

Optimalisatie piping fase 1 en 2

STERKE LEKDIJK

Wijk bij Duurstede - Amerongen



HOOGHEEMRAADSCHAP
DE STICHTSE
RIJNLANDEN

Rapport

Projectnummer: 360562

Referentienummer: SWNL0255916

Datum: 13-03-2020

Dijkversterking Sterke Lekdijk Wijk bij Duurstede - Amerongen



Versie D3.0

Opdrachtgever:
Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden
Poldermolen 2
3994 DA HOUTEN

Revisiebeheer

Revisie	Datum	Status	Belangrijkste wijzigingen
C1.0	7-10-2019	Concept	Eerste bevindingen
C1.1	29-10-2019	Eindconcept1	Aanvulling herziene peilbuis-analyse
C2.0	06-11-2019	Eindconcept2	Inclusief interne review
C2.1	13-02-2020	Eindconcept3	Inclusief aanvullende onderzoeken fase 2
D3.0	13-3-2020	Definitief	Verwerkt review van de onderzoeken fase 2

Verantwoording

Titel	Dijkversterking Sterke Lekdijk Wijk bij Duurstede - Amerongen
Subtitel	Heave (STPH), fase 1 en 2
Projectnummer	360562
Referentienummer	SWNL0255916
Revisie	D3.0
Datum	13-03-2020
Auteur	Jana Steenbergen-Kajabová, Orin van Loon, Daan van Keulen, Sebastian Huizer, Vincent Moerland, Martine Stam; Kees van Immerzeel
E-mailadres	jana.steenbergen@sweco.nl
Gecontroleerd door	Martin Arends, Marco Veendorp, Jana Steenbergen-Kajabová
Paraaf gecontroleerd	
Goedgekeurd door	Louis Broersma
Paraaf goedgekeurd	

Inhoudsopgave

1	Inleiding	6
1.1	Doelstelling	7
1.2	Leeswijzer	8
2	Aanpak en uitgangspunten voor de optimalisatie	10
2.1	Aanpak optimalisatie	10
2.1.1	Peilbuisanalyse	10
2.1.2	Analyse HPT sonderingen	10
2.1.3	Analyse invloed voorland op het mechanisme piping	11
2.1.4	D-Geo Flow analyse met aangescherpte parameters	11
3	Analyse peilbuizen	12
3.1	Algemene bevindingen peilbuisanalyse	12
3.2	Gevoeligheidsanalyse weerstand deklaag	17
3.3	(Bulk)doorlatendheid eerste watervoerend pakket	18
4	Analyse HPT sonderingen	20
4.1	Conclusie	20
5	Gevoeligheidsanalyse D-Geo Flow	22
5.1	Gevoeligheidsanalyse effect van het voorland op kritieke verval	22
5.1.1	Uitgangspunten en schematisatie effect voorland	22
5.1.2	Resultaat gevoeligheidsberekeningen naar effect van het voorland	23
5.2	Gevoeligheidsanalyse demping voorland	24
5.2.1	Schematisatie demping voorland	25
5.2.2	Resultaat gevoeligheidsberekeningen naar effect demping van het voorland	25
5.3	Uitbreiding analyse naar demping van het voorland met een strang	26
5.3.1	Uitgangspunten en schematisatie demping van het voorland met een strang	26
5.3.2	Resultaat gevoeligheidsberekeningen demping van het voorland met een strang	26
5.4	Conclusies	27
6	D- Geo Flow berekeningen	29
6.1	Berekening bij doorsnede DP47+00	29
6.2	Berekening bij doorsnede DP53+00	30
7	Conclusies	32
7.1.1	Aanbevelingen voor ontwerpfase	32
7.1.2	Aanbevelingen algemene kennisontwikkeling	32
7.2	Werkhypothese op basis van de optimalisatie	33
8	Referenties	35

Bijlage 1	Bepaling bulkdoorlatendheid
Bijlage 2	Analyse HPT sonderingen
Bijlage 3	Verdere kennisontwikkeling : STOWA-rapport van Acacia Water naar effect van het intrede en uittrede weerstand op piping
Bijlage 4	Gevoeligheidsanalyse D- Geo Flow scopebepalingsfase
Bijlage 5	Onderbouwing hypothese versterkingsopgave
Bijlage 6	Resultaten optimalisatie Sellmeijer – schadefactor
Bijlage 7	Werkhypothese ruimtebeslag piping maatregelen
Bijlage 8	Interpretatie Infiltratie metingen

1 Inleiding

Voor het vaststellen van de versterkingsopgave op het traject Wijk bij Duurstede – Amerongen (WAM) wordt op alle faalmechanismes beoordeeld. Arcadis voert samen met Sweco deze opdracht uit in opdracht van Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden. Project WAM maakt deel uit van het programma Sterke Lekdijk.

In de periode oktober 2018 – maart 2019 heeft Sweco-Arcadis (SA) in opdracht van het Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden (HDSR) de veiligheidsscope voor het dijkversterkingsproject Wijk bij Duurstede – Amerongen (WAM) opgesteld. De veiligheidsscope is terug te vinden in het definitieve rapport D1.0 van 28 maart 2019 met bijlagen.

Uit de scopebepaling bleek dat de grootste opgave is te wijten aan de faalmechanismes Macrostabieliteit binnenwaarts (STBI) en Piping en heave (STPH).

De scopebepalingsrapportage met de bijlagen is beoordeeld door het Kennisplatform Risicobenadering (KPR).

Ten aanzien van de optimalisatie van Piping en Heave (STPH) heeft zowel SA als KPR aanbevelingen voor de optimalisaties aangegeven. Dit zijn de aanbevelingen in Tabel 1-1.

Tabel 1-1 Aanbevelingen voor de optimalisatie van de scope op basis van STPH

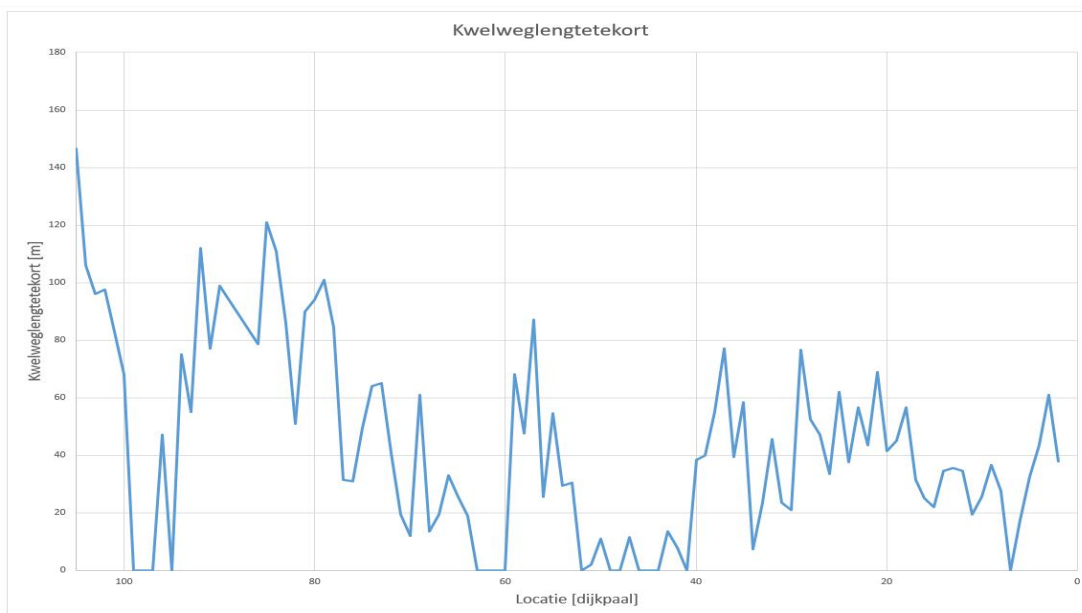
SA3	Piping en heave (STPH)	Aanvullend voorlandonderzoek in combinatie met gebruik van D-Geo Flow, traject dp 1 – 79.
SA4	Piping en heave (STPH)	Gebruik van D-Geo Flow, traject dp 80 – 105.
KPR3	Piping en heave (STPH)	Ga niet uit van polderpeil, maar van hoogte binnendijs maaiveld. <i>Advies SA: Winst vrij beperkt.</i>
KPR4	Piping en heave (STPH)	Breng bredere strook voorland in rekening. <i>Advies SA: Eens, mits nader onderzoek dit aantoont (zie SA3).</i>
KPR5	Piping en heave (STPH)	Gevoeligheidsanalyse uitvoeren met D-Geo Flow. <i>Advies SA: Eens, zie SA3 en SA4.</i>

De meest kansrijke en haalbare optimalisaties zowel volgens SA als KPR zijn uitgewerkt in deze rapportage. Het betreft:

- Peilbuisanalyses bestaande meetreeksen (vanaf 2018) in relatie tot doorlatendheid en weerstand voorland met als doel het afleiden van de bandbreedte van werkelijke weerstand voorland en ijking van de doorlatendheid van watervoerend pakket.
- Analyse van het invloed van het voorland op mechanisme piping op basis van de inzichten van het onderzoeksrapport van STOWA door Acacia Water [2.] en aanvullende gevoeligheidsanalyse met D-Geo Flow.
- Analyse van de nieuwe beschikbare HPT sonderingen ter inschatting van de variatie van de doorlatendheid van de watervoerende zandlaag (kD-waarde) langs het dijktraject in relatie tot de eerdere analyse van de doorlatendheid van de eerder beschikbare HPT-sonderingen en uitgevoerde doorlatendheidsmetingen
- D-Geo Flow berekeningen voor 2 extra dwarsprofielen ter plaatse van de geohydrologische analyses met inachtnaam van de resultaten en inzichten van de voorgaande punten.

1.1 Doelstelling

Doel van het fase 1 en fase 2 onderzoek is het verkrijgen inzicht in de invloed van het voorland en de doorlatendheid van het zandpakket (kD) op de actuele piping opgave (zie Figuur 1-1) en reductie hiervan door onderbouwde optimalisaties en nadere beschouwingen.



Figuur 1-1 Kwelweglengtetekort laagst maaiveldpunt op basis van de scopebepaling

In het oosten begint de dijkpaalnummering bij Amerongen. Rond dijkpaal 40 is de Stuw Amerongen gelegen. Dijkpaal 85 is gelegen bij Wijk bij Duurstede en de daar aanwezige haven en Beermuur. Het traject eindigt langs het Amsterdam-Rijnkanaal voor de Prinses Irenesluizen in het westen bij dijkpaal 105. De dijkpaalnummering is weergegeven in Figuur 1-2.



Figuur 1-2 Projectgebied Sterke Lekdijk WAM met dijkpaalnummering en positie van de onderzoeksraais peilbuisen (geel- fase 1, oranje – fase 2) en HPT's (rood-fase 1, paars- fase2)

Verwachting is dat aanvullend voorlandonderzoek in combinatie met gebruik van D-Geo Flow voor het traject DP 1-79 naar verwachting resulteert in een aanscherping van de scope of een afname van het kwelweglengtetekort. De optimalisaties hebben daarmee grote invloed op de kansrijkheid van de verbeteralternatieven. Doel is het stabiliseren van de verbeteropgave in dit traject.

De tekorten in het westelijke deel (DP 80 – 105) deel zijn dusdanig dat hier verbetermaatregelen noodzakelijk zijn. Verwachting is dat het gebruik van D-Geo Flow levert hier in combinatie met de peilbuisanalyse wel een afname van het kwelweglengtetekort.

Het nader onderzoek is opgesplitst in twee fases. De eerste fase van het onderzoek is uitgevoerd op basis van de beschikbare data. Op basis van de inzichten uit het onderzoek van fase 1 is vervolgens voor fase 2 onderbouwd welk type onderzoek (en schaalgrootte) ingezet moet worden voor een accurater inzicht in de toe te passen randvoorwaarden en uitgangspunten voor de versterkingsopgave. Met de resultaten van het onderzoek van fase 2 is vervolgens, waar mogelijk, nog een nadere optimalisatieslag uitgevoerd.

1.2 Leeswijzer

In dit rapport zijn de afzonderlijke deelactiviteiten gerapporteerd en zijn de verbanden tussen de bevindingen gelegd. Dit betreft zowel de activiteiten van fase 1 (medio 2019) als fase 2 (eind 2019-begin 2020) onderzoek. Daar waar het onderscheid tussen de fases relevant is, is dit separaat gerapporteerd. Voor andere onderdelen is alleen het eindresultaat van de twee fases in het onderzoek gepresenteerd. De onderdelen die toegevoegd zijn in het kader van de optimalisatie van fase 2, zijn in dit rapport in blauw aangegeven.

In hoofdstuk 2 is de aanpak per onderdeel nader toegelicht en zijn de afwijkingen in uitgangspunten, ten opzichte van de scopebepaling vastgelegd.

In hoofdstuk 3 zijn de resultaten van de peilbuisanalyse toegelicht. De volledige rapportage is opgenomen in bijlage 1. Hoofdstuk 4 bevat de HPT analyse. De geanalyseerde sonderingen zijn weergegeven in bijlage 2.

De gevoeligheidsanalyse is opgenomen in hoofdstuk 5. De resultaten van de D-Geo Flow berekeningen zijn toegelicht in hoofdstuk 6. Hoofdstuk 7 verzamelt de conclusies van de

genomen stappen en vertaalt deze naar de gevolgen op de scope. Analyse van STOWA rapport naar het effect van de intrede en uittredeweerstand op piping heeft geen invloed op het bepalen van de scope voor dit project en is in Bijlage 3 geanalyseerd met aanbevelingen voor verdere kennisontwikkeling.

2 Aanpak en uitgangspunten voor de optimalisatie

2.1 Aanpak optimalisatie

De optimalisatie van de scope op basis van de opgave vanuit het mechanisme piping is gebaseerd op het opbouwen van de inzichten over het effect van de lengte en doorlatendheid van het voorland en een beter beeld van de doorlatendheid van de watervoerende zandlaag. Hiervoor zijn enkele analyses uitgevoerd in het najaar van 2019 (fase1). Op basis van de inzichten uit fase 1 is in november en december extra aanvullend onderzoek uitgevoerd. Dit heeft begin 2020 geresulteerd in een aanscherping van de inzichten.

2.1.1 Peilbuisanalyse

In het projectgebied zijn in 3 raaien met peilbuizen uitgerust. Sinds 2018 wordt hier een continue meting van de stijghoogte uitgevoerd. De meetraaien bij DP47, DP53 en DP95 zijn aangegeven in Figuur 1-2. Met een 2D geohydrologische modellen zal de bandbreedte van de werkelijke voorlandweerstand afgeleid worden en zullen kD waarden van de watervoerende zandlaag geïkt worden. Resultaat wordt vergeleken met de eerdere inschattingen op basis van boringen en/of vlakdekkende metingen. De afgeleide doorlatendheid van de watervoerende zandlaag wordt vergeleken met de resultaten van de HPT analyse in combinatie met de pompproef. Tevens is verkend de variatie van de resultaten van de optredende stijghoogte ter plaatse van de buitenteen met het grondwatermodel en D-Geo Flow benadering.

In november 2019 zijn aanvullende onderzoeken uitgevoerd door middel van viertal HPT sonderingen en boringen met 3 ringinfiltratieproeven van de deklaag in het voorland. Inzicht van de doorlatendheid is gebruikt voor de verificatie van de aannames die gemaakt zijn voor de analyse in najaar 2019. Deze informatie leidt tot een betere afbakening van de aannames die voor deze analyse zijn gemaakt. In het najaar van 2019 zijn aanvullend voor 2 raaien 4 peilbuizen onder de deklaag geplaatst. Ook is in de buurt van DP 95 een extra peilbuis geplaatst. Deze keuze was gemaakt, omdat de eerder onderzochte peilbuisraaien gekozen waren op de locaties met dikste deklaag zowel in het voorland als achterland (meer dan 6 m) en zijn hierdoor niet representatief voor de meest kwetsbare delen van het project met oog op de kwel en piping. De nieuwe peilbuizen zijn geplaatst bij DP 19+101_BI en DP20+001, bij DP 78+089_BU en DP 79+001_BI. De meetperiode van deze peilbuizen is nog genoeg om de resultaten al mee te nemen in de voorliggende rapportage.

2.1.2 Analyse HPT sonderingen

In de periode van de uitvoering van de scopebepaling zijn in het projectgebied 3 HPT sonderingen uitgevoerd in combinatie met de pompproef bij DP 35. Na deze periode is in fase 1 nog een drietal HPT-sonderingen in het gebied uitgevoerd (DP 10, DP 64 en DP 84) en in fase 2 in de tussenliggende gebieden nog 5 extra HPT sonderingen verspreid in drie raaien (DP4, DP84 en DP 104). Voor het overzicht van de onderzochte locaties zie Figuur 1-2. De HPT-sonderingen zijn geanalyseerd aan de hand van de werkwijze die is afgestemd tussen de veldonderzoeksbureau en HDSR [3.].

De aanvullende analyse geeft een beeld van de variatie in de doorlatendheid van het watervoerend pakket langs het dijktraject in relatie tot de resultaten van de pompproef, die in de bepaling van de veiligheidsopgave voor het gehele traject representatief is gesteld.

Resultaat van de analyse van HPT-sonderingen en de peilbuisanalyse gebruiken we voor de eventuele aanscherping van de gebruikte parameters voor de kD van de watervoerende

zandlaag. Deze worden gebruikt in de aanvullende D-Geo Flow analyses en in de Sellmeijer regel.

2.1.3 Analyse invloed voorland op het mechanisme piping

De invloed van het voorland op het mechanisme piping onderzoeken we op twee manieren:

1. Gebruiken van de recente inzichten in het effect van het voorland op de berekening van de piping aan de hand van de literatuurstudie.
2. Uitvoeren van de gevoeligheidsanalyse naar effect van het voorland.

2.1.3.1 *Recente inzichten in effect van de intrede- en uittredeweerstand*

In een STOWA-onderzoek van Acacia Water “Optimalisatie rekenregels piping en regionale keringen: invloed maatgevende geohydrologische parameterwaarden” [2.] is de optimalisatie van de rekenregel voor boezemkades afgeleid. Focus van de rapportage ligt in de analyse van de effecten van de intrede- en uittredeweerstand. Ten behoeve van de scope aanscherping wordt deze rapportage geanalyseerd en de relevante inzichten van het boezemkadesysteem worden vertaald voor de bovenrivier. Effect van een aangepaste rekenregel op de opgave wordt inzichtelijk gemaakt.

2.1.3.2 *D-Geo Flow gevoeligheidsanalyse*

Vervolgend op de gevoeligheidsanalyse uitgevoerd ten behoeve van de scopebepaling is de intentie van de gevoeligheidsberekeningen in fase 1 (met D-Geo Flow) het vaststellen van de invloed van de weerstand van het voorland. Hierbij rekening houdend met een zeer heterogene opbouw (anisotropie en gelaagdheid) en invloed van ingravingen/lokaal ontbreken van een deklaag in het voorland. Voor het effect van de gelaagdheid zijn 2 berekeningen uitgevoerd. In één berekening is de doorlatendheid voor de berekening gelijk aan 70 m/dag gehanteerd voor het hele pakket (13 m) en in de tweede berekening is onderscheid gemaakt van een laag van 3 m met doorlatendheid van 3 m/dag en een laag van 10 m met doorlatendheid van 70 m/dag.

Op basis van deze inzichten kan vervolgens beter ingeschat worden welk type onderzoek en met welke schaalgrootte ingezet moet worden. We kunnen hierdoor beter bepalen hoe gevoelig het model is voor lokale onderbrekingen van de deklaag in het voorland. Met deze kennis, en de analyse van de peilbuizen, kunnen we onderbouwd een voorstel doen voor aanvullend onderzoek. Dit onderzoek kan bestaan uit infiltratieproeven, maar ook vlak-dekkende metingen, plaatsing van peilbuizen en boringen behoren eveneens tot de mogelijkheden.

2.1.4 D-Geo Flow analyse met aangescherpte parameters

Uit de resultaten van de alle voorgaande onderzoeken zijn voor 2 aanvullende dwarsprofielen D-Geo Flow berekeningen uitgevoerd met aangescherpte uitgangspunten ten aanzien van de doorlatendheid van het watervoerend pakket en doorlatendheid van het voorland.

Alle overige uitgangspunten zijn gehanteerd zoals in de scopebepalingsfase. De specifieke relevante uitgangspunten per deelanalyse zijn opgenomen in desbetreffende hoofdstuk.

Resultaat van de D- Geo Flow analyse is vergeleken met de resultaten van de analyse met regel van Sellmeijer.

3 Analyse peilbuizen

Vanaf 2018 zijn in drie meetraaien (DP47, DP53 en DP95) in het projectgebied peilbuizen geplaatst en gemonitord.

In fase 1 van de optimalisatie is de data uit de monitoring gebruikt om met behulp van een relatief eenvoudig 2D grondwatermodel de doorlatendheid van de watervoerende zandlaag (kD) en doorlatendheid van het voorland te ijken voor elke meetraai. De opbouw van de modellen per meetraai is afgeleid uit grondboringen en het REGIS II model. De weerstand van de deklaag en de transmissiviteit van het eerste watervoerende pakket zijn vervolgens bepaald gedurende de modelkalibratie, waarbij gebruik is gemaakt van Parameters ESTImaton Software (PEST).

De volledige rapportage van de peilbuisanalyse vanuit het modelonderzoek, inclusief de gebruikte uitgangspunten is opgenomen in bijlage 1. In dit hoofdstuk is een samenvatting van de resultaten opgenomen. Deze peilbuisanalyse is uitgevoerd op basis van de beschikbare data tot en met 23 juli 2019/ In het voorjaar van 2020 is een hoogwaterperiode geweest waarvan in de meetdata is het effect van deze hoogwaterperiode waarneembaar. Onze eerste indruk van deze recente metingen, is dat dit de inzichten van de eerdere peilbuisanalyse niet tot nauwelijks wijzigt.

Eind 2019 zijn naar aanleiding van de analyse van fase 1 onderzoek aanvullende peilbuisraaien geplaatst. De monitoring daarvan is opgestart. De monitoringsdata zijn ten tijde van deze rapportage nog niet beschikbaar en daarom niet meegenomen in dit rapport. Deze data zal de basis vormen voor het geohydrologisch model in de ontwerpfase.

3.1 Algemene bevindingen peilbuisanalyse

De analyse heeft de volgende inzichten gegeven:

1. De peilbuizen met een filter in het eerste watervoerende pakket kunnen bijna geheel verklaard worden door de rivierwaterstand. Opmerkelijk is het verhang tussen de twee peilbuizen van meetraai DP95. Hier wordt in het eerste watervoerende pakket gemiddeld een stijghoogte verschil van circa 0.2 m waargenomen, over een afstand van 30 m. Voor meetraai DP47 en DP53 was dit echter maar enkele centimeters.

Ook worden de grondwaterstanden van DP95+029 BU WVP minder goed verklaard door de rivierwaterstand, ondanks dat deze peilbuis dicht bij de rivier staat. Het is mogelijk dat deze afwijking te verklaren is met de eventuele drainage onder de sportvelden aan de binnenzijde van de waterkering. Op dit moment is de informatie over de drainage niet beschikbaar en daarom niet meegenomen in de analyse.

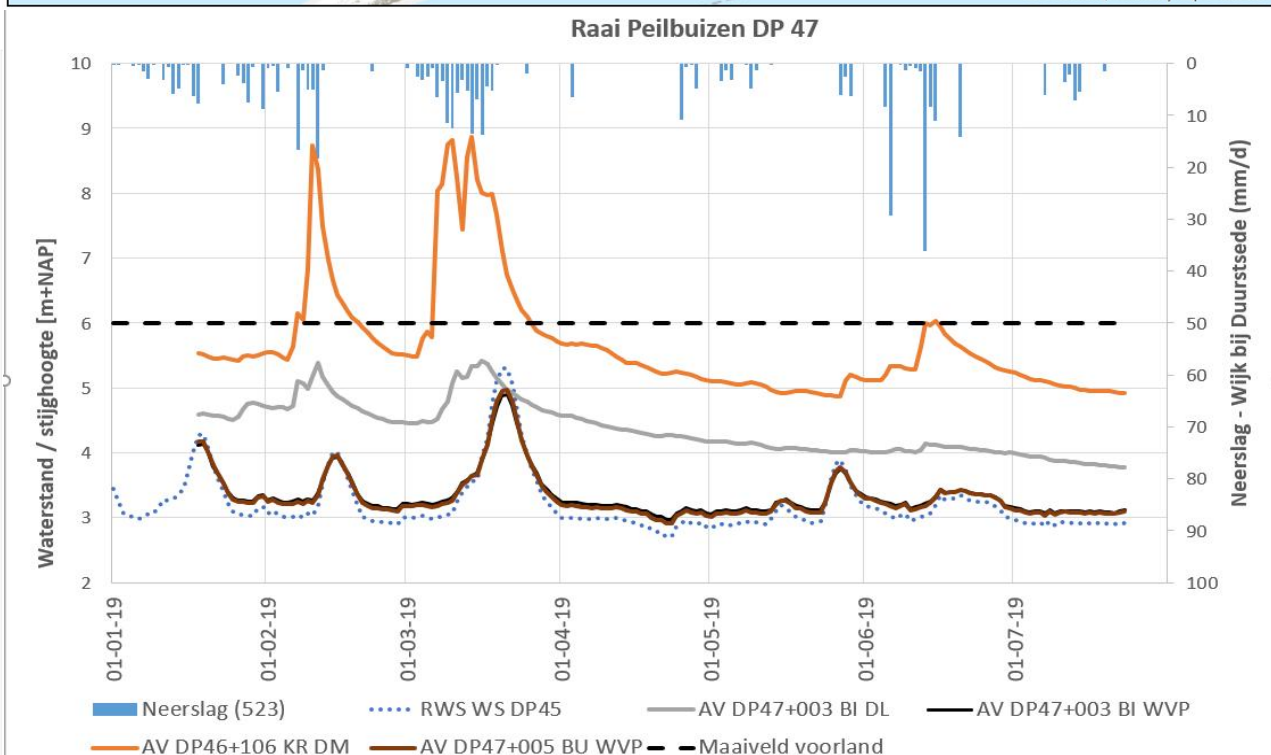
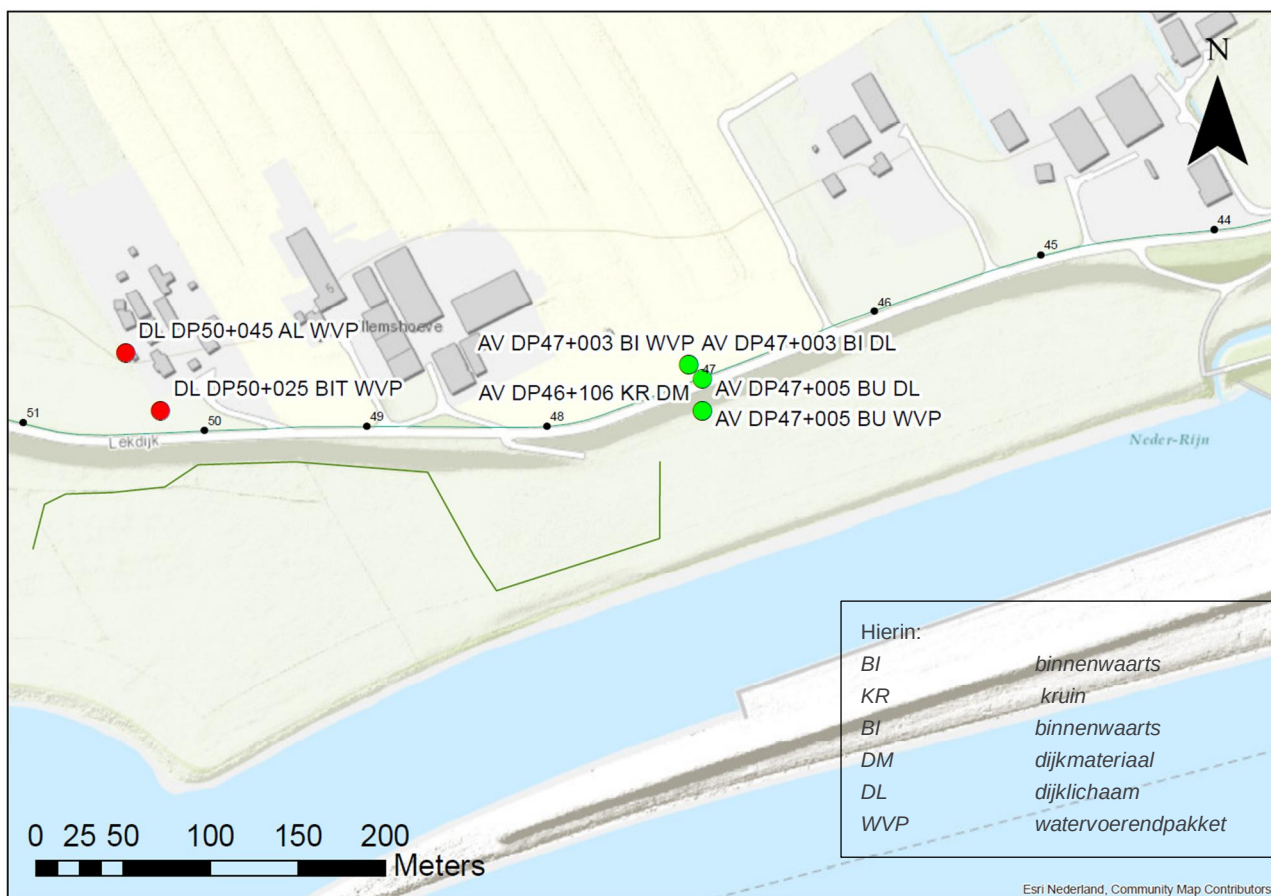
2. Peilbuizen in deklaag bij de binnenteen vertonen een vergelijkbare meetreeks. De grondwaterstanden worden bepaald door neerslag en verdamping. De tijdreeksmodellen overschatten de response in de zomermaanden. Dit moet meegenomen worden gedurende de interpretatie van de modelresultaten.
3. Grondwaterstanden in de kruin lijken bepaald te worden door neerslag en verdamping. Er vormt zich een opbolling in de kruin. In de kruin van meetraai 95 lijkt

een schijngrondwaterspiegel gevormd te zijn. Er komt echter geen eenduidig patroon uit de meetreeksen van de dijkkruinen naar voeren.

Ter aanvulling zijn een aantal specifieke bevindingen / aandachtspunten uit de analyse van de voorlopige resultaat van de metingen na zomer 2019:

In de gemeten grondwaterstanden in de kruin van meetraai DP47 treedt in het voorjaar van 2019 op enkele momenten een (extreem) sterke stijging van de grondwaterstand op (Figuur 3-1). Deze sterke stijging treedt niet in dezelfde mate op in de andere peilbuizen van meetraai DP47, en lijkt samen te gaan met de aanwezige neerslag. Omdat deze extreme stijgingen alleen lijken op te treden in de eerste 3 maanden van de meting (i.e. voorjaar 2019), zijn deze afwijkende meetwaarden vermoedelijk te wijten aan een (tijdelijke) niet ingeregelde situatie na plaatsing. Mogelijk veroorzaakt door overspanning tijdens de beginperiode.

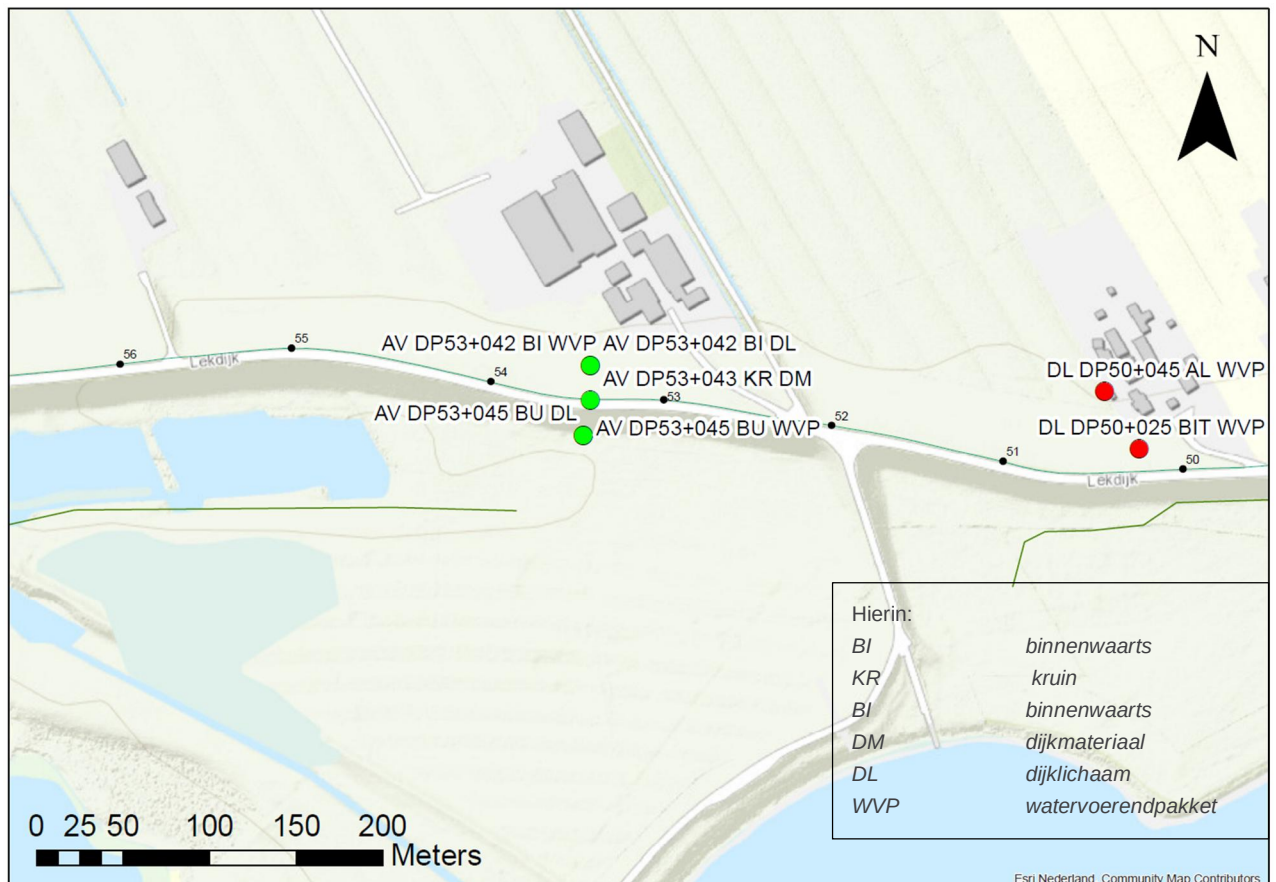
Metingen in de afgelopen periode van februari en maart 2020 laten zien dat de peilbuis in de kruin bij meetraai DP53 reageert door relatief steile toename van waterspanning. Vermoedelijk wordt deze toename verklaard door (snelle) veranderingen in het rivierwaterpeil, waarbij het voorland mogelijk (deels) onder water heeft gestaan. Metingen in de kruin van meetraai DP47 en DP95 vertonen een veel geleidelijker patroon in dezelfde periode, met kleinere toenamen in de grondwaterstanden.



