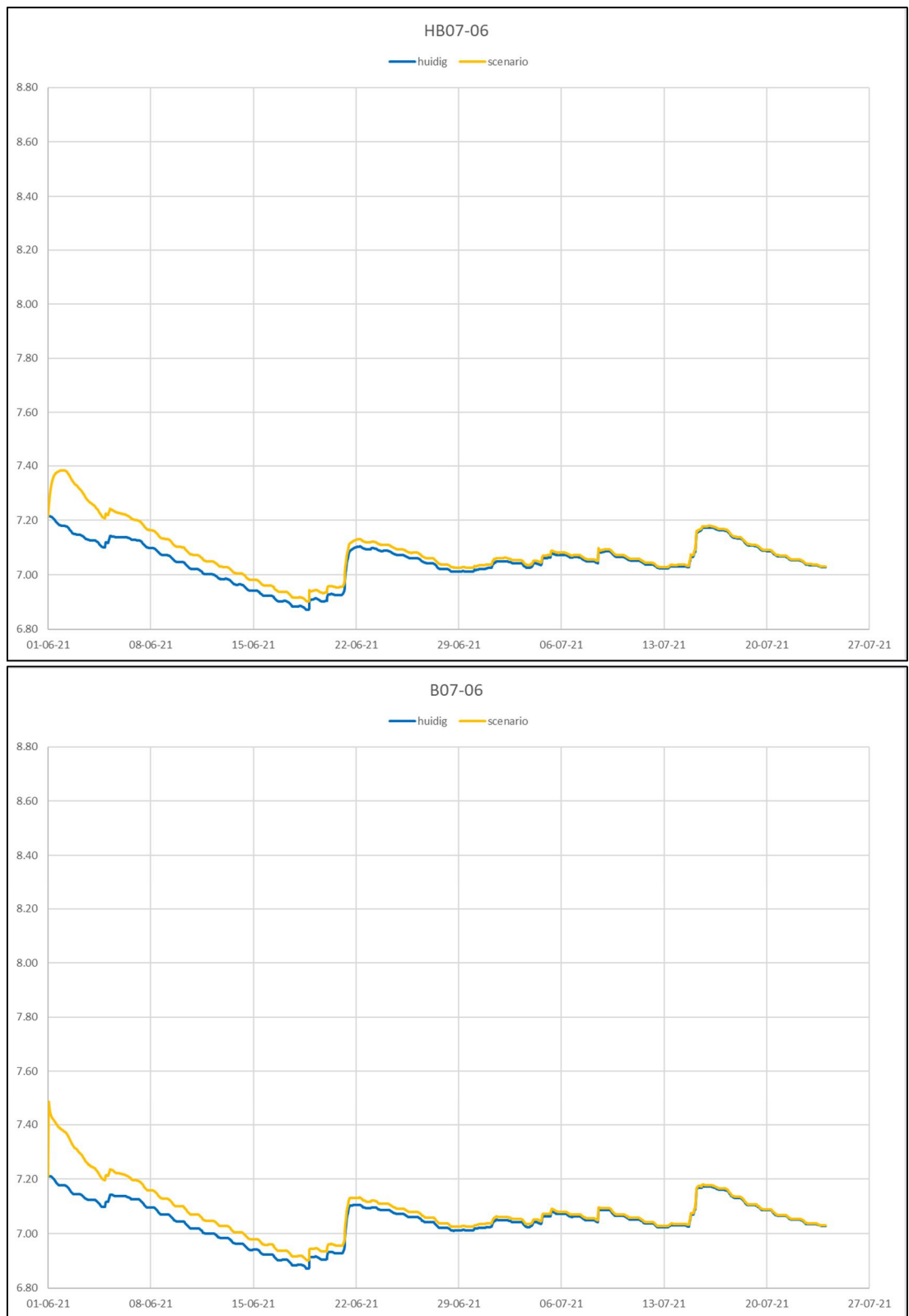
Figuur 5-28, Figuur 5-29, Figuur 5-30 en Figuur 5-31 geven de resultaten van de tijdsafhankelijke berekeningen voor de meetpunten voor dit scenario weer.



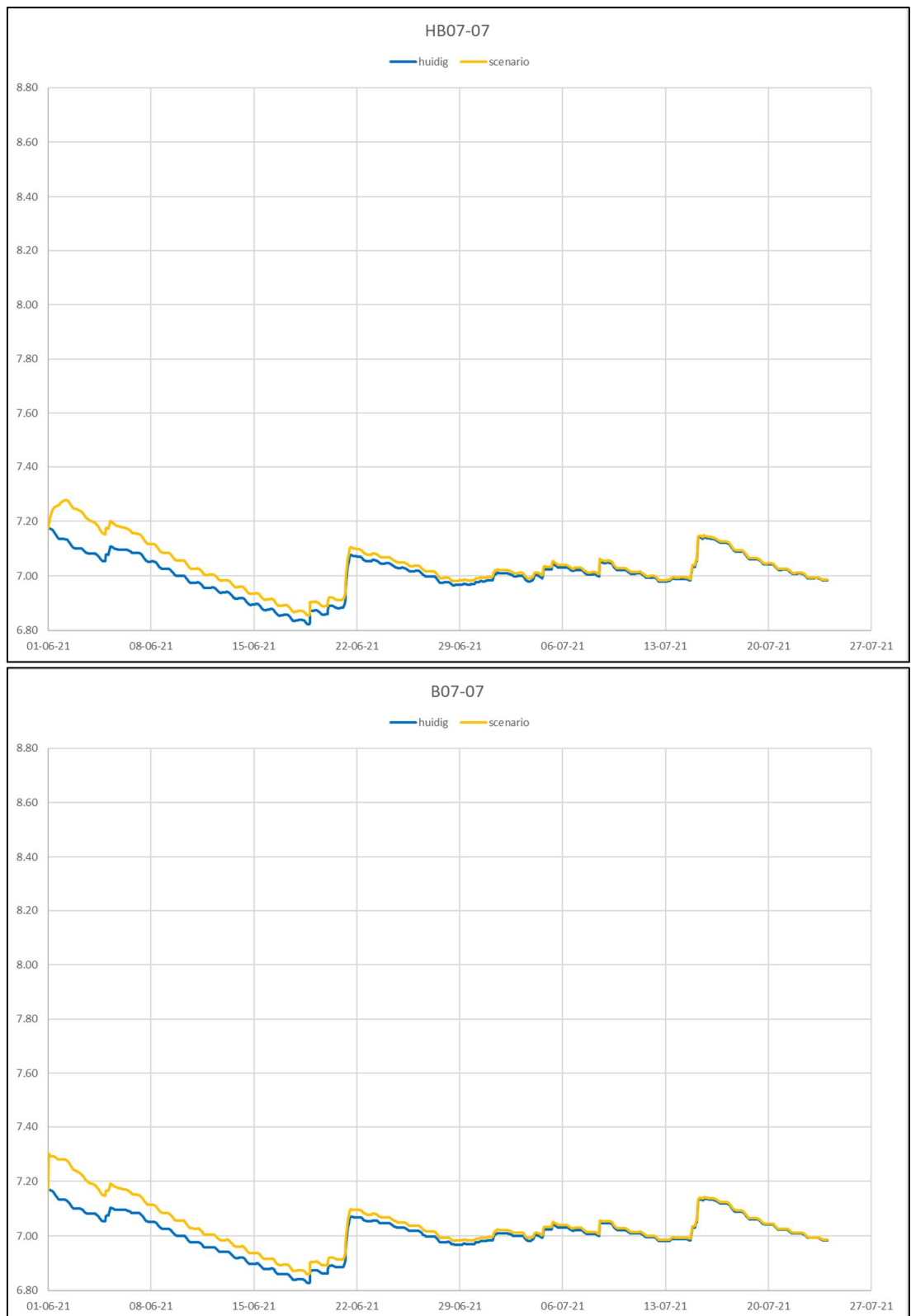
Figuur 5-28 Scenario met snel dichtslibbende bodem (oranje) en kalibratie (blauw) voor meetpunten HB07-04 en B07-04



Figuur 5-29 Scenario met snel dichtslibbende bodem (oranje) en kalibratie (blauw) voor meetpunten HB07-05 en B07-05



Figuur 5-30 Scenario met snel dichtslibbende bodem (oranje) en kalibratie (blauw) voor meetpunten HB07-06 en B07-06



Figuur 5-31 Scenario met snel dichtslibbende bodem (oranje) en kalibratie (blauw) voor meetpunten HB07-07 en B07-07

De stijghoogte in het onderliggende pakket komt initieel duidelijk omhoog en de grondwaterstand ook. Vlakbij het kanaal is dat ongeveer een halve meter. Het effect dooft vrij snel uit, omdat de bodem na ca 2.5 dag in het model weer dezelfde weerstand heeft als voor

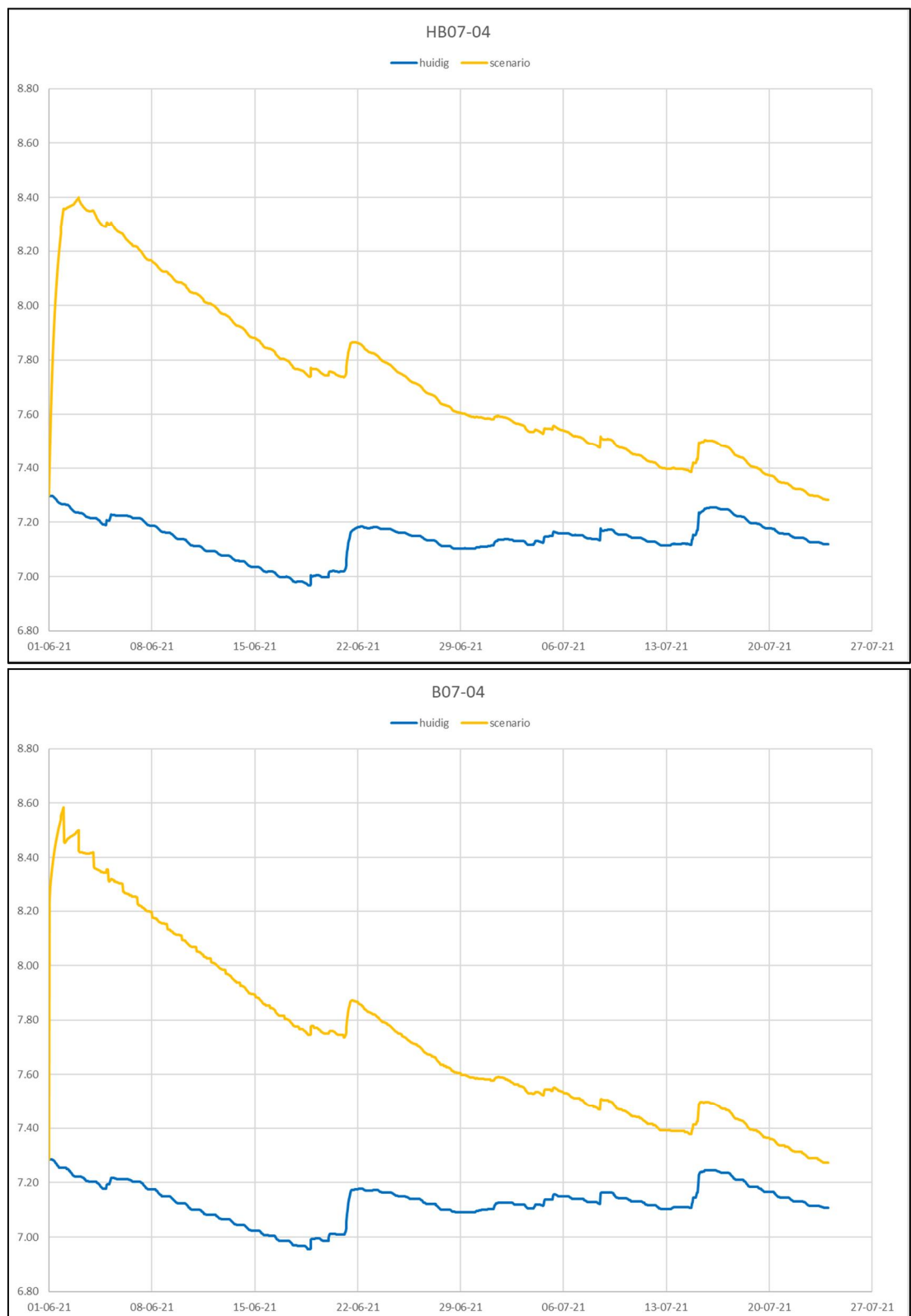
het baggeren. De berekende maximale stijging van de grondwaterstand aan de voorzijde van het pand bedraagt ongeveer 15 cm. Aan de achterzijde van het pand is dat ongeveer 10 cm. Daardoor neemt het verhang over het pand met minder dan 0.5% toe.

De kans op wateroverlast neemt hierdoor marginaal toe.

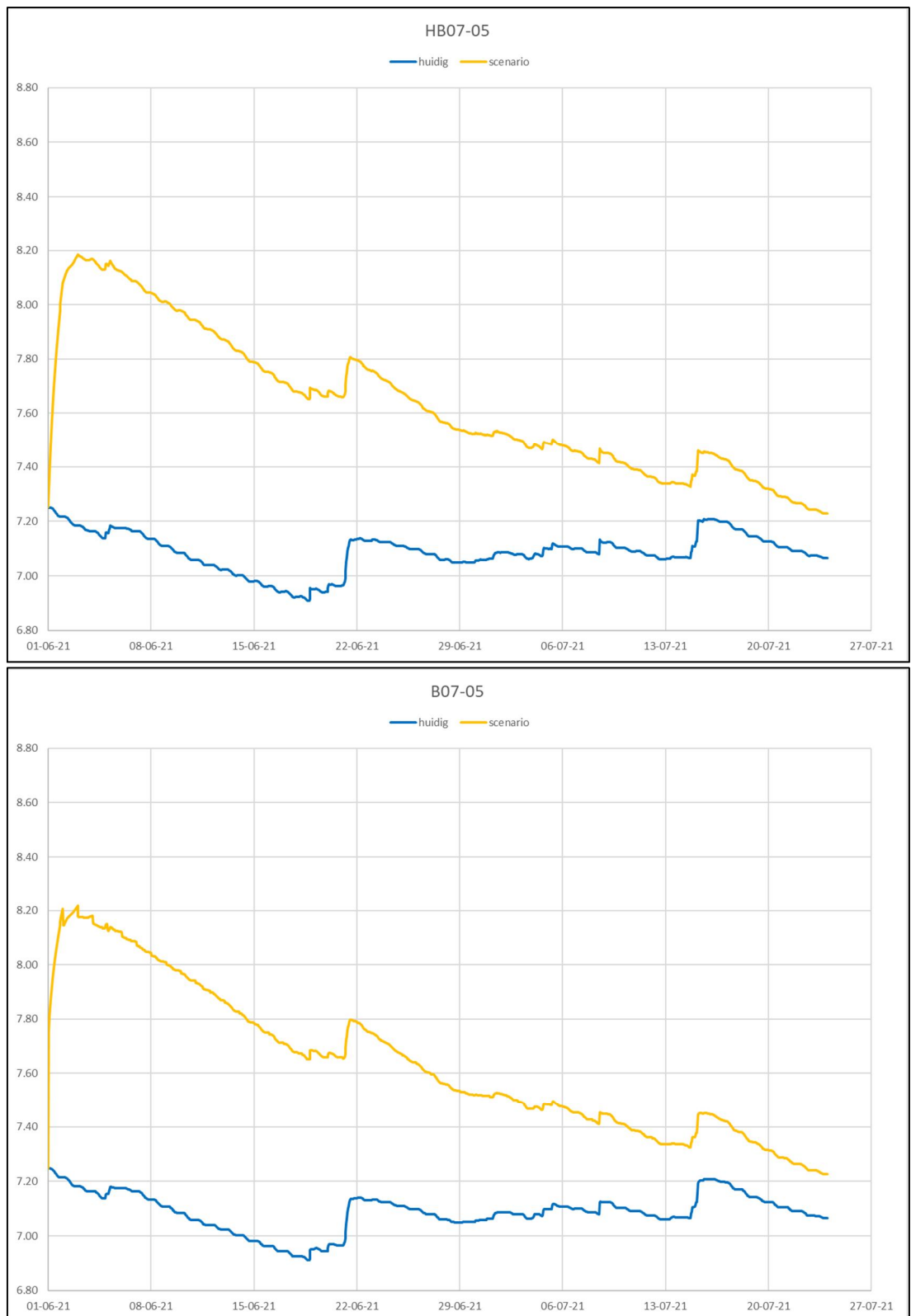
Kantekening daarbij is dat het model maar 30 m breed is, waardoor hier geen radiale stroming optreedt (stroming in lengterichting van het kanaal). Dit scenario vertegenwoordigt dus feitelijk een gat over een veel grotere lengte van het kanaal. Daardoor geven de berekeningen een overschatting van de optredende effecten.