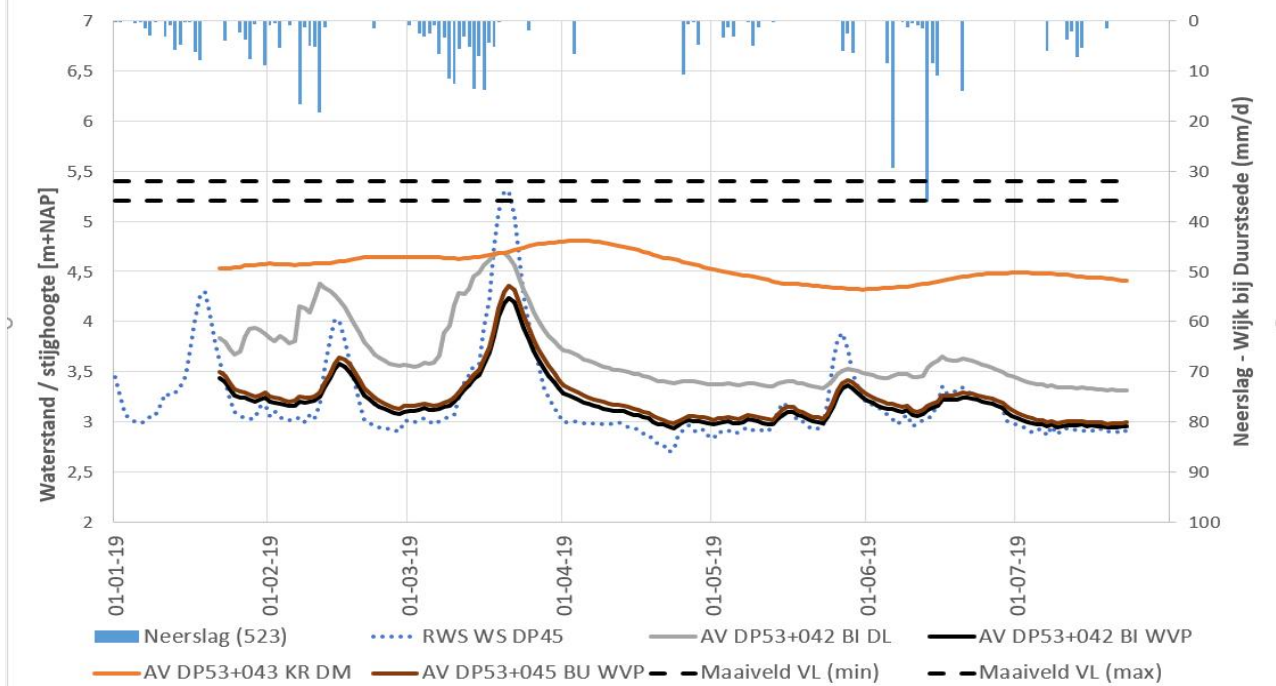
Figuur 3-1

Boven: Overzicht van de peilbuizen in meetraai DP47.

Onder: Gemeten rivierwaterstand voor Amerongen beneden de stuw (RWS DP45), grondwaterstand in de peilbuizen, neerslag en hoogte van het maaiveld in het voorland.



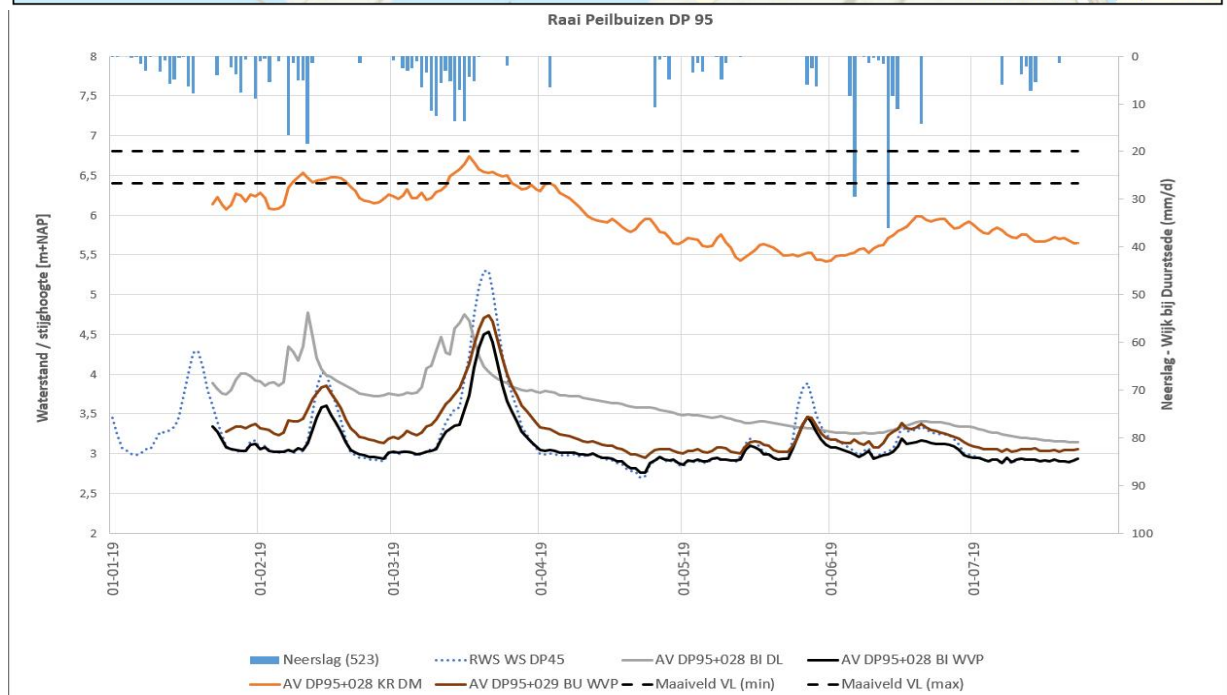
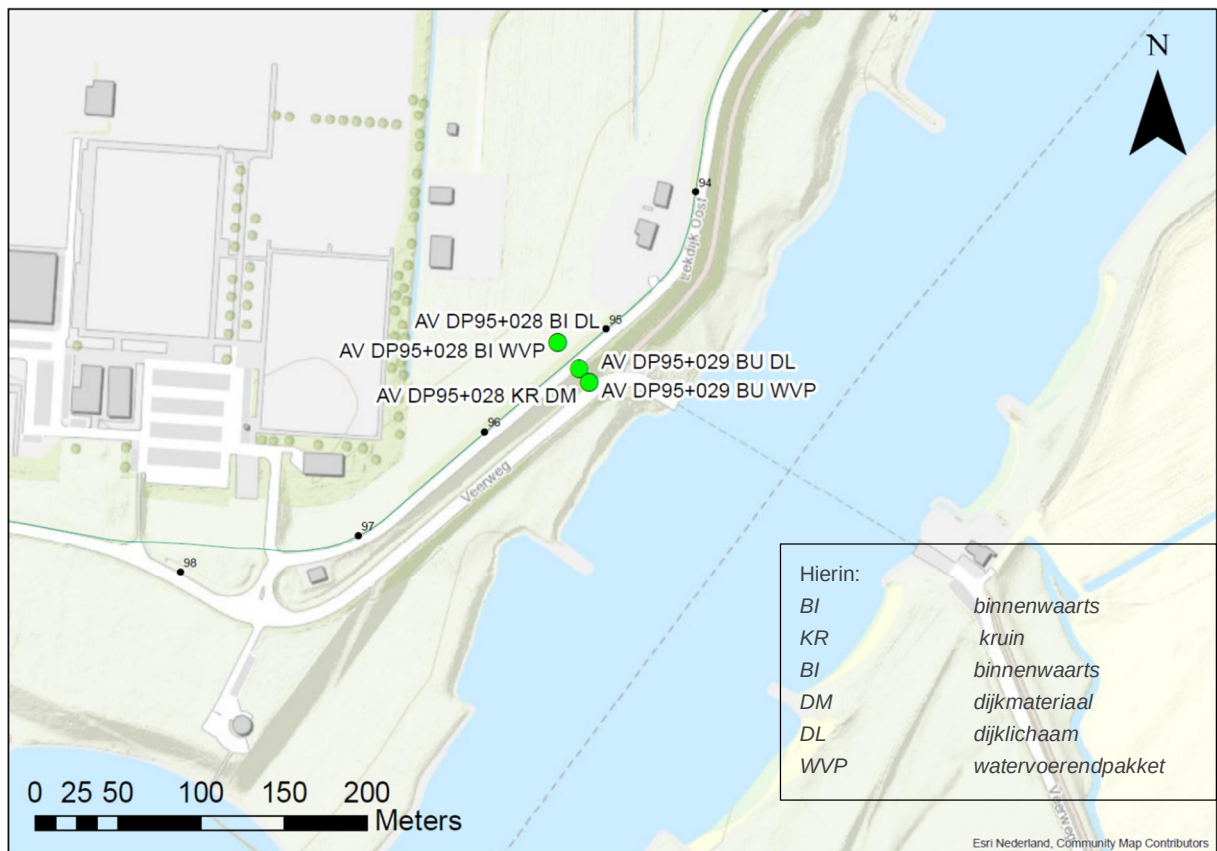
Raai Peilbuizen DP 53



Figuur 3-2

Boven: Overzicht van de peilbuizen in meetraai DP53.

Onder: Gemeten rivierwaterstand voor Amerongen beneden de stuw(RWS DP45), grondwaterstand in de peilbuizen, neerslag en hoogte van het maaiveld in het voorland.



Figuur 3-3

Boven: Overzicht van de peilbuizen in meet raai DP95.

Onder: Gemeten rivierwaterstand voor Amerongen beneden de stuw (RWS DP45), grondwaterstand in de peilbuizen, neerslag en hoogte van het maaiveld in het voorland.

3.2 Gevoeligheidsanalyse weerstand deklaag

Per meetraai is op basis van de peillbuisanalyse (3.1) een modelkalibratie uitgevoerd om meer inzicht te krijgen in de grootte van de deklaagweerstand en de bulkdoorlatendheid. Voor meetraai DP47 en DP53 kwamen de gekalibreerde bulkdoorlatendheden op ongeveer 80 m/d bij een verticale doorlatendheid tussen de 0,01 en 0,1 m/dag. Hier wordt kort ingegaan op de onzekerheden van de gekalibreerde bulkdoorlatendheid, en hoe deze afhankelijk is van de gehanteerde aannames bij de modellering. In de kalibratie is er van uit gegaan dat de deklaagweerstand in het voorland identiek is aan het achterland. De (verticale) doorlatendheid van de deklaag in het voorland kan hiervan afwijken¹, bijvoorbeeld door verschillen in het afgezette (Holocene) sediment, verschillen in landgebruik of vergravingen. Op dit moment kon de weerstand van de deklaag met het model niet goed bepaald worden omdat het voorland niet onderwater heeft gestaan.

De gekalibreerde bulkdoorlatendheid van het eerste watervoerende pakket is met name afhankelijk van de dikte van het watervoerende pakket en de weerstand (i.e. verticale doorlatendheid) van de deklaag, samen bepalen deze hoe een hoogwaterpiek zich voorplant. Een lagere deklaagweerstand wordt in het model gecompenseerd met een hogere doorlatendheid van het watervoerende pakket. Het tegengestelde effect treedt op voor de weerstand van de eerste scheidende laag (i.e. Waalre klei 1). Een lagere weerstand van de eerste scheidende laag resulteert in hogere doorlatendheden van het eerste watervoerende pakket. Hieronder is per meetraai gekeken wat de invloed is van de deklaagweerstand in het voorland en de weerstand in 1^e kleiige afzettingen van de Waalre klei.

Gevoeligheidsanalyse deklaagweerstand van het voorland: Om de gevoeligheid van deklaagweerstand in het voorland inzichtelijk te maken is deze gevarieerd tussen de 0,001 en 1,0 m/dag, de doorlatendheid van deze range varieert van een zeer goed afsluitende laag (zware klei) tot een goed doorlatende laag (fijn zand). Voor beide meetraaien neemt de gekalibreerde doorlatendheid van het eerste watervoerende pakket toe wanneer de deklaag weerstand afneemt, zie Tabel 3-1. Dit komt doordat een lagere deklaagweerstand in de model kalibratie wordt gecompenseerd door een hogere doorlatendheid van het eerste watervoerende pakket. De resultaten laten een positief omgekeerd onevenredig verband zien tussen de deklaagweerstand en de gekalibreerde bulkdoorlatendheid. Meetraai DP53 is gevoeliger voor de deklaagweerstand dan meetraai DP47. Dit kan verklaard worden aangezien het voorland groter is voor meetraai DP53 dan voor meetraai DP47.

¹ In fase 2 is een drietal ring infiltratieproeven uitgevoerd. Uit deze proeven blijkt dat zavelige toplaag (relatief veel zandige bijmenging) een doorlatendheid van 2,3 m/dag respectievelijk 2,7 m/dag heeft. Interpretatie van de resultaten is opgenomen in Bijlage 8

De in de gevoeligheidsanalyse gehanteerde waarde van doorlatendheid van 1m/dag is qua orde grootte vergelijkbaar met de gevonden waarden in de ongunstige situatie met relatief zandige toplaag. In de hier geanalyseerde raaien is sprake van relatief dikke kleiige toplaag (>5 m) waardoor hier de verwachte verticale doorlatendheid eerder ligt in een orde grootte van 0,01 m/dag (zie tabel 8-1 in bijlage 8).

Tabel 3-1 Gekalibreerde doorlatenheden van het 1^e WVP bij verschillende deklaagweerstand in het voorland.

Deklaag voorland Verticale doorlatendheid (m/d)	Meetraai DP47 Bulkdoorlatendheid (m/d)	Meetraai DP53 Bulkdoorlatendheid (m/d)
0,001	78	60
0,01	83	90
0,1	89	132
1	90	146

Gevoeligheidsanalyse Weerstand Waalre klei: In het basismodel is voor meetraai DP47 en DP53 op een diepte van circa NAP -11,5 m een scheidende laag (i.e. Waalre klei 1) opgenomen o.b.v. REGIS II en boorgegevens. Om de gevoeligheid van het model op de verticale doorlatendheid van deze laag inzichtelijk te maken is deze gevarieerd tussen de 0,025 en 25 m/dag. Dit is een brede range waarbij de uiterste typische waarden zijn voor klei en goed doorlatend zand. De doorlatendheid die toegekend wordt aan deze laag beïnvloedt de gekalibreerde bulkdoorlatendheid van het eerste watervoerende pakket, zie Tabel 3-2. Bij een lagere weerstand voor deze eerste scheidende laag neemt de gekalibreerde bulkdoorlatendheid af. Dit komt doordat interactie met het onderliggende pakket mogelijk wordt en heeft als gevolg dat een hoogwatergolf zicht makkelijker voorplant. Gezien de lage gekalibreerde bulkdoorlatendheden bij een weerstand van 2,5 of 25 m/d, verwachten we dat de scheidende laag als een grotendeels afsluitende laag voorkomt.

Tabel 3-2 Gekalibreerde doorlatenheden van het 1^e WVP bij verschillende weerstanden voor de 1^e scheidende laag (i.e. Waalre klei 1).

Waalre klei 1e afzetting Verticale doorlatendheid (m/d)	Meetraai DP47 Bulkdoorlatendheid (m/d)	Meetraai DP53 Bulkdoorlatendheid (m/d)
0,025	81	80
0,25	49	45
2,5 (geen klei, fijn zand)	13	6
25 (geen klei, grof zand)	6	3

3.3 (Bulk)doorlatendheid eerste watervoerend pakket

Voor meetraai DP47 en DP53 konden de gemeten grondwaterstanden en stijghoogten goed gereproduceerd worden na de modelkalibratie. De gekalibreerde bulkdoorlatendheid voor meetraai DP47 en DP53 kwamen beiden neer op ongeveer 80 m/dag. De modelafwijkingen in de gekalibreerde modelresultaten voor meetraai DP95 waren te groot om de modelresultaten hiervan te interpreteren. De gevonden bulkdoorlatendheid ligt iets hoger, maar wel in de orde grootte van de in de pompproef waargenomen (bulkdoorlatendheid). De nieuwe inzichten worden verwerkt in de gevoeligheidsanalyse voor bepaling van de kwelweglengte in de D-Geo Flow analyse.

Voor raai 35/36 is de doorlatendheid van het eerste watervoerend pakket bepaald met een pompproef (V.O.F, Wiertsema-Inpijn-Blokpoel, 2018). Hieruit bleek dat de eerste zandlaag een doorlatendheid heeft van circa 1 á 3 m/dag (circa 3 m dik) en de tweede laag (circa 10 m dik) van 70 m/dag. De gekalibreerde bulkdoorlatendheid voor raai DP47 en DP53 zijn

dus hoger dan de doorlatendheid van het goed doorlatend pakket bepaald met de pomproef.

De onzekerheden in de modelresultaten zijn groot, hetgeen ook blijkt uit de onzekerheidsanalyse waarin gekeken is naar de invloed van de deklaagweerstand van het voorland en de weerstand van de Waalre klei op de gekalibreerde bulkdoorlatendheid. Uit deze analyse blijkt dat de gekalibreerde bulkdoorlatendheid toeneemt bij een lagere deklaagweerstand. De gevoeligheid van deze parameter is afhankelijk van de lengte van het voorland. De weerstand van de Waalre klei bepaald of interactie mogelijk is met onderliggend zandpakket. Bij een hogere weerstand neemt de gekalibreerde bulkdoorlatendheid toe. Dit laat zien dat verschillende combinaties van parameters tot hetzelfde resultaat kan leiden. Ondanks de onzekerheid laten deze resultaten zien dat het onderliggende zandpakket ter plekke van meetraai DP47 en DP53 heeft waarschijnlijk een hoge doorlatendheid van 45-90 m/dag.

In de gevoeligheidsanalyse komen veel hogere doorlatendheden voor. Op basis van de eerder genoemde pompproef, de boorstaten en REGIS II waarden voor de doorlatendheid in het projectgebied verwachten wij dat een horizontale doorlatendheid van 45-90 m /dag het meest reëel is voor meetraai DP47 en DP53.

Zoals aangegeven zijn de uitkomsten van dit onderzoek (paragraaf 3.2) afhankelijk van de werkelijke verticale doorlatendheid van het voorland. Recent uitgevoerde infiltratieproeven bij DP84 en DP104 wijzen op een relatief hoge verticale doorlatendheid van 2,3 tot 2,7 m/d (zie Bijlage 8 voor meer informatie). Beide metingen zijn echter uitgevoerd op locaties met een dunne weerstand biedende (i.e. kleihoudend) deklaag, waardoor de resultaten naar verwachting niet representatief zijn voor meetraai DP47 en DP53. Dit geeft echter aan dat de verticale doorlatendheid van de deklaag bij meetraai DP47 en DP53 – met een dikkere, minder zandige deklaag – vermoedelijk kleiner is dan 1 m/d.

Aanbeveling:

1. Gedurende de meetperiode heeft het voorland niet onderwater gestaan. Hierdoor kon de weerstand van de deklaag van het voorland niet bepaald worden. Het is daarom aan te bevelen om de meetcampagne door te zetten tot dat er een hoogwatergolf heeft plaats gevonden waarbij inundatie van het voorland plaatsvindt.
2. Opmerkelijk is het stijghoogte verschil tussen de twee peilbuizen in het watervoerende pakket van meetraai DP95. Tussen de twee peilbuizen in het WVP wordt gemiddeld een stijghoogte verschil van circa 0.2 m waargenomen, voor meetraai DP47 en DP53 bedroeg dit enkele centimeters. Dit verschil kon vervolgens ook niet met het model gereproduceerd worden. Het is mogelijk dat dit verschil verklaart kan worden door de aanwezigheid van de sloot en drainage bij de sportvelden. Met aanvullende informatie t.a.v. met name de (mogelijke) drainage van de sportvelden en data uit de monitoring van de aanvullende peilbuis kan voor meetraai DP95 in de ontwerpfase mogelijk een betrouwbaardere analyse gemaakt worden dan naar voren is gekomen uit dit onderzoek.

4 Analyse HPT sonderingen

Ten behoeve van de scopebepaling van het traject Wijk bij Duurstede – Amerongen is een drietal HPT sonderingen en een pompproef bij DP 35 uitgevoerd.

Na deze periode zijn ten behoeve van fase 1 optimalisatie 3 extra HPT sonderingen beschikbaar gekomen (DP 10, DP 64 en DP 84).

Naar aanleiding van het onderzoek in fase 1 van de optimalisatie zijn voor fase 2 van de optimalisatie in de tussenliggende gebieden 5 extra HPT sonderingen in drie raaien (DP4, DP84 en DP 104) uitgezet.

De uitgevoerde HPT sonderingen zijn gepresenteerd in Bijlage 2.

Deze sonderingen zijn geanalyseerd aan de hand van de werkwijze afgestemd tussen de veldonderzoeksbureau en HDSR [3.] met de gecontroleerde en geverifieerde Excel rekensheet van HDSR.

De analyse van de resultaten geeft duidelijk een beeld van de relatieve variatie in de doorlatendheid van het watervoerend pakket langs het dijktraject in relatie tot de resultaten van de pompproef, die nu voor het gehele traject representatief is gesteld. De resultaten van de analyse zijn per HPT in Bijlage 2 opgenomen.

De formatie grenzen zijn bepaald aan de hand van de sonderingen en zijn geverifieerd met REGIS II database.

Uit de analyse blijkt dat in het algemeen de REGIS II waarden van de doorlatendheid doorgaans hoger uitvallen (op basis van de analyse volgens [3]) dan de tijdens de slugtesten gemeten doorlatendheid.

4.1 Conclusie

In de scopebepalingsfase is op basis van de pompproef [5.] is een doorlatendheid bepaald van 70 m per dag voor het gehele watervoerende pakket van Echteld en Kreftenheye. Deze waarde is toegepast in de basisberekening. Dit is gedaan vanwege het regionale karakter van een pompproef en de overeenkomst met de k-waarde uit de TNO grondwaterkaarten.

Aan de hand van de analyse van de uitgevoerde HPT-sonderingen [3.] in combinatie met de peilbuisanalyse kan geconcludeerd worden dat de variatie van de (maatgevende)² doorlatendheid van het watervoerend zandpakket ligt circa tussen 50 m/d en 90 m/d.

Met oog op de resultaten van de 2D grondwatermodellen kan als startpunt aangenomen worden dat de doorlatendheid van de watervoerende zandlaag lager is dan de default bovenwaarde op basis van WBI-SOS van 100 m/dag. De aanvullende analyses op basis van de meetdata na het hoogwatergolf van 2020 kunnen tot aanscherping van dit standpunt leiden.

² De hoger in het bodemprofiel gelegen zandlagen hebben doorgaans lagere doorlatendheid dan de dieper gelegen watervoerend pakket. Kwalitatief is hier sprake van 20% tot 50% lagere doorlatendheid.

De HPT-sonderingen bieden wel een inzicht in de gelaagdheid en daarmee ook de variatie in de doorlatendheid van de zandlagen. Deze inzichten zijn goed te gebruiken bij het opzetten van een geohydrologisch model in de ontwerpfase en bij het schematiseren in D-Geo Flow model.

5 Gevoeligheidsanalyse D-Geo Flow

Tijdens de scopebepalingsfase voor piping is een aantal gevoeligheidsanalyses met D-Geo Flow software uitgevoerd om inzicht te krijgen in de gevoeligheid van het model op onder andere de variatie in gelaagdheid (meerlaagsheid) en anisotropie. Deze bevindingen zijn ook hier in Bijlage 4 opgenomen.

In de optimalisatiefase (fase 1), die hier gepresenteerd is, is aanvullend de gevoeligheid verkend van het effect van het voorland. Dit om het inzicht in de berekeningen per doorsnede te vergroten. In fase 2 optimalisatie zijn aanvullend aantal analyses uitgevoerd met de aangepaste doorlatendheid van de deklaag aan de hand van de uitgevoerde infiltratieproeven (Bijlage 8).

Naar aanleiding van de resultaten van de gevoeligheidsanalyses kunnen de uitgangspunten van de toetsingsberekeningen worden aangescherpt. Tevens wordt duidelijk wat de invloed van de geanalyseerde parameters is op piping.

5.1 Gevoeligheidsanalyse effect van het voorland op kritieke verval

5.1.1 Uitgangspunten en schematisatie effect voorland

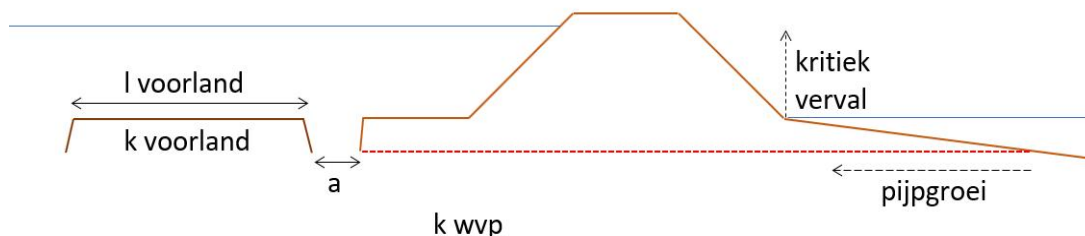
Om zo veel mogelijk aan te sluiten op de eerder gemaakte berekeningen uit de scopebepaling fase zijn de uitgangspunten vrijwel gelijk gebleven. Dit betekent dat het Basismodel nagenoeg identiek is. Er zijn twee noemenswaardige aanpassingen:

1. Het verplaatsen van de gesloten randvoorwaarde bij de rivier naar 270 m (was 70 m) vanaf de dijk om randeffecten uit te sluiten zelfs als er een voorland gemodelleerd wordt.
2. Het afronden van de doorlatendheid van het watervoerende pakket naar 70 m/d (was 70,26 m/d) om een rond getal te hebben bij het variëren van de doorlatendheid.

De varianten zijn gericht om het effect van het voorland inzichtelijk te krijgen. Daar is gevarieerd met de lengte en doorlatendheid van het voorland in combinatie met de grootte van het infiltratiegebied (breedte van het intredepunt tussen het voorland en de dijk) en doorlatendheid van het watervoerende pakket. Figuur 5-1 geeft een visueel overzicht van de relevante variabelen.

De combinaties die zijn beschouwd en de bijbehorende resultaten staan samengevat in Tabel 5-1. De varianten met een asterisk zijn gemaakt ter vergelijking met een nieuwe groep gevoeligheidsberekeningen.

Varianten 2*, 7, 8, 4*, 11 en 12 uit Tabel 5-1 hebben een aangepaste hoogwatercurve tot een fictief hoogwater van NAP +10,2 m omdat anders het kritieke verval niet bereikt kan worden. In de varianten 9, 10, 13 en 14 uit Tabel 5-1 is een extra verhoging van het hoogwater geschematiseerd tot NAP +11,0 m met een hogere ligging van de dijk met de kruin op NAP +11,1 m om het kritieke verval te kunnen berekenen. De invloed van deze aanpassingen in de schematisatie op het berekende kritieke verval is nagenoeg verwaarloosbaar.



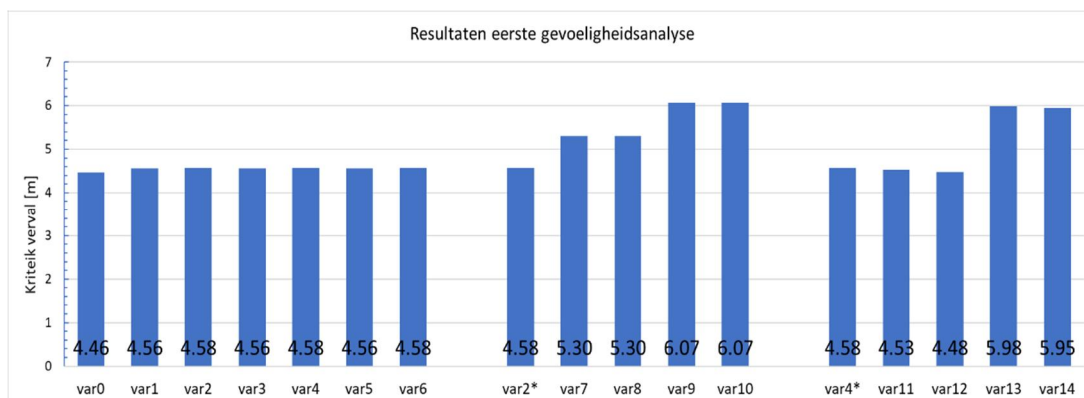
Figuur 5-1 Schets variabelen gevoeligheidsanalyse met effect van het voorland

5.1.2 Resultaat gevoeligheidsberekeningen naar effect van het voorland

Ter duiding van de resultaten: het kritieke verval is als maatstaaf gebruikt in de vergelijking van de resultaten. Een hoger kritiek verval betekent dat er een hogere waterstand kan optreden ten opzichte van het polderpeil voordat de pijp onder de dijk door zal groeien. Dit kritieke verval is direct toepasbaar in het beoordelen van de doorsnede op piping. De berekende waarden per variant is opgenomen in Tabel 5-1. Figuur 5-2 toont een totaaloverzicht in de vorm van een staafgrafiek.

Tabel 5-1 Varianten en resultaten van gevoeligheidsanalyse naar effect van het voorland

Variant	k voorland [m/d]	L voorland [m]	k wvp [m/d]	a [m]	kritiek verval [m]
0	-	0	70	1,50	4,46
1	0,25	50	70	1,50	4,56
2	0,25	100	70	1,50	4,58
3	0,50	50	70	1,50	4,56
4	0,50	100	70	1,50	4,58
5	1,00	50	70	1,50	4,56
6	1,00	100	70	1,50	4,58
2*	0,25	100	70	1,50	4,58
7	0,25	100	45	1,50	5,30
8	1,00	100	45	1,50	5,30
9	0,25	100	30	1,50	6,07
10	1,00	100	30	1,50	6,07
4*	0,50	100	70	1,50	4,58
11	0,50	100	70	3,00	4,53
12	0,50	100	70	6,00	4,48
13	0,50	100	30	3,00	5,98
14	0,50	100	30	6,00	5,95



Figuur 5-2 Staafgrafiek resultaten gevoeligheidsanalyse naar effect van het voorland

Uit het eerste gedeelte kan geconcludeerd worden dat het voorland met de opening 'a' voor de buitenteen van de dijk weinig invloed heeft op het kritieke verval. Dit is het gevolg van direct contact tussen de rivier randvoorwaarde en het watervoerende pakket ter plaatse van de buitenteen. Hierdoor treedt niet de gewenste demping van de stijghoogte in het watervoerende pakket op ten gevolge van het voorland.

Ter vergelijking, het verschil in doorlatendheid van het watervoerende pakket heeft wel een significante invloed. Dit is te zien in het middelste gedeelte van Figuur 5-2.

Uit de analyse van het effect van de opening (intredepunt) in het voorland blijkt dat een grotere opening heeft wel effect op het kritieke verval maar ook hier is het van ondergeschikt belang ten opzichte van de doorlatendheid van het watervoerende pakket. Dit is weergegeven in het meest rechter gedeelte van Figuur 5-1.

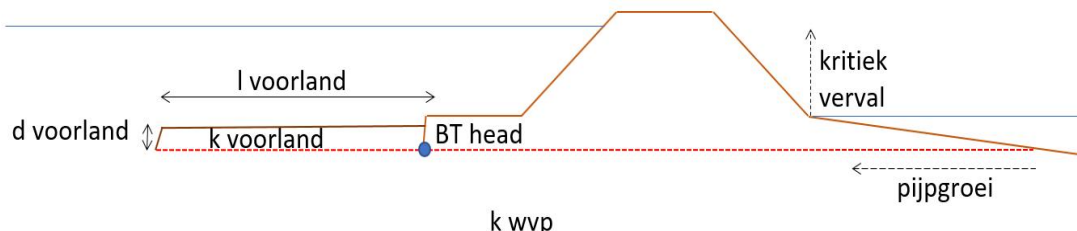
Een kleinere a blijkt geen significante invloed te hebben ten aanzien van het debiet door de opening. Naar verwachting zal deze lager moeten zijn. Mogelijke hypothese is dat de instroom in het zandpakket van de rivierzijde veel bepalender is voor de stijghoogte en debiet door het watervoerend pakket dan de instroom door de bodem van de strang/opening in het voorland.