5.3.2.4 Langzaam dichtslibbende bodem

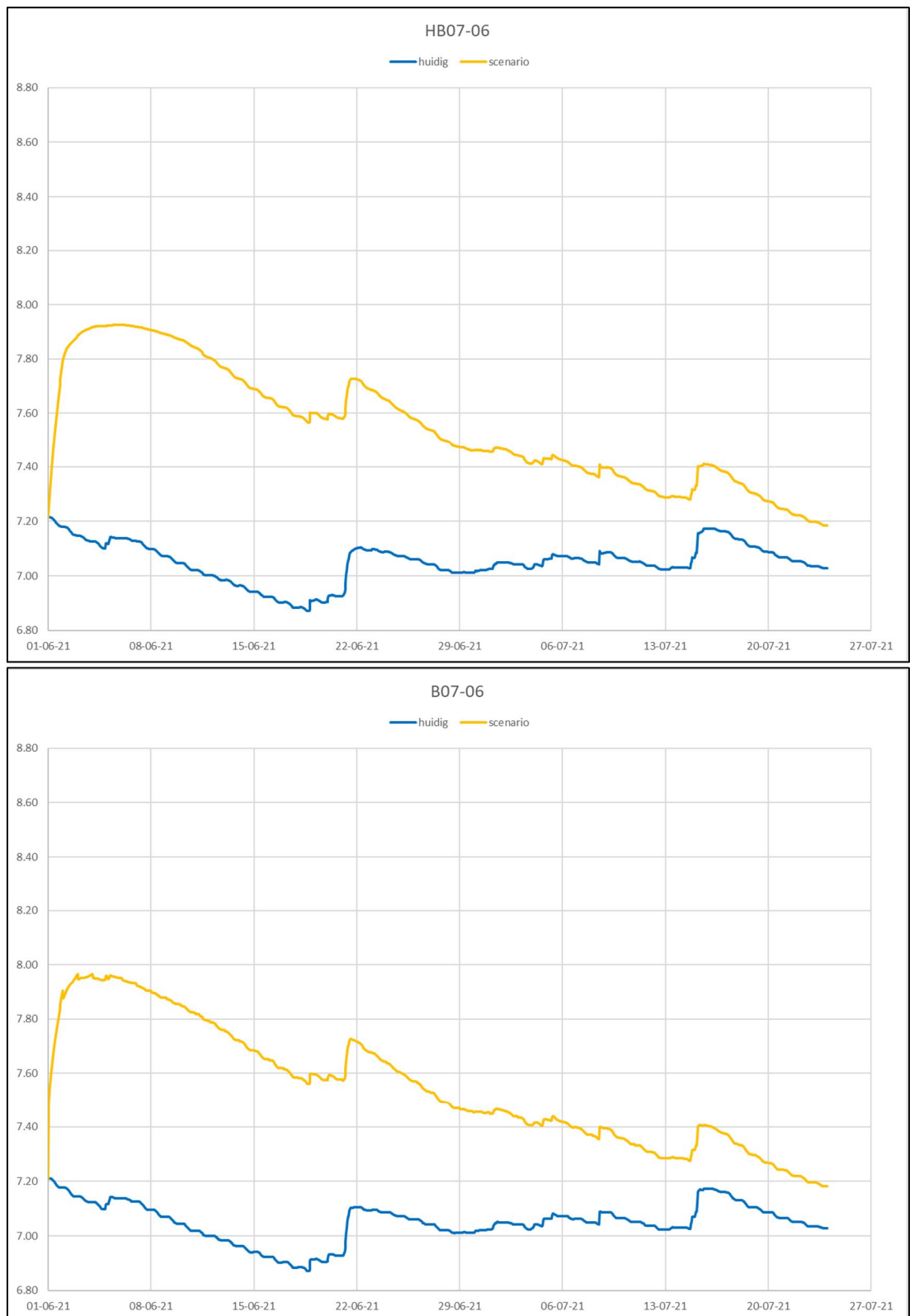
Figuur 5-32, Figuur 5-33, Figuur 5-34 en Figuur 5-35 geven de resultaten van de tijdsafhankelijke berekeningen voor de meetpunten voor dit scenario weer.



Figuur 5-32 Scenario met langzaam dichtslibbende bodem (oranje) en kalibratie (blauw) voor meetpunten HB07-04 en B07-04



Figuur 5-33 Scenario met langzaam dichtslibbende bodem (oranje) en kalibratie (blauw) voor meetpunten HB07-05 en B07-05



Figuur 5-34 Scenario met langzaam dichtslibbende bodem (oranje) en kalibratie (blauw) voor meetpunten HB07-06 en B07-06



Figuur 5-35 Scenario met langzaam dichtslibbende bodem (oranje) en kalibratie (blauw) voor meetpunten HB07-07 en B07-07

De stijghoogte in het onderliggende pakket komt initieel duidelijk omhoog en de grondwaterstand ook. Vlakbij het kanaal is dat ongeveer 1.25 meter. Het effect dooft langzaam uit, omdat de bodem elke dag een beetje meer dichtgeslibd is in het model. Aan

het eind van de rekenperiode is de weerstand opgelopen tot ruim 80% van de weerstand voor het baggeren. De berekende maximale stijging van de grondwaterstand aan de voorzijde van het pand bedraagt ongeveer 1 meter. Aan de achterzijde van het pand is dat ongeveer 20 cm minder. Daardoor neemt het verhang over het pand tijdelijk met ongeveer 1.5% toe.

De kans op wateroverlast bij een langzaam dichtslibbende bodem is reëel. De mate daarvan hangt af van aan- of afwezigheid van drainage in de bodem, zoals een lekkende rioolbuis onder de weg, drainagebuizen in iemands tuin, een pomp in iemands kelder. Er zijn geen gegevens beschikbaar die erop duiden dat dergelijke drainerende middelen hier aanwezig zijn en daarom is daar bij de berekeningen geen rekening mee gehouden.

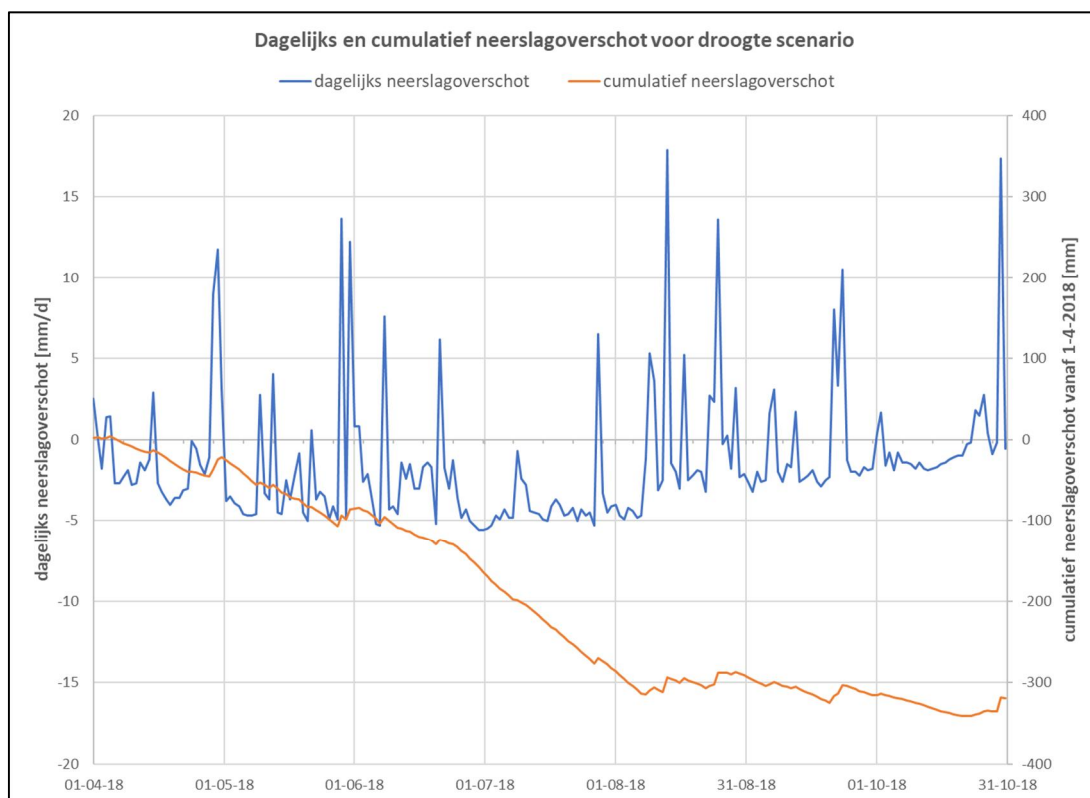
Ook hier geldt de kanttekening dat het model maar 30 m breed is, waardoor er in het model geen radiale stroming optreedt (stroming in lengterichting van het kanaal). Dit scenario vertegenwoordigt dus feitelijk een gat van een veel grotere lengte van het kanaal. Bij een langzaam dichtslibbende bodem zal de bodemweerstand over een veel grotere kanaallengte dan 30 m langdurig laag blijven. Daardoor geven de berekeningen een kleinere overschatting van de optredende effecten dan bij een snel dichtslibbende bodem.

5.3.3 Scenario droogte

Voor dit scenario is uitgegaan van de gekalibreerde waarde van de kanaalbodemweerstand en de aanwezigheid van een damwand. De meest droge periode van de laatste 10 jaar is doorgerekend. Dat is de periode van 1 april tot en met 31 oktober 2018. Het optredende cumulatieve neerslagtekort over deze periode bedraagt maximaal ruim 340 mm. Het cumulatieve neerslagtekort neemt sterk toe tot de eerste week van augustus 2018 (315 mm). Daarna schommelt het wat en wordt nog maar marginaal groter.

Kanttekening daarbij is dat de potentiële verdamping is gebruikt, waar in werkelijkheid door uitdroging gewasverdamping wat gereduceerd wordt. De berekening beschrijft wat dat betreft dus een worst-case situatie.

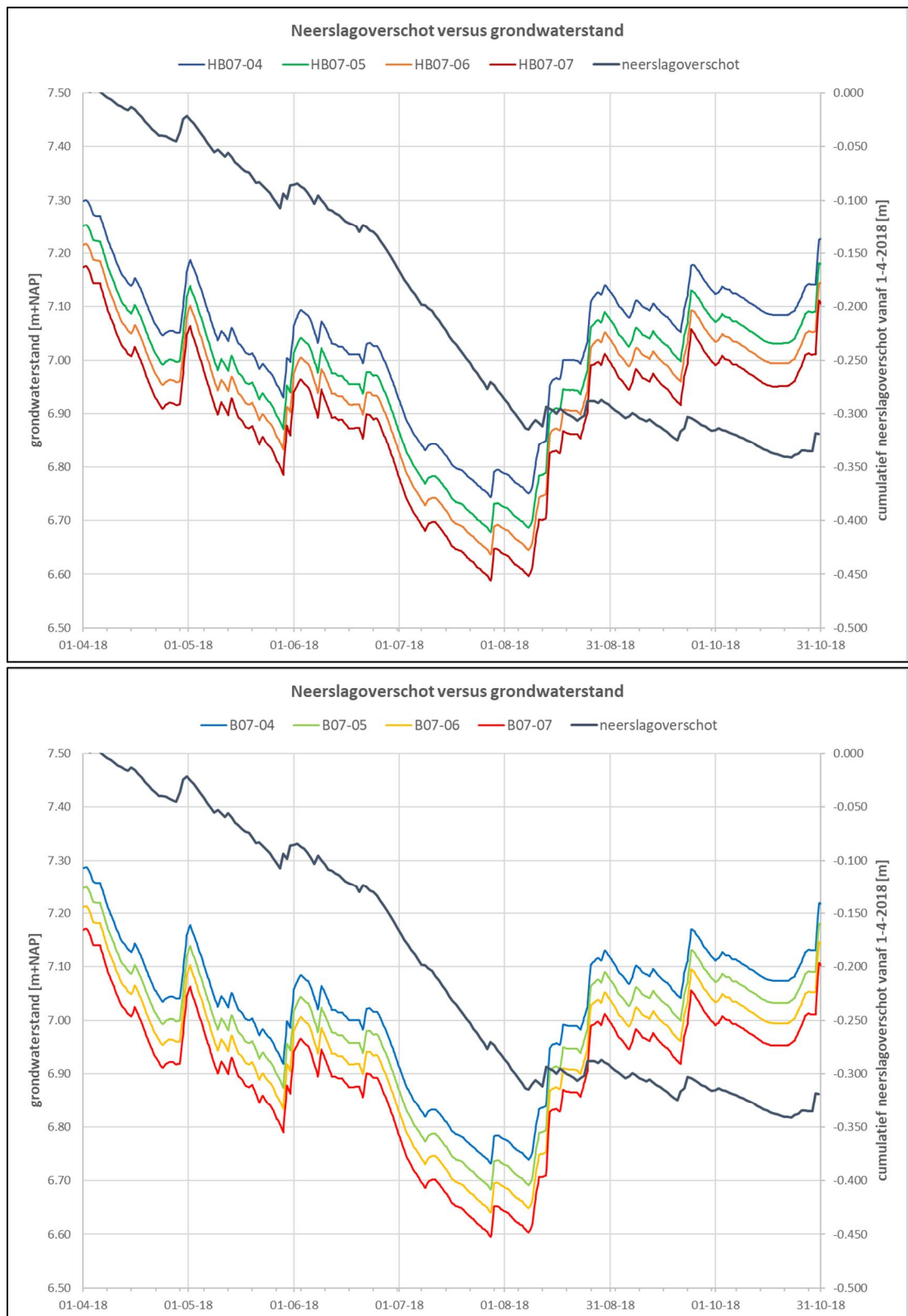
Voor deze situatie is het model doorgerekend met tijdstappen van 1 dag. Per dag is het verschil tussen neerslag en verdamping als grondwateraanvulling in het model ingevoerd (Figuur 5-36). Daarvoor zijn de waarden van KNMI station Heino gebruikt. Als initiële toestand is de initiële toestand van de kalibratie berekening gebruikt.



Figuur 5-36 Gebruikt neerslagoverschot in het droogte scenario. Op de linkeras is het dagelijkse neerslagoverschot uitgezet (de modelinvoer), op de rechteras het cumulatieve neerslagoverschot vanaf het begin van de berekening. Negatieve waarden duiden op een neerslagtekort.

Figuur 5-37 geeft de resultaten van de tijdsafhankelijke berekeningen voor de meetpunten voor dit scenario weer.

Uit de berekeningen blijkt dat de grondwaterstand tot begin augustus een kleine 60 cm omlaag gaat. In de periode daarna wordt dit gedeeltelijk weer aangevuld door infiltratie van water uit het kanaal. Dat is in overeenstemming met de waarnemingen van enkele in de buurt van het kanaal gelegen peilbuizen.



Figuur 5-37 Verloop van de grondwaterstand en stijghoogte bij de meetpunten voor een extreem droge situatie. Op de rechteras is het cumulatieve neerslagoverschot uitgezet, waarbij negatieve waarden duiden op een neerslagtekort.

5.3.4 Scenario verlengen damwand

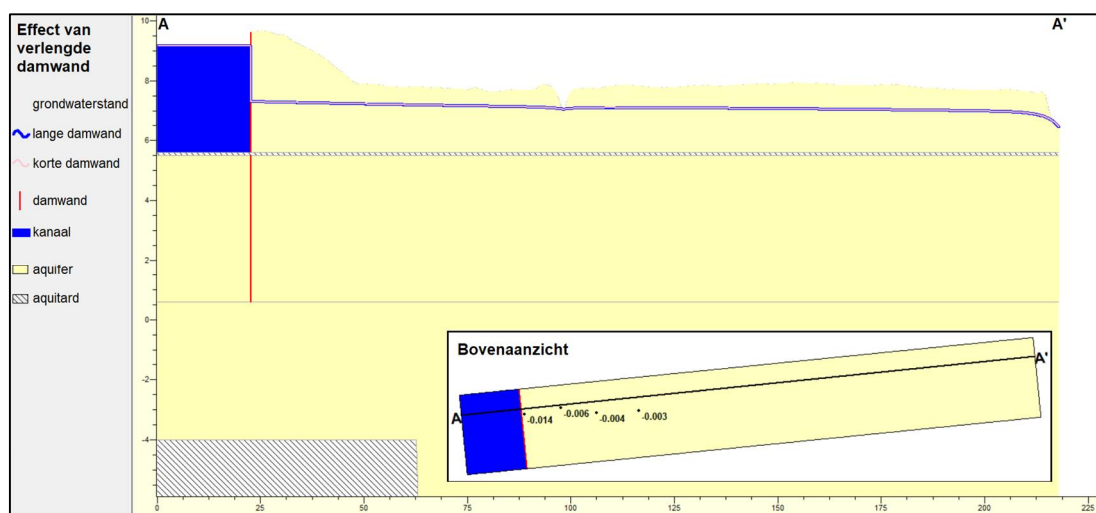
Dit scenario bestaat uit twee deelscenario's, zonder en met doorsnijding van een slechtdoorlatende laag onder de kanaalbodem. Voor beide scenario's is alleen een stationaire berekening uitgevoerd, omdat het situaties betref die gedurende langere tijd ongewijzigd blijven. Deze berekeningen zijn uitgevoerd met een ander 4-lagen model dan is gebruikt voor de berekeningen van scenario's zonder goed functionerende damwand.

5.3.4.1 Damwand doorsnijdt geen slecht doorlatende laag

Hiervoor is het tweede watervoerend pakket in het model gesplitst in een laag tot de onderkant van de damwand (NAP +0.5 m) en de rest van het watervoerend pakket. Beide gedeelde pakketten zijn in het model van elkaar gescheiden door een weerstandbiedende laagje waarin de verticale weerstand van het watervoerend pakket is geschematiseerd. Bij het bepalen van die weerstand is ervan uitgegaan van de verticale doorlatendheid van het pakket 3 keer zo laag is als de horizontale doorlatendheid van 25 m/d. Bij een dikte van ongeveer 5 m resulteert dat in een weerstand van 0.6 d. De rekenresultaten voor de uitgangssituatie (4 m lange damwand) zijn gelijk aan die met het 3-lagen model.