Aanbevolen is om hier een nader onderzoek naar te verrichten. Mogelijk zal een laboratorium schaalonderzoek uitkomst bieden om de D-Geo Flow schematisaties navolgbaar te valideren.

5.2 Gevoeligheidsanalyse demping voorland

Uit de gevoeligheidsanalyse bleek dat het voorland vrij weinig effect heeft op het kritieke verval. Dit is het gevolg van de opening 'a' bij de buitenteen van de dijk. Hier kan namelijk de randvoorwaarde van de rivier direct contact maken met het watervoerende pakket. Deze opening is voor het berekenen van het kritieke verval echter wel noodzakelijk omdat een pijp onder het gehele voorland door niet realistisch geacht wordt aangezien de dikte van de deklaag in het voorland niet gegarandeerd kan worden. Wanneer er zonder opening 'a' gerekend wordt dient er dus naar een andere maatstaaf gekeken te worden. In dit geval is dat de stijghoogte (head) bij de buitenteen, zie BT head in Figuur 5-3.

5.2.1 Schematisatie demping voorland



Figuur 5-3: Schets variabelen gevoeligheidsanalyse naar effect van het voorland en anisotropie

De gebruikte uitgangspunten zijn in de lijn met de voorgaande analyse naar het effect van het voorland.

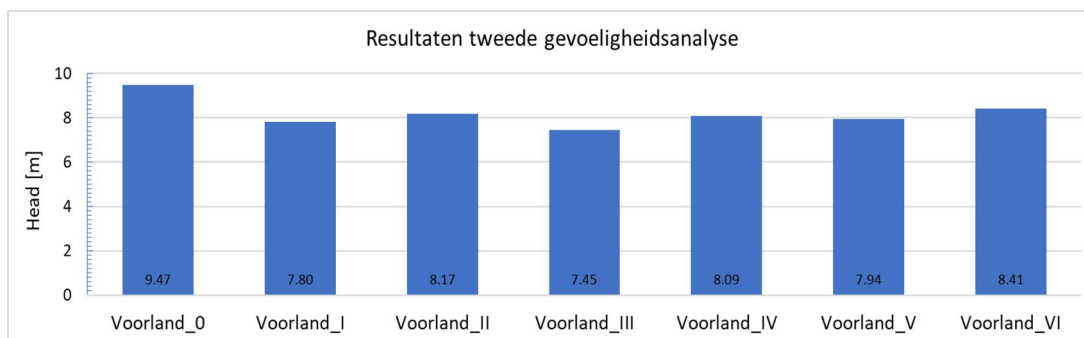
In tabel 6-2 is een overzicht van de varianten en resultaten van de gevoeligheidsanalyse waar het effect van de anisotropie in combinatie met het effect van het voorland is onderzocht. Er is gerekend met een anisotropie factor van 2. De dikte van het voorland is gevarieerd om een compleet beeld te geven van de factoren die invloed hebben op het resultaat.

5.2.2 Resultaat gevoeligheidsberekeningen naar effect demping van het voorland

In Tabel 5-2 zijn de resultaten van de analyse naar de demping van het voorland weergegeven. In de laatste kolom is het verschil ten opzichte van de 0-variant weergegeven. De 0-variant is een berekening zonder voorland en dus een stijghoogte bij de buitenteen gelijk aan het waterpeil bij WBN.

Tabel 5-2 Varianten en resultaten van de gevoeligheidsanalyse naar effect van het voorland en anisotropie

Variant	k voorland [m/d]	L voorland [m]	d voorland [m]	kh/kv wvp [m/d]	BT head [m]	Head verschil [m]
0	-	0	0,0	70/35	9,47	0,00
I	0,25	50	2,0	70/35	7,80	1,67
II	1,00	50	2,0	70/35	8,17	1,30
III	0,25	100	2,0	70/35	7,45	2,02
IV	1,00	100	2,0	70/35	8,09	1,38
V	0,25	50	1,0	70/35	7,94	1,53
VI	1,00	50	1,0	70/35	8,41	1,06



Figuur 5-4 Staafgrafiek resultaten gevoeligheidsanalyse naar effect van het voorland en anisotropie

Figuur 5-4 geeft een overzicht van de resultaten van de gevoeligheidsanalyse met anisotropie met het voorland en strangen in het voorland. Elke afzonderlijke berekening kan vergeleken worden met de 0 variant of met elkaar. De invloed van het voorland is duidelijk zichtbaar, zelfs bij een doorlatend voorland van 50 meter van maar een meter dik zoals in variant VI is er ruim een meter demping. In het meest gunstige geval, variant III, is er zelfs sprake van 2 meter demping. In deze berekening is uitgegaan van 100 meter voorland met een lage doorlatendheid van 0,25 m/dag en een dikte van 2 m.

De overige resultaten zijn allemaal goed te verklaren:

- Langer voorland levert meer demping.
- Dikker voorland levert meer demping.
- Slechter doorlatend voorland levert meer demping.

5.3 Uitbreiding analyse naar demping van het voorland met een strang

Gezien er op basis van de peilbuisanalyse geen betrouwbaar beeld van de deklaagweerstand in het voorland kan opgemaakt worden, zijn er na de optimalisatie fase 1 aanvullende onderzoeken uitgevoerd. Naast de plaatsing van de aanvullende peilbuizen, is een drietal infiltratieproeven uitgevoerd. Deze zijn geanalyseerd in Bijlage 8. Deze analyse liet zien dat de gevonden verticale doorlatendheid van het voorland circa 2,5 m /dag bedraagt. Deze doorlatendheid is als referentie gebruikt bij de uitbreiding van de gevoeligheidsanalyses naar effect van het voorland met een strang in fase 2 van de optimalisatie.

5.3.1 Uitgangspunten en schematisatie demping van het voorland met een strang

De aanvullende analyse is uitgevoerd met een deel van het voorland met een grotere doorlatendheid dan in de analyse in 5.2. Hier is een strang gemodelleerd. Over een breedte van 10 m is in het voorland een gedeelte gemodelleerd met een doorlatendheid van 2,5 m/d en 5,0 m/d. De verhoogde doorlatendheden staan representatief voor het zich voordoen van zwakke plekken en/of strangen in het voorland.

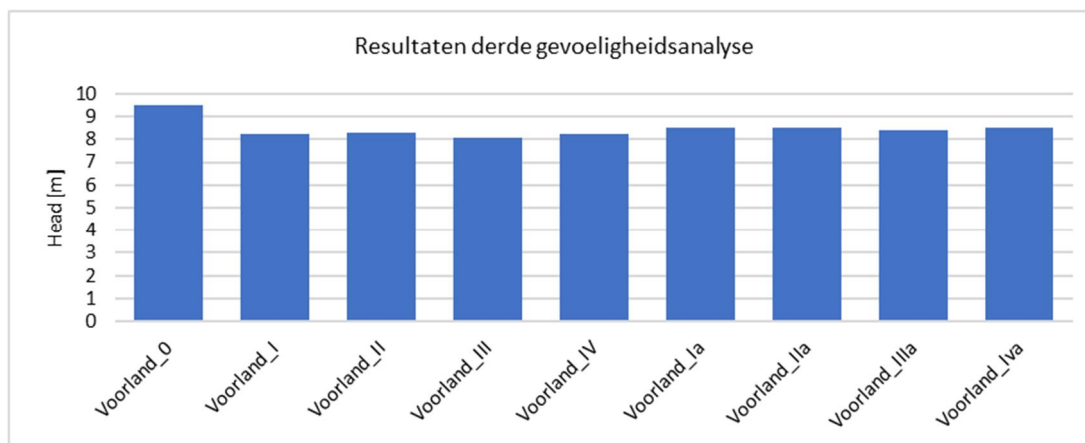
5.3.2 Resultaat gevoeligheidsberekeningen demping van het voorland met een strang

In de tabel 6-3 zijn de resultaten weergegeven. Hier is elke afzonderlijke berekening te vergelijken met de 0 variant of met elkaar.

Tabel 5-3 Varianten en resultaten van de gevoeligheidsanalyse naar effect van het voorland met strangen en anisotropie

Variant	k voorland [m/d]	L voorland [m]	d voorland [m]	kh/kv wvp [m/d]	k strang [m/d]	BT head [m]	Head verschil [m]
0	-	0	0	70/35	n.v.t.	9,47	0
I	0,25	50	2	70/35	2,5	8,24	1,23
II	1	50	2	70/35	2,5	8,31	1,16
III	0,25	100	2	70/35	2,5	8,09	1,38
IV	1	100	2	70/35	2,5	8,25	1,22
Ia	0,25	50	2	70/35	5	8,49	0,98
Ila	1	50	2	70/35	5	8,53	0,94
IIla	0,25	50	1	70/35	5	8,40	1,07
IVa	1	50	1	70/35	5	8,53	0,94

Figuur 5-5 geeft een overzicht van de resultaten van de gevoeligheidsanalyse met anisotropie met het voorland en strangen in het voorland. De stijghoogte bij het buitenteen in het geval van het minder doorlatende voorland (0,25 m/dag) zonder een strang is circa 0,6 m lager dan hetzelfde voorland met een strang. Bij een doorlatender voorland is het verschil tussen de berekende stijghoogtes veel kleiner, circa 0,15 m à 0,35 m.



Figuur 5-5 Staafgrafiek resultaten gevoeligheidsanalyse naar effect van het voorland met strangen en anisotropie

5.4 Conclusies

Het volgende kan geconcludeerd worden op basis van de berekeningen:

Uit de gevoeligheidsberekeningen in fase 1 van de optimalisatie is bevestigd dat de doorlatendheid en dikte van het voorland aanzienlijk kleiner effect hebben op de kritieke stijghoogte dan het effect van de doorlatendheid van de watervoerende zandlaag.

Het modelleren van het voorland heeft in ieder geval significant effect op de demping van de stijghoogte in de watervoerende laag. Demping is meer dan 1 m en gemiddeld 1,5 m. Dergelijke demping van de stijghoogte kan circa 15 m tot 20 m kwelweglengte verkleining

betekenen. De variatie in de doorlatendheid van het voorland en de dikte heeft slechts gering effect op de stijghoogte verschillen.

In het geval van een brede strang in het voorland (gevoeligheidsanalyse van de fase 2), is de demping nog steeds significant en kan zorgen voor een wezenlijke verkorting van de benodigde kwelweglengte. Waarneembare demping van de stijghoogte is dan nog steeds bijna 1 m. De veilige inschatting van de mogelijke kwelweglengte reductie is in dit geval circa 10 m tot 15 m.

6 D- Geo Flow berekeningen

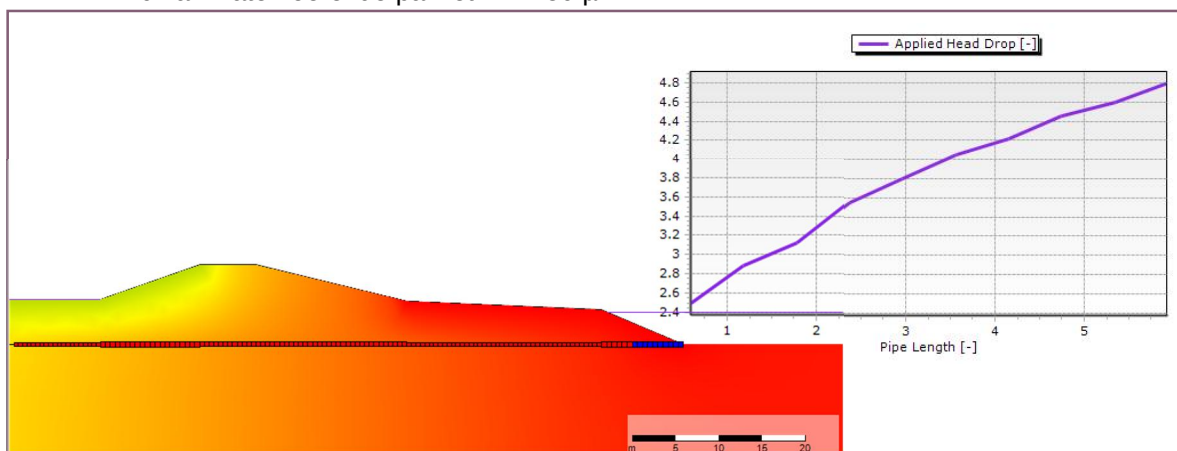
Voor twee doorsneden is een D-Geo Flow piping berekening uitgevoerd. De twee doorsneden die hiervoor geselecteerd zijn komen overeen met de doorsneden waarvoor succesvol de doorlatendheid van het watervoerende pakket zijn bepaald in de geohydrologische berekeningen. Dit zijn de doorsneden bij DP47+00 en DP53+00. In deze D-Geo Flow berekeningen is gekozen geen meerlaagsheid³ toe te passen, omdat voor de gekalibreerde doorsnedes geen HPT-sonderingen voorhanden zijn en het bepalen van de doorlatendheidsparameters voor diverse lagen berust op vele aannames. Met deze keuze ligt het vergelijken van de resultaten in de lijn met de resultaten uit de berekeningen met analytisch regel van Selmeijer. De specifieke uitgangspunten voor de berekeningen zijn hier verder separaat opgenomen.

De modellen zijn stationair berekend, gezien de niet stationaire module van D- GeoFlow door Deltares (ontwikkelaar) als niet geheel betrouwbaar is bestempeld.

6.1 Berekening bij doorsnede DP47+00

In de schematisering van de situatie ter plaatse van DP 47+00 zijn conservatieve uitgangspunten gehanteerd voor zowel de doorlatendheid van het in dit geval kleiige voorland als de dikte van het voorland. Verder is rekening gehouden met een anisotropie factor van 2. De volgende uitgangspunten zijn gehanteerd bij de berekening voor DP47+00 in lijn met de uitgangspunten gehanteerd in de geohydrologische analyse uit bijlage 1:

- Watervoerende pakket:
 - o Dikte 12,5 m
 - o Doorlatendheid $kh=80,0$ m/d en $kv=40$ m/d
- Voorland:
 - o Lengte 75 m
 - o Dikte 2 m
 - o Doorlatendheid 1,0 m/d
- Strang:
 - o Doorlatendheid $kh=10,0$ m/d en $kv=10$ m/d
- Randvoorwaarden:
 - o Maatgevend hoogwater NAP +9,21 m
 - o Polderpeil NAP +4,67 m
- D70 van watervoerende pakket: 250 μ m



Figuur 6-1 Pipe groei DP47+00 stationaire situatie met ontwikkelde pipelengte 5,9 m

³ Effect van de meerlaagsheid is onderzocht tijdens de scopebepaling fase in Bijlage 4

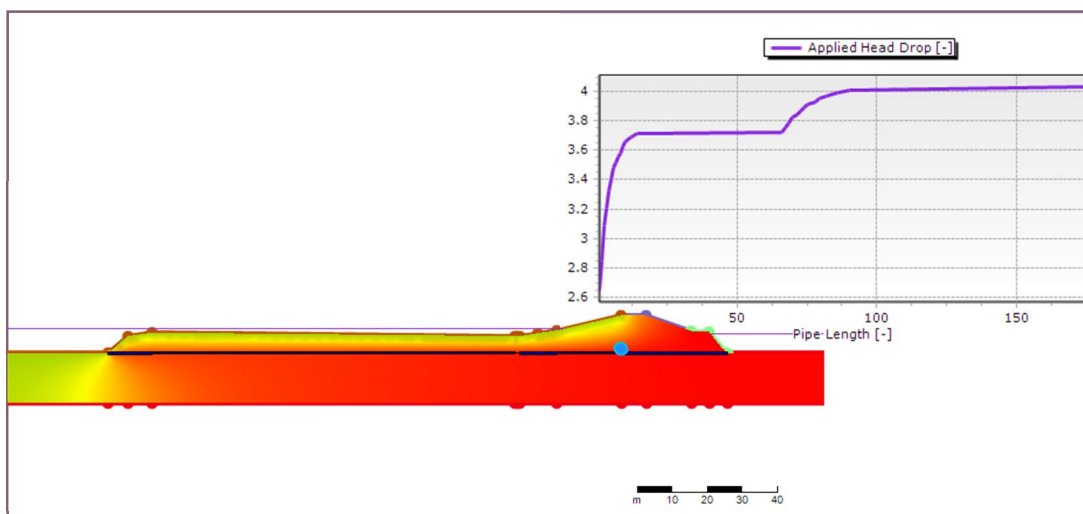
Uit de berekening met de buitenrandvoorwaarde van het maatgevend hoogwater (NAP +9,21 m) volgt dat er geen doorbraak is van de pipe, de stijghoogte onder de buitenteen bedraagt dan NAP +7,50 m. Het maatgevende hoogwater is handmatig verhoogd tot NAP +11,47 m om te achterhalen waar het kritieke verval ligt. Deze is na berekening gevonden op 6,8 m. De stijghoogte bij de buitenteen uit de berekening is dan NAP +8,49 m. Het kritieke verval ligt hoger dan het optredende verval ($9,21 - 4,67 = 4,54$ m) en daarmee voldoet de doorsnede. Verhouding tussen het optredend verval en kritiek verval is $F_s=1,49$. Hiermee is hetzelfde mate van de veiligheid aanwezig als in de Sellmeijer analyse van de scopebepaling

Uit de pipinganalyse tijdens de scopebepaling (F_s ; eis piping=1,49) met regel van Sellmeijer was uitgekomen dat ter plaatse van deze doorsnede een kwelweglengte tekort van 11,5 m aanwezig is. Met de D-Geo Flow analyse blijkt dat de kwelweglengte tekort met minimaal circa 12 m is te reduceren.

6.2 Berekening bij doorsnede DP53+00

In de schematisering van de situatie ter plaatse van DP 53+00 zijn conservatieve uitgangspunten gehanteerd voor zowel de doorlatendheid van het voorland als de dikte van het voorland. Verder is rekening gehouden met een anisotropie factor van 2. De volgende uitgangspunten zijn gehanteerd bij de berekening voor DP53+00 in lijn met de uitgangspunten gehanteerd in de geohydrologische analyse uit bijlage 1:

- Watervoerende pakket:
 - o Dikte 14,6 m
 - o Doorlatendheid $kh=80$ m/d en $kv=40$ m/d
- Voorland:
 - o Lengte 125 m
 - o Dikte 2 m
 - o Doorlatendheid 1,0 m/d
- Strang:
 - o Doorlatendheid $kh=10,0$ m/d en $kv=10$ m/d
- Randvoorwaarden:
 - o Maatgevend hoogwater NAP +9,18 m
 - o Polderpeil NAP +4,67 m
- D70 van watervoerende pakket: 180 μ m



Figuur 6-2 Pipe groei DP53+00 stationaire situatie met pipelengte 175 m (pipe is doorgebroken)

Uit de berekening met de buitenrandvoorwaarde van het maatgevend hoogwater (NAP +9,18 m) volgt dat hier een doorbraak is van de pipe optreedt. Het kritieke verval is 4,18 m.

Het kritieke verval ligt lager dan het optredende verval ($9,187 - 4,67 = 4,51$ m). Verhouding tussen het optredend verval en kritiek verval is $F_s = 0,93$ en daarmee voldoet de doorsnede niet aan gestelde veiligheidseis ($F_s = 0,93 < 1,49 = F_{s; \text{eis piping}}$).

Uit de pipinganalyse tijdens de scopebepaling ($F_{s; \text{eis piping}} = 1,49$) met regel van Sellmeijer was uitgekomen dat ter plaatse van deze doorsnede een kwelweglengte tekort van 16,5 m aanwezig is. Met de D-Geo Flow analyse blijkt dat de kwelweglengte tekort niet te reduceren is. Wel is in het D-Geo Flow model een hogere doorlatendheid gemodelleerd dan in de Sellmeijer analyse.

In het geval de strang/sloot wordt gedempt met een slecht doorlaatbaar materiaal (k van 0,1 m/d), dan wordt een kritiek verval van 4,26 m gevonden, dit ligt wel dichterbij de gevonden waarde met een hoge doorlatendheid, maar door de breedte van de sloot van maar 1 m is dit verschil relatief klein.

7 Conclusies

Het analyseren van de peilbuisdata ten behoeve van een beter inzicht in de doorlatendheid van het watervoerend pakket en effect van het voorland is van toegevoegde waarde voor een betrouwbaarder beeld van de opgave. Hiervoor zijn onder andere nog aanvullende peilbuisraaien na fase 1 van de optimalisatie geplaatst. Aanbeveling is om de data van de monitoring in de ontwerpfase te analyseren en verwerken in een gekalibreerd geohydrologisch model.

Door gebruik maken van een geavanceerde analyse van piping met D-Geo Flow, waar het effect van het voorland meegenomen wordt kan de piping opgave verkleind worden. De met regel van Sellmeijer afgekeurde profielen bij DP 47 (oorspronkelijk tekort circa 12 m) geen doorbraak van de pipe ondervindt (veiligheid 1,49). Bij DP53 (oorspronkelijk tekort circa 17 m) is de opgave niet geheel verdwenen. In D-GeoFlow is ook inzichtelijk wat is de lengte van de ontwikkelde pipe, zoals aangegeven in de figuren in hoofdstuk 6.

Aan de hand van de bevindingen kan (veilig) aangenomen worden dat de opgave met geavanceerde aanpak (meenemen van het effect van het voorland) met circa 12 à 15 gereduceerd kan worden. Deze reductie is de basis voor het opstellen van de werkhypothese ten aanzien van de reservering van de ruimte voor de te nemen maatregelen.

7.1.1 Aanbevelingen voor ontwerpfase

Op basis van het uitgevoerde onderzoek bevelen wij aan om:

- De meetresultaten van de raai DP95 te verifiëren op basis van de extra informatie ten aanzien van de drainage van de sportvelden zodat ook voor deze raai een betrouwbaar geohydrologisch model gemaakt kan worden.
- Analyseren alle peilbuisraaien (van fase 1 en 2 optimalisatie) en gebruiken voor het maken van een gevalideerd geohydrologisch model (aanscherping van de bestaande SEEP-W of Modflow model), waarmee kan de inschatting van de doorlatendheden van de zandlagen met meer spreiding over het projectgebied plaats vinden.
- Gebruik van de resultaten van bovenstaande analyse voor de bepaling van de verwachting van de stijghoogte in de watervoerende zandlaag ter plaatse van de buitenteen, met de aanpassing van de invoer in de Sellmeijer ontwerp som (in plaats van WBN waarde).
- D Geo Flow analyse uitvoeren voor de doorsneden met grootste opgave en hierbij gebruik maken van de analyse van de meerlaagsheid voor de dwarsdoorsneden waar de HPT-sonderingen beschikbaar zijn. Dit in combinatie met de
- Ten behoeve van het onderzoek naar de betrouwbaarheid van de gebruikte instrumenten (D-Geo Flow) is aanbevolen is om hier een nader onderzoek naar te verrichten. Mogelijk zal een laboratorium schaalonderzoek (mogelijk ook centrifugeonderzoek) uitkomst bieden om de D-Geo Flow schematisaties van het effect van een voorland met verschillende openingsgroottes navolgbaar te valideren.

7.1.2 Aanbevelingen algemene kennisontwikkeling

- Aanbevolen is om meer onderzoek te doen naar de verschillen in de resultaten uit de slugtesten (of vergelijkbaar) en de pompproeven, als ook het zoeken van een eenduidige correlatie van de Q/P waarde met de doorlatendheden van de watervoerende lagen. Mogelijk is hier vanwege de schaafeffecten in

infiltratieproeven/slugtesten/constant-head testen aan te bevelen gebruik te maken van k waarden welke volgen uit responsanalyses van peilbuizen (als vervanging van de k_D volgens REGIS).

- Analyseren het respons van de dieper in het dijklichaam geplaatste peilbuis (DP 53) die gedurende verloop van hoogwaterperiode lijkt effect van indringing te vertonen

7.2 Werkhypothese op basis van de optimalisatie

Aan de hand van de bijgestelde opgave van de oorspronkelijke scope is ten behoeve van de ruimte reservering in het ontwerp de volgende werkhypothese toegepast:

- Vakken waar we er zeker van zijn dat er geen pipingmaatregel nodig is: is geen ruimtereservering voorzien.
- Vakken waar we er niet geheel zeker of de pipingmaatregel wegvalt of blijft hanteren we een ruimtereservering van 10 m voor eventueel kwelweglengtetekort.
- Vakken waar we er zeker van zijn dat er een pipingmaatregel blijft, echter zal kleiner zijn dan eerder uitgerekend hanteren we 25 meter ruimtereservering voor kwelweglengtetekort.
- Vakken waar we er zeker van zijn dat we een kwelweglengtetekort hebben van 50 m. of meer maximaliseren we de ruimtereservering voor deze trajecten op 50 m.

Waar nodig geven we aan waar we met de kopslootdemping kwelweglengtetekort kunnen opheffen. Uitwerking van de werkhypothese is opgenomen in Tabel 7-1.

Tabel 7-1 Uitwerking Werkhypothese piping t.b.v. effectbeoordeling kansrijke alternatieven

Dijkvak	Van	Tot	Lengte	STPH Piping
1	0-65	0+50	135	-
2	0+50	17+95	1745	dp 1+60 - 6+50, 25 m reserveren; dempen kopsloten bij DP3 en DP5 dp 6+50 - 7+50, geen opgave dp 7+50 - 14+50, 25 m reserveren; dempen kopsloten bij DP13 dp 17+50 - 17+95, 25 m reserveren. dempen kopsloten DP15-17+95 NB: na dempen vervalt opgave: DP4+50-P5+50 en DP14+50 - 17+50.
3	17+95	34+20	1625	DP17+95-19+50 25 m reserveren en dempen kopsloten bij DP 18-19 DP19+50-23+50 50 m reserveren en dempen kopsloten bij DP 23 DP23+50-28+50 25 m reserveren en dempen kopsloten bij DP 24, DP28- DP28+50 DP28+50-33+50 50 m reserveren en dempen kopsloten bij DP28+50- DP31 en bij DP 33 DP 33+50 34+20: geen opgave NB: geen opgave na dempen: DP25+50-26+50 en DP27+50 -28+50; DP30+50- DP 33+50
4	34+20	39+30	510	DP 34+20-35+50: 10 m reserveren DP35+50-36+50: geen opgave DP 36+50-37+50: 25 m reserveren DP 37+50-38+50: 10 m reserveren DP38+50-39+30: geen opgave
5	39+30	42+10	290	dp 39+30 - 40+45: kopsloot dempen en 10 m reserveren. dp 40+45 - 41+40: geen opgave dp 41+40 - 42+10: alleen kopsloot dempen dan geen opgave
6	42+10	50+20	810	dp 42+10 - 43+50: 10 m reserveren ;opgave vervalt na dempen kopsloot bij DP42 en 43 dp 43+50 - 46+50: geen opgave dp 46+50 - 47+50: 10 m reserveren; geen opgave na dempen kopsloot bij DP47 dp 47+50 - 49+50: geen opgave dp 49+50 - 50+20: na dempen kopsloot bij DP 50 vervalt de opgave.
7	50+20	61+45	1125	dp 50+20 - 51+50: na kopsloot dempen vervalt opgave dp 51+50 - 53+50: geen opgave; Bij DP 53: kopsloot dempen. dp53+50 - 56+50: 25 m reserveren. dp56+50 - 59+50: 50 m reserveren dp59+50 - 61+45: geen opgave.
8	61+45	72+25	1080	Dp 61+45 -63+50: geen opgave dp63+50 - 68+50: 10 m reserveren DP68+50-69+50: 50 m reserveren DP69+50-72+25: 10 m reserveren; Bij DP 70 ook kopsloot dempen.
9	72+25	74+50	225	Geheel: 50 m reserveren. En bij DP 74 kopsloot dempen
10	74+50	85+40	1090	DP74+50-DP77+50: 25 m reserveren. DP77+50-DP85+40: 50 m reserveren
11	85+40	86+90	150	Geheel: 50 m reserveren.
12	86+90	89+335	245	Locatie Beermuur
13	89+335	92+60	325	Geheel: 50 m reserveren
14	92+60	96+50	390	dp 92+60 - 94+50: 10 m reserveren, dp94+50-96+50: geen opgave ba sloot dempen bij DP 96
15	96+50	99+70	320	Geen opgave
16	99+70	105+95	625	Geheel: 50 m reserveren

8 Referenties

- [1.] Beoordeling Piping en heave, Dijkversterking Wijk bij Duurstede Amerongen, 28-3-2019, Sweco Arcadis, definitief, pn. 360562 / C03011.000750.0100
- [2.] Optimalisatie rekenregels 'piping' en regionale keringen: invloed maatgevende geohydrologische parameterwaarden, Acacia Water in opdracht van STOWA, concept eindrapportage 1 december 2014
- [3.] Memo Aanpak afleiden verantwoorde ontwerpparameter doorlatendheid o.b.v. HPT resultaten, Fugro, 28-5-2019
- [4.] Schematiseringshandleiding Piping WBI 2017
- [5.] Grondonderzoek, Sterke Lekdijk Wijk bij Duurstede / Amerongen (WAM), Uitwerking Pompproef, Wiertsema-Inpijn-Blokpoel V.O.F.

Bijlage 1 Bepaling bulkdoorlatendheid

OPTIMALISATIE PIPING DIJKVERBETERING WAM

Bepalen bulkdoorlatendheid

Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden

13 FEBRUARI 2020

Contactpersoon

SEBASTIAN HUIZER
Specialist geohydrologie

T +31 (0)88 426 1626
M +31 (0)6 2706 0881
E sebastian.huizer@arcadis.com

Arcadis Nederland B.V.
Postbus 264
6800 AG Arnhem
Nederland

INHOUDSOPGAVE

1	INLEIDING	6
1.1	Aanleiding	6
1.2	Doel	6
1.3	Leeswijzer	6
2	MONITORINGSANALYSES	7
1.1	Monitoringsanalyse meetraai 47	7
1.2	Monitoringsanalyse meetraai 53	7
1.3	Monitoringsanalyse meetraai 95	8
1.4	Samenvatting monitoringsanalyse	8
3	MODEL OPBOUW	12
3.1	Lagen opbouw meetraai 47	12
3.2	Lagen opbouw meetraai 53	13
3.3	Lagen opbouw meetraai 95	14
4	MODEL KALIBRATIE	15
4.1	Meetraai 47	15
4.2	Meetraai 53	16
4.3	Meetraai 95	17
4.4	Onzekerheden en gevoeligheid	18
5	DISCUSSIE EN CONCLUSIE	20
6	REFERENTIES	22
	COLOFON	26

1 INLEIDING

1.1 Aanleiding

Voor het project Sterke Lekdijk wordt circa 55 km aan primaire wateringen versterkt. Arcadis en Sweco werken binnen dit project gezamenlijk aan o.a. het traject tussen Wijk bij Duurstede – Amerongen (WAM). De focus in dit project ligt op de toetsing op het faal mechanisme piping. Piping is een mechanisme waarbij water onder de dijk door het onderliggende zandpakket stroomt aan de achterzijde van de dijk opwelt. Het opwellend water kan zand mee transporteren wat op den duur tot falen van de dijk kan resulteren.

Om het risico op piping zo goed mogelijk te kunnen vaststellen is o.a. een betrouwbare schatting nodig van de (horizontale) bulkdoorlatendheid van het eerste watervoerend pakket en de weerstand (i.e. verticale doorlatendheid) van de deklaag. Om hier inzicht in te krijgen is een pomprouf en HPT sondering uitgevoerd, ter plaatse van dijkpaal 35/36. Deze metingen geven lokaal inzicht in de doorlatendheid van het eerste watervoerende pakket. Ook is er een monitoringnetwerk opgezet met peilbuizen in meetraaien, die parallel op de rivier staan. Dit monitoringsnetwerk is operationeel sinds januari 2019. De meetraaien bestaan uit een twee peilbuizen met een filter in het eerste watervoerende pakket (t.p.v. de binnen- en buitenteen van de dijk), één in de kruin van de dijk, en één in de deklaag ter plaatse van de binnenteen.

1.2 Doel

Het doel van dit project is om aan de hand van de peilbuismetingen in het traject tussen Wijk bij Duurstede – Amerongen (WAM) de bulkdoorlatendheid van het eerste watervoerende pakket te bepalen. Dit onderzoek richt op de drie meetraaien in dit traject, namelijk 47, 53 en 95. Omdat er geen inundatie van het voorland is geweest in de meetperiode van de deze raaien kan de deklaagweerstand alleen indicatief worden geschat.

1.3 Leeswijzer

De werkzaamheden zijn beschreven en onderverdeeld in de volgende stappen:

1. Inleiding
2. Monitoringsanalyse
3. Modelopbouw
4. Model kalibratie
5. Discussie en conclusies

In hoofdstuk 2 is de monitoringsanalyse beschreven. Deze dient om inzicht te krijgen in het grondwatersysteem, waarbij gekeken is of de fluctuatie van de grondwaterstand verklaard kan worden aan de hand van neerslag, verdamping en de rivierwaterstand. Om de bulkdoorlatendheid en de deklaagweerstand in te schatten is een niet-stationair 2D grondwatermodel opgezet per meetraai. De opbouw van de modellen is beschreven in hoofdstuk 3 (Modelopbouw). Vervolgens is een niet-stationaire kalibratie uitgevoerd met PEST (Parameter Estimation) om meer inzicht te krijgen in de grootte van de bulkdoorlatendheid van het eerste watervoerende pakket en (waar mogelijk) de weerstand van de deklaag. Om de gevoeligheid van het model – en de mogelijke variatie in de bepaalde bulkdoorlatendheid en deklaagweerstand – uit te lichten is aansluitend een onzekerheidsanalyse uitgevoerd. De resultaten hiervan zijn beschreven in hoofdstuk 4 (Model kalibratie). Tot slot, in hoofdstuk 5 zijn de conclusies en enkele discussie punten beschreven.

2 MONITORINGSANALYSES

De eerste stap van dit onderzoek is om de gemeten grondwaterstanden en stijghoogten per meetraai te analyseren in het programma Menyanthes. Met Menyanthes kan ingeschat worden wat de kwaliteit van de meetreeksen is, en kan inzicht worden verkregen in de oorzaak van de fluctuaties in de waargenomen grondwaterstanden. De verklarende variabelen die zijn gebruikt voor de tijdreeksanalyses met Menyanthes zijn:

1. Gemeten rivierwaterstanden bij de stuw van Amerongen.
2. Neerslag van het KNMI station in Amerongen.
3. Referentiegewasverdamping van het KNMI station in Deelen.

Hieronder staan de resultaten per meetraai beschreven.

2.1 Monitoringsanalyse meetraai 47

Figuur 1 geeft de in meetraai 47 gemeten grondwaterstanden en stijghoogte weer, en Bijlage 1 de door Menyanthes reproduceerde tijdreeksen.

De tijdreeksmodellen voor beide peilbuizen in het eerste watervoerend pakket (AV DP47+003 BI WVP en AV DP47+005 BU WVP) resulteerde in een verklaarde variantie (EVP) boven de 95%, RMSE van 0.05 m en een drainagebasis tussen de 0.8 en 1.0 m. Dit betekent dat de gemeten fluctuatie in de stijghoogte (bijna) geheel verklaard kan worden met de rivierwaterstand. Dit wijst erop dat de grondwaterstand sterk beïnvloed wordt door de rivier.

De gemeten grondwaterstanden in de deklaag (AV DP47+003 BI DL) kunnen grotendeels verklaard door neerslag en verdamping. Hiermee kan 90% van de variantie verklaard worden, met een RMSE van 0.12 m en een drainagebasis van 4.2 m. Dit wijst erop dat de waterstand in de deklaag voornamelijk door neerslag en verdamping bepaald wordt.

Voor de metingen in de kruin kon geen betrouwbaar tijdreeksmodel opgezet worden (de EVP bleef onder de 70%). Opvallend zijn de (extreme) stijging van de grondwaterstand in vergelijking met de deklaag na neerslag. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de berging in de dijk door compactie lager is dan in het omliggende gebied. Daarnaast reageert de grondwaterstand in de deklaag en kruin anders gedurende de zomer. In de zomer maanden stijgt de grondwaterstand minder na neerslag. De tijdreeksmodellen bevestigen dit en overschatten de response op neerslag gedurende de zomer maanden.

2.2 Monitoringsanalyse meetraai 53

Figuur 2 geeft de in meetraai 53 gemeten grondwaterstanden en stijghoogte weer, en Bijlage 2 de door Menyanthes reproduceerde tijdreeksen.

De tijdreeksmodellen voor beide peilbuizen in het eerste watervoerend pakket (AV DP53+042 BI WVP en AV DP53+045 BU WVP) resulteerde in een verklarende variantie (EVP) boven de 95%, RMSE van 0.03 m en een drainagebasis van 1.3 m. Dit betekent dat de gemeten fluctuatie in de stijghoogte (bijna) geheel verklaard kan worden met de rivierwaterstand. Dit wijst erop dat de stijghoogte sterk beïnvloed wordt door de rivier.

De gemeten fluctuatie van de grondwaterstanden in de deklaag (AV DP53+043 BI DL) kan voor 90% verklaard (EVP) worden met neerslag en verdamping, met een RMSE van 0.1 m en een drainagebasis van 2.5 m. Dit wijst erop dat de grondwaterstand in de deklaag vooral door neerslag en verdamping bepaald wordt. Daarnaast reageert de grondwaterstand in de deklaag anders gedurende de zomer. In de zomer maanden stijgt de grondwaterstand minder na neerslag. De tijdreeksmodellen bevestigen dit en overschatten de response op neerslag gedurende de zomer maanden, zie Bijlage 1.

Voor de metingen in de kruin kon een tijdreeksmodel opgezet worden met een EVP van boven de 95%, met een RMSE van 0.01 m en een drainageniveau van 3.3 m. De parameters van het tijdreeksmodel met alleen neerslag en verdamping waren echter niet realistisch, met een drainagebasis van -34.6 m en een evaporatie fractie van 0.08. Bovendien vertoonde deze meetreeks nauwelijks variaties door te tijd vertoont. Om deze reden wordt dit tijdreeksmodel als niet betrouwbaar beschouwd.

2.3 Monitoringsanalyse meetraai 95

Figuur 3 geeft de in meetraai 95 gemeten grondwaterstanden en stijghoogte weer.

De tijdreeksmodellen voor de peilbuizen in het eerste watervoerend pakket (AV DP95+028 BI WVP en AV DP95+029 BU WVP) resulteerde in een verklaarde variantie (EVP) boven de 90%, RMSE tussen 0.04 en 0.05 m en een drainagebasis tussen de 0.9 en 1.3 m. Dit betekent dat de gemeten fluctuaties in de stijghoogte (bijna) geheel verklaard kan worden met de rivierwaterstand, en dit wijst erop dat de stijghoogte sterk beïnvloed wordt door de rivier. Opvallend is het stijghoogte verschil van circa 0.2 m tussen deze twee peilbuizen in het watervoerend pakket (de afstand tussen de peilbuizen circa 30 m). Ook wordt de stijghoogte gemeten in AV DP95+029 BU WVP minder goed verklaard door de rivierwaterstand (EVP was ongeveer 10% lager), mogelijk staat de filterstelling van deze peilbuis niet volledig in het watervoerende pakket.

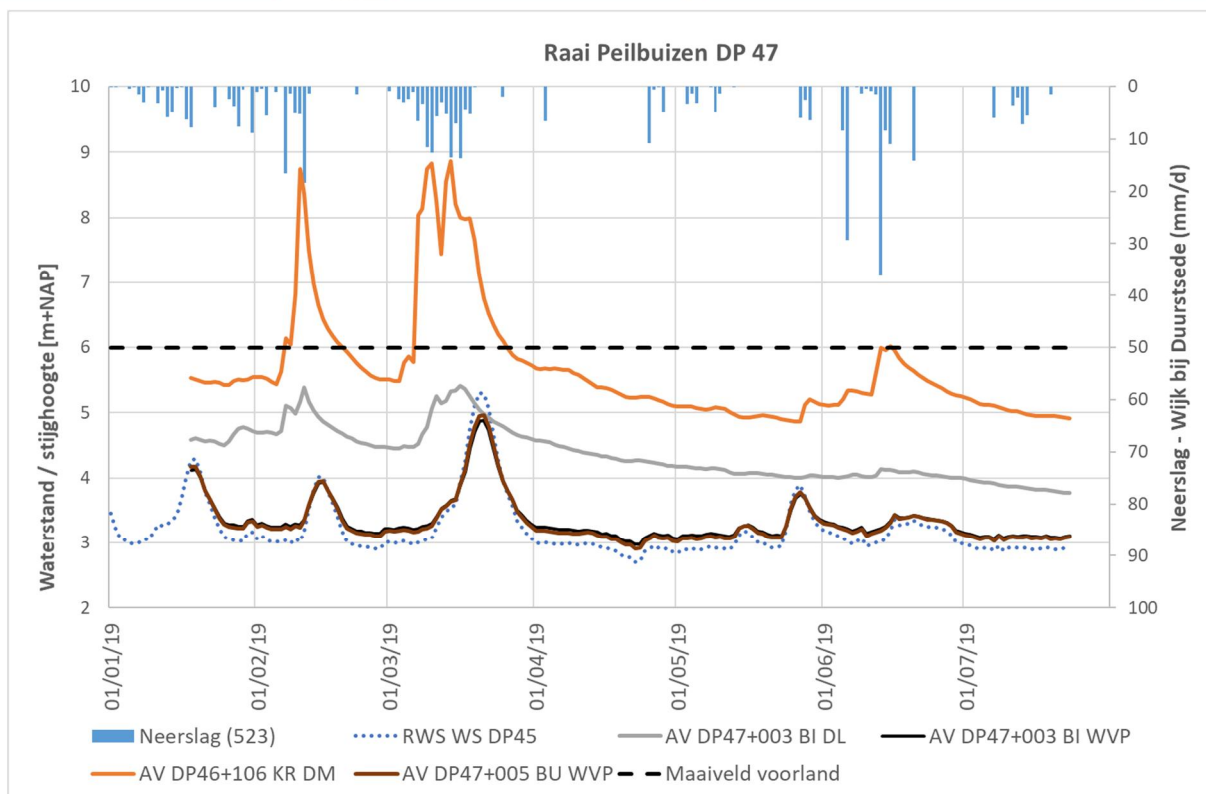
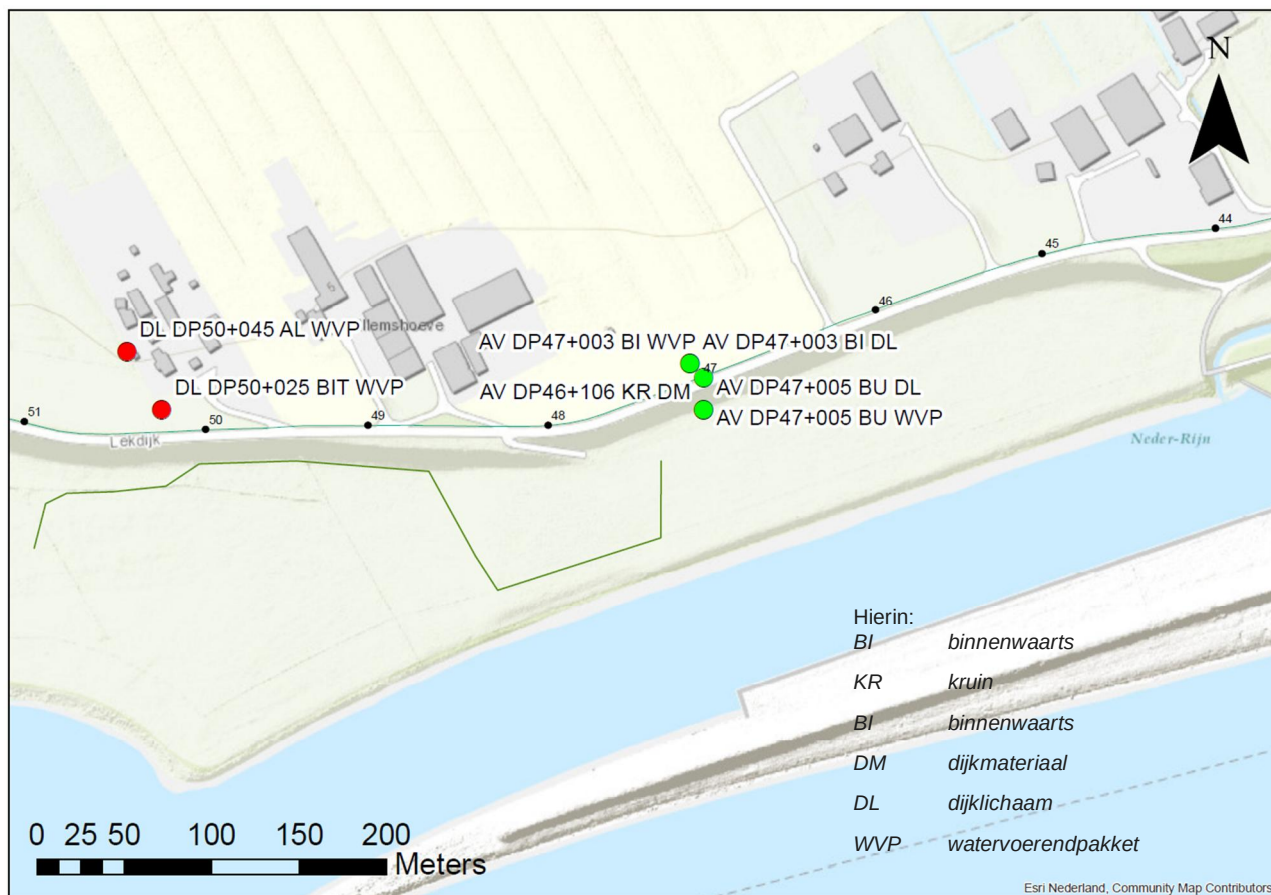
De gemeten grondwaterstanden in de deklaag (AV DP95+028 BI DL) kunnen grotendeels verklaard worden door neerslag en verdamping. Hiermee kan 85% van de variantie verklaard worden met een RMSE van 0.08 m en een drainagebasis van 3.6 m. Dit wijst erop dat de grondwaterstand in de deklaag voornamelijk door neerslag en verdamping bepaald wordt.

Voor de metingen in de kruin kon tijdreeksmodel opgezet worden met een EVP boven de 90%, RMSE van 0.08 m en drainageniveau van 5.5 m. Het merendeel van de variantie kon verklaard worden met neerslag en verdamping. Opvallend van deze reeks is dat de stijghoogte circa 2.5 meter boven het waterpeil in de deklaag ligt. Mogelijk heeft zich hier een schijnwaterstand gevormd. Daarnaast reageert de grondwaterstand in de deklaag en kruin anders gedurende de zomer. In de zomer maanden stijgt de grondwaterstand minder na neerslag. De tijdreeksmodellen bevestigen dit en overschatten de response op neerslag gedurende de zomer maanden, zie Bijlage 1.

2.4 Samenvatting monitoringsanalyse

De monitoringsanalyse heeft de volgende inzichten gegeven:

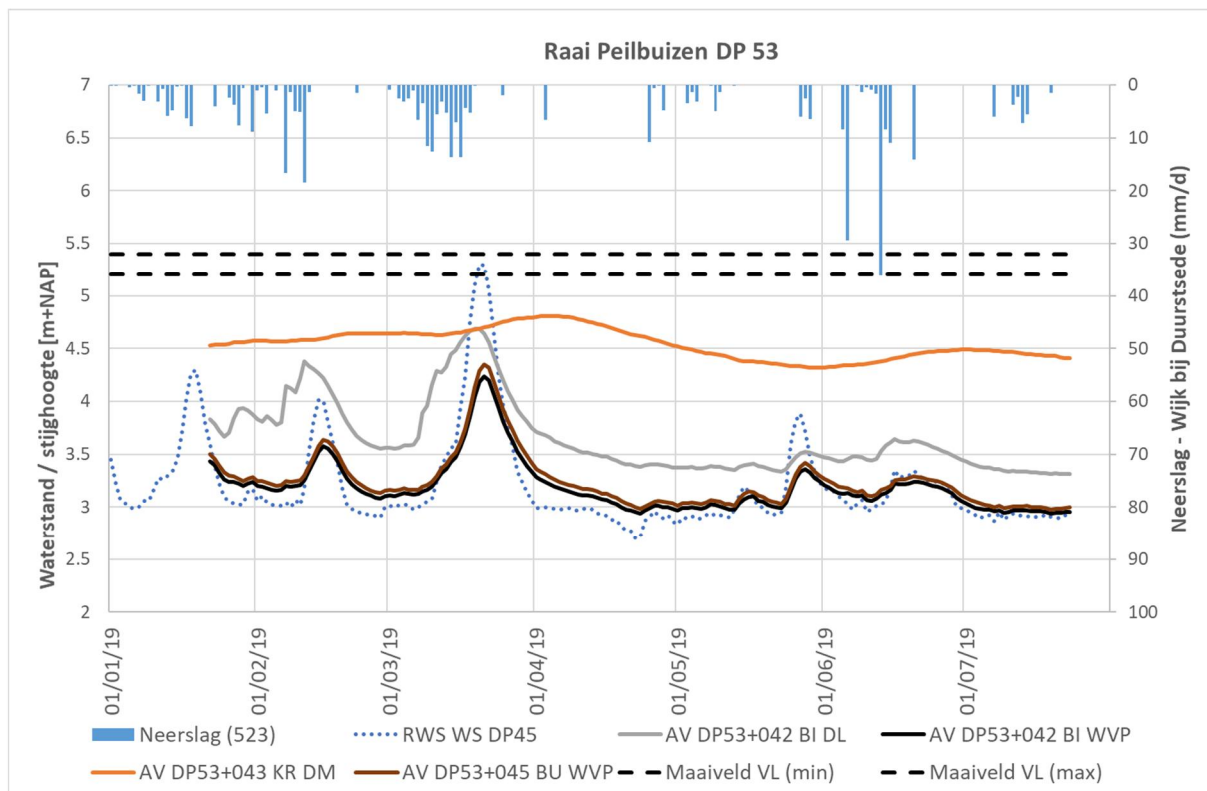
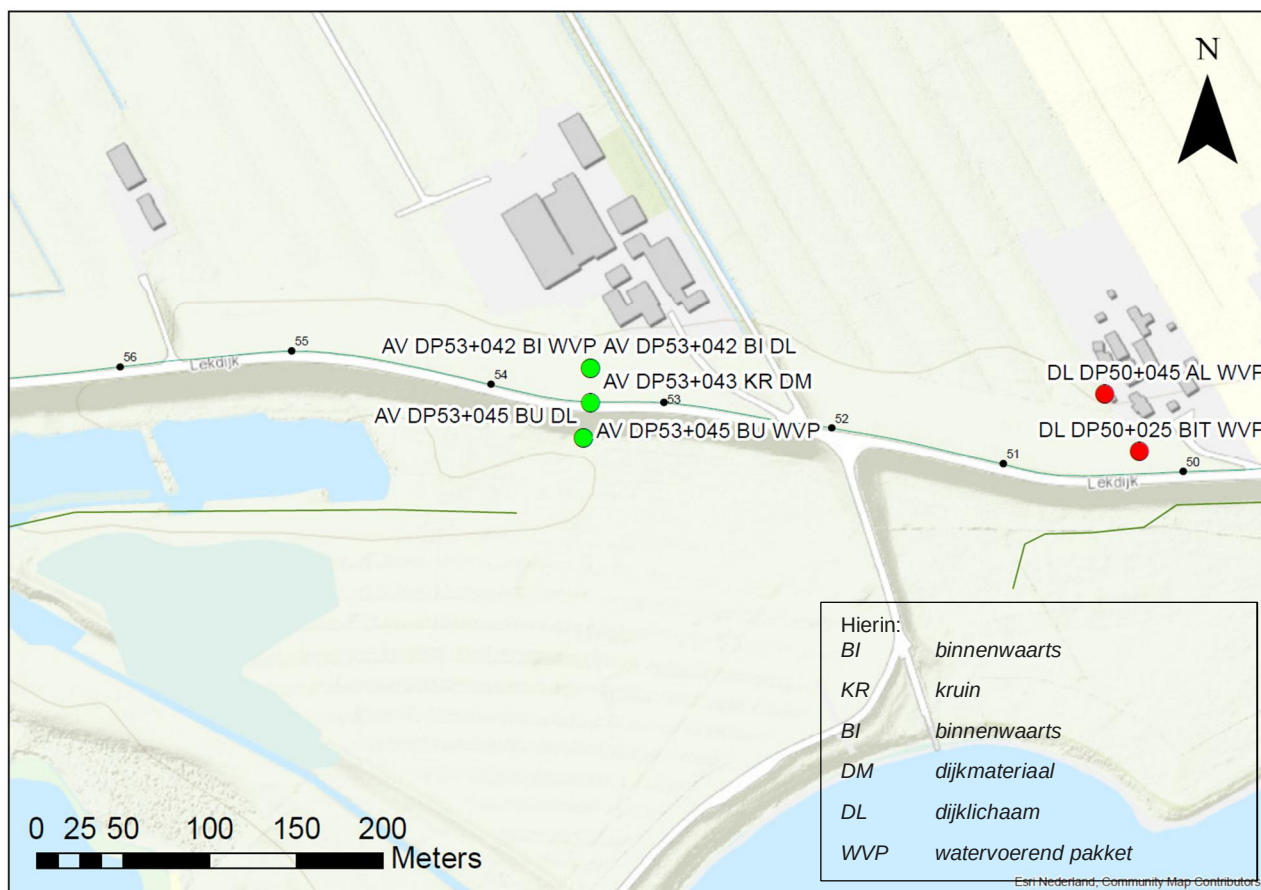
1. De peilbuizen met een filter in het eerste watervoerende pakket kunnen bijna geheel verklaard worden door de rivierwaterstand. Opmerkelijk is het verhang tussen de twee peilbuizen van meetraai 95. Hier wordt in het eerste watervoerende pakket gemiddeld een stijghoogte verschil van circa 0.2 m waargenomen, over een afstand van 30 m. Voor meetraai 47 en 53 was dit echter maar enkele centimeters. Ook worden de grondwaterstanden van DP95+029 BU WVP minder goed verklaard door de rivierwaterstand, ondanks dat deze peilbuis dichterbij de rivier staat.
2. Peilbuizen in deklaag bij de binnenteen vertonen een vergelijkbare meetreeks. De grondwaterstanden worden bepaald door neerslag en verdamping. De tijdreeksmodellen overschatten de response in de zomermaanden. Dit moet meegenomen worden gedurende de interpretatie van de modelresultaten.
3. Grondwaterstanden in de kruin lijken bepaald te worden door neerslag en verdamping. Er vormt zich een opbolling in de kruin. In de kruin van meetraai 95 lijkt een schijngrondwaterspiegel gevormd te zijn. Echter, is geen duidelijk vergelijkbaar patroon zichtbaar in de meetreeksen voor dijkruinen.



Figuur 1

Boven: Overzicht van de peilbuizen in raai 47.

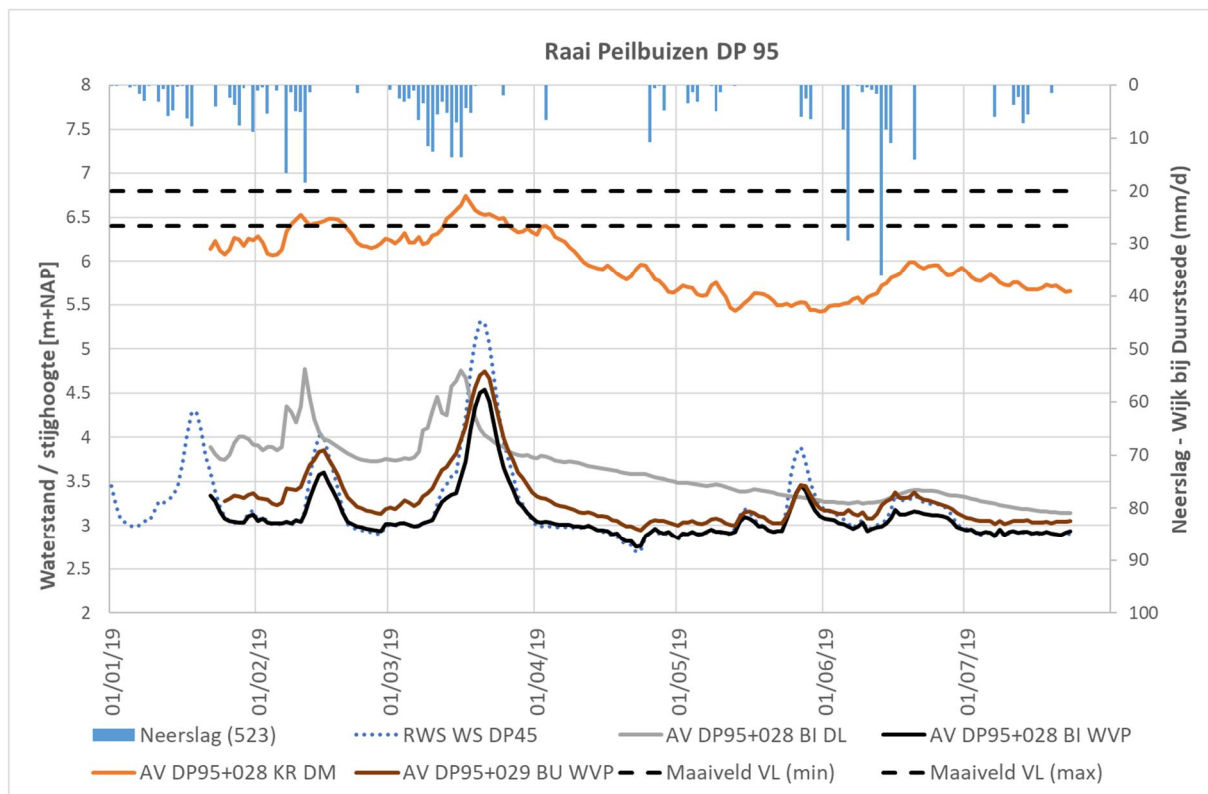
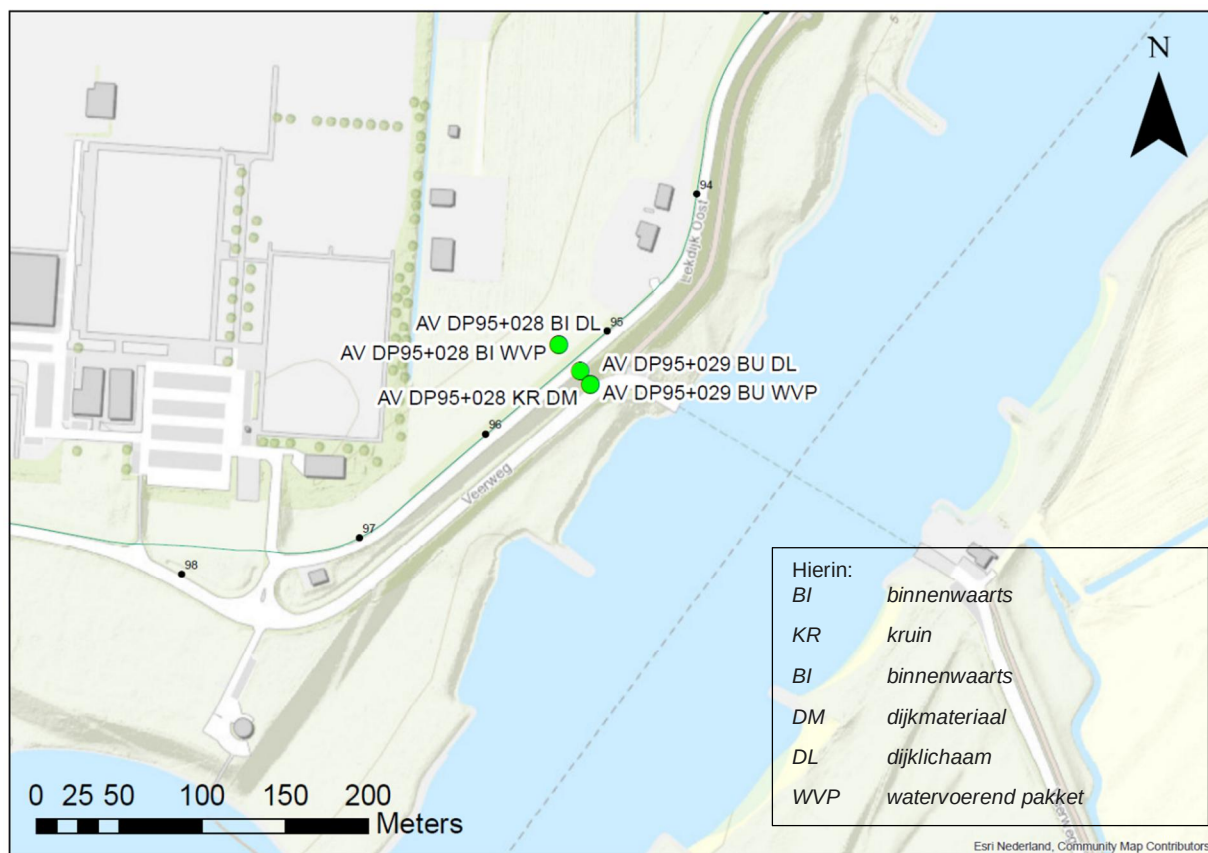
Onder: Gemeten rivierwaterstand voor Amerongen beneden de stuw (RWS DP45), grondwaterstand in de peilbuizen en hoogte van het maaiveld in het voorland en neerslag.



Figuur 2

Boven: Overzicht van de peilbuizen in raai 53.

Onder: Gemeten rivierwaterstand voor Amerongen beneden de stuw (RWS DP45), grondwaterstand in de peilbuizen en hoogte van het maaiveld in het voorland.



Figuur 3

Boven: Overzicht van de peilbuizen in raai 95.

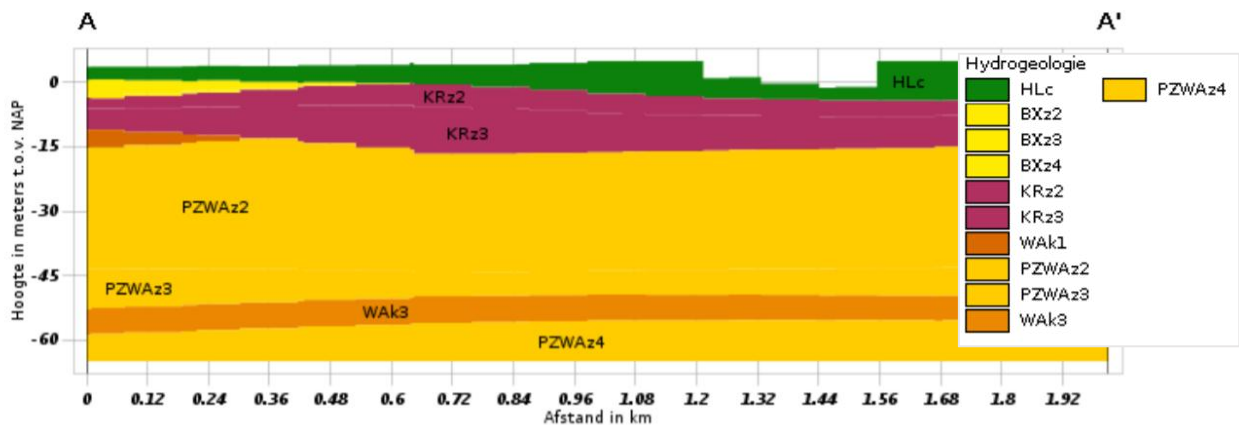
Onder: Gemeten rivierwaterstand voor Amerongen beneden de stuw (RWS DP45), grondwaterstand in de peilbuizen en hoogte van het maaiveld in het voorland.

3 MODEL OPBOUW

Voor het inschatten van de bulkdoorlatendheid en deklaagweerstand is een niet-stationair 2D grondwatermodel opgezet per meetraai. De modellen zijn doorgerekend voor de periode 01-01-2018 tot 29-07-2019. Hierbij is het eerste jaar (2018) gebruikt als inlooperperiode. De niet stationaire componenten van het model bestaan uit de grondwateraanvulling en de rivierwaterstand:

- **Grondwateraanvulling:** De grondwateraanvulling is bepaald met dag gemiddelde waarden voor neerslag en de potentiële verdamping. Voor neerslag is het KNMI weerstation in Amerongen gebruikt en voor de verdamping het KNMI weerstation in Deelen.
- **Rivierwaterstand:** Voor de rivierwaterstand is gebruik gemaakt van de dag gemiddelde waarde. Deze is bepaald voor het meetpunt bij de stuw van Amerongen, zowel boven- als benedenstrooms.

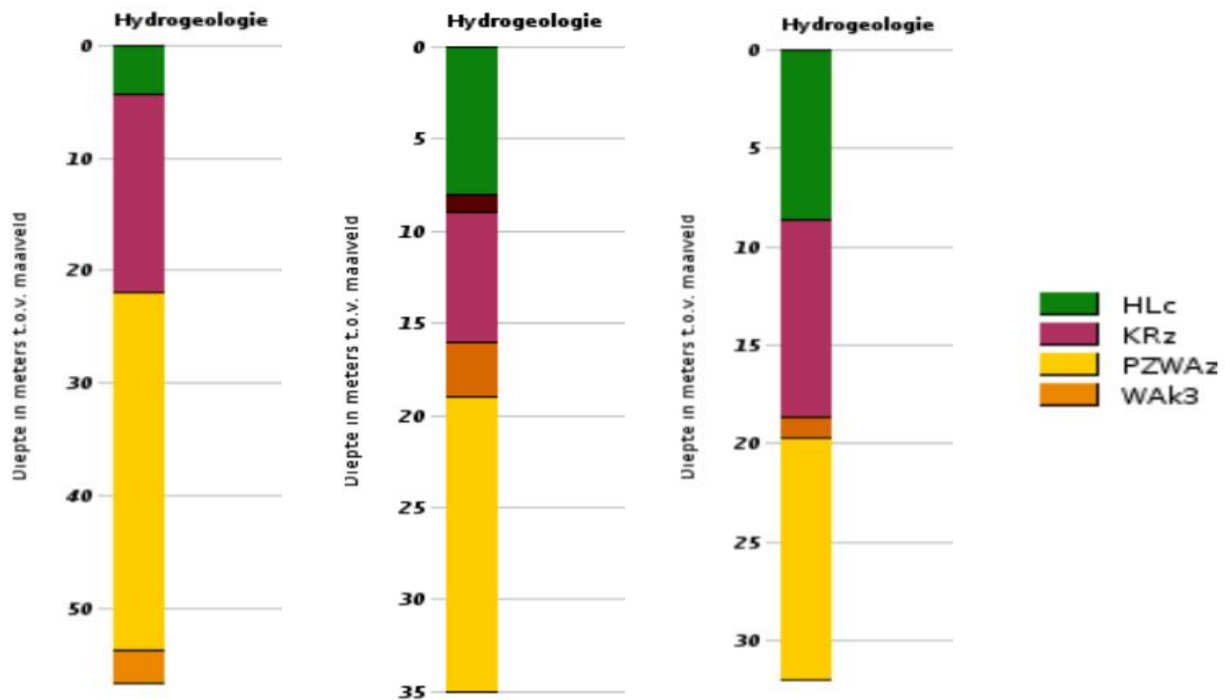
De modellagen opbouw van de gebruikte 2D modellen geven een versimpelde weergave van de ondergrond. De modellagen zijn gebaseerd op het REGIS II model (versie 2.2), GeoTOP (versie 1.3) en de boringen die beschikbaar zijn per meetraai. De modellagen opbouw is per meetraai verder uitgewerkt.