Als de damwand geen slecht doorlatende laag doorsnijdt, kan het water vrij onder de damwand door stromen. Alleen de weg, die daarbij moet worden afgelegd, waarbij slechts een iets grotere weerstand moet worden overwonnen, in dit geval 2 keer 0.6 d.

Figuur 5-38 geeft de resultaten van de situatie zonder doorsnijding van een slecht doorlatende laag.



Figuur 5-38 Situatie zonder doorsnijding van een slechtdoorlatende laag. Stationair berekende grondwaterstand bij damwand van 4 meter (dunne roze lijn) en een damwand van 9 meter (dikke blauwe lijn). De getallen in het bovenaanzicht geven de verschillen in grondwaterstand bij de meetpunten.

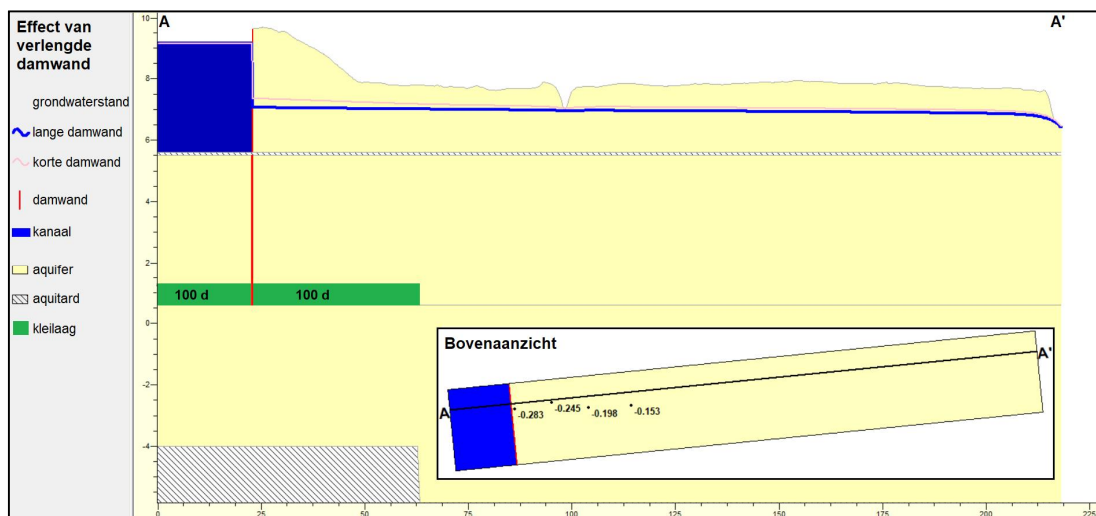
Zoals verwacht laat de berekening zien dat de verlaging van de grondwaterstand door het aanbrengen van een langere damwand marginaal is, orde millimeters tot centimeters.

5.3.4.2 Damwand doorsnijdt wel een slechtdoorlatende laag

Bij Panden 2, 18 en 16 zal een langere damwand geen slechtdoorlatende laag onder het kanaal doorsnijden. Dus betreft deze berekening een fictieve situatie. Daarbij maakt de diepte van die slechtdoorlatende laag niet veel uit. Daarom is voor het gemak aangenomen dat deze laag zich precies op de scheiding van het gedeelde watervoerend pakket bevindt en zich net zover onder de panden uitstrekt als de wel aanwezig diepere kleilaag. Voor de weerstand de fictieve laag is 100 d aangenomen (groene laag in Figuur 5-39). Omdat de

weerstand van de kanaalbodem in het model al 65 d bedraagt, wordt de totale weerstand onder het kanaal daarmee 165 d.

Figuur 5-39 geeft de resultaten van de situatie waarbij de damwand een slecht doorlatende laag doorsnijdt.



Figuur 5-39 Situatie met doorsnijding van een slechtdoorlatende laag. Stationair berekende grondwaterstand bij damwand van 4 meter (dunne roze lijn) en een damwand van 9 meter (dikke blauwe lijn). De getallen in het bovenaanzicht geven de verschillen in grondwaterstand bij de meetpunten.

De berekening laat zien dat een langere damwand in deze situatie resulteert in een wat lagere grondwaterstand. Vlakbij het kanaal is de berekende grondwaterstand ruim 28 cm lager. Naarmate de afstand tot het kanaal toeneemt neemt de verlaging van de grondwaterstand geleidelijk af. Aan de achterzijde van het pand is de verlaging in deze situatie nog bijna 20 cm.

5.3.5 Effect lengte veenlaag

De analyse uit hoofdstuk 5 laat zien dat het effect van een lekke damwand en omgekeerd ook het effect van het aanbrengen van een waterkerende damwand op de grondwaterstand bij het pand afhangt van de aanwezigheid van een veenlaag. Maatgevend aspect daarbij is de afstand gemeten vanaf de rand van het kanaal waarover deze veenlaag ononderbroken doorloopt in de richting van de panden. Het feit dat deze veenlaag over die afstand overal met een continue dikte aanwezig is, is daarbij essentieel. Daar waar de veenlaag stopt, wordt de grondwaterstand immers gelijk aan de stijghoogte van het onderliggende watervoerend pakket, die voor een belangrijk deel wordt bepaald door het relatief lage niveau van de regionale drainage. Ook de grootte van de hydraulische weerstand van het veen is mede bepalend voor beïnvloeding van de grondwaterstand door de aanwezigheid van een al of niet goed functionerende damwand.

Bij Panden 2, 18 en 16 loopt de veenlaag niet ononderbroken door tot aan het pand. Op diverse andere locaties is dat wel het geval. Pand 20 is daar een voorbeeld van. De beschikbare boor- en sonderingsbeschrijvingen duiden erop dat de veenlaag hier tot op 50 m afstand van het kanaal doorloopt. Bijkomend verschil met Panden 2, 18 en 16 is dat het maaiveld bij Pand 20 veel geleidelijker afloopt, een aspect dat in het algemeen ook voor een hogere grondwaterstand kan zorgen. Daarom zijn er enkele aanvullende berekeningen met het detailmodel van Panden 2, 18 en 16 uitgevoerd, waarbij de lengte van de veenlaag en het maaiveld zijn aangepast om een situatie te kunnen doorrekenen die lijkt op de situatie zoals die zich bij Pand 20 voordoet. De tijd en middelen om een gedetailleerd gekalibreerd model voor Pand 20 te maken ontbrak. Bovendien gaat het er alleen om een indruk te krijgen van de invloed van de lengte van de veenlaag op de gevolgen van een al of niet waterkerende damwand voor de grondwaterstand.

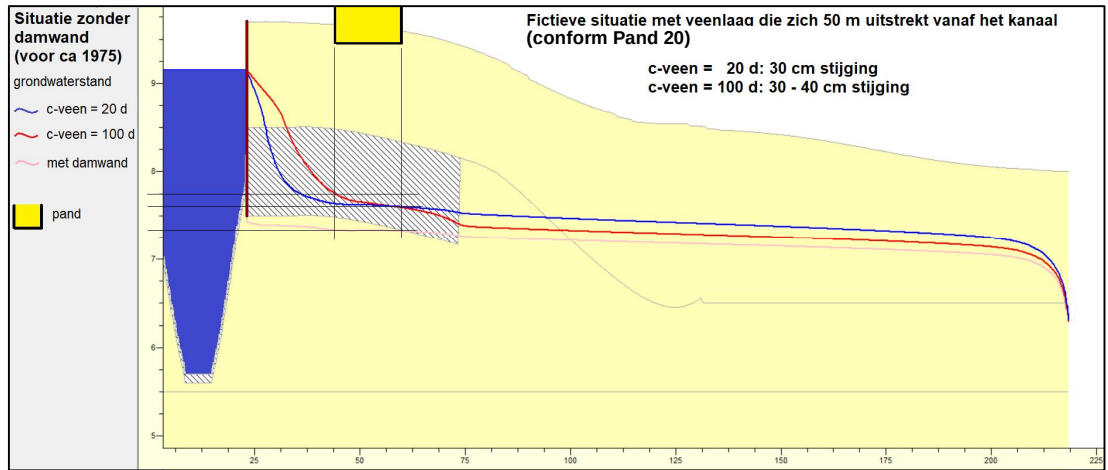
Een andere vraag die hiermee beantwoord kan worden, is het effect van het optreden van schijngrondwaterspiegels boven de veenlaag.

Effect van de damwand

Met het aangepaste model zijn 3 situaties doorgerekend (Figuur 5-40):

1. Situatie met damwand (roze lijn);
2. Situatie zonder damwand, waarbij de weerstand van het veen 20 d is (blauwe lijn);
3. Situatie zonder damwand, waarbij de weerstand van het veen 100 d is (rode lijn).

In de figuur is met het gele blokje de ligging van het pand weergegeven, ongeveer van 20 tot 30 m afstand van het kanaal. In de eerdere berekeningen bij Panden 2, 18 en 16 is voor de weerstand van het veen 100 dagen aangehouden, voor een veendikte van 1 m dus overeenkomend met een verticale doorlatendheid (k_v) van 0.01 m/d. Dat is voor dit veen een relatief lage doorlatendheid, die aangenomen is om te voorkomen dat de effecten op de grondwaterstand bij de panden onderschat worden. Op basis van onze ervaring denken we dat een weerstand van 20 dagen voor het veen een wat reëlere waarde is.



Figuur 5-40 Berekeningsresultaten voor een situatie met een 50 m lange veenlaag in de bodem. De onderste roze lijn geeft de berekende grondwaterstand met een goedwerkende damwand. De blauwe lijn is de berekende grondwaterstand zonder damwand bij een weerstand van het veen van 20 dagen. De rode lijn is de berekende grondwaterstand zonder damwand bij een weerstand van het veen van 100 dagen.

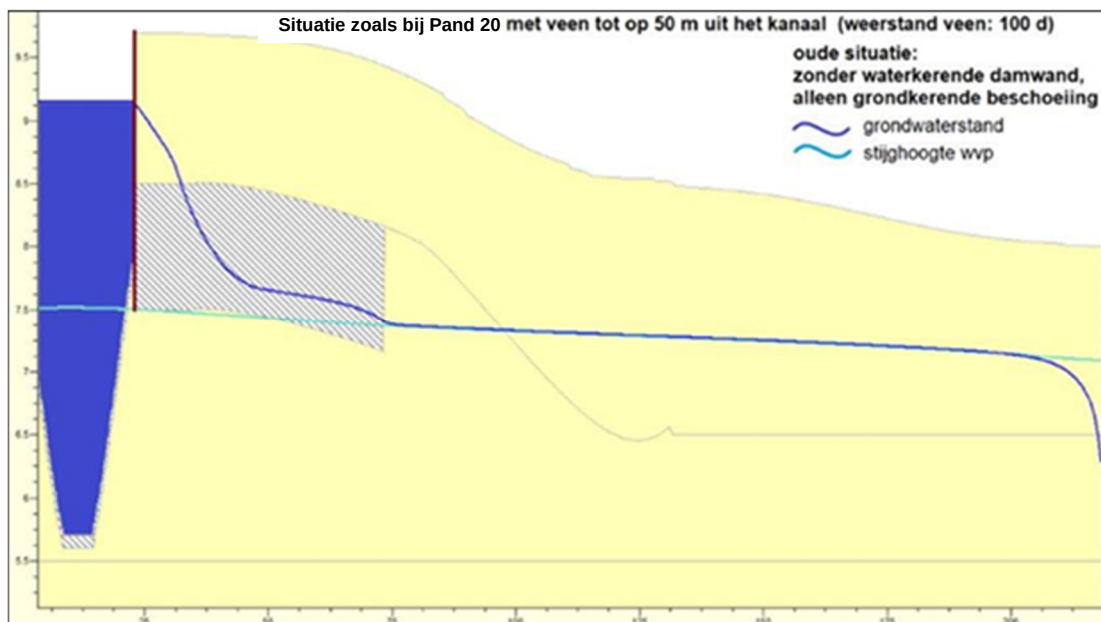
Figuur 5-40 laat zien dat het verschil tussen een lekke (of afwezige) en een goed functionerende damwand aan de voorzijde van het pand bij een veenweerstand van 100 dagen ongeveer 10 cm groter is dan bij een veenweerstand van 20 dagen. Aan de achterzijde van het pand is het effect in beide gevallen ongeveer gelijk. Verder achter het pand is het effect op de grondwaterstand bij een grotere veenweerstand zelfs kleiner.

Als de weerstand van het veen lager is, zal er naast het kanaal meer water door het veen omlaag stromen. Daardoor gaat de stijghoogte in het watervoerend pakket onder het veen meer omhoog. Die extra stijging zet zich door tot voorbij het einde van de veenlaag. Daar wordt de grondwaterstand gelijk aan de stijghoogte, die bij een lagere veenweerstand dus hoger is. Dat is de reden dat de rode en blauwe lijnen in de figuur elkaar kruisen.

Schijngrondwaterspiegels

Als de grondwaterstand onder de onderkant van de veenlaag zit, kan er in natte situaties mogelijk een schijngrondwaterspiegel op de veenlaag ontstaan. In dat geval is er een onverzadigde zone onder de veenlaag aanwezig.

We beschouwen daarvoor de situatie uit Figuur 5-40, met een weerstand van 100 dagen voor de veenlaag. Figuur 5-41 geeft voor die situatie de berekende grondwaterstand (donkerblauwe lijn) en de berekende stijghoogte in het watervoerend pakket onder de veenlaag (lichtblauwe lijn).



Figuur 5-41 Situatie waarbij de grondwaterstand op sommige plekken net onder de veenlaag ligt. De lichtblauwe lijn die de stijghoogte in het watervoerend pakket onder de grijs gearceerde veenlaag aangeeft, is feitelijk de grondwaterstand als die onder de veenlaag ligt.

Figuur 5-41 laat zien dat in dit voorbeeld de stijghoogte in het watervoerend pakket op sommige plekken net onder de veenlaag ligt. Eigenlijk ligt hij op dezelfde hoogte. Dus of je in dit geval met een confined of freatisch tweede pakket rekent, maakt nauwelijks iets uit. In het geval van een schijngrondwaterspiegel zou je immers niet met de stijghoogte, maar met de plaatshoogte van de onderkant van de veenlaag moeten rekenen. En in dit geval geldt: plaatshoogte $\approx$ stijghoogte, dus hetzelfde verhang.

Als de stijghoogte iets lager ligt, is het effect van het verschil tussen stijghoogte en plaatshoogte grofweg hetzelfde als het effect van een iets grotere weerstand van de veenlaag (omdat grondwaterstroming linear toeneemt met verhang, en lineair afneemt met weerstand). In dat geval is de beïnvloeding van de grondwaterstand door het plaatsen van waterkerende damwanden iets groter, omdat aanvankelijk de grondwaterstand boven het veen ook wat hoger lag.

Onze inschatting is dat je maximale toename van de verticale weerstand door het veen hooguit enkele tientallen procenten bedraagt. Voor het begrip een voorbeeld: Bij een grondwaterstand van 9.0 m is het verhang naar de onderkant van het veen op 7.5 m, 1.5 m. Als de stijghoogte dan wegzakt, en het zand onverzadigd raakt, dan neemt het verhang niet verder toe. In vergelijking met een confined pakket is dan de grondwaterstroming kleiner, die in een equivalente weerstand uitgedrukt kan worden. Stel dat de stijghoogte 7 m bedraagt. In een confined geval bedraagt de het verhang dan 2.0 m. In een unconfined geval bedraagt verhang dan 1.5 m. Dat komt overeen met een weerstandstoename van $(2.0 - 1.5 / 2.0 =) 25\%$.

De aanwezigheid van schijngrondwaterspiegels bovenop de veenlaag is nergens waargenomen en is ook nauwelijks aan te tonen. Maar stel dat het hier voorkomt, is het zeer onwaarschijnlijk dat er daardoor bij extreme neerslag grote hoeveelheden grondwater afstromen over de veenlaag richting de panden, omdat:

- De bovenkant van de veenlaag niet egaal afloopt naar de panden;
- De veenlaag relatief goed doorlatend is en misschien zelfs water kan aanzuigen zolang het veen nog niet 100% verzadigd is;

- De stroming van grondwater een langzaam proces is en door een dun grondlaagje gaat.

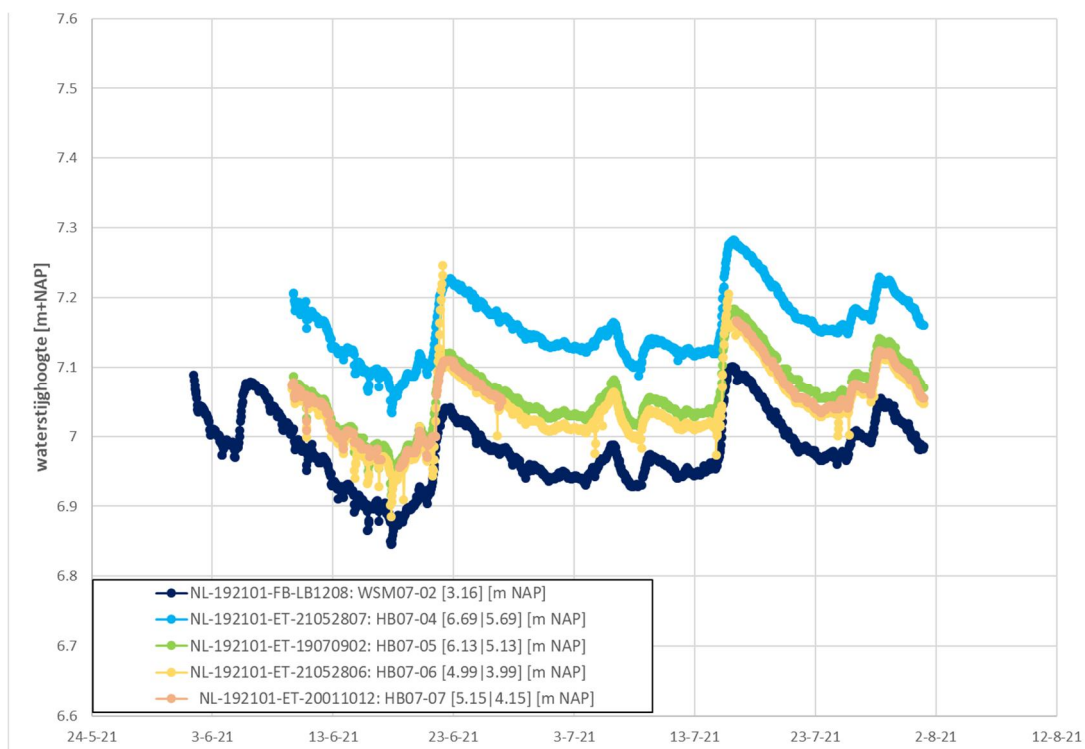
5.4 Evaluatie

5.4.1 Metingen

De metingen van de waterspanningsmeter die aan de kanaalzijde in de kanaalbodem is gedrukt tot op een diepte van NAP +3.26 m vertonen een identiek verloop in de tijd als de gemeten grondwaterstijghoogtes in de peilbuizen (Figuur 5-42).