Figuur 4 Doorsnede van het REGIS II model van noord (A) naar zuid (A') voor meetraai 47 en 53.

3.1 Lagen opbouw meetraai 47

- **Deklaag:** De onderkant van de deklaag varieert tussen de -0.5 en +1 m NAP. In het voorland ligt het maaiveld op circa 6 en in het achterland op 4.5 m NAP. De deklaag bestaat (voornamelijk) uit matig siltige klei. Rond 2 tot 0 m NAP is een laag met veen menging aanwezig, hiervoor is geen aparte modellaag opgenomen. Uit de boringen lijkt de deklaag relatief heterogeen, daarom is de deklaag als een modellaag opgenomen.
- **Eerste watervoerend pakket:** Onder de holocene deklaag ligt volgens REGIS II (versie 2.2) de 2e en 3e zandige formatie van Kreftenheye, tot een diepte van circa -11.5 m NAP (zie Figuur 4). Hieronder ligt de formatie van Peize en Waalre tot op een diepte van circa -52 m NAP. Onder de formatie van Peize ligt een slecht/afsluitende doorlatende laag, namelijk de 3e kleiige formatie van Waalre. Het model REGIS II model geeft aan dat de 1e kleiige eenheid van de Waalre formatie (deels) afwezig is. Uit de boringen blijkt echter dat er maar één boorprofiel is waar deze formatie niet in terugkomt, zie Figuur 5. Het is daarom waarschijnlijk dat deze formatie wel aanwezig is, maar niet geheel afsluitend. Om deze reden is deze laag wel opgenomen in het model op een diepte van -11.5 tot -14 m NAP.
- **Modelgrens en drainageniveau:** Op de buitengrens van het model is een vaste stijghoogte opgegeven. Om een betrouwbare schatting van de (gemiddelde) stijghoogte te maken zijn peilbuizen in de omgeving van deze buitengrens geraadpleegd. De stijghoogte aan buitengrens van het model ligt rond de 3.0 m NAP. In het achterland is een drainagepeil ingesteld.



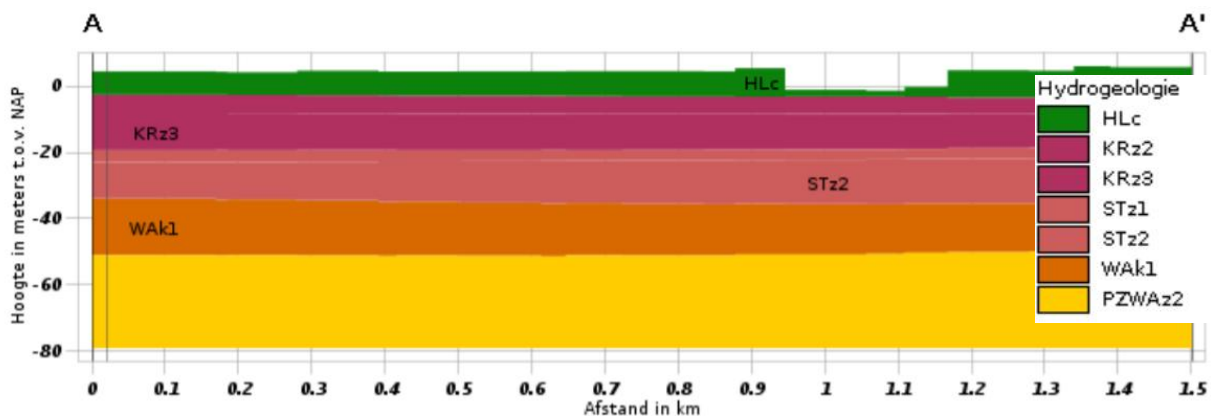
Figuur 5 Relevante geohydrologische boorprofielen rondom meetraai 47 en 53 uit het REGIS II model (DINOLOKET). Niet op alle locaties is de slecht doorlatende Waalre klei aanwezig.

3.2 Lagen opbouw meetraai 53

- **Deklaag:** De onderkant van de deklaag varieert tussen de -2 en -1 m NAP. In het voorland bedraagt de dikte van de deklaag circa 6.5 m en ligt het maaiveld op 5.5 m NAP. In het achterland ligt het maaiveld op circa 4 - 4.5 m NAP. De deklaag bestaat (voornamelijk) uit matig siltige klei. De boringen laten veen lagen zien op variërende hoogtes. Toch lijkt de deklaag relatief heterogeen. Daarom is de deklaag opgenomen als één modellaag.
- **Eerste watervoerend pakket:** Onder de holocene deklaag ligt volgens REGIS II (versie 2.2) de 2e en 3e zandige formatie van Kreftenheye, tot een diepte van circa - 11.5 m NAP. Hieronder ligt de formatie van Peize en Waalre op tot op een diepte van circa - 50 m NAP. Onder de formatie van Peize ligt een slecht doorlatende laag, namelijk de 3e kleiige formatie van Waalre. Het model REGIS II model geeft aan dat de 1e kleiige eenheid van de Waalre formatie (deels) afwezig is. Uit de boringen blijkt echter dat er maar één boorprofiel is waar deze formatie niet in terugkomt, zie Figuur 5. Het is daarom waarschijnlijk dat deze formatie wel aanwezig is maar niet geheel afsluitend. Om deze reden is deze laag wel opgenomen in het model op een diepte van -11.5 tot -14.5 m NAP.
- **Modelgrens:** Op de buitengrens van het model is een vaste stijghoogte opgegeven. Om een betrouwbare schatting van de (gemiddelde) stijghoogte te maken zijn peilbuizen in de omgeving geraadpleegd. De stijghoogte aan buitengrens van het model ligt rond 3.0 m NAP. In het achterland is een drainagepeil ingesteld. Voor meetraai 53 is deze op een hoogte van 2.8 m NAP geplaatst, dit komt overeen met het streefpeil dat gehanteerd wordt door het waterschap. Dit is gedaan aangezien een watergang in het verlengde van de raai loopt.

3.3 Lagen opbouw meetraai 95

- **Deklaag:** De onderkant van de deklaag varieert tussen de -4 en -1.5 m NAP. In het voorland bedraagt de dikte van de deklaag circa 7 m en ligt het maaiveld op 6 m NAP. In het achterland ligt het maaiveld op circa 4.7 m NAP. De deklaag bestaat (voornamelijk) uit matig siltige klei. In het voorland zijn er meerdere zandlagen in de deklaag aanwezig zijn in het voorland. Onder dijk en in het achterland zijn verschillende lagen met organisch materiaal aanwezig. De opbouw is relatief heterogeen vergeleken met de deklaag rond meetraai 47 en 53.
- **Eerste watervoerend pakket:** Onder de holocene deklaag ligt volgens REGIS II (versie 2.2) de 2e en 3e zandige formatie van Kreftenheye, tot een diepte van circa -18 m NAP (zie Figuur 5). Hieronder ligt de 2e formatie van Sterksel tot op een diepte van circa -34 m NAP. De formatie van Sterksel wordt opgevolgd door het 1e kleiige pakket van Waalre.
- **Modelgrens:** Op de buitengrens van het model is een vaste stijghoogte opgegeven. Om een betrouwbare schatting van de (gemiddelde) stijghoogte te maken zijn peilbuizen in de omgeving geraadpleegd. De stijghoogte aan buitengrens van het model ligt tussen de 1.2 en 1.6 m NAP.



Figuur 6 Doorsnede van het REGIS II model van noordwest (A) naar zuidoost (A') voor meetraai 95.

4 MODEL KALIBRATIE

Om de bulkdoorlatendheid van het eerste watervoerende pakket te bepalen en de weerstand van de deklaag te schatten is een modelkalibratie uitgevoerd¹. De gekalibreerde waarden van de deklaag zijn het minst betrouwbaar, dit komt doordat inundatie van het voorland niet is voorgekomen. De kalibratie van de modellen is in twee stappen uitgevoerd:

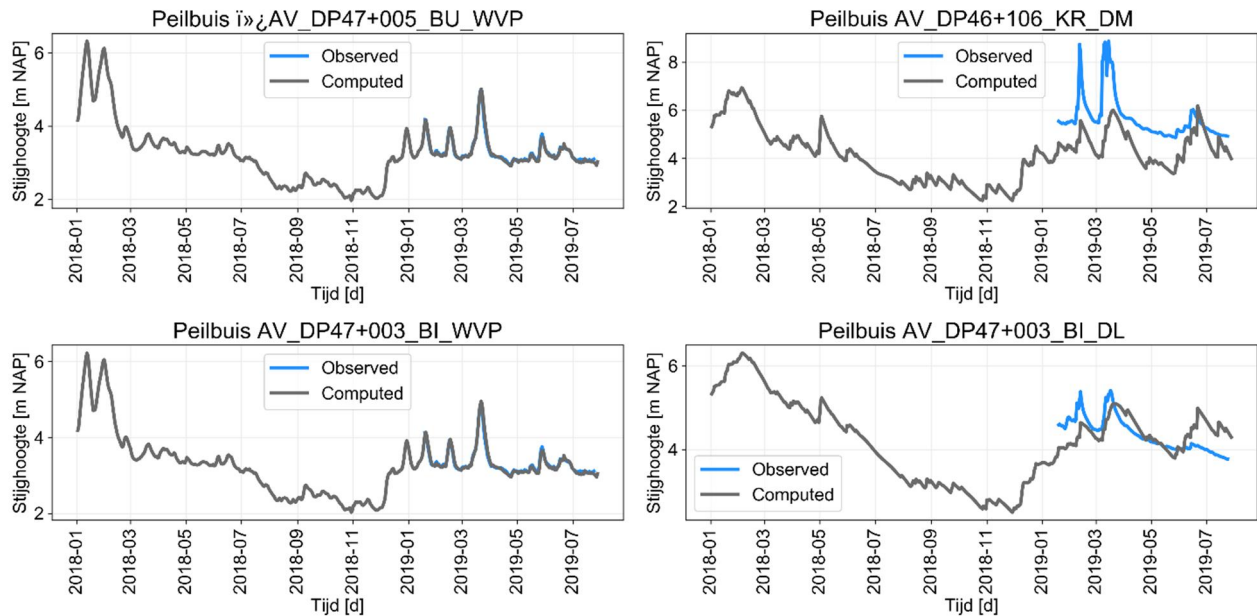
1. Eerst is gezocht naar een representatieve berging coëfficiënt, horizontale en verticale doorlatendheid voor de deklaag. Hierbij is gekeken naar een waarde waarbij de gemiddelde grondwaterstand en de variatie in de grondwaterstand goed overeenkomt met de gemeten waarden. Bij het beoordelen van de grondwatermodellen is in achtgenomen dat seizoen fluctuaties niet met tijdreeksanalyses gereproduceerd konden worden, en dus ook niet met het grondwatermodel.
2. Vervolgens is PEST gebruikt om de doorlatendheid van het eerste watervoerende pakket te bepalen. PEST is een programma dat bijvoorbeeld de doorlatendheid schat door de modelafwijking ten opzichte van de observaties te minimaliseren. Hierbij is gekozen om de horizontale en verticale doorlatendheid aan elkaar te koppelen, hierdoor is (mogelijke) anisotropie niet meegenomen. Dit is gedaan om het aantal variabelen te reduceren en om te voorkomen dat een optimale fit gevonden wordt met onrealistische waarden. Hierbij is de modelafwijking ten opzichte van de observaties uitgedrukt in de Root Mean Squared Error (RMSE) voor elk monitoringspunt.
3. Tot slot is gekeken naar onzekerheden en gevoeligheid in de model resultaten. Deze analyse is bedoeld om inzichtelijke te maken wat de onzekerheid is rondom de modelresultaten.

4.1 Meetraai 47

Figuur 7 laat de modelresultaten zien na de modelkalibratie voor meetraai 47.

- De waargenomen grondwaterstanden in de deklaag werden het best gereproduceerd met een verticale doorlatendheid van 4 mm/dag (AV DP47+003 BI DL: RMSE 0.42 m). De stijghoogte in de kruin kon niet goed gereproduceerd worden.
- De kleinste modelafwijking voor de peilbuizen in het eerste watervoerend pakket is behaald met een doorlatendheid tussen de 81 m/d. Zichtbaar is dat met deze doorlatendheid de fluctuaties in het watervoerend pakket goed gereproduceerd worden (AV DP47+005 BU WVP: RMSE 0.05 m, AV DP47+003 BI WVP: RMSE 0.05 m).

¹ De modellen zijn gekalibreerd o.b.v. de fluctuatie in de waterdruk (stijghoogte) in het onderliggende WVP. Dus de gehanteerde verticale doorlatendheid is een resultaat van de kalibratie.

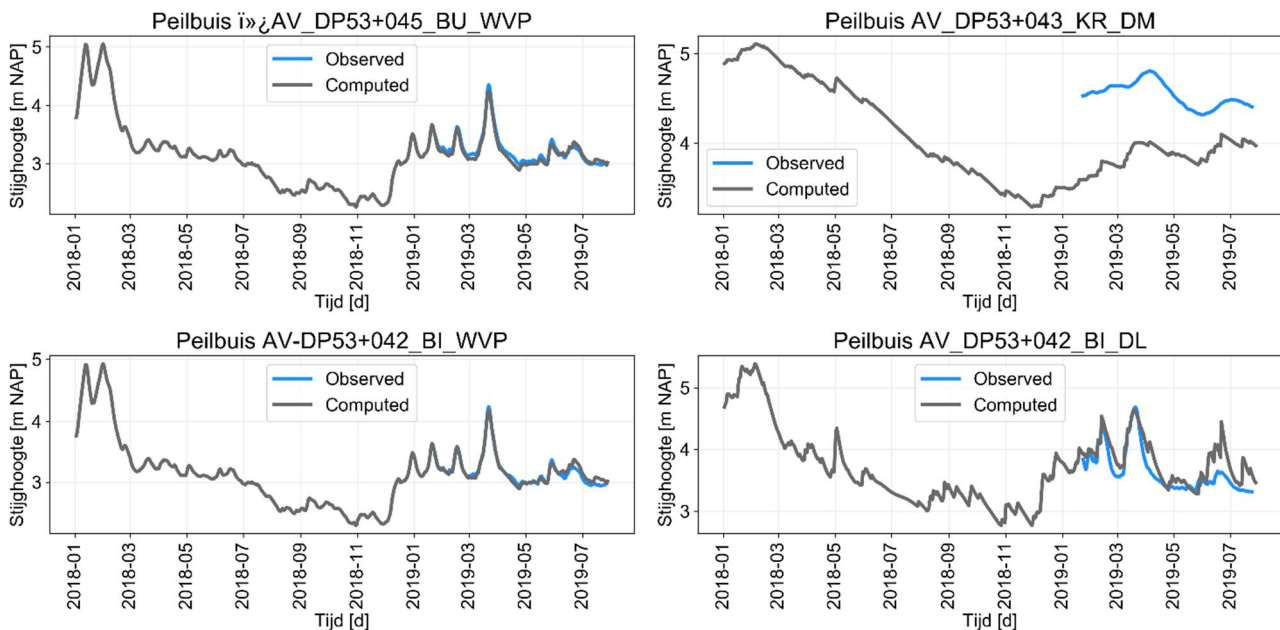


Figuur 7 Modelresultaten voor meetraai 47. De doorlatendheid van het eerste watervoerende pakket (WVP) is gekalibreerd met behulp van PEST. De gemeten grondwaterstand in de kruin niet meegenomen in het kalibratieproces.

4.2 Meetraai 53

Figuur 8 laat de modelresultaten zien na de modelkalibratie voor meetraai 53.

- De waargenomen grondwaterstanden in de deklaag (AV DP53+042 BI DL: RMSE 0.24 m) werden het best gereproduceerd met een verticale doorlatendheid van 7 mm/dag. Fluctuaties in de deklaag worden relatief goed weergegeven door het model, ondanks dat het model in de zomer sterker op neerslag reageert dan waargenomen is. De stijghoogte in de kruin kon niet goed gereproduceerd worden.
- De kleinste modelafwijking voor de peilbuizen in het eerste watervoerende pakket is behaald met een doorlatendheid van de 80 m/d. Zichtbaar is dat met deze doorlatendheid de fluctuaties in het watervoerend pakket goed gereproduceerd worden (AV DP47+005 BU WVP: RMSE 0.06 m, AV_DP47+003_BI_WVP: RMSE 0.05 m). Alleen in de zomermaanden zakt de grondwaterstand verder uit dan wordt berekend door het model.



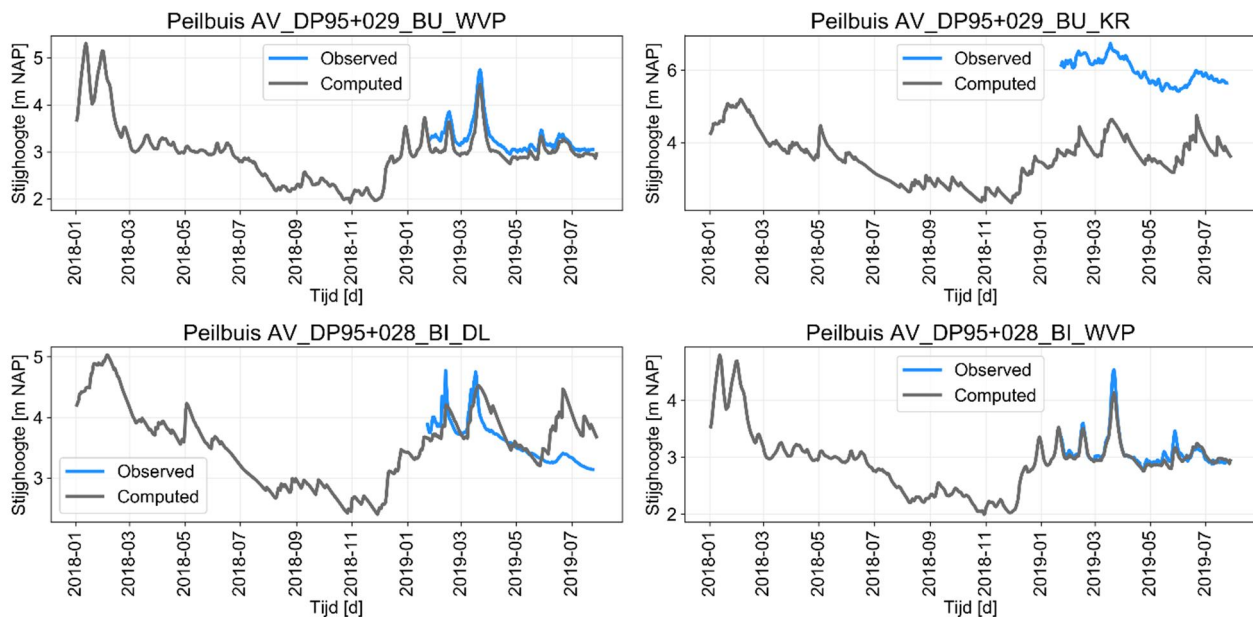
Figuur 8 Modelresultaten voor meetraai 53. De doorlatendheid van het eerste watervoerende pakket (WVP) is gekalibreerd met behulp van PEST. De gemeten waterstand in de kruin niet meegenomen in het kalibratieproces.

4.3 Meetraai 95

Figuur 9 laat de modelresultaten zien na de modelkalibratie voor meetraai 95.

- De waargenomen grondwaterstanden in de deklaag (AV DP+028 BI DL, RMSE 0.42 m) werden het best gereproduceerd met een verticale doorlatendheid van 1 mm/dag.
- De kleinste modelafwijking voor de peilbuizen in het eerste watervoerende pakket is behaald met een doorlatendheid van 64 – 68 m/d. Het model geeft gemiddeld lagere stijghoogten voor de peilbuis in de buitenteen (AV DP95+029 BU WVP, RMSE 0.22 m).
- Voor de peilbuis in de binnenteen (AV DP95+028 BI WVP, RMSE 0.09 m) worden de grondwaterstanden beter gereproduceerd, toch worden met name piekwaterstanden onderschat door het model.
- Het stijghoogte verschil tussen de twee peilbuizen in het watervoerende pakket kon niet door het model gereproduceerd worden. Eerder is al aangegeven dat de gemeten waarden opmerkelijk zijn. Het is aan te raden om de gemeten waarden te controleren.

Samengevat, het model voor meetraai 95 is minder goed in staat om de waterstandfluctuaties in het eerste watervoerende pakket (WVP) weer te geven in vergelijking met meetraai 47 en 53.



Figuur 9 Modelresultaten voor meetraai 95. De doorlatendheid van het eerste watervoerende pakket (WVP) zijn gekalibreerd met behulp van PEST.

4.4 Onzekerheden en gevoeligheid

In de vorige paragrafen is per meetraai een modelkalibratie uitgevoerd om meer inzicht te krijgen in de grootte van de deklaagweerstand en de bulkdoorlatendheid. Voor meetraai 47 en 53 kwamen de gekalibreerde bulkdoorlatendheden op ongeveer 80 m/d bij een verticale doorlatendheid tussen de 1 en 10 mm/dag. In deze paragraaf wordt kort ingegaan op de onzekerheden van de gekalibreerde bulkdoorlatendheid, en hoe deze afhankelijk is van de gehanteerde aannames bij de modellering.

In de voorgaande paragrafen is er van uit gegaan dat de deklaagweerstand in het voorland identiek is aan het achterland. De (verticale) doorlatendheid van de deklaag in het voorland kan hiervan afwijken, bijvoorbeeld door verschillen in het afgezette (Holocene) sediment, verschillen in landgebruik of vergravingen. Bovendien kon deze (verticale) doorlatendheid – i.e. weerstand van de deklaag – niet goed bepaald worden met het model omdat het voorland niet onderwater heeft gestaan. Naast de deklaag, is er bij de modellering vanuit gegaan dat er een afsluitende kleilaag ligt (i.e. Waalre klei 1) op een diepte van ongeveer -11.5 m NAP. Boringen, zoals boring B39B0276, laten zien dat deze laag mogelijk niet geheel afsluitend is.

De gekalibreerde bulkdoorlatendheid van het eerste watervoerende pakket is met name afhankelijk van de dikte van het watervoerende pakket en de weerstand (i.e. verticale doorlatendheid) van de deklaag, samen bepalen deze hoe een hoogwaterpiek zich voorplant. Een lagere deklaagweerstand wordt in het model gecompenseerd met een hogere doorlatendheid van het watervoerende pakket. Het tegengestelde effect treedt op voor de weerstand van de eerste scheidende laag (i.e. Waalre klei 1). Een lagere weerstand van de eerste scheidende laag resulteert in hogere doorlatendheden van het eerste watervoerende pakket. Hieronder is per meetraai gekeken wat de invloed is van de deklaagweerstand in het voorland en de weerstand in 1^e kleiige afzettingen van de Waalre klei.

Deklaagweerstand van het voorland: Om de gevoeligheid van deklaagweerstand in het voorland inzichtelijk te maken is deze gevarieerd tussen de 0.001 en 1.0 m/dag, de doorlatendheid van deze range varieert van een zeer goed afsluitende laag (zwarte klei) tot een goed doorlatende laag (fijn zand). Voor beide meetraaien neemt de gekalibreerde doorlatendheid van het eerste watervoerende pakket toe wanneer de deklaag weerstand afneemt, zie Tabel 1. Dit komt doordat een lagere deklaagweerstand in de model kalibratie wordt gecompenseerd door een hogere doorlatendheid van het eerste watervoerende pakket. De resultaten laten een positief omgekeerd onevenredig verband zien tussen de deklaagweerstand en de gekalibreerde bulkdoorlatendheid. Meetraai 53 is gevoeliger voor de deklaagweerstand dan meetraai 47. Dit kan verklaard worden aangezien het voorland groter is voor meetraai 53 dan voor meetraai 47.

Deklaag voorland Verticale doorlatendheid (m/d)	Meetraai 47 Bulkdoorlatendheid (m/d)	Meetraai 53 Bulkdoorlatendheid (m/d)
0.001	78	60
0.01	83	90
0.1	89	132
1	90	146

Tabel 1 Gekalibreerde doorlatenheden van het 1^e WVP bij verschillende deklaagweerstand in het voorland.

Weerstand Waalre klei: In het basismodel is voor meetraai 47 en 53 op een diepte van circa -11.5 m NAP een scheidende laag (i.e. Waalre klei 1) opgenomen o.b.v. REGIS II en boorgegevens. Om de gevoeligheid van het model op de verticale doorlatendheid van deze laag inzichtelijk te maken is deze gevarieerd tussen de 0.025 en 25 m/dag. Dit is een brede range waarbij de uiterste typische waarden zijn voor klei en goed doorlatend zand. De doorlatendheid die toegekend wordt aan deze laag beïnvloedt de gekalibreerde bulkdoorlatendheid van het eerste watervoerende pakket, zie Tabel 2. Bij een lagere weerstand voor deze eerste scheidende laag neemt de gekalibreerde bulkdoorlatendheid af. Dit komt doordat interactie met het onderliggende pakket mogelijk wordt en heeft als gevolg dat een hoogwatergolf zicht makkelijker voorplant. Gezien de lage gekalibreerde bulkdoorlatenheden bij een weerstand van 2.5 of 25 m/d, verwachten we dat de scheidende laag als een grotendeels afsluitende laag voorkomt.

Waalre klei 1 ^e afzetting Verticale doorlatendheid (m/d)	Meetraai 47 Bulkdoorlatendheid (m/d)	Meetraai 53 Bulkdoorlatendheid (m/d)
0.025	81	80
0.25	49	45
2.5 (geen klei, fijn zand)	13	6
25 (geen klei, grof zand)	6	3

Tabel 2 Gekalibreerde doorlatenheden van het 1^e WVP bij verschillende weerstanden voor de 1^e scheidende laag (i.e. Waalre klei 1).

5 DISCUSSIE EN CONCLUSIE

Voor elke meetraai is een relatief eenvoudig 2D grondwatermodel gemaakt. De opbouw van de modellen per meetraai is afgeleid uit grondboringen en het REGIS II model. De weerstand van de deklaag en het eerste watervoerende pakket zijn vervolgens bepaald gedurende de modelkalibratie, waarbij gebruik is gemaakt van PEST.

Weerstand deklaag: Het voorland heeft voor de onderzochte meetraaien niet onderwater gestaan. Hierdoor is het niet mogelijk om nauwkeurig de weerstand van de deklaag te bepalen. Voor meetraai 47, 53 en 95 is een verticale doorlatendheid tussen de 1 - 7 mm/dag gebruikt. Met een gemiddelde deklaag van circa 6.5 m varieert de deklaag weerstand tussen de 900 en 6500 dagen.

(Bulk)doorlatendheid 1^e WVP: Voor meetraai 47 en 53 konden de gemeten grondwaterstanden en stijghoogten goed gereproduceerd worden na de modelkalibratie. De gekalibreerde bulkdoorlatendheid voor meetraai 47 en 53 kwamen beiden neer op ongeveer 80 m/dag. De modelafwijkingen in de gekalibreerde modelresultaten voor meetraai 95 waren te groot om de modelresultaten hiervan te interpreteren.

Voor raai 35/36 is de doorlatendheid van het eerste watervoerend pakket bepaald aan met een pompproef (V.O.F, Wiertsema-Inpijn-Blokpoel, 2018). Hieruit bleek dat de eerste zandlaag een doorlatendheid heeft van circa 1 à 3 m/dag (circa 3 m dik) en de tweede laag (circa 10 m dik) van 70 m/dag. De gekalibreerde bulkdoorlatendheid voor raai 47 en 53 zijn dus hoger dan de doorlatendheid van het goed doorlatend pakket bepaald met de pompproef.

De onzekerheden in de modelresultaten zijn groot, hetgeen ook blijkt uit de onzekerheidsanalyse waarin gekeken is naar de invloed van de deklaagweerstand van het voorland en de weerstand van de Waalre klei op de gekalibreerde bulkdoorlatendheid. Uit deze analyse blijkt dat de gekalibreerde bulkdoorlatendheid toeneemt bij een lagere deklaagweerstand. De gevoeligheid van deze parameter is afhankelijk van de lengte van het voorland. De weerstand van de Waalre klei bepaald of interactie mogelijk is met onderliggend zandpakket. Bij een hogere weerstand neemt de gekalibreerde bulkdoorlatendheid toe. Dit laat zien dat verschillende combinaties van parameters tot hetzelfde resultaat kan leiden. Ondanks de onzekerheid laten deze resultaten zien dat het onderliggende zandpakket ter plekke van meetraai 47 en 53 waarschijnlijk een hoge doorlatendheid heeft tussen de 45-90 m/dag.

In de gevoeligheidsanalyse in paragraaf 4.4 komen veel hogere doorlatendheden voor. Op basis van de (bovengenoemde) pompproef, de boorstaten en REGIS II waarden voor de doorlatendheid in het projectgebied verwachten wij dat doorlatendheid < 90 m /dag het meest reëel zijn..

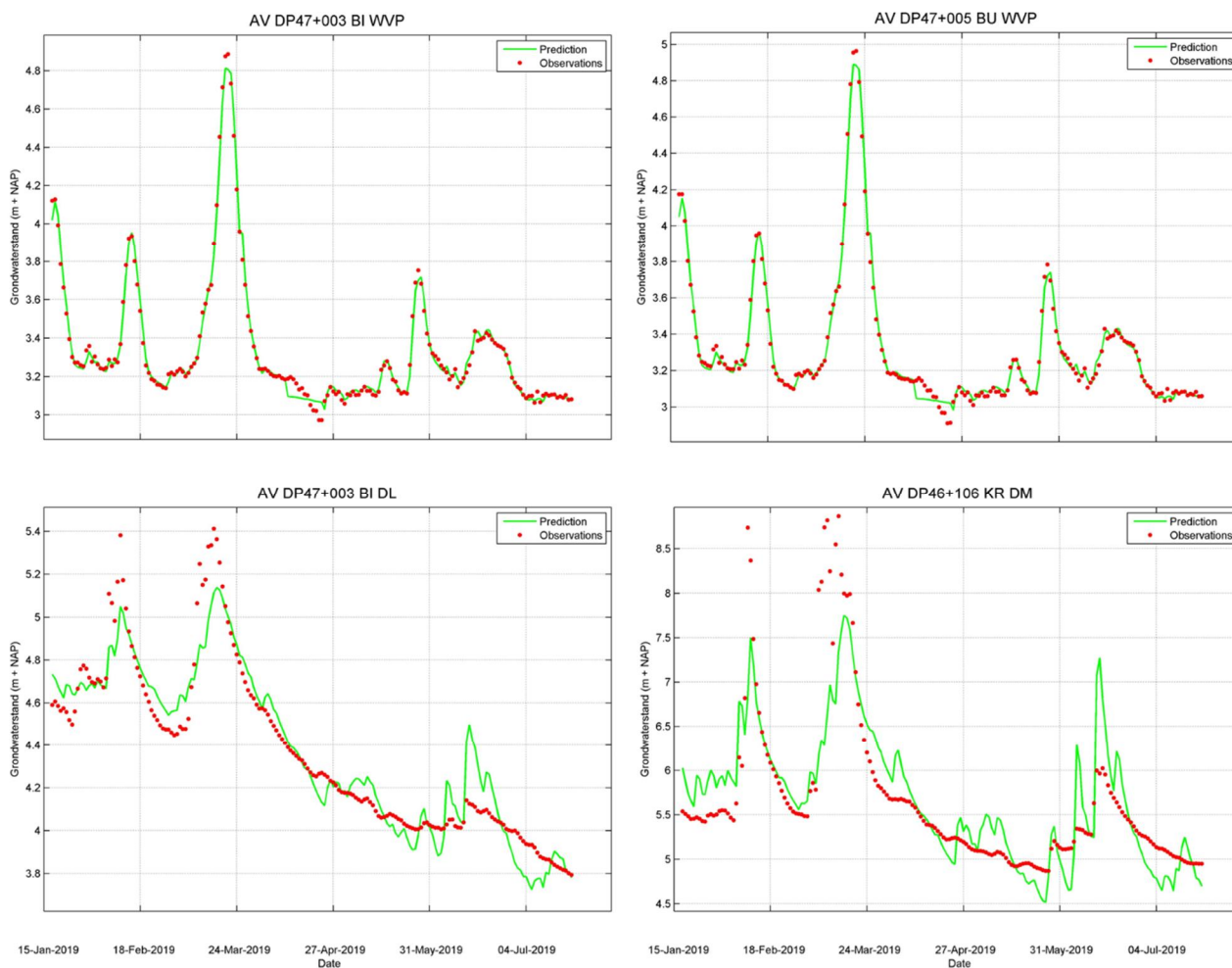
Aanbevelingen:

1. Gedurende de meetperiode heeft het voorland niet onderwater gestaan. Hierdoor kon de weerstand van de deklaag van het voorland niet bepaald worden. Het is daarom aan te bevelen om de meetcampagne door te zetten tot dat er een hoogwatergolf heeft plaats gevonden waarbij inundatie van het voorland plaats vindt.
2. Opmerkelijk is het stijghoogte verschil tussen de twee peilbuizen in het watervoerende pakket van meetraai 95. Tussen de twee peilbuizen in het WVP wordt gemiddeld een stijghoogte verschil van circa 0.2 m waargenomen, voor meetraai 47 en 53 bedroeg dit enkele centimeters. Dit verschil kon vervolgens ook niet met het model gereproduceerd worden. Het is mogelijk dat dit verschil verklaart kan worden door de aanwezigheid van de sloot en drainage bij de sportvelden. Met aanvullende informatie t.a.v. met name de (mogelijke) drainage van de sportvelden en data uit de monitoring van de aanvullende peilbuis kan voor meetraai 95 in de ontwerpfase mogelijk een betrouwbaardere analyse gemaakt worden dan naar voren is gekomen uit dit onderzoek.