De gegeven waarden van dit meetpunt zijn stijghoogten in m ten opzichte van NAP, die zijn omgerekend uit gemeten waterspanningen in kPa. De absolute waarden van die metingen zijn minder betrouwbaar dan het verloop van deze waarden in de tijd (stijgingen en dalingen). Dat komt door mogelijke onnauwkeurigheden in de referentiewaarden.

Ongeacht de geringere betrouwbaarheid van de absolute waarden (orde decimeters versus meters verschil met het kanaalpeil), laten de resultaten van de waterspanningsmeter op een groot verschil zien met het kanaalpeil van NAP +9.15 m. Dat kan alleen gebeuren als er een flinke hydraulische weerstand aanwezig is tussen het kanaalwater en het grondwater onder het kanaal. Alle waterspanningsmeters die voor dit onderzoek in de kanaalbodem zijn geplaatst geven vergelijkbaar grote verschillen. Dat duidt erop dat er in de huidige situatie een grote bodemweerstand in het hele kanaal aanwezig moet zijn.



Figuur 5-42 Vergelijking metingen waterspanningsmeter (WSM) en ondiepe peilbuizen bij Panden 2, 18 en 16

Ook alle andere waterspanningsmeters die bij de andere meettraaien in de kanaalbodem gedrukt zijn, geven grote verschillen tussen meting en kanaalpeil en vertonen een vergelijkbaar verloop in de tijd als de nabij gelegen stijghoogtemetingen.

5.4.2 Berekeningen

De uitgevoerde zeer gedetailleerde grondwatermodellering bij de panden van Panden 2, 18 en 16 onderbouwt de relatief grote weerstanden van kanaalbodem en damwand voor deze locatie.

Uit de scenarioberekeningen blijkt dat er bij een lekke damwand over een grote lengte van het kanaal een grote grondwatergradiënt ontstaat, waarbij de grondwaterstand over enkele meters afneemt van kanaalpeil direct naast de damwand tot ruim anderhalve meter lager op zo'n 10 meter afstand van het kanaal. De metingen bij de lekke damwand 100 m ten zuiden van Pand 14 duiden zelfs op een nog snellere afname. Daar reikt de aanwezige veenlaag in de kanaaloever echter maar tot de weg die ongeveer 2.5 m van de kanaaloever ligt. De veenlaag bij Panden 2, 18 en 16 reikt (in het model) een stuk verder, waardoor het directe contact tussen de zandpakketten boven en onder de veenlaag ook op wat grotere afstand van het kanaal ligt. Het grote doorlaatvermogen van de onderliggende zandpakketten en de laaggelegen regionale drainageniveaus zorgen ervoor dat de relatief kleine instroom- "opening" van kanaalwater boven de veenlaag relatief snel uitdempt. Ook de aanwezige bodemweerstand van het kanaal draagt hieraan bij.

De spreiding van het effect van een lekke damwand op de grondwaterstand hangt samen met de afstand waarover de aanwezige veenlaag zich vanaf de damwand landinwaarts uitstrekt. In het detailmodel van Panden 2, 18 en 16 is aangenomen dat de veenlaag zich tot voorbij de weg uitstrekt, over een afstand van 12 meter. 100 m ten zuiden van Pand 14 is bekend dat de veenlaag onder de weg niet aanwezig is en daarmee beperkt blijft tot ongeveer 2.5 m vanaf het kanaal. Daarom is het gemeten verloop van de grondwaterstand 100 m ten zuiden van Pand 14 ook steiler dan het berekende verloop van de grondwaterstand bij Panden 2, 18 en 16.

Dat betekent ook dat op locaties waar de veenlaag zich verder uitstrekt, het effect van een lekke damwand op de grondwaterstand groter is. Uit de berekeningen volgt dat de bijdrage van een lekke damwand aan de grondwaterstand ter plekke van de panden bij Panden 2, 18 en 16 in de orde van 10 tot 15 cm ligt. Een relatief grove berekening waarbij deze veenlaag zich tot achter het pand uitstrekt, zoals bij Pand 20 het geval is, resulteert aan de voorzijde van het pand in een stijging van de grondwaterstand van ongeveer 30 cm. Bij een hogere weerstand van de veenlaag is deze berekende stijging aan de voorzijde van het pand een decimeter groter.

De scenarioberekeningen voor de bodemweerstand tonen aan dat bij een snel dichtslibbende bodem het effect van baggeren op de grondwaterstand beperkt blijft tot een tijdelijke stijging van een tot twee decimeter. Als de bodem langzaam dichtslibt, kan de tijdelijke stijging van de grondwaterstand bij de panden oplopen tot een meter. Bij langzaam dichtslibben van de bodem zou er in 2012 gedurende langere tijd een sterk verhoogde grondwaterstand moeten zijn gemeten. Hoewel er geen waarnemingen zijn die eenduidig aantonen dat stijgingen van de grondwaterstand zijn opgetreden na het baggeren, zijn kortdurende stijgingen van de grondwaterstand destijds mogelijk wel opgetreden, maar langdurige stijgingen zeker niet. Ook dat duidt erop dat de kanaalbodem na baggeren waarschijnlijk weer snel dichtslibt.

De scenarioberekeningen voor verdroging tonen aan dat de grondwaterstand ook in extreem droge situaties niet heel ver uitzakt. De aanvulling van het grondwater door lekkend kanaalwater verhindert verdere uitzakking van de grondwaterstand. Ook als de bodemweerstand en damwandweerstand relatief hoog zijn. Dat wordt bevestigd door enkele in het gebied aanwezige peilbuizen.

Vervangen van goed functionerende betonnen damwanden van 4 meter lengte, zoals deze in de situatie van de gekalibreerde doorsnede bij de Panden 2, 18 en 16 aanwezig is, door

stalen damwanden van 9 meter lengte heeft nagenoeg geen effect op de grondwaterstand. Alleen als daarbij een slechtdoorlatende klei- of leemlaag, die onder het gehele kanaal over grotere lengte aanwezig is, wordt doorsneden, zal de grondwaterstand in de buurt van het kanaal door het aanbrengen van een langere damwand een paar decimeter kunnen dalen. Kanttekening 1 daarbij is dat in dat geval het effect van baggeren van de kanaalbodem vele malen kleiner wordt. Kanttekening 2 is dat een situatie met een slechtdoorlatende laag onder het gehele kanaal aannemelijk is voor slechts één locatie in het gebied.

5.5 Conclusies detailmodellering

De belangrijkste conclusies die uit de detailmodellering volgen, zijn:

- In alle doorgerekende scenario's blijven de grondwater-verhangen over het pand relatief laag (hooguit enkele procenten).
- Verwijderen van de damwand zal waarschijnlijk niet tot grondwateroverlast bij het pand leiden. Alleen op locaties waarbij een continue veenlaag aanwezig is, die zich uitstrekt vanaf het kanaal tot achter het pand, is de kans op grondwateroverlast bij een lekke damwand groot.
- Permanente afwezigheid van een bodemweerstand leidt tot grote wateroverlast bij de panden. Maar dat is een zeer onwaarschijnlijke situatie.
- Als na baggeren de bodem snel weer dichtslibt, geleidelijk in ongeveer tweeënhalve dag, is het effect bij de panden relatief klein en wordt er geen wateroverlast verwacht.
- Als na het baggeren de bodem langzaam dichtslibt, geleidelijk in ongeveer twee maanden, is het effect bij de panden relatief groot en kan er (tijdelijk) wateroverlast optreden. Maar het is niet waarschijnlijk dat het kanaal na baggeren langzaam dichtslibt. De metingen tijdens het baggeren ondersteunen ook een langzaam dichtslibbend kanaal niet: een stijging van een meter is niet aan te wijzen.
- De extreme droogte in het groeiseizoen van 2018 heeft relatief weinig effect op verlaging van de grondwaterstand. De grondwaterstand gaat vanaf het voorjaar 50 tot 60 cm omlaag. Een verdere verlaging wordt voorkomen doordat het grondwater uit het kanaal wordt aangevuld.
- Het effect van het aanbrengen van een langere damwand heeft nagenoeg geen effect op de grondwaterstand. Alleen als daarbij een slecht doorlatende laag, die onder de gehele kanaalbodem over grotere lengte aanwezig is, wordt doorsneden, zal de grondwaterstand in de buurt van het kanaal een paar decimeter kunnen dalen. In dat geval zal het effect van baggeren van de kanaalbodem op de grondwaterstand een stuk kleiner zijn. Er zijn echter geen aanwijzingen dat dit ergens bij het kanaal het geval is.

6 Aanvullende peilbuisanalyse

Naar aanleiding van discussies over de snelheid waarmee de bodemweerstand zich weer hersteld na baggeren, is een aanvullende analyse uitgevoerd van enkele peilbuiswaarnemingen, die tijdens het baggeren in de periode van 2011 en 2012 zijn gedaan. Dit is reeds uitvoerig geanalyseerd in het vorige onderzoek. Er wordt hier nogmaals kort aandacht aan besteed, en in context geplaatst met de nieuwe grondwatermetingen die zijn verricht voor dit onderzoek.

De grondwatermetingen die recentelijk voor dit onderzoek gedaan zijn, laten een eenduidig beeld zien wat betreft de grondwaterstanden en stijghoogte rondom het kanaal. Er bestaat een groot peilverschil:

- Over de damwand bedraagt het verschil circa 1,5-2 m. De grondwaterstandsmeting 100 m ten zuiden van Pand 14 is een uitzondering: hier lekt hoogstwaarschijnlijk de damwand, en hier is de grondwaterstand direct achter de damwand gelijk aan het kanaalpeil.
- Over de kanaalbodem bedraagt het verschil eveneens circa 1,5-2 m. Dit baseren we op waterspanningsmeters die door de kanaalbodem gedrukt zijn (Figuur 6-1), en dus de stijghoogte direct onder de kanaalbodem meet. Hier zijn geen uitzondering op waargenomen. Ook 100 m ten zuiden van Pand 14 is de stijghoogte direct onder de kanaalbodem 1,5-2 m lager dan het kanaalpeil; de kanaalbodem vormt dus een hydraulische weerstand.

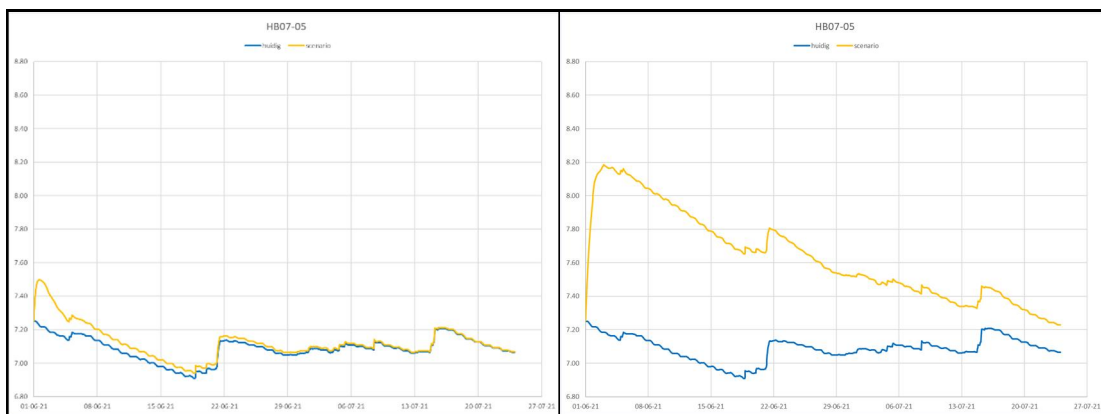
Figuur 6-1 is om privacy redenen niet opgenomen.

Figuur 6-1 Locatie van de waterspanningsmeters in de kanaalbodem. Alle meetpunten zijn vlakbij de damwand in de kanaalbodem gedrukt en steken enkele meters diep onder de kanaalbodem.

Tijdens het baggeren in de periode van 2011 en 2012 zijn een aantal peilbuizen rond het kanaal geplaatst. Bij het baggeren wordt de sliblaag op de kanaalbodem verwijderd, en daarmee de hydraulische weerstand. Het kanaal gaat versterkt infiltreren, wat het grondwater kan laten stijgen. De mate van deze stijging hangt onder andere af van hoe lang het kanaal versterkt infiltreert; het is een bekend fenomeen dat de bodem van een permanent infiltrerende waterloop dichtslaat.

Uit het gemeten stijghoogte verschil van 1,5 tot 2 m met het kanaalpeil blijkt dat in de huidige toestand de kanaalbodem inderdaad dicht is. De resterende vraag is dan: hoe lang heeft het geduurd voordat het kanaal na het baggeren van 2011 en 2012 weer was dichtgeslagen?

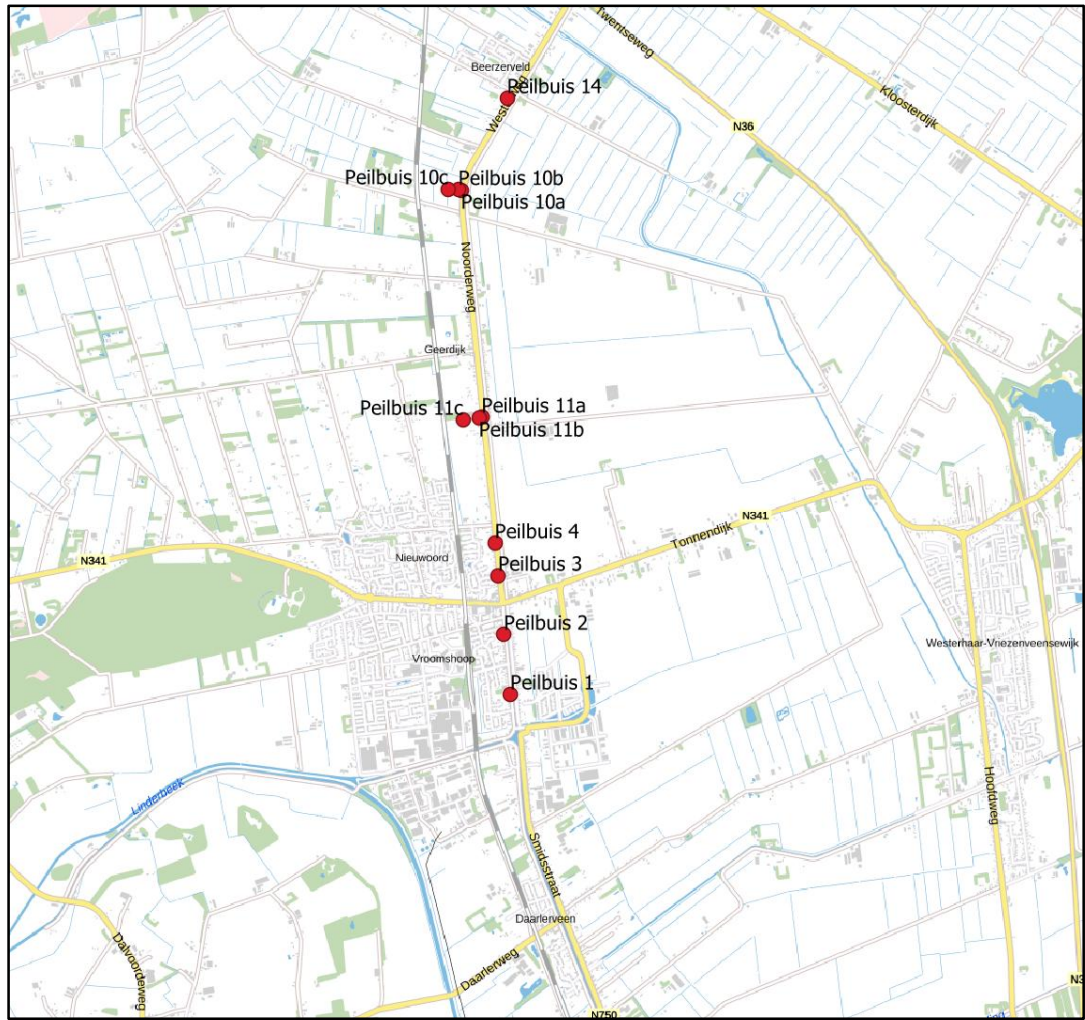
Met behulp van het grondwatermodel is bepaald wat de invloed is van het wegnemen van de kanaalbodemweerstand. De tijdreeksen hiervoor, voor de grondwaterstand bij een pand dat zich op 17 tot 27 m vanaf het kanaal bevindt, zijn afgebeeld in Figuur 6-2.



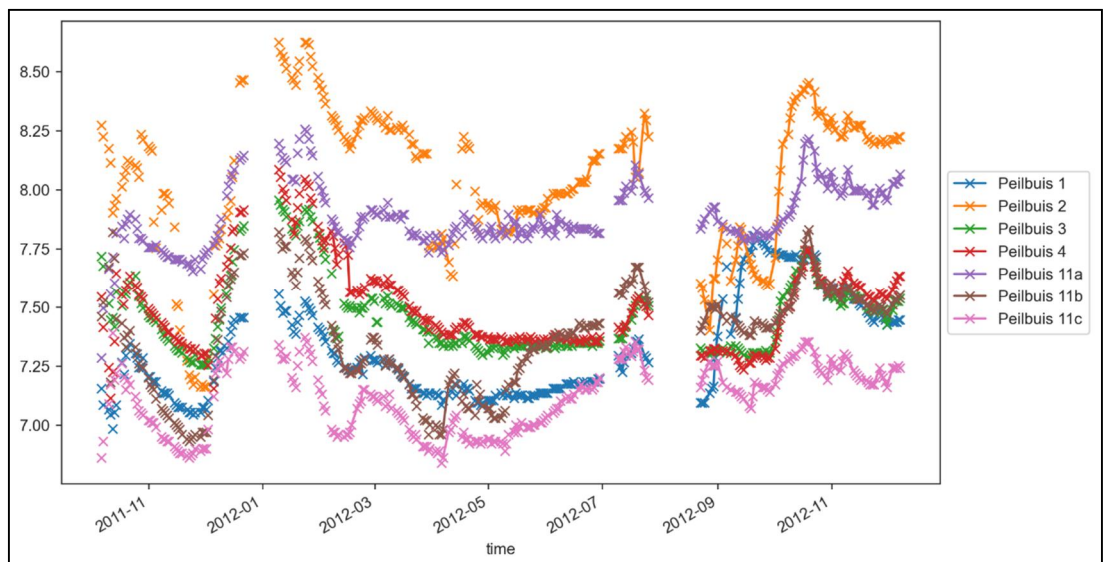
Figuur 6-2 Berekende stijging van het grondwater bij snel (circa 2 dagen, links) en bij langzaam (circa 2 maanden, rechts) dichtslaan van de kanaalbodem

Bij snel dichtslibben (circa 2 dagen) bedraagt de stijging 10 tot 20 centimeter. Bij langzaam dichtslaan (circa 2 maanden) bedraagt de stijging 1 meter. Bij een nog langere periode bedraagt de stijging ook 1 meter; dit volgt uit een stationaire berekening waarbij de sliblaag zich nooit herstelt. Een stijging van 1 meter is niet eenduidig aan te wijzen in de grondwaterstandmetingen ten tijde van het baggeren.

In het vorige onderzoek hebben we deze peilbuizen uitgebreid bekeken, alleen lag er toen geen nadruk op peilbuis 1 en 2 uit die periode. Op deze peilbuizen gaan we hieronder wat uitgebreider op in.



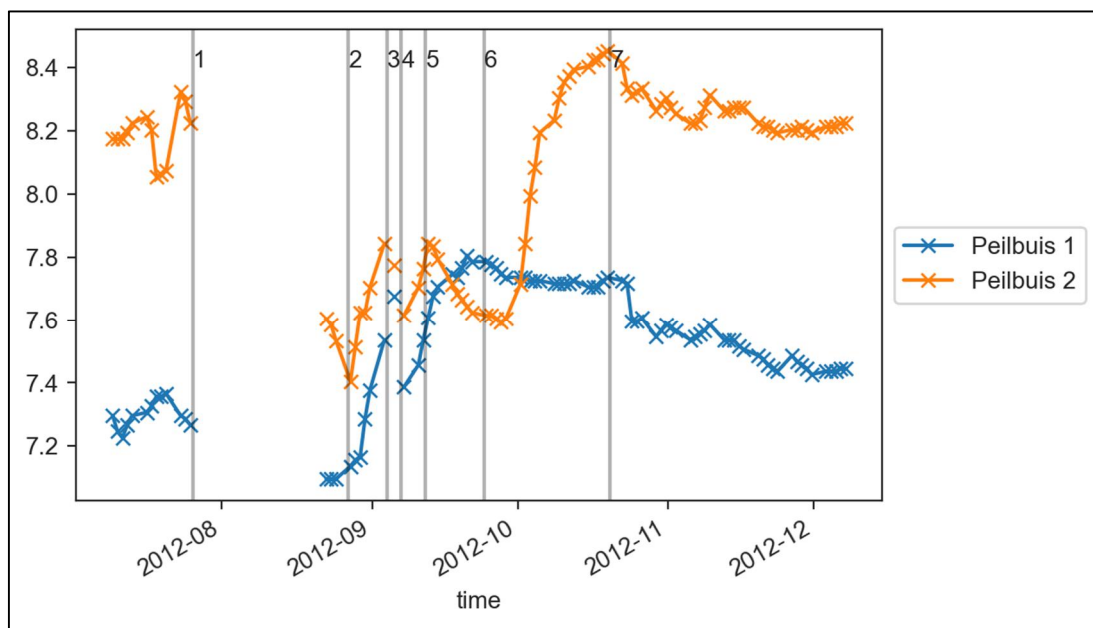
Figuur 6-3 Locatie van de peilbuizen



Figuur 6-4 Grondwaterstanden in de peilbuizen, gemeten tijdens de baggerwerkzaamheden van 2011 en 2012. De gaten in de metingen rond de jaarwisseling 2011/2012 en in augustus 2012 komen overeen met vakantieperiodes.

Wij concentreren ons in deze korte analyse op de peilbuizen in de directe omgeving van Vroomshoop. De locatie van deze peilbuizen is afgebeeld in Figuur 6-3. De tijdreeksen van de grondwaterstanden voor deze peilbuizen staan afgebeeld in Figuur 6-4.

Als het baggeren tot een langdurige stijging van de grondwaterstand heeft gezorgd, dan veroorzaakt dat lokaal een sterke stijging van de grondwaterstand op dat moment. Anders gesteld: een grondwaterstijging die op hetzelfde moment in elk van de peilbuizen voorkomt, wordt niet veroorzaakt door het baggeren, maar door de reactie van de grondwaterstand op neerslag (en verdamping). Figuur 6-4 laat veel van dit soort stijgingen zien, waarbij bijvoorbeeld de stijgingen rond 1 januari 2012 en rond 20 oktober het meest in het oog springen: deze zijn uitstekend te verklaren door neerslag. In het algemeen geldt dat er in de reeksen geen plotselinge stijgingen waar te nemen zijn, die voor maar één peilbuis optreedt, die aan het baggeren te relateren zijn. Peilbuis 1 en 2 vormen hier een uitzondering op: zij laten rond september 2012 afwijkend gedrag zien.



Figuur 6-5 Tijdreeksen van peilbuis 1 en 2, voor de periode 1 juli 2012 tot 7 december 2012. De verticale lijnen corresponderen met een reeks datums die in Tabel 6-1 staan toegelicht. Het gat in de metingen vanaf 26 juli betreft de vakantieperiode.

Tabel 6-1 Beschrijving van stijging en daling per periode uit Figuur 6-5

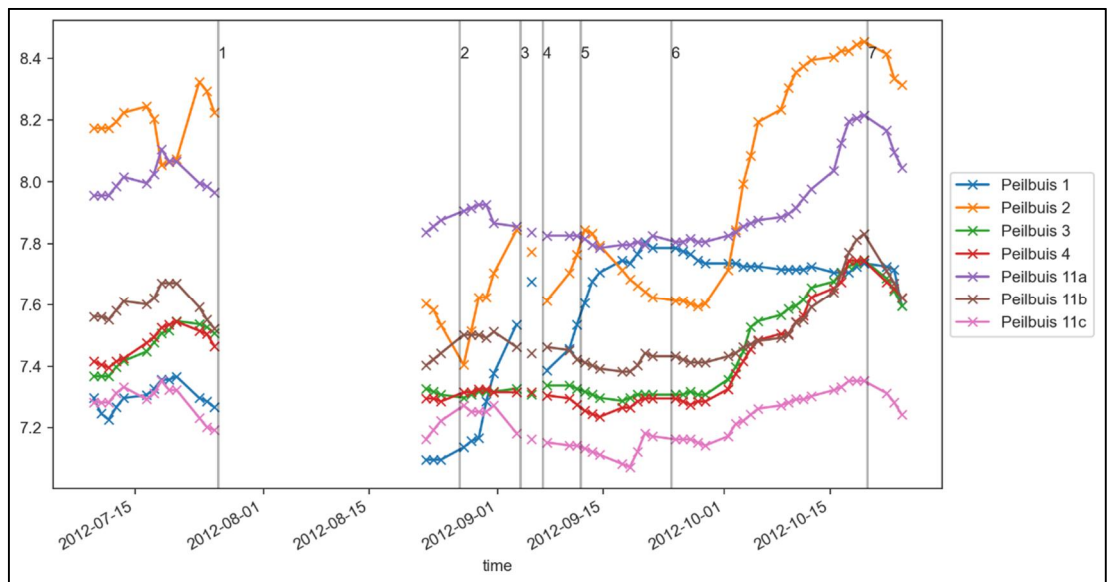
Periode (in 2012)	Peilbuis 1	Peilbuis 2
1: 26 juli – 27 augustus	20 cm daling	80 cm daling (!)
2: 27 augustus – 4 september	60 cm stijging	40 cm stijging
3: 4 – 7 september	30 cm daling (!)	25 cm daling (!)
4: 7 – 12 september	30 cm stijging	25 cm stijging
5: 12 – 24 september	20 cm stijging	25 cm daling
6: 24 september – 20 oktober	10 cm daling	80 cm stijging (!)
7: vanaf 20 oktober	gebruikelijke neerslagrespons	gebruikelijke neerslagrespons

Figuur 6-5 in combinatie met Tabel 6-1 beschrijft een aantal periodes tussen 1 juli 2012 en 7 december 2012. Er is deze periode vermoedelijk van noord naar zuid gebaggerd, waarbij

peilbuis 1 circa 450 meter ten zuiden ligt van peilbuis 2 (zie Figuur 6-3). Schatting van de baggersnelheden bedragen 30 tot 100 meter per werkdag.

In de tijdreeksen van peilbuis 1 en 2 zijn een aantal onverklaarbare stijgingen en daling waar te nemen:

1. Peilbuis 2 laat een daling van 80 cm zien, in een maand tijd (periode 1). Dit is niet te verklaren door verdamping. (Dit is ook niet te relateren aan het baggeren: het baggeren leidt tot een stijging van de grondwaterstand, niet een daling.)
2. Peilbuis 1 en 2 laten een sterke stijging zien in periode 2. Dit wordt echter gevolgd door een daling van 25-30 cm in periode 3.
3. Hierna stijgt de grondwaterstand weer in periode 4. Als de stijging van periode 2 aan het baggeren gerelateerd zou moeten worden, dan zou de daling in periode 3 op een korte periode van dichtslaan duiden, bij een tijdelijke pauzering van het baggeren.
4. In periode 6 laat peilbuis 2 een stijging van 80 cm zien, waarmee de grondwaterstand terugkomt op zijn oorspronkelijke waarde op 1 juli. Peilbuis 1 laat echter een kleine daling zien, terwijl er rond 20 oktober 55 mm neerslag is gevallen in drie dagen. Figuur 6-6 laat deze periode ook zien, maar nu voor meerdere peilbuizen. Alle peilbuizen reageren op de neerslag rond 20 oktober, met uitzondering van peilbuis 1.



Figuur 6-6 Tijdreeksen van de peilbuizen voor de periode 1 juli tot 25 oktober 2012. Het gat in de metingen vanaf 26 juli betreft de vakantieperiode.

Conclusies

We kunnen het volgende concluderen:

- De peilbuizen laten dezelfde veranderingen in de tijd zien, die door neerslag en verdamping verklaard kunnen worden.
- Er zijn geen grote afwijkende stijgingen te zien, met uitzondering van peilbuis 1 en 2 tussen 27 augustus tot 15 oktober.
- Peilbuis 2 laat echter een onverklaarbare daling van 80 cm in één maand zien.
- Peilbuis 1 en 2 lijken tussen 27 augustus en 12 september 2012 vergelijkbaar te stijgen en dalen.
- Peilbuis 1 en 2 laten een korte daling van 25-30 cm zien tussen 4 en 7 september.
- Na 12 september reageren ze echter volledig anders: peilbuis 1 laat geen respons zien op de neerslag in oktober (55 mm in 3 dagen), alle andere peilbuizen wel.
- Deze afwijkingen zijn niet door het baggeren alleen te verklaren.

- Er is dus of een meetfout / invulfout gemaakt (alles handmeting), of er iets anders gebeurd (bijv. een bemaling).
- Een stijging van 1 meter is niet eenduidig aan te wijzen in de grondwaterstandmetingen ten tijde van het baggeren.
- Het kanaal moet dus snel dichtgeslagen zijn.

Dit rapport beschrijft de grondwateranalyse voor het gebied rondom Kanaal Almelo – De Haandrik. De uitgevoerde analyse is gebaseerd op metingen en berekeningen. De metingen zijn onder te verdelen in metingen die specifiek voor dit onderzoek zijn verricht en metingen die al eerder zijn gedaan. De berekeningen zijn verricht met een regionaal model voor het gehele onderzoeksgebied en een detail model voor een specifieke locatie, Panden 2, 18 en 16 \. Op grond van het verhang in maaiveld over het pand is dit de locatie met een van de grootste potenties op het optreden van piping. Het aantonen of er een grondwaterverhang kan optreden dan wel in het verleden kan zijn opgetreden, waarbij piping mogelijk is, is een van de doelen van dit onderzoek.

De metingen die specifiek voor dit onderzoek zijn verricht, zijn uitgebreid beschreven in de factsheets per raai en daarom niet nogmaals in dit rapport opgenomen. De metingen bij Panden 2, 18 en 16 zijn wel gebruikt in de detailmodellering en de samen met de andere metingen in deze grondwateranalyse.

De berekeningen met het regionale model zijn vooral uitgevoerd om het effect van een kanaalpeilverlaging op de grondwaterstand te kunnen kwantificeren, om mogelijk iets tegen piping te kunnen doen als het onderzoek zou uitwijzen dat dit inderdaad optreedt. De berekeningen met het detailmodel zijn gebruikt om verschillende mogelijk maatgevende situaties te kunnen analyseren.

Metingen

Alle waterspanningsmeters die in de kanaalbodem gedrukt zijn, laten zien dat de stijghoogten van het grondwater onder de kanaalbodem veel lager zijn dan het waterpeil van het kanaal, orde 1.5 tot 2 meter lager. Daarnaast vertonen de gemeten waterspanningen nagenoeg dezelfde variatie als de gemeten grondwaterstand in de nabijgelegen peilbuizen. Beide duiden erop dat, gedurende de meetperiode van begin juni tot begin augustus 2021, de bodemweerstand van het kanaal aanwezig was.

Bijna alle ondiepe peilbuizen die binnen een paar meter van het kanaal staan, laten zien dat de stijghoogten van het grondwater vlak naast het kanaal veel lager zijn dan het waterpeil van het kanaal, orde 1.5 tot 2 meter lager. Ook dat duidt erop dat, gedurende de meetperiode van begin juni tot begin augustus 2021, de damwandweerstand van het kanaal groot was.

Alleen 100 m ten zuiden van Pand 14 zijn de gemeten stijghoogtes vlakbij het kanaal duidelijk hoger. Daar is de damwand dusdanig lek dat het water aan de landzijde van de damwand op meerdere plaatsen gelijk is aan kanaalpeil. Op ongeveer een halve meter vanaf het kanaal schommelt de gemeten grondwaterstand (oude peilbuis) tussen de 36 en 62 cm onder kanaalpeil. Ongeveer 16 meter noordelijker, op ongeveer 1.75 m uit het kanaal (HB09-04) schommelt de gemeten grondwaterstand tussen de 77 en 92 cm onder kanaalpeil. Op deze locatie was de gemeten stijghoogte in de diepe meting naast het kanaal (B09-04) ongeveer 70 cm lager dan in de ondiepe meting HB09-04. De naastgelegen waterspanningsmeter onder het kanaal gaf hier met standen rond de 1.85 m onder kanaalpeil nog 30 cm lagere meetwaarden. Het gemeten steile verhang in grondwaterstand op deze locatie wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het hoge doorlaatvermogen van het onderliggende watervoerend pakket in combinatie met de lage regionale drainageniveaus.

Regionale modellering

De resultaten van het regionale model duiden erop dat het kanaal een relatief grote bodemweerstand heeft en op de meeste plekken ook een grote damwandweerstand. Vergelijking van de rekenresultaten met de beschikbare regionale peilbuismetingen laat zien dat op ook plekken langs het kanaal zijn waar de damwand geen waterkerende werking heeft.

Een kanaalpeilverlaging heeft alleen een relevant effect op de grondwaterstand voor locaties waar de damwand over een relevante afstand lek is en / of als de weerstand van de bodem gedurende langere tijd klein is.

Als de bodemweerstand van het kanaal gedurende langere tijd klein is, zal de grondwaterstand in de omgeving van het kanaal sterk omhoog gaan. Dat kan leiden tot grondwateroverlast. Datzelfde gebeurt als de damwand over langere trajecten lek is.