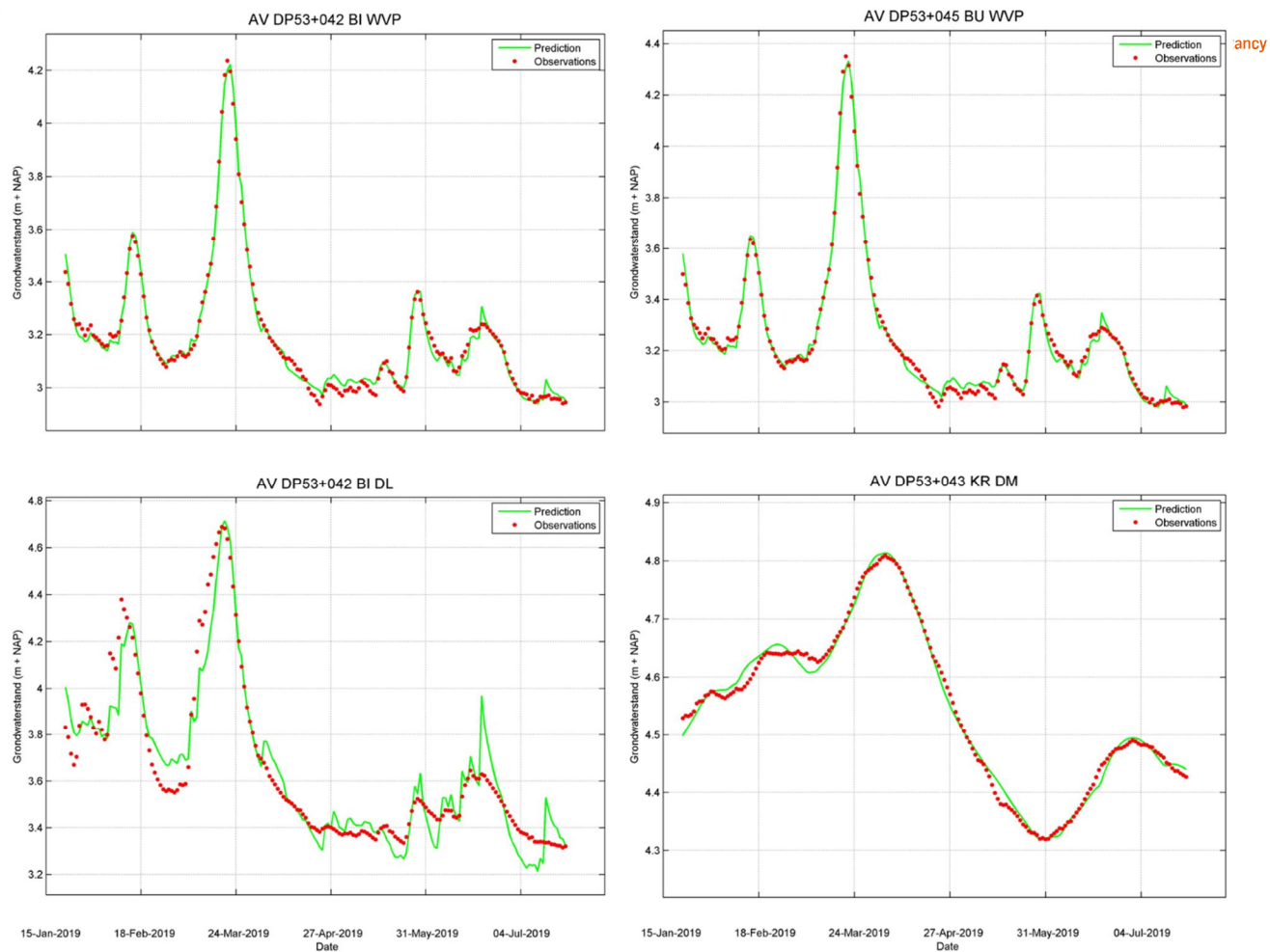
6 **REFERENTIES**

V.O.F, Wiertsema-Inpijn-Blokpoel. (2018). *Grondonderzoek: Sterke Lekdijk Wijk bij Duurstede / Amerongen (WAM)*. Tolbert.

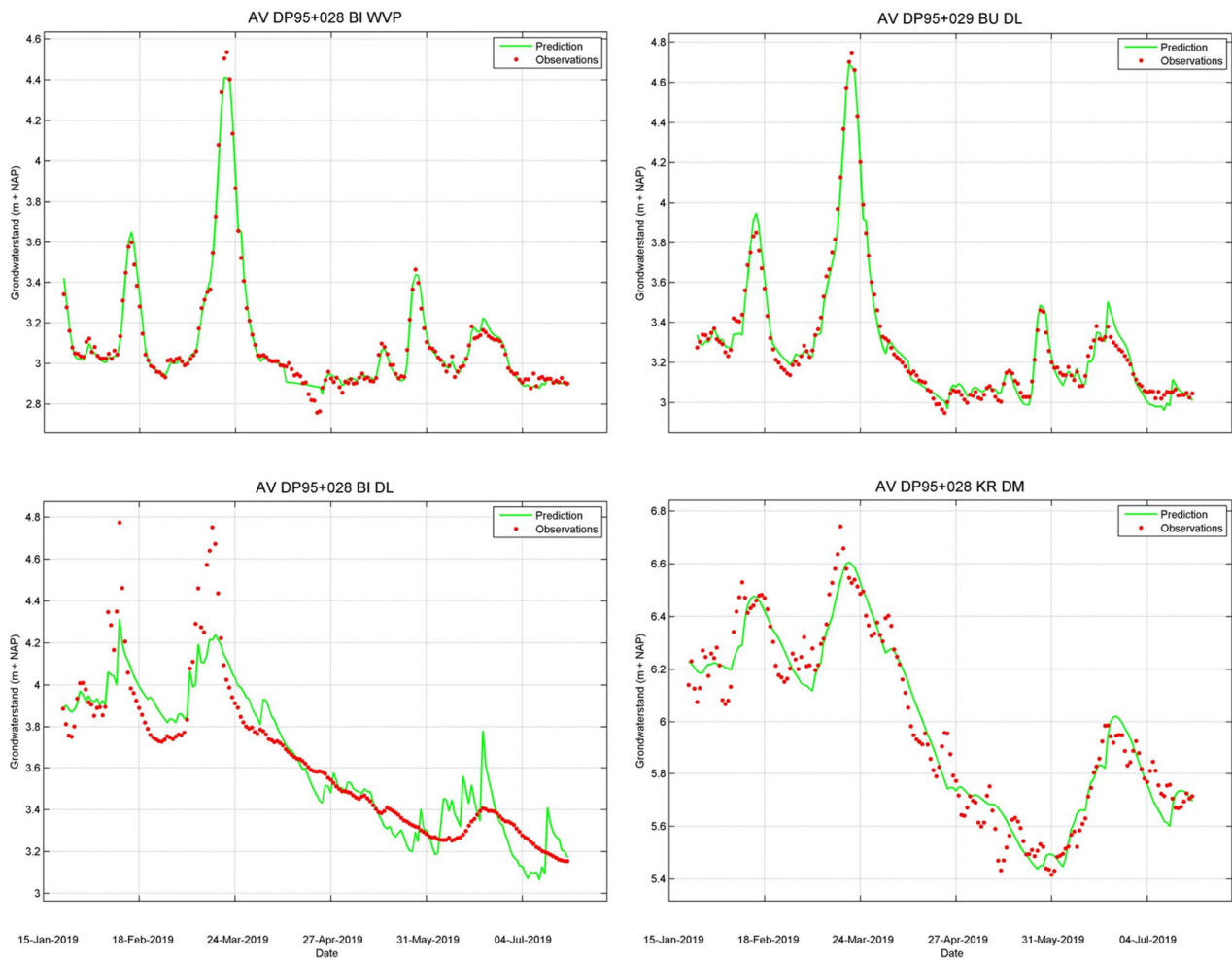
Bijlage 1: Resultaten tijdreeksanalyses



Figuur 1 Gemeten grondwaterstanden (rood) en met het tijdreeksmodel voorspelde grondwaterstanden (groen) voor de peilbuizen in raai 47.



Figuur 2 Gemeten grondwaterstanden (rood) en met het tijdreeksmodel voorspelde grondwaterstanden (groen) voor de peilbuizen in raai 53.



Figuur 3 Gemeten grondwaterstanden (rood) en met het tijdreeksmodel voorspelde grondwaterstanden (groen) voor de peilbuizen in raai 95.

COLOFON

OPTIMALISATIE PIPING DIJKVERBETERING WAM
BEPALEN BULKDOORLATENDHEID

KLANT

Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden

AUTEUR

Daan van Keulen

PROJECTNUMMER

C03011.000750

ONZE REFERENTIE

DATUM

13 februari 2020

STATUS

Definitief

GECONTROLEERD DOOR

Sebastian Huizer
Specialist Geohydrologie

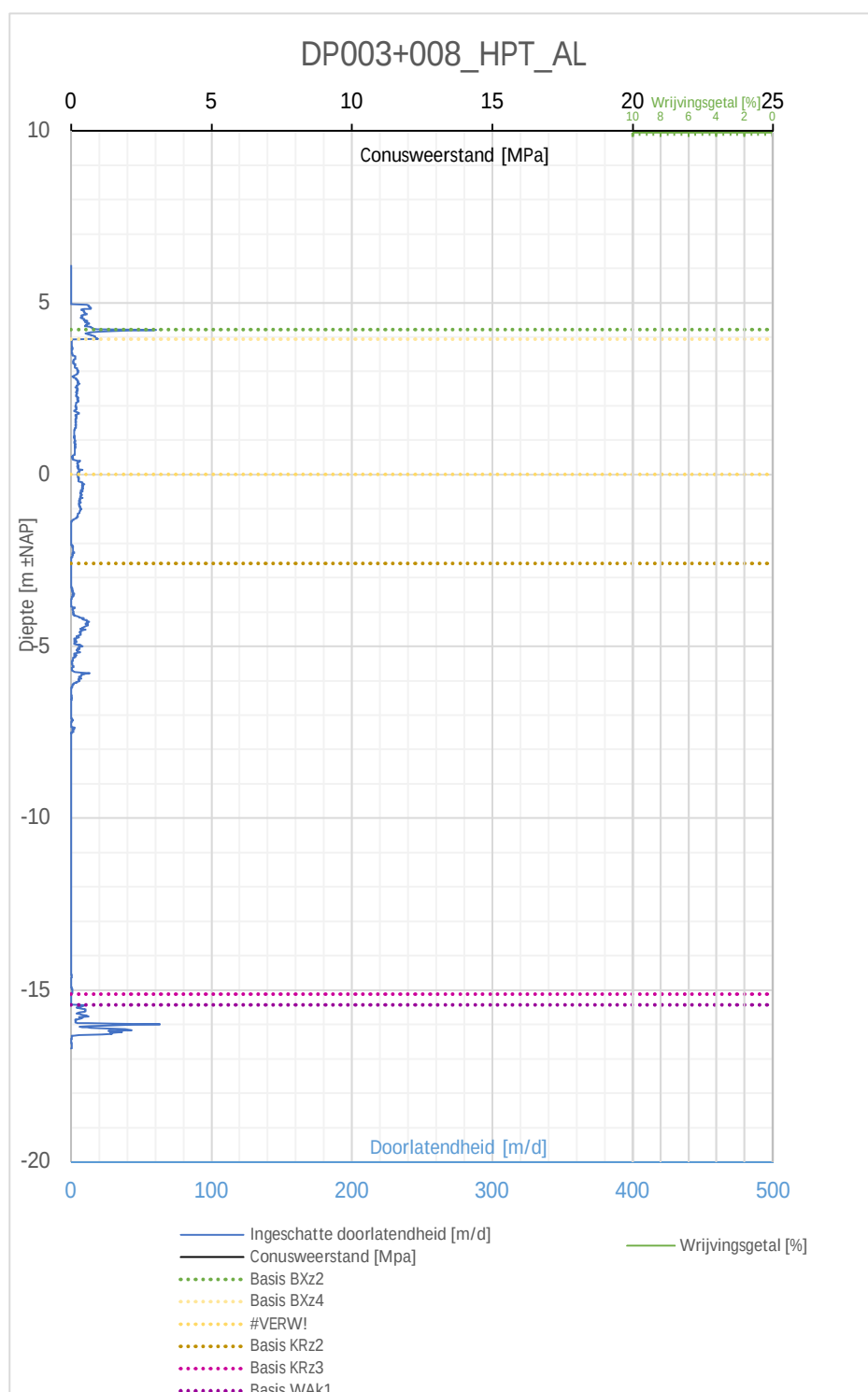
Arcadis Nederland B.V.

Postbus 264
6800 AG Arnhem
Nederland
+31 (0)88 4261 261

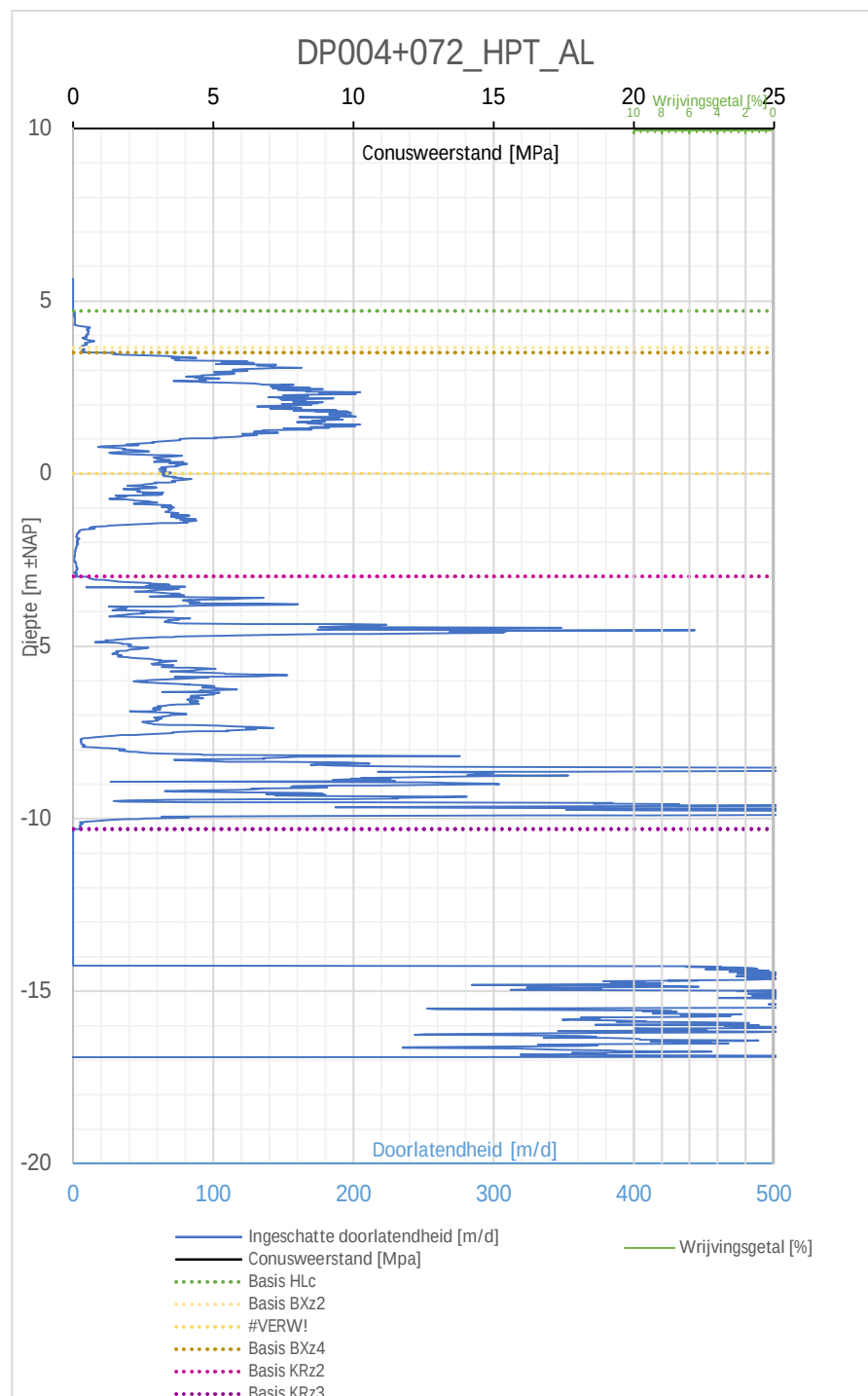
www.arcadis.com

Bijlage 2 Analyse HPT sonderingen

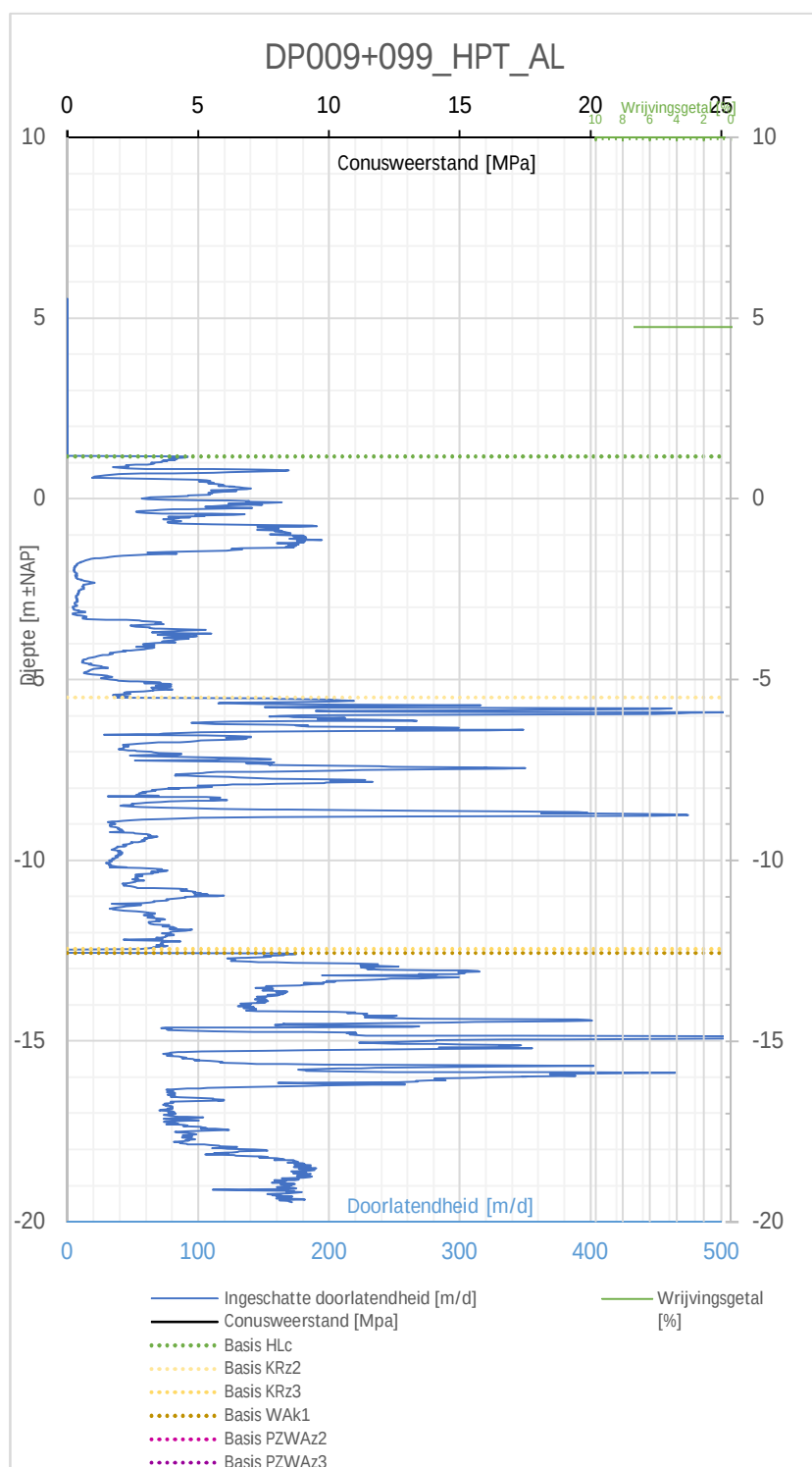
DP003+008_HPT_AL		top	basis	k
Naam laag	code	m t.o.v. NAP	m t.o.v. NAP	m/d
Holocene afzettingen, complexe hydrogeologische eenheid	HC	mv		4,95
Formatie van Boxtel, tweede zandige hydrogeologische eenheid	BXz2	4,95	4,22	10,63
Formatie van Boxtel, vierde zandige hydrogeologische eenheid	BXz4	4,22	3,94	22,30
Formatie van Kreftenheye, tweede zandige hydrogeologische eenheid	KRz2	3,94	-2,59	3,22
Formatie van Kreftenheye, tweede zandige hydrogeologische eenheid	KRz3	-2,59	-15,12	0,94
Formatie van Waalre, eerste kleiige hydrogeologische eenheid	Wak1	-15,12	-15,43	
Formatie van Peize en Formatie van Waalre, tweede zandige hydrogeologische eenheid	PZWAz2	-15,43	-51,8	10,41



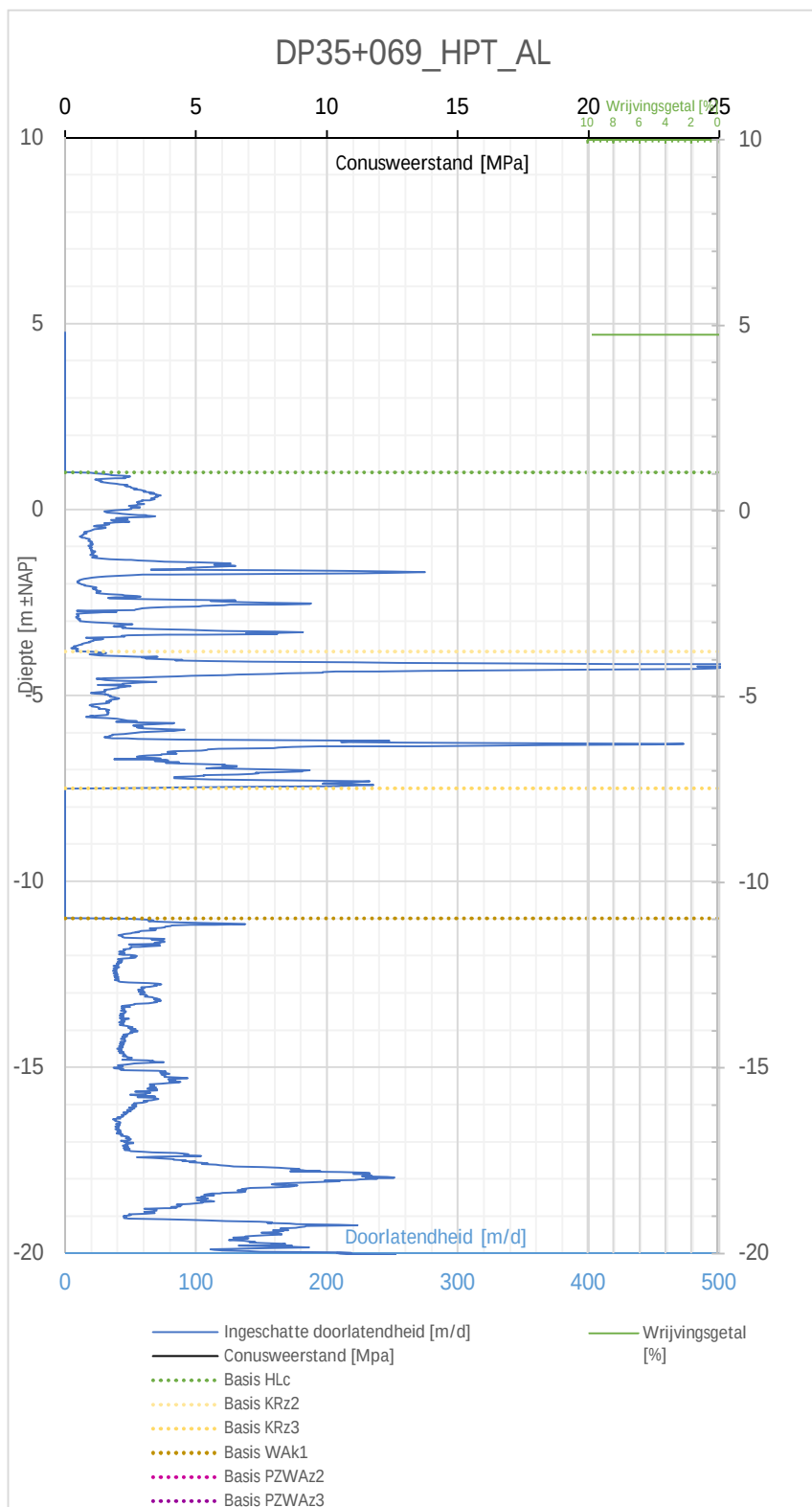
DP004+072_HPT_AL		top	basis	k
Naam laag	code	m t.o.v. NAP	m t.o.v. NAP	m/d
Holocene afzettingen, complexe hydrogeologische eenheid	HLc	5,65	4,71	
Formatie van Boxtel, tweede zandige hydrogeologische eenheid	BXz2	4,71	3,65	6,09
Formatie van Boxtel, vierde zandige hydrogeologische eenheid	BXz4	3,65	3,51	6,49
Formatie van Kreftenheye, tweede zandige hydrogeologische eenheid	KRz2	3,51	-2,98	77,06
Formatie van Kreftenheye, derde zandige hydrogeologische eenheid	KRz3	-2,98	-10,3	118,97
Formatie van Waalre, eerste kleiige hydrogeologische eenheid	WAK1	-10,3	-14,27	
Formatie van Peize en Formatie van Waalre, tweede zandige hydrogeologische eenheid	PZWAz2	-14,27	-51,95	436,42



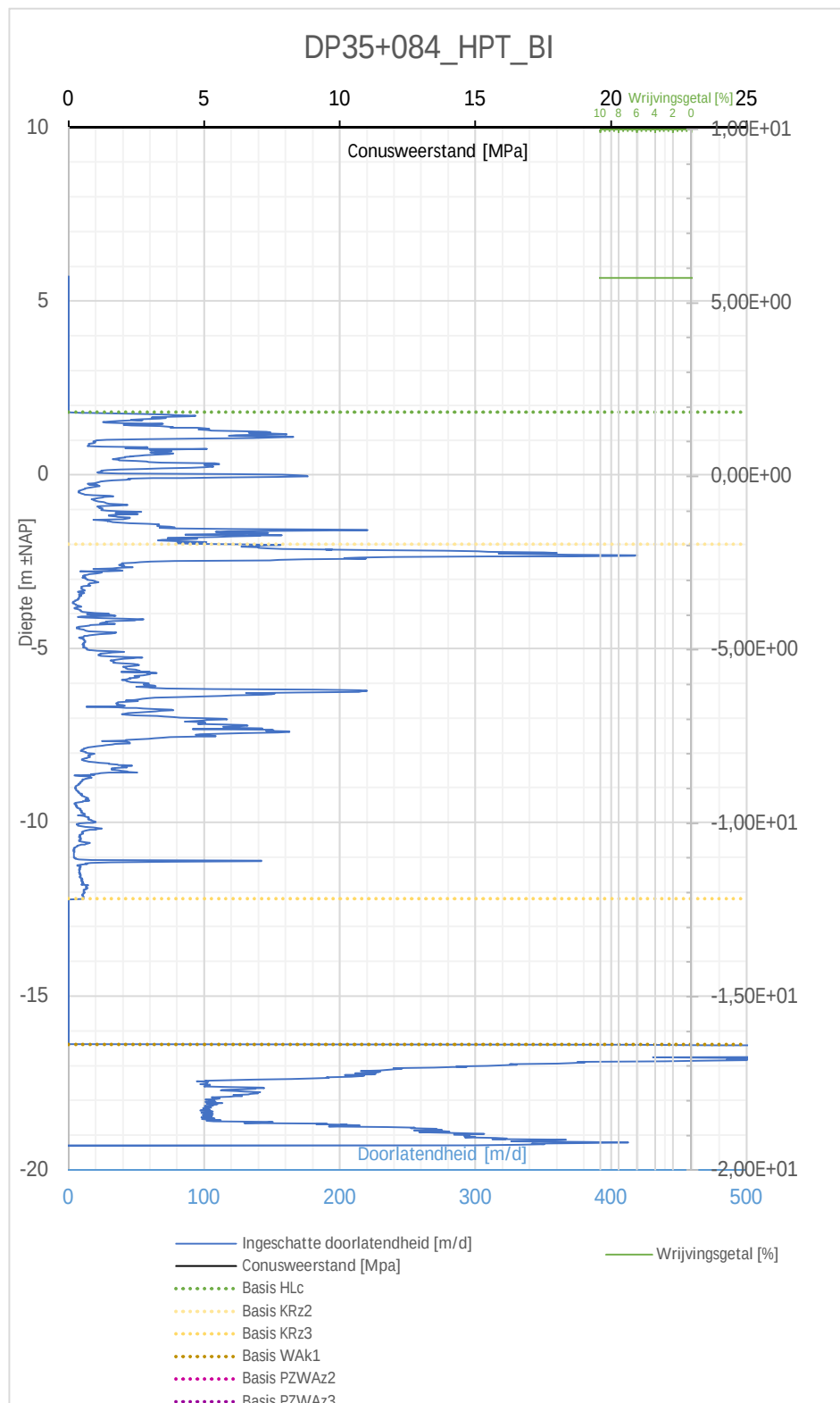
DP009+099_HPT_AL		top	basis	k
Naam laag	code	m t.o.v. NAP	m t.o.v. NAP	m/d
Holocene afzettingen, complexe hydrogeologische eenheid	HLc	5,99	1,17	
Formatie van Kreftenheye, tweede zandige hydrogeologische eenheid	KRz2	1,17	-5,5	64,39
Formatie van Kreftenheye, derde zandige hydrogeologische eenheid	KRz3	-5,5	-12,457	106,43
Formatie van Waalre, eerste kleiige hydrogeologische eenheid	WAK1	-12,457	-12,564	
Formatie van Peize en Formatie van Waalre, tweede zandige hydrogeologische eenheid	PZWaz2	-12,564	-52,92	172,84



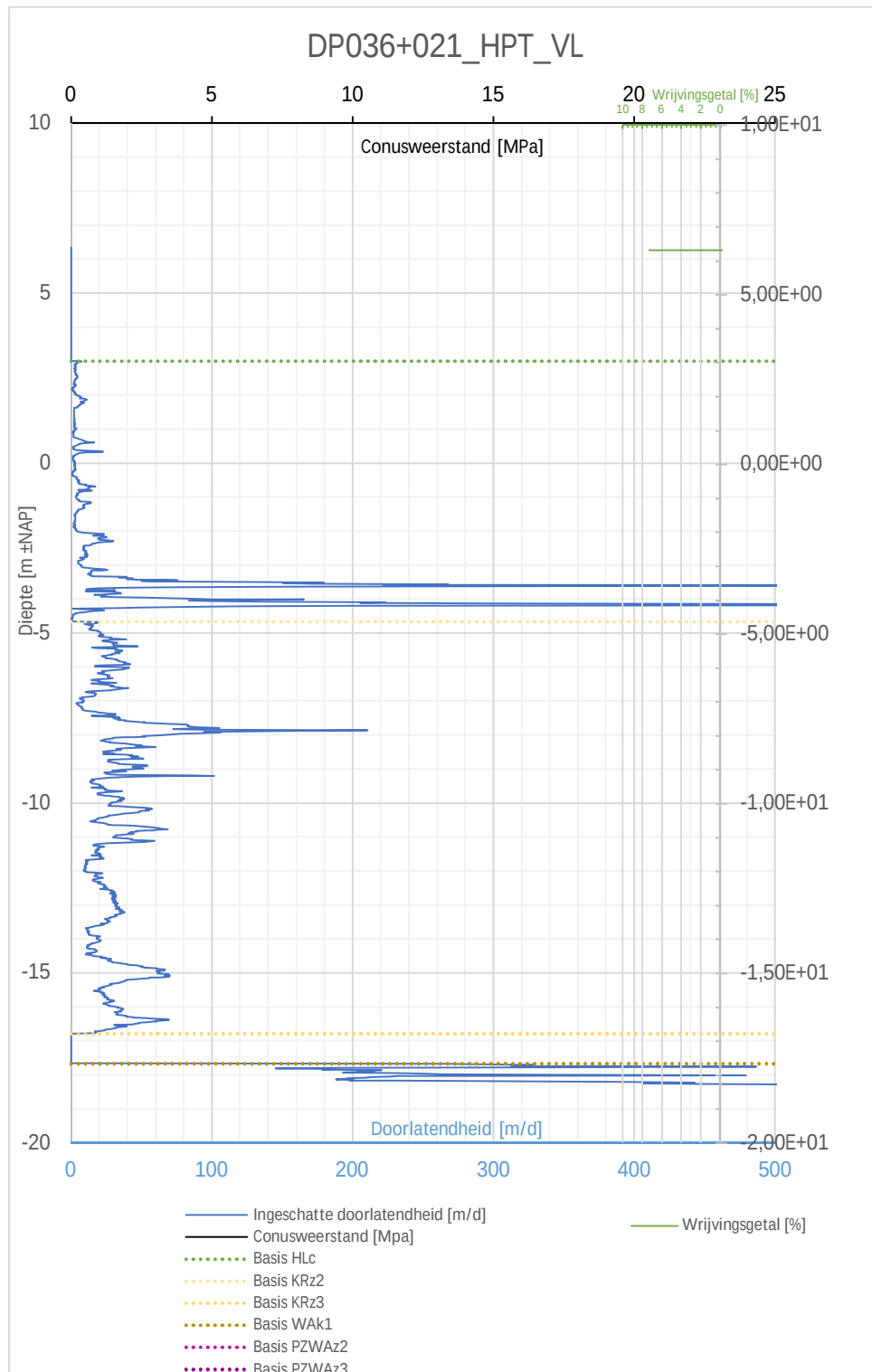
DP35+069_HPT_AL		top	basis	k
Naam laag	code	m t.o.v. NAP	m t.o.v. NAP	m/d
Holocene afzettingen, complexe hydrogeologische eenheid	HLC	4,94	1	
Formatie van Kreftenheye, tweede zandige hydrogeologische eenheid	KRz2	1	-3,82	48,13
Formatie van Kreftenheye, derde zandige hydrogeologische eenheid	KRz3	-3,82	-7,5	111,69
Formatie van Waalre, eerste kleiige hydrogeologische eenheid	WAK1	-7,5	-11	
Formatie van Peize en Formatie van Waalre, tweede zandige hydrogeologische eenheid	PZWAz2	-11	-39,87	81,01