Detailmodellering

De uitgevoerde zeer gedetailleerde grondwatermodellering bij de panden van Panden 2, 18 en 16 onderbouwt de relatief grote weerstanden van kanaalbodem en damwand voor deze locatie.

Uit de scenarioberekeningen blijkt dat er bij een lekke damwand over een grote lengte van het kanaal een grote grondwatergradiënt ontstaat, waarbij de grondwaterstand over enkele meters afneemt van kanaalpeil direct naast de damwand tot ruim anderhalve meter lager op zo'n 10 meter afstand van het kanaal. De metingen bij de lekke damwand 100 m ten zuiden van Pand 14 duiden zelfs op een nog snellere afname. Daar reikt de aanwezige veenlaag in de kanaaloever echter maar tot de weg die ongeveer 2.5 m van de kanaaloever ligt. De veenlaag bij Panden 2, 18 en 16 reikt (in het model) een stuk verder, waardoor het directe contact tussen de zandpakketten boven en onder de veenlaag ook op wat grotere afstand van het kanaal ligt. Het grote doorlaatvermogen van de onderliggende zandpakketten en de laaggelegen regionale drainageniveaus zorgen ervoor dat de relatief kleine instroom- "opening" van kanaalwater boven de veenlaag relatief snel uitdempt. Ook de aanwezige bodemweerstand van het kanaal draagt bij aan de lage stijghoogten onder de veenlaag.

De spreiding van het effect van een lekke damwand op de grondwaterstand hangt samen met de afstand waarover de aanwezige veenlaag zich vanaf de damwand landinwaarts uitstrekt. In het detailmodel van Panden 2, 18 en 16 is aangenomen dat de veenlaag zich tot voorbij de weg uitstrekt, over een afstand van 12 meter. 100 m ten zuiden van Pand 14 is bekend dat de veenlaag onder de weg niet aanwezig is en daarmee beperkt blijft tot ongeveer 2.5 m vanaf het kanaal. Daarom is het gemeten verloop van de grondwaterstand 100 m ten zuiden van Pand 14 ook steiler dan het berekende verloop van de grondwaterstand bij Panden 2, 18 en 16.

Dat betekent ook dat op locaties waar de veenlaag zich verder uitstrekt, het effect van een lekke damwand op de grondwaterstand groter is. Uit de berekeningen volgt dat de bijdrage van een lekke damwand aan de grondwaterstand ter plekke van de panden bij Panden 2, 18 en 16 in de orde van 10 tot 15 cm ligt. Een indicatieve berekening waarbij deze veenlaag zich tot ongeveer 20 meter achter het pand uitstrekt, resulteert aan de voorzijde van het pand in een stijging van de grondwaterstand van ongeveer 30 cm. Als de hydraulische weerstand over de gehele lengte van de veenlaag een factor 5 groter is dan aangenomen kan de stijging aan de voorzijde van het pand nog 10 cm meer zijn.

De scenarioberekeningen voor de bodemweerstand tonen aan dat bij een snel dichtslibbende bodem het effect van baggeren op de grondwaterstand beperkt blijft tot een tijdelijke stijging van enkele decimeters. Als de bodem langzaam dichtslibt, kan de tijdelijke stijging van de

grondwaterstand oplopen tot een meter. Bij langzaam dichtslibben van de bodem zou er in 2012 gedurende langere tijd een sterk verhoogde grondwaterstand moeten zijn gemeten. Kortdurende stijgingen van de grondwaterstand na baggeren zijn destijds mogelijk wel opgetreden. De waarnemingen van destijds kunnen dit echter niet eenduidig aantonen. Langdurige stijgingen van de grondwaterstand na baggeren zijn niet waargenomen. Ook dat duidt erop dat de kanaalbodem na baggeren waarschijnlijk weer snel dichtslibt.

De scenarioberekeningen voor verdroging tonen aan dat de grondwaterstand ook in extreem droge situaties in de buurt van het kanaal niet heel ver uitzakt, tot ongeveer een halve meter onder de voorjaarsgrondwaterstand en orde 20 tot 30 cm lager dan in een gemiddelde zomer. De aanvulling van het grondwater door lekkend kanaalwater verhindert verdere uitzakking van de grondwaterstand. Ook als de bodemweerstand en damwandweerstand relatief hoog zijn.

Vervangen van goed functionerende (niet lekke) damwanden van 4 meter lengte door damwanden van 9 meter lengte heeft nagenoeg geen enkel effect op de grondwaterstand. Alleen als daarbij een slechtdoorlatende klei- of leemlaag, die onder het gehele kanaal over grotere lengte aanwezig is, wordt doorsneden, zal de grondwaterstand in de buurt van het kanaal door het aanbrengen van een langere damwand een paar decimeter kunnen stijgen. Kanttekening 1 daarbij is dat in dat geval het effect van baggeren van de kanaalbodem vele malen kleiner wordt. Kanttekening 2 is dat een situatie met een slechtdoorlatende laag onder het gehele kanaal aannemelijk is voor slechts één locatie in het gebied.

Conclusies

- De verhangen in grondwater over de panden zijn relatief laag (hooguit enkele procenten). Piping kan op basis van deze verhangen niet optreden. Dat geldt zowel voor de huidige situatie als voor situaties waarbij de bodemweerstand en / of de damwandweerstand laag is.
- Een lekke damwand over een langer traject van het kanaal kan tot een kleine stijging van de grondwaterstand leiden bij panden die dicht langs het kanaal staan. De grondwaterstand bij deze panden kan door een lekke damwand 10 tot 15 cm omhoog komen. Omdat deze situatie zich gedurende langere tijd voordoet, kan dat in zeer natte perioden leiden tot lichte grondwateroverlast.
- Alleen bij locaties waarbij een continue veenlaag zich uitstrekt van het kanaal tot voorbij het pand, kan de grondwaterstand door een lekke damwand nog wat verder oplopen (tot ca 30 cm) en is de kans op grondwateroverlast door een lekke damwand groot.
- Bij het (langdurig) ontbreken van een bodemweerstand is de potentiële grondwateroverlast een stuk groter. Het is echter onwaarschijnlijk dat een dergelijke situatie zich door het baggeren van de kanaalbodem heeft voorgedaan.
- Als na baggeren de bodem snel weer dichtslibt, geleidelijk in ca 2,5 dagen, is de stijging van de grondwaterstand bij de panden relatief klein (orde 10 à 20 cm) en wordt er geen wateroverlast verwacht. Alleen als dat net samenvalt met een zeer natte periode is er kans op enige grondwateroverlast.
- Als na het baggeren de bodem langzaam dichtslibt, geleidelijk in ca 2 maanden, is het effect bij de panden relatief groot (orde 1 m) en kan er (gedurende enkele weken) grondwateroverlast optreden.
- Er zijn geen aanwijzingen (metingen), die eenduidig aantonen dat de bodem van het kanaal in het verleden na baggeren gedurende langere tijd open is gebleven.
- De extreme droogte in het groeiseizoen van 2018 heeft relatief weinig effect op de grondwaterstand. Ook bij relatief hoge weerstanden van de bodem en de damwand wordt het grondwater door het kanaal voldoende aangevuld om heel diep uit te zakken te voorkomen. In dergelijke droge zomers zakt de

grondwaterstand wel een paar decimeter verder uit dan in gemiddelde zomers, maar dat blijft door de aanvulling uit het kanaal beperkt tot hooguit een halve meter onder de grondwaterstand in het voorjaar.

- Het aanbrengen van een langere damwand heeft nagenoeg geen effect op de grondwaterstand. Alleen als daarbij een slecht doorlatende laag, die onder de gehele kanaalbodem over grotere lengte van het kanaal aanwezig is, wordt doorsneden, zal de grondwaterstand in de buurt van het kanaal een paar decimeter kunnen dalen. In dat geval zal het effect van baggeren van de kanaalbodem op de grondwaterstand echter een stuk kleiner zijn. De aanwezigheid van een dergelijke slecht doorlatende laag onder de gehele breedte van het kanaal is aannemelijk voor slechts één locatie in het gebied. Deze situatie komt dus waarschijnlijk niet of slechts zeer lokaal voor.
- Door de relatief hoge weerstanden van de kanaalbodem en de damwand, is het effect van kanaalpeilverlaging op de grondwaterstand klein tot verwaarloosbaar, zeker zolang de peilverlaging beperkt blijft tot 50 cm.
- Alleen als de bodemweerstand van het kanaal gedurende lange periode na het baggeren klein is, kan het effect van kanaalpeilverlaging (als mogelijke maatregel tegen piping) tijdelijk relevant zijn. Datzelfde geldt in veel minder mate op plekken waar de damwand over grotere lengte langs het kanaal lek is. Gezien de verwachte snelheid van het sedimentatieproces, is het minder waarschijnlijk dat de bodemweerstand gedurende lange periode laag blijft dan dat de damwand over grotere lengtes lek is.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl

Bijlage M: Samenvatting eerdere studies kwel en toetsing veiligheid

Deze bijlage geeft een samenvatting van eerdere studies naar kwel en de toetsing op veiligheid. Deze bijlagen dienden ter informatie voor het verdiepend schade-onderzoek. De inzichten en conclusies uit de eerdere analyses kunnen door voortschrijdend inzicht in dit onderzoek zijn achterhaald. Citaten uit de eerdere analyses zijn *cursief* weergegeven. De citaten zijn opgenomen ter informatie en vertegenwoordigen niet de mening van Deltares.

In deze bijlage zijn namen van betrokkenen, adressen van onderzochte panden en andere privacygevoelige informatie geanonimiseerd of verwijderd.

M.1 Verkennende onderzoeken naar kwel

In 2010 en 2011, zijn – mede naar aanleiding van de in 2008 uitgevoerde baggerwerkzaamheden en de voorgenomen baggerwerkzaamheden in 2012 (verbreden en verdiepen vaargeul t.b.v. 700 tons scheepvaart) - door RHDHV twee rapportages opgesteld met een verkennend onderzoek naar de invloed van de voorgenomen baggerwerkzaamheden op kwel vanuit het kanaal naar de omgeving:

- RHDHV, 2010, Verkennend kwelonderzoek kanaal Almelo – De Haandrik, upgraden kanaal Almelo - De Haandrik tot 700 tons schepen, referentie: 9W0044.B6/R001/902953/LM/Stee, d.d. 2 november 2010 (concept rapport).
- RHDHV, 2011, Aanvullend kwelonderzoek kanaal Almelo – De Haandrik en monitoringsplan, referentie: 9W0044.B6/R003/902953/LM/Stee, d.d. 9 maart 2011 (concept rapport).

Verkennend onderzoek RHDHV 2010

In het verkennende onderzoek is eerst een hydrologische systeemanalyse uitgevoerd op basis van literatuuronderzoek en gegevens van de Provincie Overijssel en betreffende waterschappen. Vervolgens is met behulp van een stationair grondwatermodel op basis van superpositie berekend welke mogelijke veranderingen als gevolg van het aanpassen van het kanaal kunnen ontstaan. Op basis van deze veranderingen is gekeken waar zich de grootste risico's kunnen voordoen waarbij een kwelverandering tot schade zou leiden. Vervolgens is onderzocht welke mogelijke mitigerende maatregelen genomen kunnen worden en op welke wijze monitoring van de effecten dient plaats te vinden. Op basis van de literatuur (Massop en Van der Gaast, 2006 en Massop en Joustra, 1996) is uitgegaan van intrede weerstanden die ook voor de Twenthekanaal zijn gehanteerd van 2 dagen (na baggeren) en 50 dagen (maximale weerstand). In Tabel 1 zijn de resultaten weergegeven.

Tabel 1: Effecten verlaging kanaalweerstand op de grondwaterstand.

Traject Almelo-Vroomshoop (0-11 km)		
Intreeweerstand	Verhoging grondwaterstand	Maximale reikwijdte effecten
2 t.o.v. 50 dagen	0-2 m	50 m
Traject Vroomshoop-de Haandrik (11-32 km)		
2 t.o.v. 50 dagen	0-2 m	150 m

In de rapportage van het verkennende onderzoek (RHDHV 2010) zijn de volgende conclusies getrokken:

Geconcludeerd kan worden dat effecten op de grondwaterstanden direct rondom het kanaal fors kunnen zijn (circa 1-2 m). De afstand tot waar deze effecten merkbaar zijn is echter gering (50-150 m).

2 jaar geleden is het kanaal uitgebaggerd. Er zijn toen geen problemen voor grondwaterafhankelijke belangen geconstateerd (mondelinge mededeling Provincie en waterschappen). Het profiel wordt nu verder verruimd. Op basis van de verkennende modelstudie zijn er in een directe zone van 50-150 meter grondwaterstandverhogingen en kweltoenames niet uit te sluiten.

Mogelijke grondwaterafhankelijke belangen die kunnen worden geschaad:

1. Stedelijk gebied: Natte kruipruimtes in woningen langs het kanaal in Bergentheim, Vroomshoop, Daarlerveen, Vriezenveen en Aadorp.
2. Landbouw: natschade landbouw, meer afvoer waterlopen, meer wegzijging waardoor meer aanvoer vanuit Twenthekanaal nodig is in droge tijden.
3. Drinkwater: meer kanaalwater in intrekgebieden Hammerflie en Hooge Hexel.
 - Direct rondom het kanaal kunnen lokaal als gevolg van verlaging van de intreeweerstand van het kanaal aanzienlijke verhogingen van de freatische grondwaterstanden ontstaan.
 - De reikwijdte van de effecten op de grondwaterstanden is beperkt (maximaal 150 m).

- *Ter plaatse van bewoning direct langs het kanaal zijn mogelijk negatieve effecten (o.a. water in de kruipruimtes) niet uit te sluiten.*
- *Natschade voor de landbouw kan voor verhoging van de opbrengstdepressies in de zone van 50-150 m direct langs het kanaal zorgen. Door aanpassen van het peilbeheer in de berm- en kwel sloten zijn de effecten mogelijk te mitigeren.*
- *Toename van kwel naar waterlopen in landbouwgebied kan in natte periodes mogelijk voor problemen zorgen. Door aanpassen van het peilbeheer in de berm- en kwel sloten zijn de effecten mogelijk te mitigeren.*
- *Overige effecten (op natuur, drinkwatervoorziening etc.) zijn zeer gering.*

De verwachte effecten hebben niet een zodanige omvang dat grootschalig nader onderzoek in het kader van een MER wordt aanbevolen.

Aanvullend onderzoek RHDHV 2011

Het aanvullende geohydrologische onderzoek is uitgevoerd om in een vroeg stadium inzicht te krijgen in de gebieden waar de toename van kwel kan leiden tot grondwateroverlast.

Op basis van gebiedskenmerken en overleggen met gemeenten en waterbeheerders zijn gevoelige gebieden en knelpunten geïnventariseerd. In de rapportage van het aanvullende kwelonderzoek (RHDHV 2011) is onder andere het volgende geconcludeerd:

Uit het onderzoek is gebleken dat er in de huidige situatie geen sprake van grondwateroverlast is. Aangegeven wordt dat de grondwaterstand in het najaar dicht onder het maaiveld staat, maar dit is niet structureel en wordt niet als overlast ervaren. Tijdens langdurige regenval in het najaar wordt er soms water/vocht in de kruipruimten/kelders geconstateerd. Door de heer X is aangegeven dat het kanaal circa drie jaar geleden ook is uitgebaggerd, na deze werkzaamheden heeft de grondwaterstand een stuk hoger gestaan. Dit wordt ook aangegeven door de heer Y, waar de grondwaterstand direct aan het maaiveld kwam op diverse percelen.

In de rapportage van het aanvullende kwelonderzoek (RHDHV 2011) zijn de volgende aandachtsgebieden, met betrekking tot kweltoename, benoemd:

Wanneer het omringende maaiveld lager is gelegen dan het peil van het kanaal (NAP + 9,10 m), infiltreert het kanaalwater en kwelt het op in sloten of aan het maaiveld in het omliggende gebied. Uit de analyse van het AHN volgt dat hoofdzakelijk het gebied van Vriezenveen tot aan Bergentheim lager is gelegen dan het kanaalpeil. Uit de gt-kaart blijkt dat het onderzoeksgebied overwegend een intermediair gebied is met grondwatertrap V en VI, waar het (grond)water via een dicht afwateringsstelsel versneld wordt afgevoerd. De aandachtsgebieden bevinden zich in de volgende gebieden:

- *De dalvormige laagte, ter hoogte van de Veeneleiding tussen Vriezenveen en Vroomshoop.*
- *Het gebied Hammerflie ten noorden van Vroomshoop.*
- *Het gebied tussen Vroomshoop en Bergentheim ten oosten van het kanaal.*

Uit de inventarisatie bij de gemeenten is door gemeente Twenterand aangegeven dat Vroomshoop en Vriezenveen kernen zijn met hoge grondwaterstanden. In het verleden zijn er grondwaterproblemen geweest. Door de gemeente Hardenberg is aangegeven dat in Bergentheim klachten over grondwateroverlast bekend zijn. Tevens wordt een gebied in Hardenberg (wijk Baalderveld) en een gebied in Gramsbergen (Garstlanden) als aandachtsgebied aangegeven. Tijdens bewonersavonden hebben een negental bewoners hun bezorgdheid uitgesproken over de gevolgen van de werkzaamheden op de grondwaterstand. Deze locaties zijn allemaal gekenmerkt als aandachtsgebied. Uit het informatieve overleg met de waterbeheerders is het stedelijke gebied in Vroomshoop en het gebied ten zuiden van Hardenberg aangegeven als aandachtsgebied.