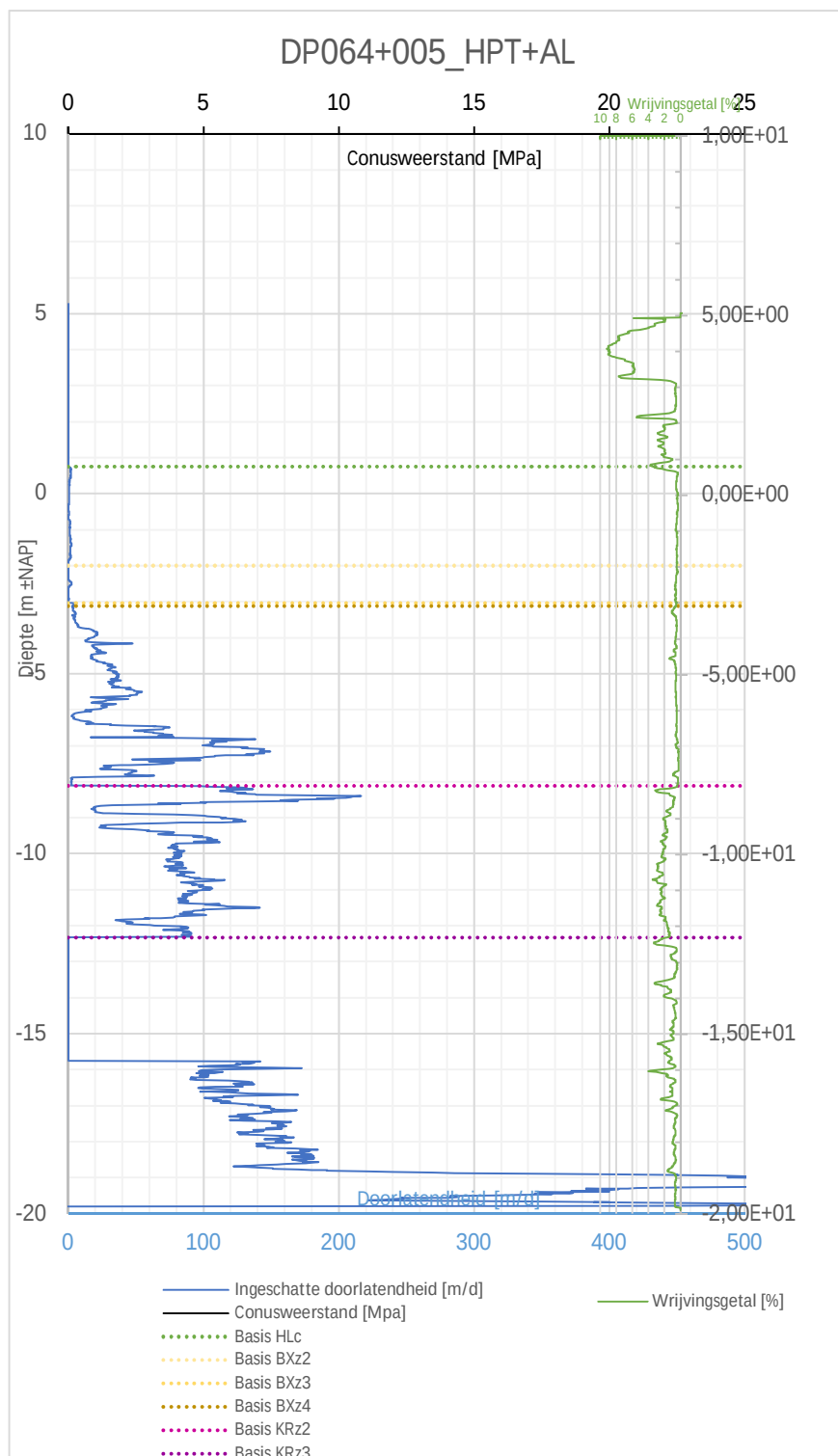
DP35+084_HPT_BI		top m t.o.v. NAP	basis m t.o.v. NAP	k m/d
Naam laag	code			
Holocene afzettingen, complexe hydrogeologische eenheid	HLC	mv	1,8	
Formatie van Kreftenheye, tweede zandige hydrogeologische eenheid	KRz2	1,8	-2	60,51
Formatie van Kreftenheye, derde zandige hydrogeologische eenheid	KRz3	-2	-12,201	40,18
Formatie van Waalre, eerste kleiige hydrogeologische eenheid	WAK1	-12,201	-16,392	
Formatie van Peize en Formatie van Waalre, tweede zandige hydrogeologische eenheid	PZWAZ2	-16,392	-39,87	255,36



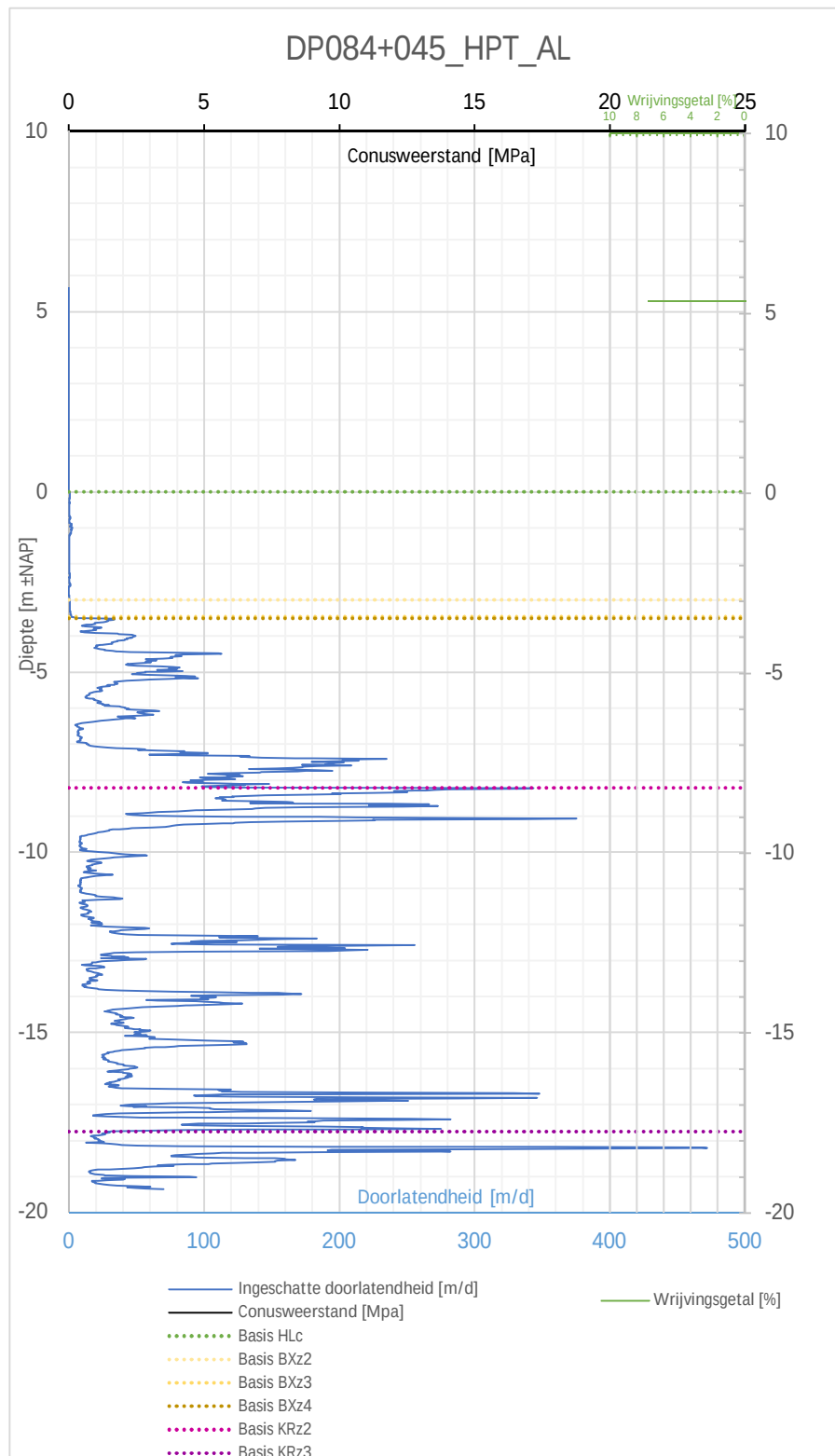
DP036+021_HPT_VL		top m t.o.v. NAP	basis m t.o.v. NAP	k m/d
Naam laag	code			
Holocene afzettingen, complexe hydrogeologische eenheid	HLc	6,38	3	
Formatie van Kreftenheye, tweede zandige hydrogeologische eenheid	KRz2	3	-4,67	26,20
Formatie van Kreftenheye, derde zandige hydrogeologische eenheid	KRz3	-4,67	-16,789	30,57
Formatie van Waalre, eerste kleiige hydrogeologische eenheid	Wak1	-16,789	-17,673	
Formatie van Peize en Formatie van Waalre, tweede zandige hydrogeologische eenheid	PZWAz2	-17,673	-39,82	485,34



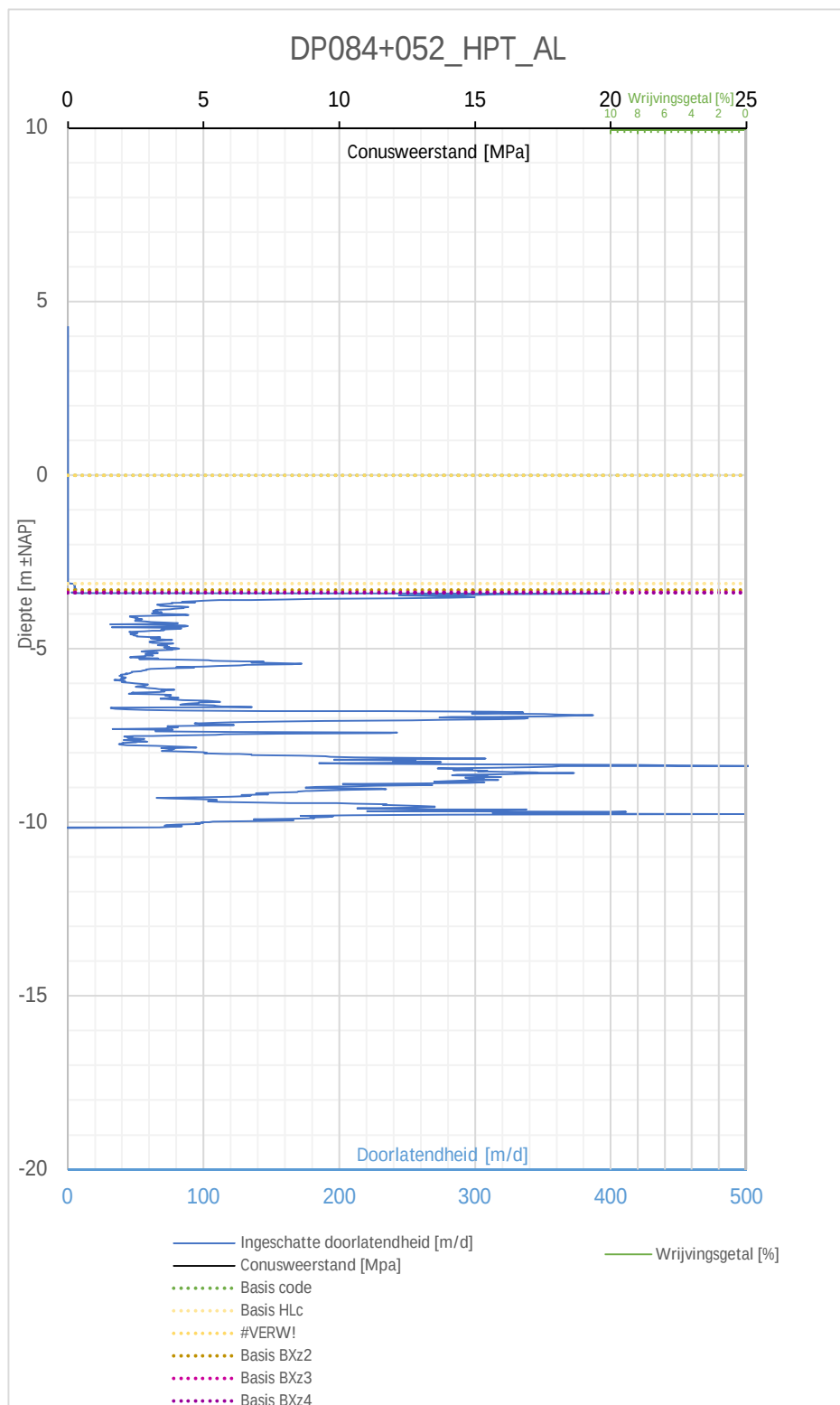
DP064+005_HPT_AL		top	basis	k
Naam laag	code	m t.o.v. NAP	m t.o.v. NAP	m/d
Holocene afzettingen, complexe hydrogeologische eenheid	HLC	5	0,75	
Formatie van Boxtel, tweede zandige hydrogeologische eenheid	BXz2	0,75	-2	1,06
Formatie van Boxtel, derde zandige hydrogeologische eenheid	BXz3	-2	-3,04	0,50
Formatie van Boxtel, vierde zandige hydrogeologische eenheid	BXz4	-3,04	-3,12	4,61
Formatie van Kreftenheye, tweede zandige hydrogeologische eenheid	KRz2	-3,12	-8,12	38,10
Formatie van Kreftenheye, derde zandige hydrogeologische eenheid	KRz3	-8,12	-12,33	88,00
Formatie van Waalre, eerste kleiige hydrogeologische eenheid	WAK1	-12,33	-15,77	0,00
Formatie van Peize en Formatie van Waalre, tweede zandige hydrogeologische eenheid	PZWaz2	-15,77	-44,6	207,25



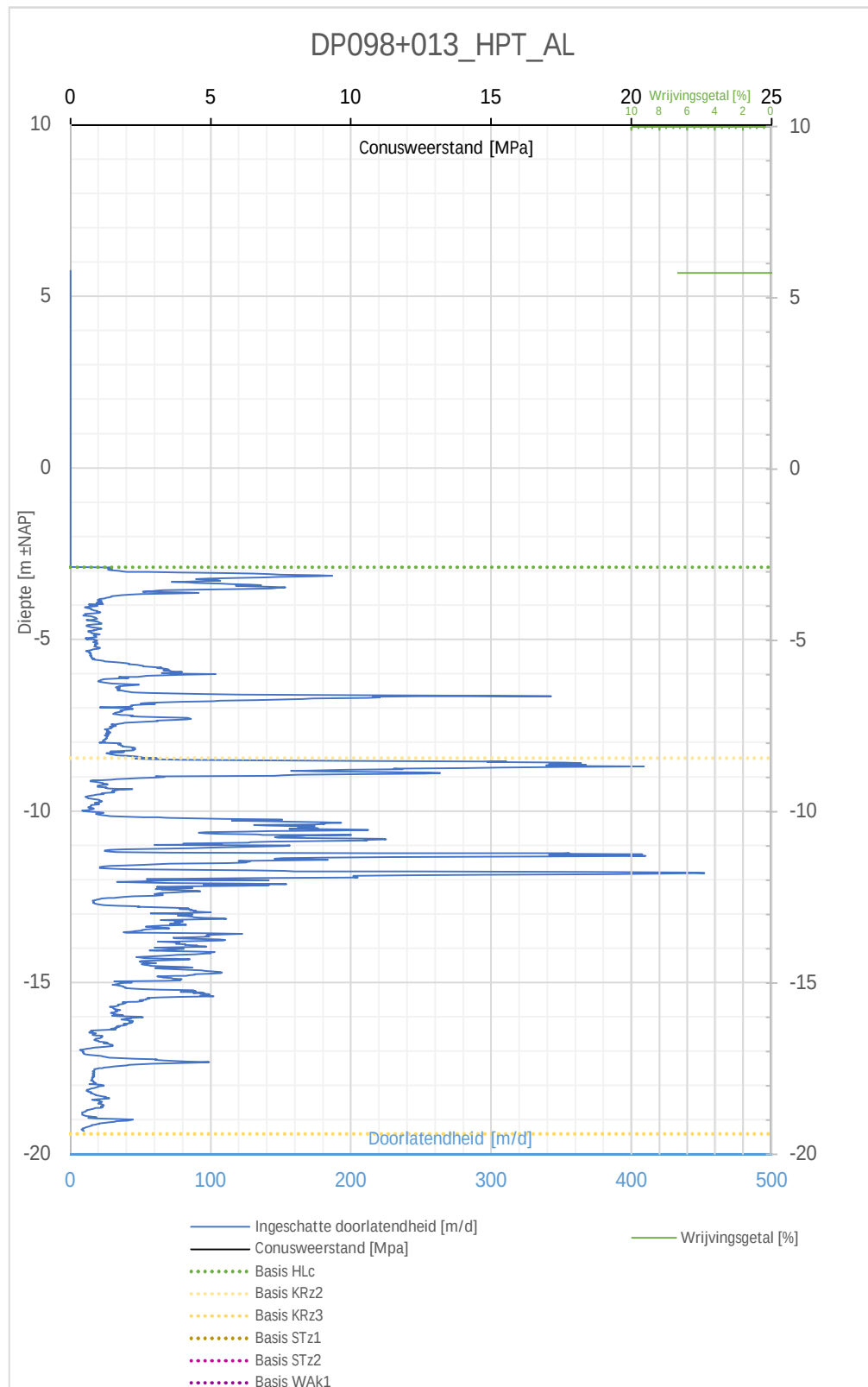
DP084+045_HPT_AL		top	basis	k
Naam laag	code	m t.o.v. NAP	m t.o.v. NAP	m/d
Holocene afzettingen, complexe hydrogeologische eenheid	HLC	5,67	0	
Formatie van Boxtel, tweede zandige hydrogeologische eenheid	BXz2	0	-3	0,50
Formatie van Boxtel, derde zandige hydrogeologische eenheid	BXz3	-3	-3,47	1,02
Formatie van Boxtel, vierde zandige hydrogeologische eenheid	BXz4	-3,47	-3,51	4,79
Formatie van Kreftenheye, tweede zandige hydrogeologische eenheid	KRz2	-3,51	-8,21	57,57
Formatie van Kreftenheye, derde zandige hydrogeologische eenheid	KRz3	-8,21	-17,75	67,13
Formatie van Sterksel, eerste zandige hydrogeologische eenheid	STz1	-17,75	-21,72	79,07



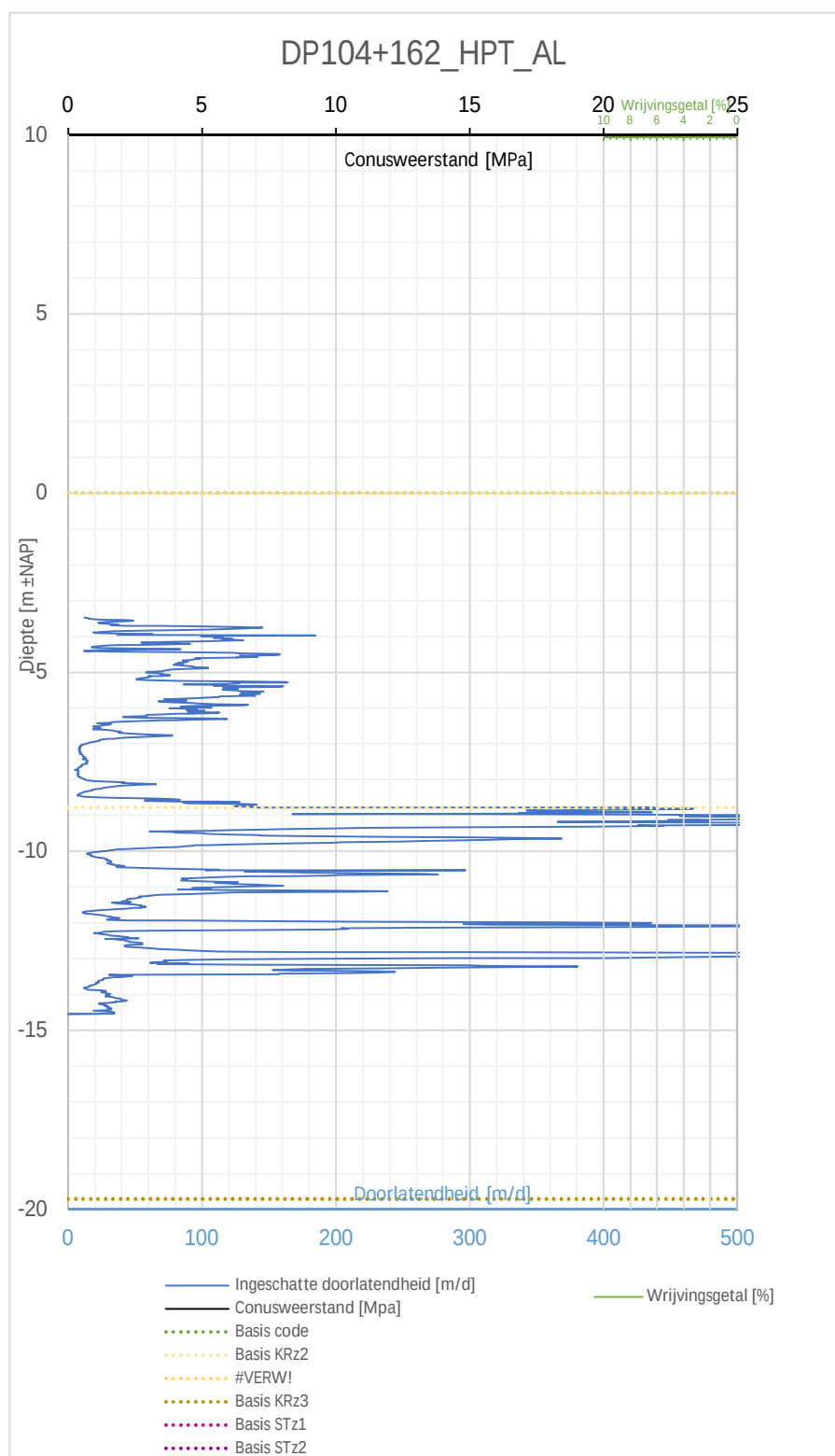
DP084+052_HPT_AL		top	basis	k
Naam laag	code	m t.o.v. NAP	m t.o.v. NAP	m/d
Holocene afzettingen, complexe hydrogeologische eenheid	HLC	5,3	-3,12	0,00
Formatie van Boxtel, tweede zandige hydrogeologische eenheid	BXz2	-3,12	-3,31	5,19
Formatie van Boxtel, derde zandige hydrogeologische eenheid	BXz3	-3,31	-3,37	5,33
Formatie van Boxtel, vierde zandige hydrogeologische eenheid	BXz4	-3,37	-3,39	3,57
Formatie van Kreftenheye, tweede zandige hydrogeologische eenheid	KRz2	-3,39	-6,68	82,10
Formatie van Kreftenheye, derde zandige hydrogeologische eenheid	KRz3	-6,68	-17,92	187,13



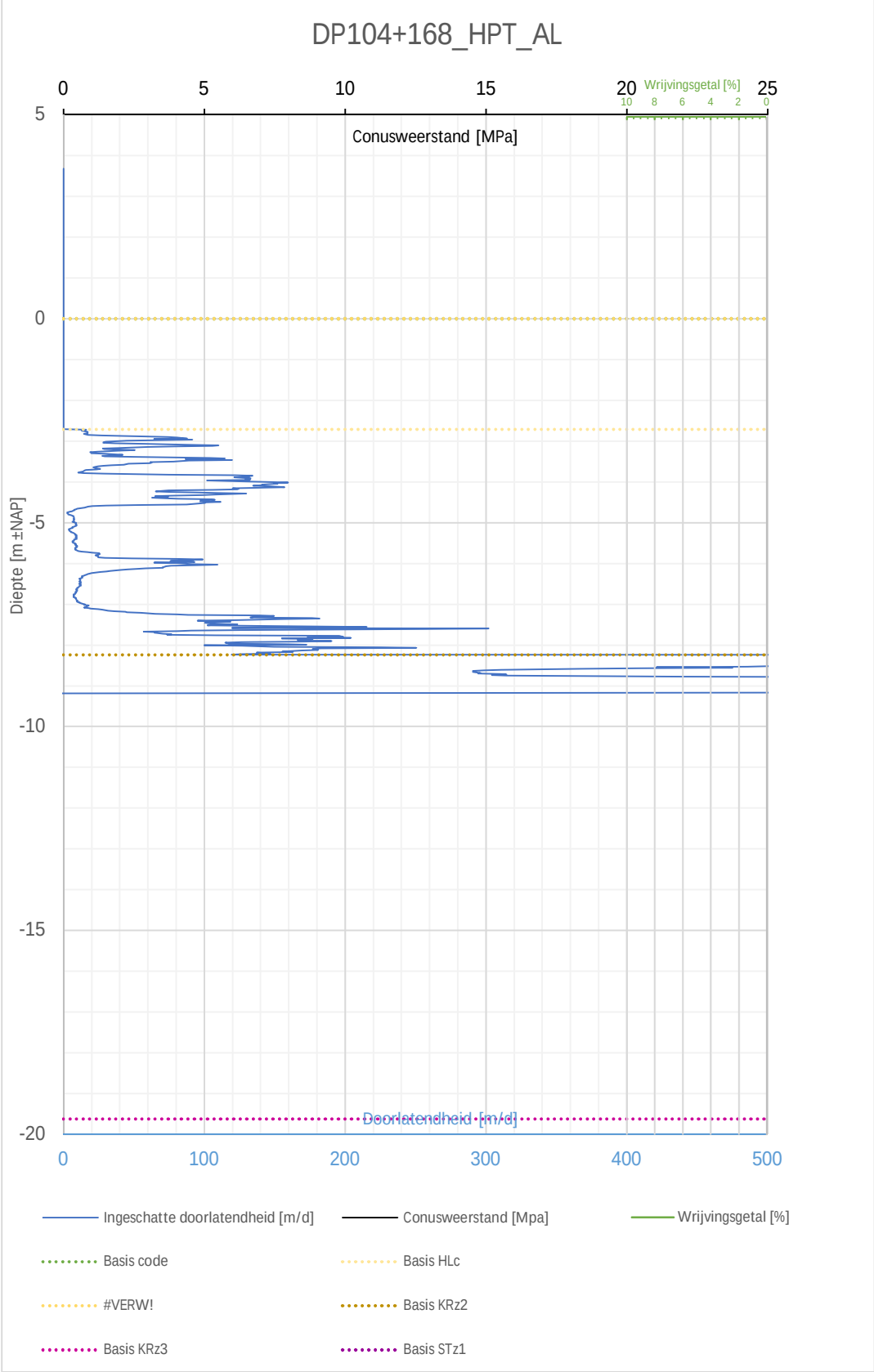
DP098+013_HPT_AL		top	basis	
Naam laag	code	m t.o.v. NAP	m t.o.v. NAP	m/d
Holocene afzettingen, complexe hydrogeologische eenheid	HLC	5,75	-2,9	
Formatie van Kreftenheye, tweede zandige hydrogeologische eenheid	KRz2	-2,9	-8,46	46,72
Formatie van Kreftenheye, derde zandige hydrogeologische eenheid	KRz3	-8,46	-19,41	71,50

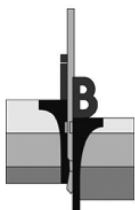


DP104+162_HPT_AL		top	basis	k
Naam laag	code	m t.o.v. NAP	m t.o.v. NAP	m/d
Holocene afzettingen, complexe hydrogeologische eenheid	HLc	5,67	-3,47	
Formatie van Kreftenheye, tweede zandige hydrogeologische eenheid	KRz2	-3,47	-8,78	60,24
Formatie van Kreftenheye, derde zandige hydrogeologische eenheid	KRz3	-8,78	-14	140,33
Formatie van Sterksel, eerste zandige hydrogeologische eenheid	STz1	-14	-21,72	



DP104+168_HPT_AL		top	basis	k
Naam laag	code	m t.o.v. NAP	m t.o.v. NAP	m/d
Holocene afzettingen, complexe hydrogeologische eenheid	HLC	5,67	-2,71	0,00
Formatie van Kreftenheye, tweede zandige hydrogeologische eenheid	KRz2	-2,71	-8,24	59,72
Formatie van Kreftenheye, derde zandige hydrogeologische eenheid	KRz3	-8,24	-19,62	901,57





Uitvoering HPT-sonderingen Sterke Lekdijk (WAM en CUB)

Betreft Resultaten onderzoek

Opdrachtnummer 02P011039/02P011039-03

Documentnummer 02P011039-03-RG-01

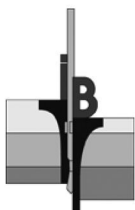
Opdrachtgever Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden
Poldermolen 2
3994 DD Houten

Opgesteld door : M.L.H.M. van Lipzig MSc
Gezien : K.K. Hertogh
Status : Definitief
Codering : RG

Paraaf :

Paraaf :

Datum rapport : 7 mei 2019



Opdracht : 02P011039-01
Document : 02P011039-03-RG-01
Project : Uitvoering HPT-sonderingen aan Sterke Lekdijk (WAM en CUB)

INHOUDSOPGAVE

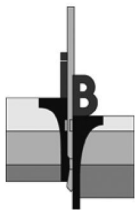
1. INLEIDING	1
2. ONDERZOEK	2
2.1 HPT-SONDERINGEN	2
2.2 PEILBUIZEN	2
2.3 DOORLATENDHEIDSMETINGEN	2
2.4 INMETING EN WATERPASSING	3
3. BEPALING K-WAARDE UIT HPT-SONDERINGEN	4

BIJLAGEN

- A) Situatietekening en foto's
- B) Waterpasstaat
- C) Sondeergrafieken
- D) Resultaten waterdoorlatendheidsmetingen
- E) Toelichting pneumatische Slug-Test

VERZENDLIJST

1 x Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden te Houten t.a.v. de heer R.Bolt



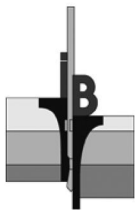
Opdracht : 02P011039-03
Document : 02P011039-03-RG-01
Project : Uitvoering HPT-sonderingen aan Sterke Lekdijk (WAM en CUB)

1. INLEIDING

In het kader van het project Sterke Lekdijk wordt door ons bureau in opdracht van het Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden uit Houten divers geotechnisch onderzoek uitgevoerd.

Onderdeel van dit onderzoek is het uitvoeren van HPT-sonderingen. Middels de HPT-sondering wordt op een hoger detailniveau inzicht verkregen in de waterdoorlatendheid van de bodem en daarmee de aanwezigheid van waterremmende en watervoerende lagen.

Voorliggend worden de resultaten van het grondonderzoek gepresenteerd voor 8 HPT-sonderingen binnen het traject WAM en CUB. Daarnaast worden kort de bevinden van de HPT-sonderingen beschreven, waarbij tevens eerder door ons bureau uitgevoerde HPT-sonderingen worden betrokken.



Opdracht : 02P011039-03
Document : 02P011039-03-RG-01
Project : Uitvoering HPT-sonderingen aan Sterke Lekdijk (WAM en CUB)

2. ONDERZOEK

2.1 HPT-Sonderingen

Er zijn 8 sonderingen gemaakt met een elektrische conus conform NEN-EN-ISO 22476-1. Bij alle sonderingen is naast de conusweerstand tevens de plaatselijke wrijving gemeten en geregistreerd. De relatie tussen conusweerstand, en plaatselijke wrijving, het wrijvingsgetal, geeft een indicatie van de verschillende grondsoorten onder het grondwaterniveau. Naast de conusweerstand en de plaatselijke wrijving is tevens de waterspanning geregistreerd. Op einddiepte is hierbij een dissipatietest uitgevoerd. De sonderingen zijn uitgevoerd door een sondeertruck.