Tenslotte is in de rapportage een monitoringsplan t.b.v. grondwaterstanden opgesteld, met name ter plaatse van de aandachtsgebieden. Als mitigerende maatregel is aangegeven: het aanbrengen van een kleiafdichting zoals, ten tijde van de rapportage, ook uitgevoerd is bij de baggerwerkzaamheden in het Twenthekanaal.

Baggerwerkzaamheden

Naast de baggerwerkzaamheden in 2008, zijn na 2010 (analyse kwelonderzoek), in 2012 en eind 2015/begin 2016, diverse baggerwerkzaamheden uitgevoerd, zoals aangegeven in de rapportage van Deltares uit maart 2020 (11203512-005-GEO-0015 v1.0). RHDHV heeft in maart 2013 gepubliceerd over klachten in het rapport: "Analyse meldingen wateroverlast kanaal Almelo - de Haandrik, Locatie Geerdijk" (RHDHV 2013b). Daarna is er een brief van de Provincie van 17 mei 2013 (kenmerk: 2013/0159398) beschikbaar gekomen waar sprake is van een door RHDHV uitgevoerd onderzoek, waarin geconcludeerd wordt:

Uit dit onderzoek is gebleken, dat niet kan worden uitgesloten dat de uitgevoerde baggerwerkzaamheden hebben bijgedragen aan de grondwaterstand rondom uw woning en de daarmee door u ervaren overlast.

Het is ons niet bekend of dit vermelde onderzoek hetzelfde is als de hiervoor genoemde publicatie over de gemelde klachten van RHDHV (maart 2013). Op 9 oktober 2018 heeft de Provincie een brief aan de bewoners gestuurd vanwege schade door de werkzaamheden aan het kanaal op dat moment waren er 45 schademeldingen bij de Provincie binnen gekomen. Inmiddels gaat het om circa 370 meldingen.

Welke werkzaamheden tot die tijd zijn uitgevoerd, is weergegeven in Figuur 3 5 en Tabel 3 2. Tussen 2013 en 2018 zijn slechts laat in 2014 baggerwerken uitgevoerd in Daarlerveen, beveiligd lokaal baggeren vanwege NGE bij bruggen en in 2017 bij de verlegging van de N750 nabij Daarlerveen. Pas na 2018 is het aantal schademeldingen substantieel toegenomen.

Mogelijk zou er op veel plaatsen bentoniet zijn gebruikt om de, door het baggeren lek geraakte kanaalbodem, af te dichten. Volgens mededeling van de Provincie heeft het afdichten van de kanaalbodem met een zandbentonietmengsel slechts op één locatie plaatsgevonden (namelijk te Daarlerveen, zie onderstaand). Volgens de Provincie zouden de baggerwerkzaamheden in het schadegebied al opgeleverd zijn vóór 2013. Zoals hiervoor reeds vermeld is slechts een stuk van circa 200 m in Daarlerveen bekend, waar in 2013 problemen ontstonden, en kwamen de overige meldingen van problemen met wateroverlast pas in het najaar van 2018 (mondelinge informatie van Provincie).

Mogelijk zou in 2015 en 2016, in verband met aanwezige metaalobjecten en munitie (WOII) dieper gebaggerd zijn dan het benodigde kanaalbodem profiel, waarbij tevens afsluitende leemlagen verwijderd zijn. Uit navraag bij de Provincie blijkt het volgende:

Er is tijdens het baggeren in 2015 / 2016 niet dieper gebaggerd. Tijdens die baggeronde is er met een speciale bak gegraven die de explosieve kracht van kleinere CE (20 mm geschut, granaten) aankon. Het verwijderen van de verdachte objecten vond al eerder plaats. Het is ook niet zo dat ze daarbij hebben gegraven. De objecten zijn door duikers handmatig (met een soort stofzuiger) benaderd en daarna verwijderd.

Daarbij wordt gesproken van 220 bodemmonsters, die door Arcadis in januari 2014 zijn gestoken, verspreid over het hele kanaal. Hieruit zou blijken hoe weinig slib er nog op de bodem van het kanaal aanwezig zou zijn. De aanwezigheid van de sliblaag en andere afsluitende lagen komt verder aan de orde in paragraaf 3.4 van ons rapport.

M.2 Toetsingen en toetsrapportages veiligheid waterkeringen

In 2003 heeft Provinciale Staten (PS) vastgesteld welke waterkeringen dienen te worden beschouwd als regionale kering en derhalve getoetst dienen te worden op waterveiligheid en de bijbehorende normen (hoogwaterstanden), die in 2006 door Gedeputeerde Staten(GS) zijn vastgesteld; toetsing op

veiligheid tegen overstroming. Het kanaal Almelo – De Haandrik is eigendom van de Provincie Overijssel en heeft regionale waterkeringen aan weerszijden van het kanaal. Bekend is dat vanaf 2006, de volgende toetsingen van de betreffende waterkeringen zijn uitgevoerd:

- 2008; RHDHV: “Regionale Keringen Kanaal Almelo-De Haandrik, Toetsing op Veiligheid op overstroming”, Definitief rapport, 9T0411 .AO/L0003/MBO/MJANS/Nijm, d.d. 27 maart 2008.
- 2013; RHDHV: “Regionale keringen Kanaal Almelo – De Haandrik, Toetsing op veiligheid (2^e ronde) Rapport BC3768/R0001/414320/VVDM/Nijm, d.d. 11-06-2013.
- 2015; RHDHV: “Regionale keringen Kanaal Almelo - De Haandrik, Toetsing op veiligheid naar aanleiding van verdieping van de vaarweg”, Definitief rapport, BD4245-103-100/R001-D2/414320/NVW/Gron, d.d. 28 januari 2015.

Naast deze toetsingen hebben de in paragraaf 3.2.2 vermelde inventarisaties van de oeverconstructies (boordvoorzieningen) plaatsgevonden. In de toetsrapportage (RHDHV 2008) is in bijlage 9 reeds een overzicht opgenomen van de geplaatste damwandconstructies met bijbehorende specificaties zoals: jaartal van plaatsing, bestek, type wand, lengte, locatie en wel of geen verankering. Deze inventarisatie is met name ook van belang in verband met de sterkte van de constructies en de buitenwaartse stabiliteit. Het buitentalud van de kades wordt immers gesteund door de damwandconstructies die langs het overgrote deel van het kanaal de begrenzing de waterkering (buitendijkse zijde) en het kanaal vormen.

De toetsingen zijn uitgevoerd conform de “Leidraad toetsen op veiligheid regionale keringen” (STOWA 2007). De veiligheid van de regionale waterkeringen langs het kanaal zijn daarbij getoetst op de volgende toetssporen: hoogte, piping, macrostabiliteit binnen- en buitenwaarts, microstabiliteit en bekledingen. Navolgend zijn de belangrijkste resultaten uit de 1^e toetsing (2008) weergegeven.

M2.1 1^e Toetsing 2008

De in 2008 uitgevoerde toetsing is in principe een eenvoudige toets geweest.

In de bijlagen van de betreffende rapportage zijn middels overzichtskaarten de toetsresultaten van de verschillende toetssporen opgenomen. Daarnaast is in de bijlagen van betreffende toetsrapportage (bijlage 9) ook een overzicht gegeven van de aanwezige oeverconstructies en specificaties van de damwanden. Het totaal oordeel van de toetsing is weergegeven in onderstaande tabel. Het oordeel gaat uit van de slechtste score van de toetsing op hoogte, piping, macrostabiliteit (binnen- en buitenwaarts) en microstabiliteit.

Tabel 2: Overzicht overall-toetsresultaten waterkeringen kanaal Almelo - De Haandrik 2008 (RHDHV 2008).

	Lengte (km)	Voldoet aan de norm	Voldoet niet aan de norm	Geen oordeel
		Goed / voldoende	Onvoldoende	
Westoever	23,2	16,3	0,0	6,9
Oostoever	25,8	22,9	0,0	2,9
Totaal	49,0	39,2	0,0	9,8

Het toetsresultaat “geen oordeel” volgt uit onvoldoende gegevens om tot een toetsoordeel te komen, waarbij ook het beheerdersoordeel ontoereikend is. Geconcludeerd is, dat circa 80% van de keringen voldoet aan de norm. Alle keringen voldoen aan de norm voor de toetssporen hoogte, macrostabiliteit buitenwaarts, microstabiliteit en bekledingen.

Voor circa 20 % is het niet mogelijk gebleken een oordeel te geven voor de toetssporen piping en macrostabiliteit binnenwaarts. De reden hiervoor is dat er met name gegevens ontbreken van de binnendijkse geometrie (10 à 15 %) en voor een deel (5 à 10 %) wordt niet voldaan aan de eenvoudige toetsregels.

Niet waterkerende objecten (NWO's) zijn niet beschouwd. Ten aanzien van de Waterkerende kunstwerken, is op basis van navraag bij Provincie en betrokken waterschappen geconcludeerd dat de waterkerende kunstwerken waarschijnlijk voor hun primaire functie in goede staat zijn. Er is verder geen toetsing of nadere inspectie uitgevoerd.

Op een aantal te toetsen strekkingen zijn natuurvriendelijke oevers aanwezig. Het gaat om de volgende strekkingen:

- Westzijde: km 0,7 - 0,9 en km 2,3 - 2,8.
- Oostzijde: km 6,71 - 7,03.

Navolgend zijn de belangrijkste resultaten uit de toetsing ten aanzien van piping en macrostabiliteit binnen- en buitenwaarts weergegeven (betreft een uitsnede uit de betreffende toetsrapportage (RHDHV 2008).

Piping (STPH)

De toets op piping is uitgevoerd met de formule van Bligh:

$$(\Delta H - 0,3d) \leq \Delta H_c = L/C_{creep}$$

Waarin:

ΔH = het aanwezige verval (verschil tussen maatgevende waterstand en het waterpeil bij het uittredepunt)

d = verticale afstand tussen bovenkant zandlaag en het maaiveld of de slootbodem

ΔH_c = het kritieke verval

L = de aanwezige kwelweglengte

C_{creep} = ceepfactor, conform Bligh, afhankelijk van de gradering van het zand, hier $C=15$.

Voorwaarde voor het kunnen ontstaan van piping zijn:

- Er moet sprake zijn van een afdeklaag op een watervoerende zandondergrond, waardoor er zich juist op de grens tussen de 2 lagen een pipe kan ontwikkelen door het uitspoelen van zand.
- Het buitenwater staat in contact met de watervoerende zandlaag (intredepunt).
- Binnendijs kan het zand ter plaatse van het uittredepunt uitspoelen. Dit is meestal ter plaatse van een sloot of een laag maaiveldpunt, waar opbarsten kan optreden.

Indien het profiel met de formule van Bligh niet blijkt te voldoen is de methode Lane toegepast, waarbij tevens de invloed van de damwand wordt meegenomen. De damwand verlengt namelijk de kwelweg en zorgt voor een ander grondwaterstromingspatroon:

$$\left(\frac{1}{3}L_{hor} + L_{vert}\right) / C_l \geq \Delta H$$

Waarin:

L_{hor} = de aanwezige horizontale kwelweglengte

L_{vert} = de aanwezige verticale kwelweglengte

C_i = creepfactor, conform Lane, hier $C=7$

ΔH = het aanwezige verval.

Voor de gedeelten die bij toetsing volgens bovenstaande methoden niet voldoen is gekeken of het principe van bewezen sterkte opgaat. Dit lijkt voor de hand te liggen omdat de waterkering niet heeft gefaald ten tijde van het hoogwater van 1998 waarbij het toetspeil NAP +9,41 m is bereikt. Om het principe van bewezen sterkte te kunnen toepassen moet de sterkte van de waterkering niet zijn achteruitgegaan ten opzichte van de sterkte die de waterkering had ten tijde van het hoogwater in 1998. Voor relevante strekkingen is nagegaan of de sterkte niet is achteruitgegaan, waarbij de volgende, sterkte bepalende zaken, zijn gecontroleerd:

- Is de damwandlengte sinds 1998 minstens gelijk gebleven?
- Zijn er weerstandbiedende klei-, veen- of leemlagen in het onderwaterprofiel aanwezig?

Uit de toets op het faalmechanisme piping zijn de volgende resultaten verkregen, zie tabel 3.

Tabel 3: Overzicht toetsresultaten piping, kanaal Almelo - De Haandrik 2008 (RHDHV 2008).

	Lengte (km)	Voldoet aan de norm		Voldoet niet aan de norm	Geen oordeel
		Goed (o.b.v. rekenregel)	Voldoende (o.b.v. bewezen sterkte)	onvoldoende	(gedetailleerd toetsen)
Westoever	23.2	16.9	2.1	0.0	4.2
Oostoever	25.8	22.3	0.6	0.0	2.9
Totaal	49.0	39.2	2.7	0.0	7.1

Voor de profielen km 13,7; km 21,1-22,2 en km 30,8-30,9 aan de oostzijde van het kanaal is, met toepassing van de methode Lane, een score 'goed' verkregen. Circa 85% van de keringen voldoet aan de norm. Voor 2,7 km is het mogelijk gebleken een oordeel te geven op basis van bewezen sterkte. Voor 7,1 km (15%) is nog geen oordeel te geven. Hiervoor geldt dat het profiel niet voldoet niet op basis van de rekenregel en tevens bewezen sterkte niet toepasbaar is (omdat niet kan worden uitgesloten dat na het hoogwater van 1998 weerstand biedende lagen zijn weggebaggerd). Aan de westzijde van het kanaal krijgt 4,2 km geen oordeel omdat binnenwaarts onvoldoende gegevens bekend zijn van de geometrie van de kering, waardoor niet kan worden bepaald of aan de rekenregel wordt voldaan. Hiervan betreft 0,3 km natuurvriendelijke oevers. Aan de oostzijde geldt deze oorzaak voor 2,9 km en 0,4 km aan natuurvriendelijke oevers.

Van de profielen, die niet voldoen op basis van rekenregels of bewezen sterkte, is profiel km 14,0 (oost) gedetailleerder getoetst / nader beschouwd. Gezien de grondopbouw, aanwezige afsluitende lagen en damwand tot NAP +5,6m, is piping hier uitgesloten. De resultaten van de toets op piping zijn op een kaart weergegeven in bijlage 6 van de toetsrapportage (RHDHV, 2008)

Macrostabieliteit binnenwaarts (STBI)

De toets op binnenwaartse macrostabieliteit is uitgevoerd op basis van geometrische kenmerken conform de eenvoudige toetsing in het VTV (Voorschriften toetsen op veiligheid).

Voor de gedeelten die bij toetsing volgens bovenstaande methode niet voldoen is, evenals bij piping, nagegaan of met het principe van bewezen sterkte wel tot een voldoende oordeel kan worden gekomen. Dit blijkt, als gevolg van waterspanningen en verkeersbelasting, niet het geval te zijn.

Op locaties waar substantieel veen in de waterkering of de ondergrond aanwezig is, moet in principe ook rekening worden gehouden met een extreem droge situatie waarin het veen, als gevolg van gewichtsafname, sterkte verliest. Een verkennende berekening met het computerprogramma MStab geeft aan dat deze situatie niet maatgevend is.

Uit de toets op het faalmechanisme piping zijn de volgende resultaten verkregen, zie Tabel 4.

Tabel 4: Overzicht toetsresultaten STBI, kanaal Almelo - De Haandrik 2008 (RHDHV 2008).

	Lengte (km)	Voldoet aan de norm		Voldoet niet aan de norm	Geen oordeel
		goed	voldoende	onvoldoende	(gedetailleerd toetsen)
Westoever	23.2	0.0	16.4	0.0	6.8
Oostoever	25.8	0.0	25.2	0.0	0.6
Totaal	49.0	0.0	41.6	0.0	7.4

Circa 85% van de keringen voldoet aan de norm. Voor 15 % kan geen oordeel gegeven worden. Het principe van bewezen sterkte is niet toepasbaar. Evenals bij piping geldt hier dat aan de westzijde van het kanaal op een aantal locaties geen oordeel kan worden gegeven omdat binnenwaarts de geometrie onvoldoende bekend is. Het gaat hierbij om 6,3 km (waarvan 0,2 km natuurvriendelijke oever) van de 6,8 km. Voor de overige 0,5 km is een analyse gedaan op basis van een gedetailleerde toetsing. Op de oostoever krijgt 0,6 km de score 'geen oordeel'. Hiervan is 0,4 km natuurvriendelijke oever, waarvan de geometrie onvoldoende bekend is. Voor de overige 0,2 km een analyse gedaan op basis van een gedetailleerde toetsing.

Op basis van berekeningen met het computerprogramma MStab is een gedetailleerde toetsing uitgevoerd voor de profielen km 28,5 (west) en km 14,0 (oost). Daarbij zijn de conservatieve waarden voor grondeigenschappen (verwachtingswaarden) uit tabel 4.5 van het Katern Boezemkaden aangehouden. Daarbij dient getoetst te worden aan een overall-veiligheidsfactor van 1,3 (zoals voorgeschreven in Katern Boezemkaden). Indien rekening gehouden wordt met een restprofiel en/of een 0,5 m hoger slootpeil in de maatgevende situatie, blijkt het berekende profiel km 28,5 te voldoen. Het profiel km 14,0 blijkt niet te voldoen. Hiervoor wordt nader onderzoek aanbevolen.

Macrostabieliteit buitenwaarts (STBU)

Ten aanzien van de buitenwaartse stabiliteit zijn in de toetsrapportage (RHDHV 2008) de volgende conclusies opgenomen:

Ten aanzien van de toetsing op macrostabieliteit buitenwaarts wordt op basis van de beschikbare informatie reeds geconcludeerd dat de keringen aan de norm voldoen. Alle keringen zijn recent voorzien van nieuwe of aangepaste damwandconstructies, die op een aantal strekkingen zijn verankerd. Alle damwandconstructies zijn ontworpen conform de CUR 166 (richtlijn voor ontwerp van damwanden). De damwandberekeningen zijn uitgevoerd voor veiligheidsklasse II. Dit gegeven betekent dat de damwanden voldoen aan de norm. De damwanden zijn namelijk ontworpen conform de richtlijnen en de aangehouden veiligheidsklasse is ruimschoots voldoende voor de hier aan te houden norm van 1/100 per jaar.

Bijlage 9 geeft een overzicht van alle damwandconstructies. Hierbij zijn de volgende opmerkingen van belang:

- *als in het overzicht is vermeld dat damwanden verankerd zijn, dan geldt:*
 - *damwanden uit 1995/1996 zijn verankerd met schroefankers;*
 - *oudere damwanden zijn verankerd met horizontale ankers aan een ankerwand tenzij anders aangegeven;*
- *als in het overzicht niet is vermeld of de damwanden verankerd zijn, dan geldt dat er geen verankering aanwezig is;*
- *alle damwanden (staal/beton) voldoen aan de eisen. De betonnen damwanden zijn hergebruikt en daarvoor getest (kwaliteit beton met boorkernen onderzocht).*

Voor de natuurvriendelijke oevers is geconcludeerd dat macrostabieliteit buitenwaarts voldoet vanwege een voldoende flauwe taludhelling van 1:3 à 1:4.

De toetsresultaten voor de buitenwaartse macrostabiliteit zijn in Tabel 5 weergegeven.

Tabel 5: Overzicht toetsresultaten STBU, kanaal Almelo - De Haandrik 2008 (RHDHV 2008).

	Lengte (km)	Voldoet aan de norm		Voldoet niet aan de norm	Geen oordeel (gedetailleerd toetsen)
		Goed	Voldoende		
Westoever	23.2	22.3	0.9	0.0	0.0
Oostoever	25.8	25.4	0.4	0.0	0.0
Totaal	49.0	47.7	1.3	0.0	0.0

De trajecten met een oeverconstructie (damwand) krijgen in de toetsrapportage allemaal het toetsoordeel “goed”. Totaal betreft dit 22,3 km langs de westoever en 25,4 km langs de oostoever. De trajecten met een natuurlijke oever krijgen het toetsoordeel “voldoende”. Dit betreft 0,9 km langs de westoever en 0,4 km langs de oostoever.

M.2.2 2^e Toetsing 2013

In de 2^e toetsing (toetsronde) is voor een aanzienlijk deel voortgeborduurd op de resultaten uit de eerste toetsing. Voor de toetsing is de Leidraad toetsen op veiligheid regionale keringen [STOWA, 2007] gevolgd. De norm voor de regionale keringen langs kanaal Almelo - De Haandrik is vastgesteld door de Provincie Overijssel op 1/100 per jaar. Het bijbehorende toetspeil, de maatgevende waterstand (MHW), bedraagt NAP +9,41 m. In principe is uitgegaan van de “eenvoudige methode” die de Leidraad voorschrijft. Voor de onderdelen waarop deze methode tot de score ‘geen oordeel’ leidt, is getracht met behulp van bewezen sterkte een nader oordeel te kunnen geven. In het geval tevens het principe van bewezen sterkte niet kan worden toegepast, dan wordt een doorkijk gegeven naar het oordeel dat bij een *gedetailleerde* en/of geavanceerde toetsing zou worden gevonden. Er is daartoe een “semi-gedetailleerde toetsing” uitgevoerd op basis van aannamen die nog geverifieerd moeten worden door nader (grond)onderzoek. Het eerder gegeven oordeel verandert door de semi-gedetailleerde toetsing niet.

In de rapportage is verder een specifieke beschrijving en overzicht opgenomen van de waterkeringen inclusief de waterkerende kunstwerken. Ook is aandacht besteed aan niet waterkerende objecten (NWO's), zijnde bebouwing, begroeiing en kabels en leidingen.

Omdat op het moment van de toetsing gewerkt werd aan een opwaardering van het kanaal, met name het aanpassen van bruggen, ligplaatsen en verdieping/verbreding van de vaargeul geldt als uitgangspunt voor deze 2^e toetsing de situatie op 1 juli 2011.

Navolgend zijn de belangrijkste resultaten uit de toetsing ten aanzien van piping (STPH), macrostabiliteit binnenwaarts (STBI) en de NWO's—bebouwing weergegeven.

Er is geen nadere toetsing van de buitenwaartse stabiliteit (STBU) uitgevoerd. Het betreft een uitsnede uit de betreffende rapportage.

Piping (STPH)

Op basis van de in 2008 uitgevoerde toetsing dient ca. 7 km extra te worden getoetst. De resultaten hiervan (eenvoudige toets) staan in Tabel 6.

Tabel 6: Overzicht resultaten aanvullende eenvoudige toets op piping.

№	Lengte-(km)■	Voldoet-aan-de-norm■		Voldoet-niet-aan-de-norm■	Geen-oordeel■
		goed■	voldoende■		(gedetailleerd-toetsen)■
Westoever■	4.1■	0.0■	2.2■	1.7■	0.2■
Oostoever■	2.9■	0.0■	0.4■	2.5■	0.0■
Totaal■	7.0■	0.0■	2.6■	4.2■	0.2■

Uit de toetsing blijkt dat een groot deel van de trajecten niet voldoet volgens de toetsingscriteria voor de eenvoudige toetsing. Hierbij is vooral de kwallengte van belang die vaak meer dan 3x de minimale lengte tekort komt. In de toetsingsrapportage (bijlage 4) is een toelichting opgenomen op het tekort aan kwelweglengte.

In principe is vervolgd is met een gedetailleerde toetsing, maar omdat hiervoor aanvullende (grond)gegevens nodig waren, en verwacht werd, dat met de aanvullende gegevens de gedetailleerde toetsing niet tot een betere resultaten zou leiden, is vervolgd met het uitvoeren van een geavanceerde toetsing waarbij het criterium voor piping nader is onderzocht met behulp van een geohydrologische gevoeligheidsanalyse.

Uit de gevoeligheidsberekeningen is het volgende gebleken:

- *Het blijkt dat bij alle berekeningen grondwater uittreedt ter plaatse van de teensloot. Het water dat uit het kanaal weglekt kan niet volledig freatisch worden geborgen. Om ervoor te zorgen dat er geen zand meegevoerd kan worden en piping te voorkomen, dient het uittredend verhang voldoende klein te zijn.*
- *Berekening 1 is bedoeld als worst-case en dient als referentieberekening. In berekening 2, 3 en 4 is steeds één variabele aangepast om de invloed ervan te onderzoeken.*
- *In berekening 1 is de kanaalbodem als relatief doorlatend beschouwd en is de weerstand van de damwand verwaarloosd. Dit zorgt voor een te groot uittredend verhang waarmee zand meegevoerd zou kunnen worden (ca. 1V:11H).*
- *Berekeningen 2 en 3 hebben een dusdanig klein verhang nabij de sloot (ca. 1V:40H) dat daarmee geen zand meegevoerd kan worden.*
- *In berekening 4 is de weerstand van SDL2 verlaagd. Er kan daardoor meer water wegziigen naar dieper gelegen watervoerende lagen waardoor de stroming niet geconcentreerd wordt in de richting van de sloot Dit heeft een gunstig effect op het verhang, maar deze is nog groot genoeg om zand mee te kunnen voeren (ca. 1V:16H).*

Samenvatting conclusies piping:

- *Er is geen risico op piping indien uitgesloten kan worden dat hydraulische kortsluiting kan ontstaan als gevolg van het, over een aanzienlijk lengte, wegbaggeren van de kanaalbodem.*
- *Er is geen risico op piping indien de damwanden voldoende weerstand bieden (minimaal 0,1 m/dag) ondanks het bestaan van het risico van hydraulische kortsluiting door baggerwerkzaamheden. Voorwaarde hiervoor is wel dat de staat van de damwanden bekend is en het zeker is dat de stalen damwanden niet uit het slot zijn gelopen.*
- *Indien hydraulische kortsluiting niet kan worden uitgesloten en de staat van de damwand onvoldoende bekend is, dan bestaat er een risico op het ontstaan van piping. Dat wil niet zeggen dat het ook daadwerkelijk op zal treden. Het feit dat het kanaalpeil permanent boven het achterland staat, het kanaal reeds meerdere malen is uitgebaggerd en piping nog niet is opgetreden is zeker een aanwijzing dat piping niet overal kritisch is.*

Eindconclusie:

1. Goed, indien de staat van de damwanden bekend is of hydraulische kortsluiting door het nemen van beheersmaatregelen kan worden uitgesloten.
2. Onvoldoende, indien zowel de staat van de damwanden slecht of onbekend is en hydraulische kortsluiting niet kan worden uitgesloten.

Tabel 1: Overzicht resultaten geavanceerde toets op piping op basis van conclusie 2 (zie boven).

№	Lengte (km)	Voldoet-aan-de-norm		Goed/Onvoldoende
		goed	voldoende	
Westoever	4.1	0.0	2.2	1.9
Oostoever	2.9	0.0	0.4	2.5
Totaal	7.0	0.0	2.6	4.4

Macrostabieliteit binnenwaarts

De beoordeling van binnenwaartse macrostabieliteit is uitgevoerd conform de eenvoudige toetsregels uit de VTV2006. Daarbij zijn de volgende uitgangspunten aangenomen:

Voor deze toetsing is verder aangenomen dat:

- Opdrijven of opbarsten kan niet optreden. Hieronder wordt verstaan dat de eventueel aanwezige deklagen een dermate geringe dikte hebben dat stabiliteitsverlies door opdrijven niet kan optreden en dat een significante afname van de sterkte van de deklaag geen rol speelt bij de stabiliteit analyse. De eenvoudige toetsing mag derhalve worden uitgevoerd.
- Er nergens een berm aanwezig is in het dwarsprofiel.
- Het niveau van een hoog gelegen tuin achter de waterkering is opgenomen als het niveau van het achterland.
- De afstand tussen de binnenteen en de greppel is dermate klein, dat er geen sprake is van een horizontaal maaiveld tussen binnenteen en de greppel (A). Bij aanwezigheid van een greppel is getoetst aan de hand van een fictief maaiveld op het niveau van de slootbodem.

In totaal heeft de waterkering een lengte van ca. 50 km waarvan ten opzichte van de vorige toetsing in 2008 7,5 km aanvullend is getoetst. De resultaten van de aanvullende (eenvoudige) toetsing zijn weergegeven in Tabel 7.

Tabel 7: Overzicht resultaten aanvullende eenvoudige toets STBI.

№	Lengte (km)	Voldoet-aan-de-norm		Voldoet-niet-aan-de-norm	Geen-oordeel
		goed	voldoende		
Westoever	6.7	0.0	6.5	0.0	0.2
Oostoever	0.8	0.0	0.8	0.0	0.0
Totaal	7.5	0.0	7.3	0.0	0.2

Met uitzondering van de genoemde trajecten is het eindoordeel overal “voldoende”.

Circa 200 m (km 2,7 – 2,8 west) kan niet worden beoordeeld doordat er onvoldoende informatie aanwezig is van het dwarsprofiel. De volgende trajecten hebben de score ‘Onvoldoende’ volgens eenvoudige toetsing:

- 13,9 - 14,0 oostzijde (200 m). Dit traject is nader gedetailleerd getoetst.

Voor het traject km 13,9 - 14,0 (oost) is een gedetailleerde toetsing uitgevoerd met behulp van het programma Mstab, versie 9.10.8.6 van Delft Geosystems. Uit de berekening blijkt, dat op basis van de gehanteerde uitgangspunten, waaronder verwachtingswaarden voor de grondsterkte, berekende dwarsprofiel (km 13,9, oost) voldoet aan de gestelde veiligheidseisen. Derhalve heeft dit traject de score "goed" gekregen.

Niet Waterkerende objecten (NWO's) bebouwing

In de toetsrapportage staat het volgende vermeld:

De bebouwing langs het kanaal Almelo - De Haandrik staat aan de landzijde van de kering. Bebouwing op of achter de kering kan van invloed zijn op de macrostabiliteit binnenwaarts en op piping.

De bebouwing dateert merendeels van voor het hoogwater van 1998 en kan daarom op basis van bewezen sterkte goedgekeurd worden aangezien er van dit hoogwater geen ongunstige waarnemingen bekend zijn. Bebouwing die na het hoogwater van 1998 gerealiseerd is, dient zeker met vergunning gebouwd te zijn en wordt op basis daarvan goedgekeurd.

Indien een strekking is afgekeurd op andere sporen, kan de bebouwing dit verder nadelig beïnvloeden en is deze NWO formeel afgekeurd. De oorzaak (en de oplossing) liggen echter bij het mechanisme waarop afgekeurd is.

De score voor alle bebouwing is: 'Voldoet'.

M.2.3 3^e Toetsing 2015

Tussen globaal 2010 en 2016 is het kanaal opgewaardeerd en geschikt gemaakt voor 700 tons scheepvaart. Dit houdt in dat bruggen en ligplaatsen zijn aangepast en de vaargeul verbreed en verdiept is. De bestaande kanaalbodem is daarbij van NAP +6,50 m naar NAP +5,60 m gebracht. Het gehele kanaal is daarbij geschikt gemaakt voor tweestrooks scheepvaart, met uitzondering van de trajecten:

- km 3,0 – 7,0.
- km 8,6 – 16,2.
- km 21,8 – 32,6.

Op basis van de verdieping is een aanvullende analyse, c.q. toetsing uitgevoerd om de waterstaatkundige staat van de waterkering op 1 januari 2015 weer te geven en om eerdere open einden in te vullen. De open einden betroffen:

- Score 'geen oordeel' voor 4,4 km op piping.
- Score 'geen oordeel' voor 200 m op macrostabiliteit binnentalud en
- Open eind ten aanzien NWO's: begroeiing. Daar werd opgemerkt dat een analyse nodig was van de gevolgen van een eventuele ontgrondingskuil.

In de betreffende rapportage zijn veel gegevens overgenomen uit voorgaande toetsrapportage (RHDHV 2013). Het faalmechanisme macrostabiliteit buitenwaarts (STBU) is verder niet getoetst. Ten aanzien van de belangrijkste faalmechanismen piping (STPH) en macrostabiliteit binnenwaarts (STBI) zijn, op basis van de uitgevoerde toetsing, de volgende conclusies getrokken. Dit betreft een uitsnede uit de toetsrapportage.

Piping (STPH)

In het toetsrapport (RHDHV 2015) is ten aanzien van piping de volgende conclusie opgenomen:

In 2014 is naar aanleiding van de studie boordvoorzieningen een aanvullende analyse uitgevoerd. Daarbij is de verdieping van de vaarweg van NAP +6,50 m naar NAP +5,60 m meegenomen in de analyse en uitgegaan van de verbeterde situatie.

In het kader van het project boordvoorzieningen zijn de damwanden geïnspecteerd, nagerekend en worden vervangen waar nodig. De aanwezigheid van een niet-doorlatende damwand is daarmee uitgangspunt voor de toetsing.

Berekend is of het verticale verhang bij het uittrede punt onder het kritische verhang blijft na de verdieping van NAP +6,50 m naar NAP +5,60 m. Bijlage 7 en bijlage 8 bevatten de beschrijving en de resultaten van de berekeningen. Uit deze berekeningen blijkt dat het baggeren van het kanaal niet leidt tot optreden van een kritisch uittredeverhang. De score voor piping en heave is 'voldoende'. In bijlage 8 is nagegaan wat in de huidige situatie (korte damwanden van 3 m lengte) het risico is op piping. Geconcludeerd wordt dat het uittredeverhang nauwelijks groter is in de situatie met 3 m lange damwanden dan met 4 m lange damwanden.

Geconcludeerd wordt dat het uittredeverhang voldoende klein is in beide situaties.

De mogelijk verhoogde doorlatendheid van de huidige damwanden wordt ten aanzien van piping en heave niet als een risico ingeschat. Bij aanwezigheid van veen achter de damwand is sprake van een kleinere doorlatendheid waardoor er weinig stroming in het veen zal zijn. Verticale stroming langs de damwand is niet waarschijnlijk aangezien het veen een grotere horizontale dan verticale doorlatendheid heeft.

De score is 'voldoende' op piping en heave. Het gehele traject van Kanaal Almelo – De Haandrik voldoet op piping en heave.

Macrostabiliteit binnenwaarts

In vergelijking met de uitgevoerde toetsing uit 2013 is alleen een nieuwe beschouwing uitgevoerd van het traject km 2,7 – 2,8 west (circa 200 m) welke niet beoordeeld kon worden doordat er onvoldoende informatie aanwezig was van het dwarsprofiel.

In de toetsrapportage (RHDHV 2015) is aangegeven:

In de eerdere studie (2012) is km 2,7 - 2,8 westzijde (200 m) aangemerkt met de score 'geen oordeel'. Bij dit traject was geen dwarsprofiel bekend. Nader archiefonderzoek heeft ertoe geleid dat op basis van stap 1, eenvoudige beoordeling, de score 'voldoende' gegeven wordt.

Inclusief de resultaten van de voor traject km 13,9 - 14,0 (oostzijde) uitgevoerde gedetailleerde toetsing (uitgevoerd met behulp van het programma Mstab), kan geconcludeerd worden dat langs het gehele kanaal voldaan wordt aan de gestelde eisen voor macrostabiliteit binnenwaarts (STBI). De toetsresultaten zijn in de bijlagen van de betreffende rapportage (RHDHV 2015), zowel in tabelvorm opgenomen als overzichtelijk op kaarten weergegeven.