Tevens zijn op dezelfde locaties 8 HPT-sonderingen uitgevoerd. Met een sondeerunit wordt een HPT-sonde in de grond gedrukt met een constante snelheid van 2 cm/s. Tijdens het sonderen wordt met een constant debiet water via cirkelvormig filter in de sonde de grond in gepompt. Naast het debiet wordt het drukverschil om het debiet constant te houden gedurende de proef gemeten (HPT-druk), evenals de elektrische geleidbaarheid. Tijdens de proef worden dissipatietesten gedaan om de hydrostatische druk op de locatie te bepalen. De waargenomen HPT-druk wordt dan gecorrigeerd voor deze hydrostatische druk, waarmee de gecorrigeerde HPT-druk wordt berekend. Deze gecorrigeerde HPT-druk is een indicatie van de relatieve doorlatendheid van de bodem.

Aan de hand van een aantal waterdoorlatendheidsmetingen, is een inschatting gemaakt van de absolute waterdoorlatendheid op de locatie op verschillende dieptes.

Voor de grafieken van de sonderingen wordt verwezen naar bijlage C; de locatie van de sondeerpunten is aangegeven op de situatietekening SIT-01, toegevoegd onder bijlage A. Voor een verklaring van de op de tekening gebruikte tekens wordt verwezen naar de "Verklaring Codering" die onder bijlage D aan dit rapport is toegevoegd.

2.2 Peilbuizen

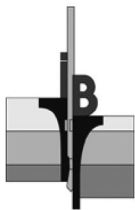
Met de sondeertruck zijn na de uitvoering van de HPT-sonderingen peilbuizen weggedrukt op verschillende dieptes. De peilbuizen hebben een binnendiameter van 28 mm, de filterlengte bedraagt 20 cm. De filterdieptes per HPT-sondering zijn gepresenteerd in bijlage D.

Allereerst is er een holle casing met een verloren punt weggedrukt, waarin vervolgens de peilbuis is geplaatst.

2.3 Doorlatendheidsmetingen

Bij pneumatische slug-testen wordt middels het verhogen van de luchtdruk de waterstand verlaagd in een afgesloten bron. Wanneer luchtdruk in de bron wordt verhoogd, daalt de waterstand totdat het verschil tussen de verhoogde luchtdruk en de verlaagde waterstand gelijk is. Zodra de waterstand (= totale druk) stabiel is, wordt de luchtdruk middels een "release valve" plotseling verlaagd. Vervolgens zal de waterstand zich herstellen. De verschillen in waterhoogte en tijd worden geregistreerd door de logger.

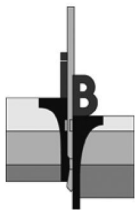
Op basis van de geregistreeerde waterhoogte in relatie tot de tijd kan de k-waarde worden berekend, middels de methode van Hvorslev (watervoerend pakket), of Bouwer-Rice (freatisch). De resultaten van deze proef zijn gepresenteerd in bijlage D. Voor een uitgebreide toelichting over de uitvoering en uitwerking van de proef wordt verwezen naar bijlage E.



Opdracht : 02P011039-03
Document : 02P011039-03-RG-01
Project : Uitvoering HPT-sonderingen aan Sterke Lekdijk (WAM en CUB)

2.4 Inmeting en waterpassing

Met behulp van een GNSS meetsysteem zijn de locaties van de onderzoekspunten uitgezet in RD-coördinaten en is de hoogte van het maaiveld ter plaatse van ieder onderzoekspunt bepaald ten opzichte van NAP. De gemeten hoogte is gecontroleerd aan de hand van een NAP-referentieniveau in de omgeving van het werk. Voor de resultaten van de inmeting en waterpassing wordt verwezen naar de inmeet- en waterpasstaat bijlage B.



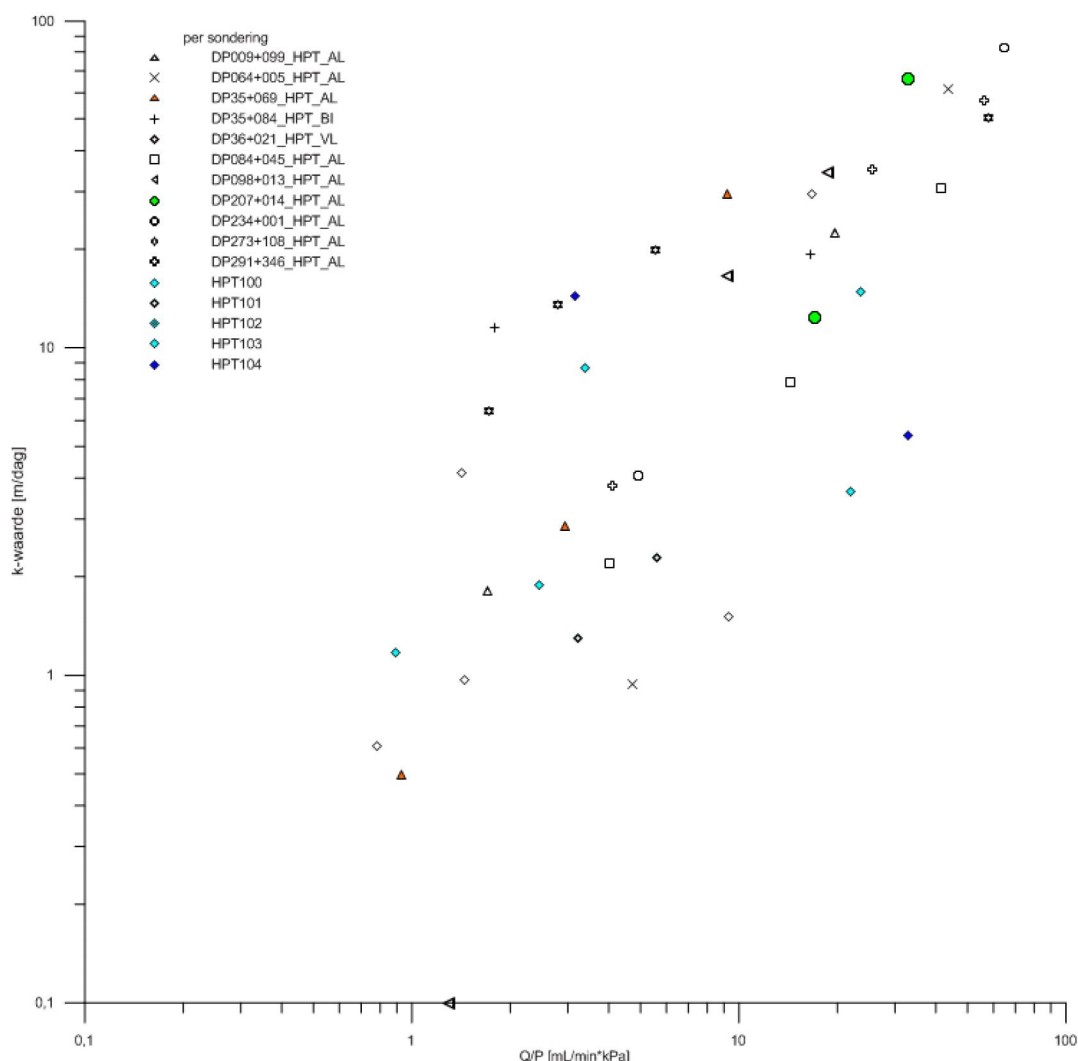
Opdracht : 02P011039-03
Document : 02P011039-03-RG-01
Project : Uitvoering HPT-sonderingen aan Sterke Lekdijk (WAM en CUB)

3. BEPALING K-WAARDE UIT HPT-SONDERINGEN

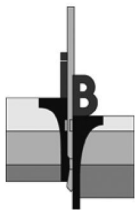
Nabij de HPT-sonderingen zijn op verschillende dieptes waterdoorlatendheidsmetingen uitgevoerd om een vertaalslag te maken van de gecorrigeerde HPT-druk naar een absolute waterdoorlatendheid (k-waarde). Per HPT-sondering zijn minimaal 2 slug-testen uitgevoerd bij hoge- een lage HPT-druk.

Er bestaat een verband tussen de waterdoorlatendheid (k-waarde) en het injectiedebiet gedeeld door de druk die nodig is om dit debiet te injecteren in het betreffende bodem materiaal. Hierbij gaat het om de gecorrigeerde HPT-druk, de gemeten druk minus de luchtdruk en de hydrostatische waterdruk.

In Figuur 1 is het verband weergegeven tussen de gemeten k-waarde (y-as) en het injectiedebiet gedeeld door de gecorrigeerde HPT-druk (x-as). Naast de recent uitgevoerde HPT-sonderingen, zijn ook de resultaten van de eerder door ons bureau uitgevoerde HPT-sonderingen gepresenteerd.



Figuur 1. Relatie tussen de gemeten k-waarde middels de pneumatische slug-testen en de verhouding tussen de stroomsnelheid en de gecorrigeerde HPT-druk (Q/P).

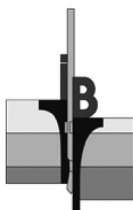


Opdracht : 02P011039-03
Document : 02P011039-03-RG-01
Project : Uitvoering HPT-sonderingen aan Sterke Lekdijk (WAM en CUB)

In het algemeen geldt de veronderstelling dat de k-waardes die gemeten worden middels slug-testen de daadwerkelijke k-waarde onderschatten. De k-waarden die worden gemeten door ons bureau zijn lager dan bijvoorbeeld de resultaten die uit Regis voortkomen.

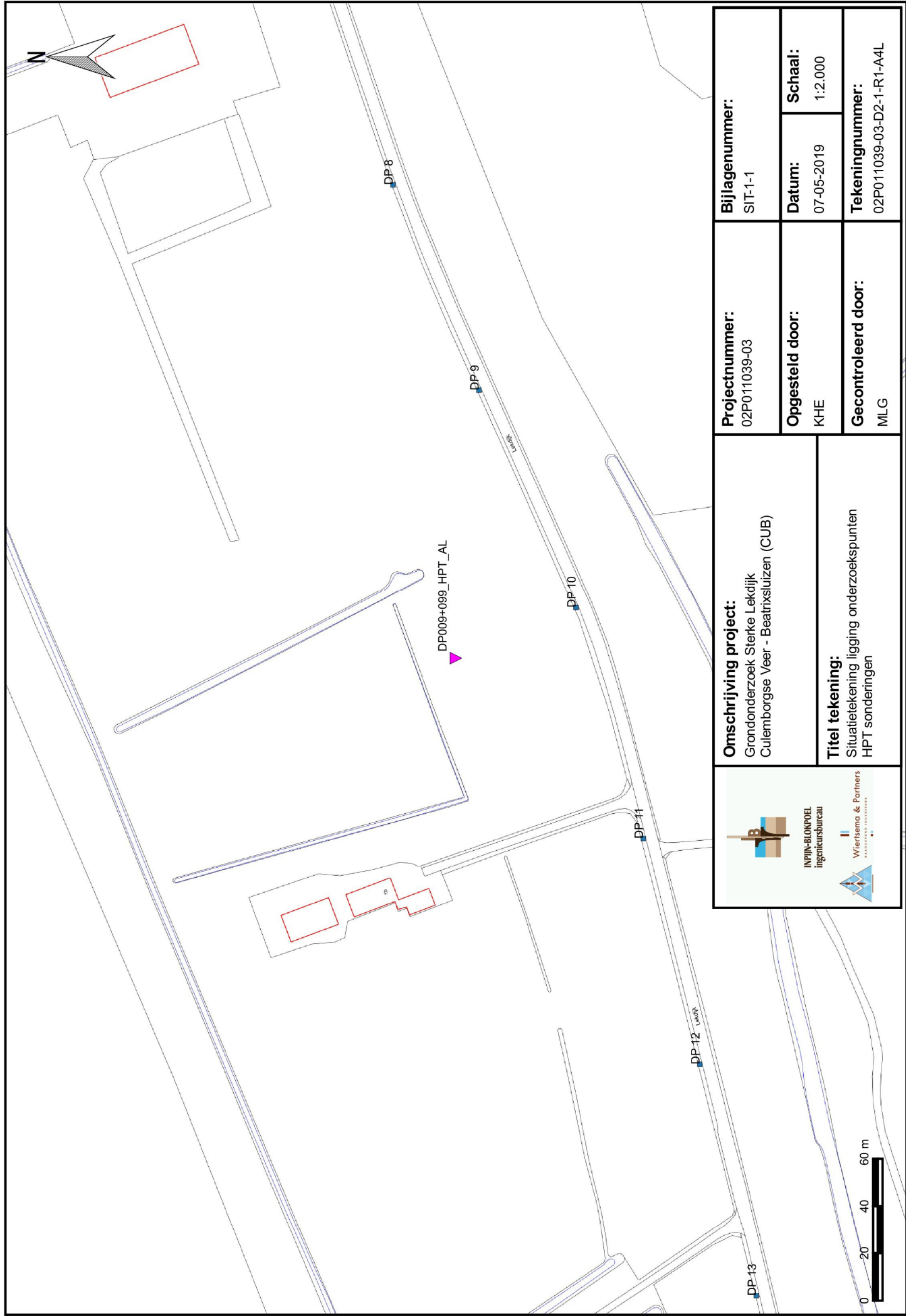
Naast het mogelijke schaal-effect, kunnen hier nog andere oorzaken aan ten grondslag liggen. Momenteel is ons bureau bezig met nader onderzoek naar mogelijke verklaringen voor deze onderschatting. Om onduidelijkheid over de vertaling van de Q/P naar een absolute k-waarde zoveel mogelijk te voorkomen, zal door ons bureau de vertaling naar absolute k-waarde gepresenteerd worden, zodra het onderzoek is afgerond. In de bijgevoegde HPT-sonderingen is dus enkel de Q/P gepresenteerd en de k-waarden die gemeten zijn in de peilbuizen.

Indien wenselijk kunnen de resultaten wel gerelateerd worden aan de kD-waarden die uit Regis/WBI naar voren komen.

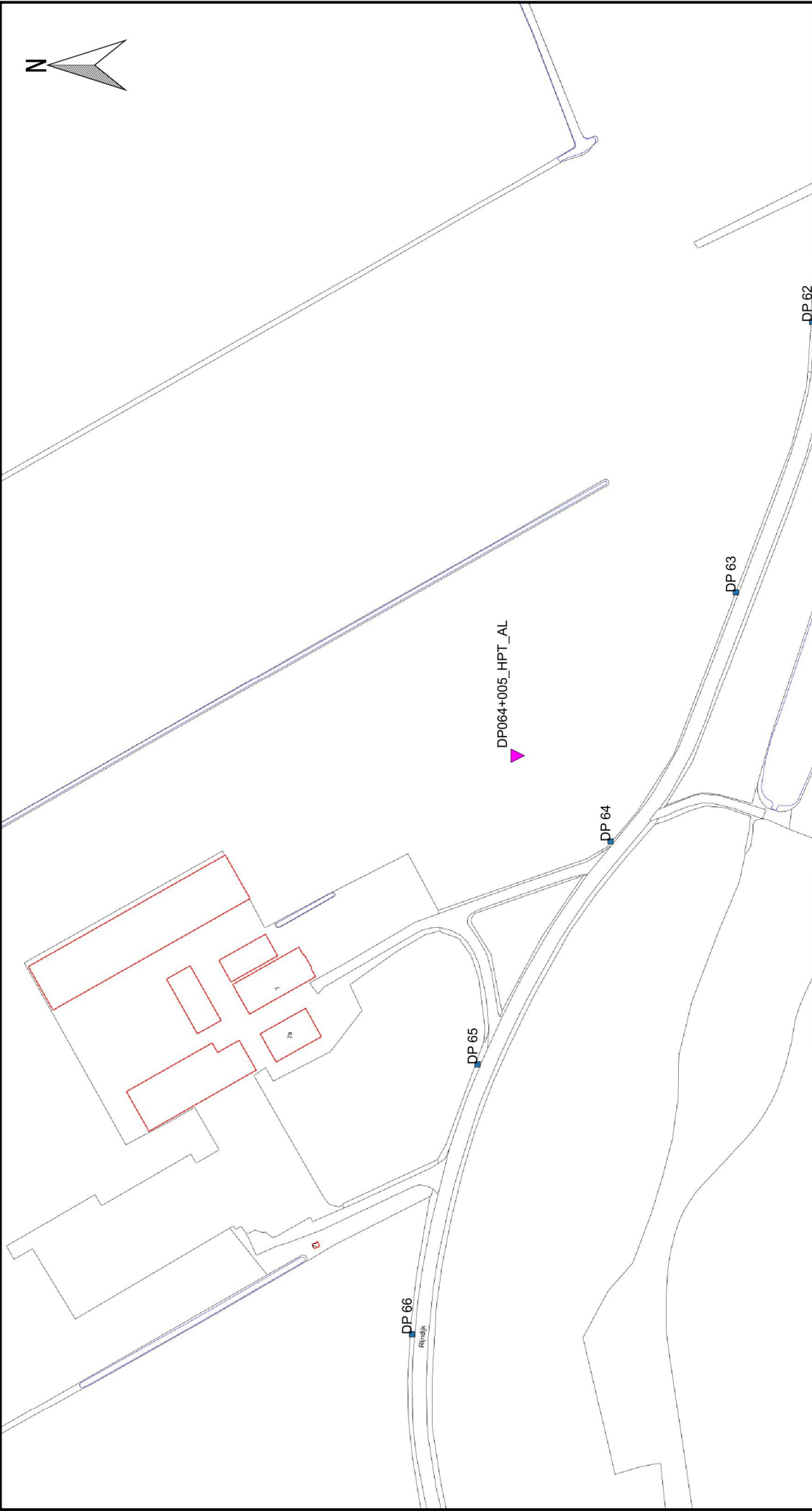


Opdracht : 02P011039-01
Document : 02P011039-01-RG-01
Project : Uitvoering HPT-sonderingen aan Sterke Lekdijk (WAM enCUB)

Bijlage A

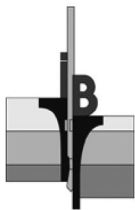


Omschrijving project: Grondonderzoek Sterke Lekdijk Culemborgse Veer - Beatrixsluizen (CUB)	Projectnummer: 02P011039-03		Bijlagennummer: SIT-1-1	
	Opgesteld door: KHE		Datum: 07-05-2019	Schaal: 1:2.000
	Gecontroleerd door: MLG		Tekeningnummer: 02P011039-03-D2-1-R1-A4L	
Titel tekening: Situatietekening ligging onderzoekspunten HPT sonderingen				
 INPIJN-BLOKPOEL ingenieursbureau  Wiersema & Partners ADVISEURS IN TECHNIEK				



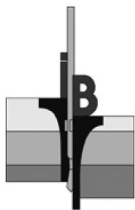
 INPIJN-BLOKPOEL ingenieursbureau  Wiersema & Partners ADVISEURS IN TECHNIEK	Omschrijving project: Grondonderzoek Sterke Lekdijk Culemborgse Veer - Beatrixsluizen (CUB)		Projectnummer: 02P011039-03	Bijlagennummer: SIT-1-2
	Titel tekening: Situatietekening ligging onderzoekspunten HPT sonderingen		Opgesteld door: KHE	Datum: 07-05-2019
			Schaal: 1:2.000	Tekeningnummer: 02P011039-03-D2-2-R1-A4L





Opdracht : 02P011039-01
Document : 02P011039-01-RG-01
Project : Uitvoering HPT-sonderingen aan Sterke Lekdijk (WAM enCUB)

Bijlage B



Opdracht : 02P011039-03

Project : Grondonderzoek Sterke Lekdijk Culemborgse Veer - Beatrixsluis (CUB)

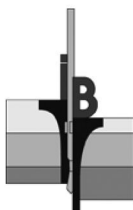
WATERPASSTAAT

Meetmethode : Uitgezet en gewaterpast middels GNSS-rtk
Datum meting : Januari/April 2019
Hoogte (Z) t.o.v. : NAP

<i>Meetpunten</i>	<i>x-coördinaat [m]</i>	<i>y-coördinaat [m]</i>	<i>z-coördinaat (hoogte) [m t.o.v. NAP]</i>
DP009+099_HPT_AL	158745,3	445072,5	5,52
DP064+005_HPT_AL	154310,7	443325,1	5,09
DP084+045_HPT_AL	152420,9	442812,5	5,36
DP098+013_HPT_AL	151687,3	441818,1	5,75
DP207+014_HPT_AL	142824,3	442146,3	2,54
DP234+001_HPT_AL	140332,7	442583,4	2,00
DP273+108_HPT_AL	137930,2	445503,2	2,41
DP291+346_HPT_AL	136206,4	446362,4	0,64

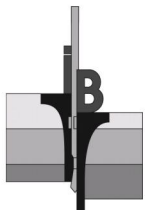
Let op:

Deze waterpasstaat dient om inzicht te geven in de hoogteligging en locaties van de meet- en onderzoekspunten ten opzichte van een referentiepunt. De resultaten dienen niet voor andere doeleinden te worden gebruikt.

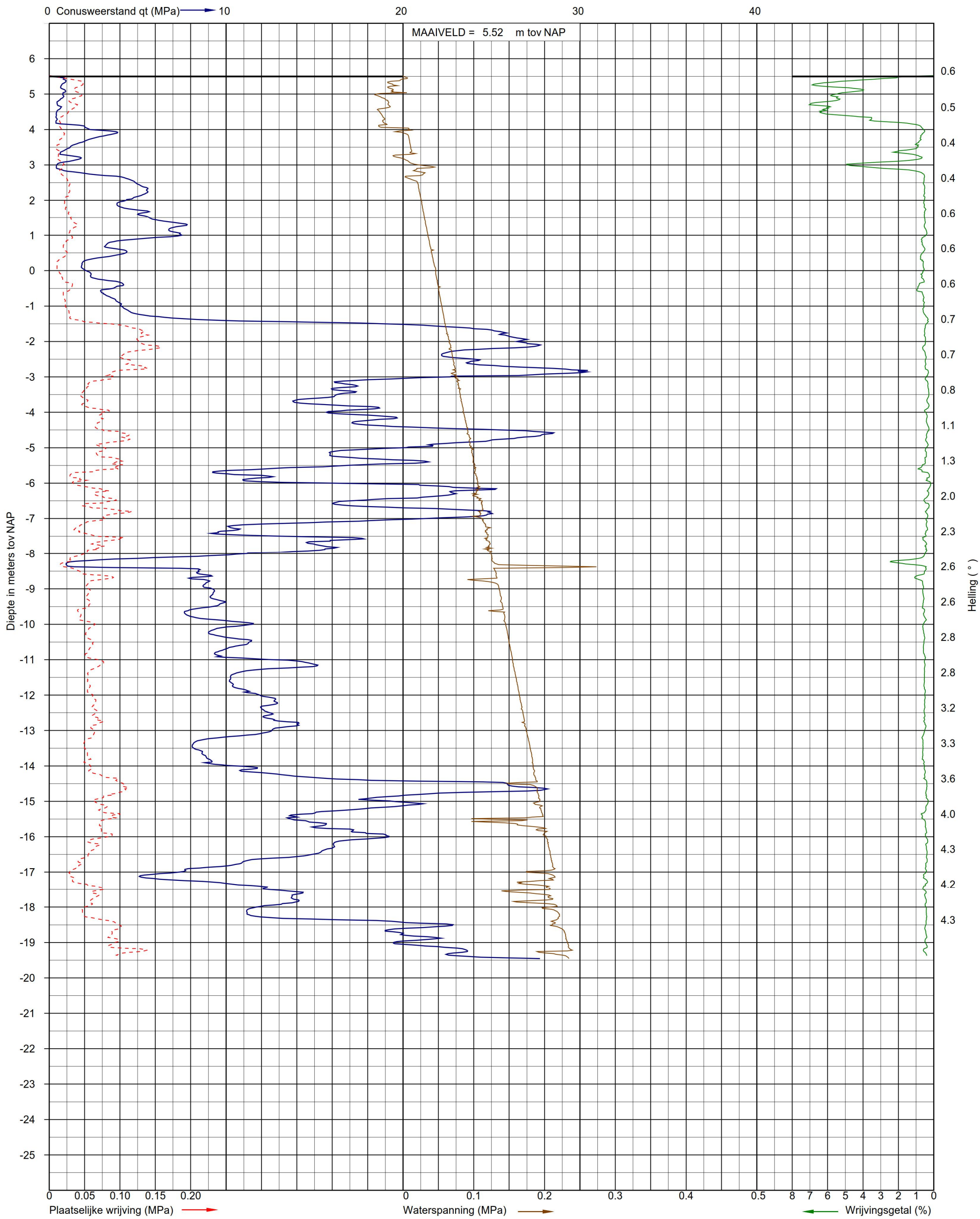


Opdracht : 02P011039-01
Document : 02P011039-01-RG-01
Project : Uitvoering HPT-sonderingen aan Sterke Lekdijk (WAM enCUB)

Bijlage C



Opdracht: 02P011039-03
Project: Grondonderzoek Sterke Lekdijk Culemborgse Veer - Beatrixsluis (CUB)

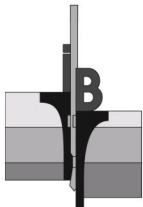


Sondering volgens NEN-EN-ISO 22476-1
Sondeerklasse 2
Conusnummer: P10-CFIIP-10

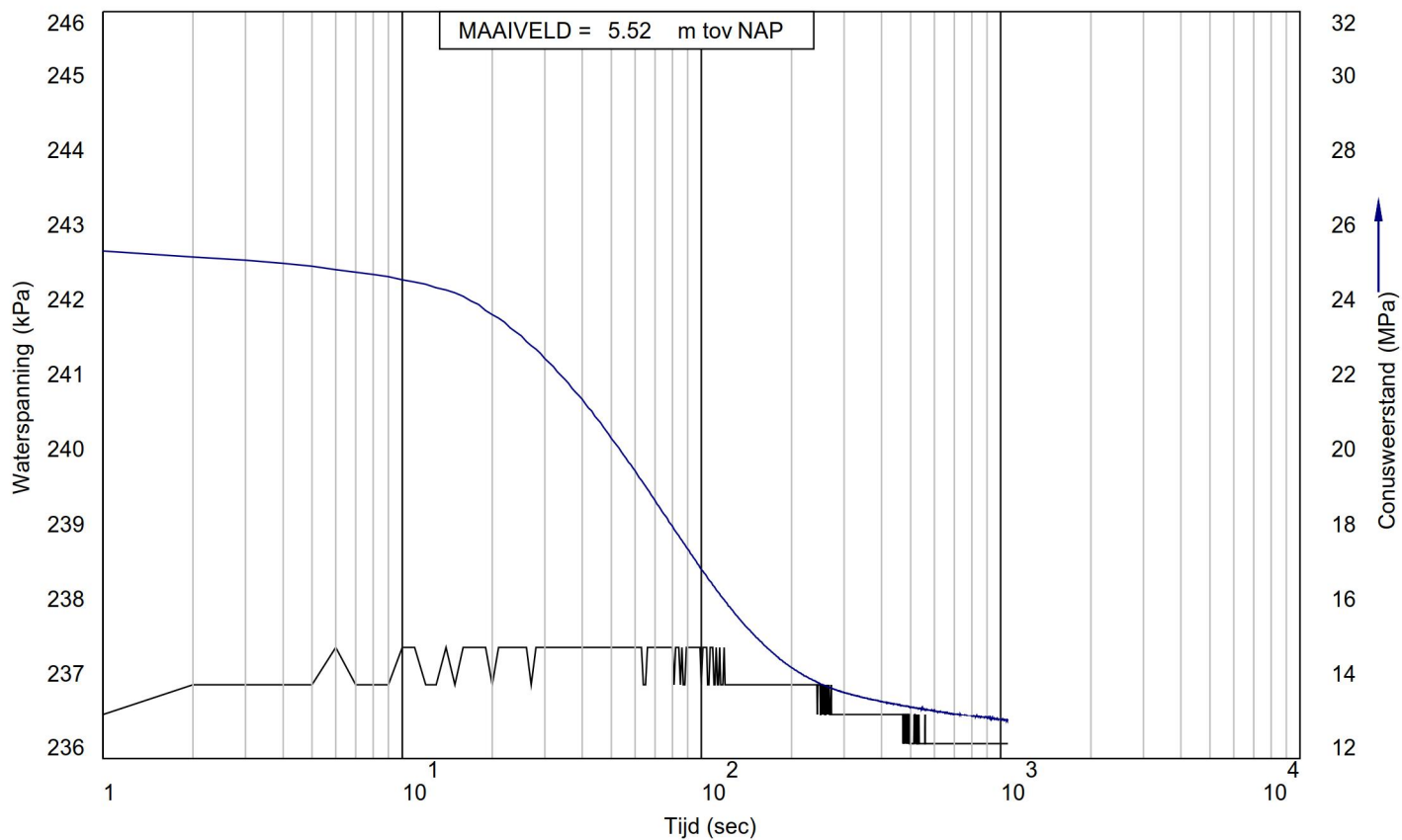
Uitvoerder: RHL
Datum: 23-4-2019

X: 158745,344
Y: 445072,512

Sondering DP009+099_HPT_AL



Opdracht: 02P011039-03
Project: Grondonderzoek Sterke Lekdijk Culemborgse Veer - Beatrixsluis (CUB)

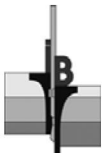


GWS (m-mv):
Conusnummer P10-CFIIP-10

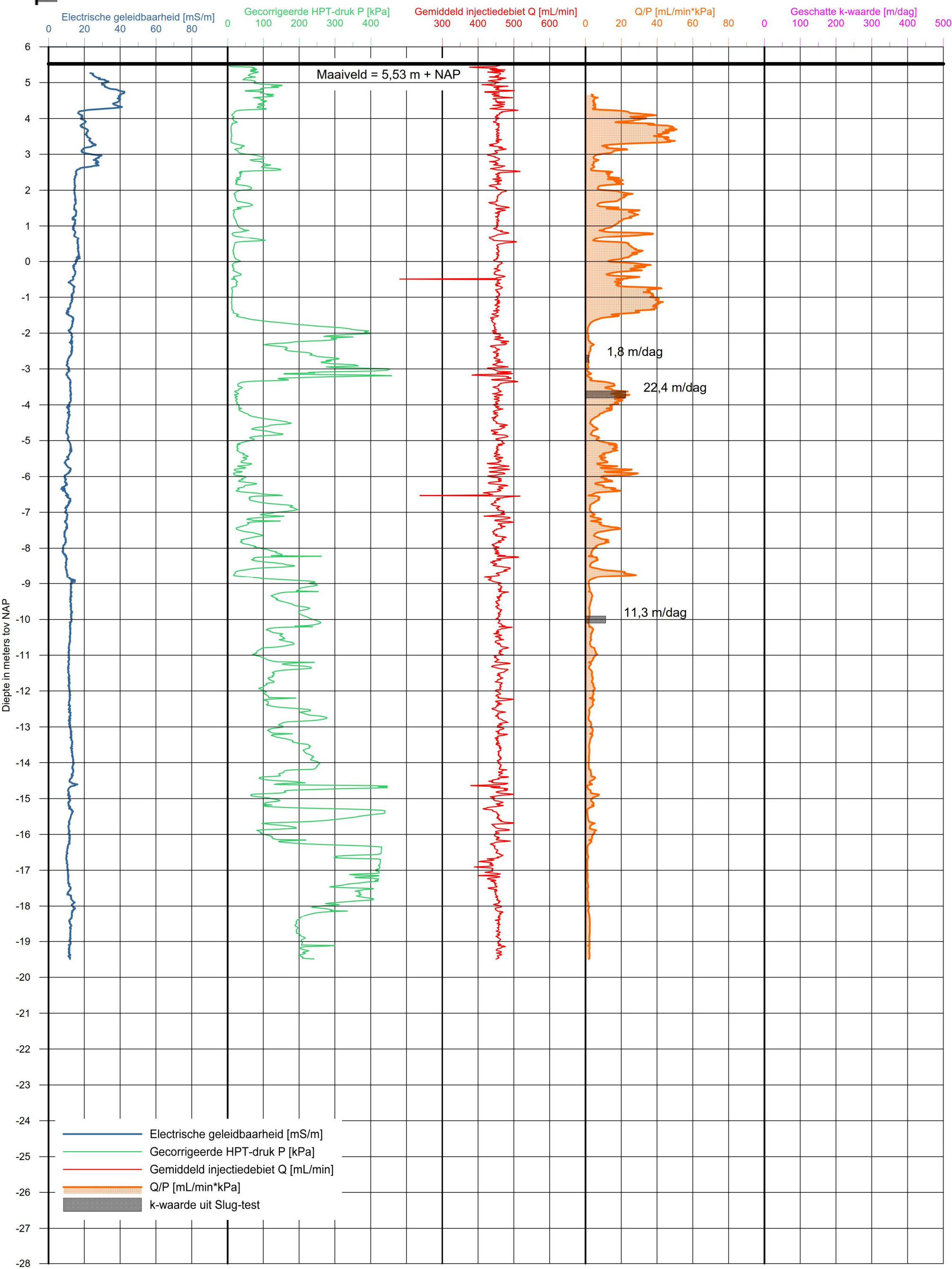
Uitvoerder: RHL
Datum: 23-4-2019

X: 158745,344
Y: 445072,512

Sondering: DP009+099_HPT_AL
Dissipatietest: 25.01 m - mv

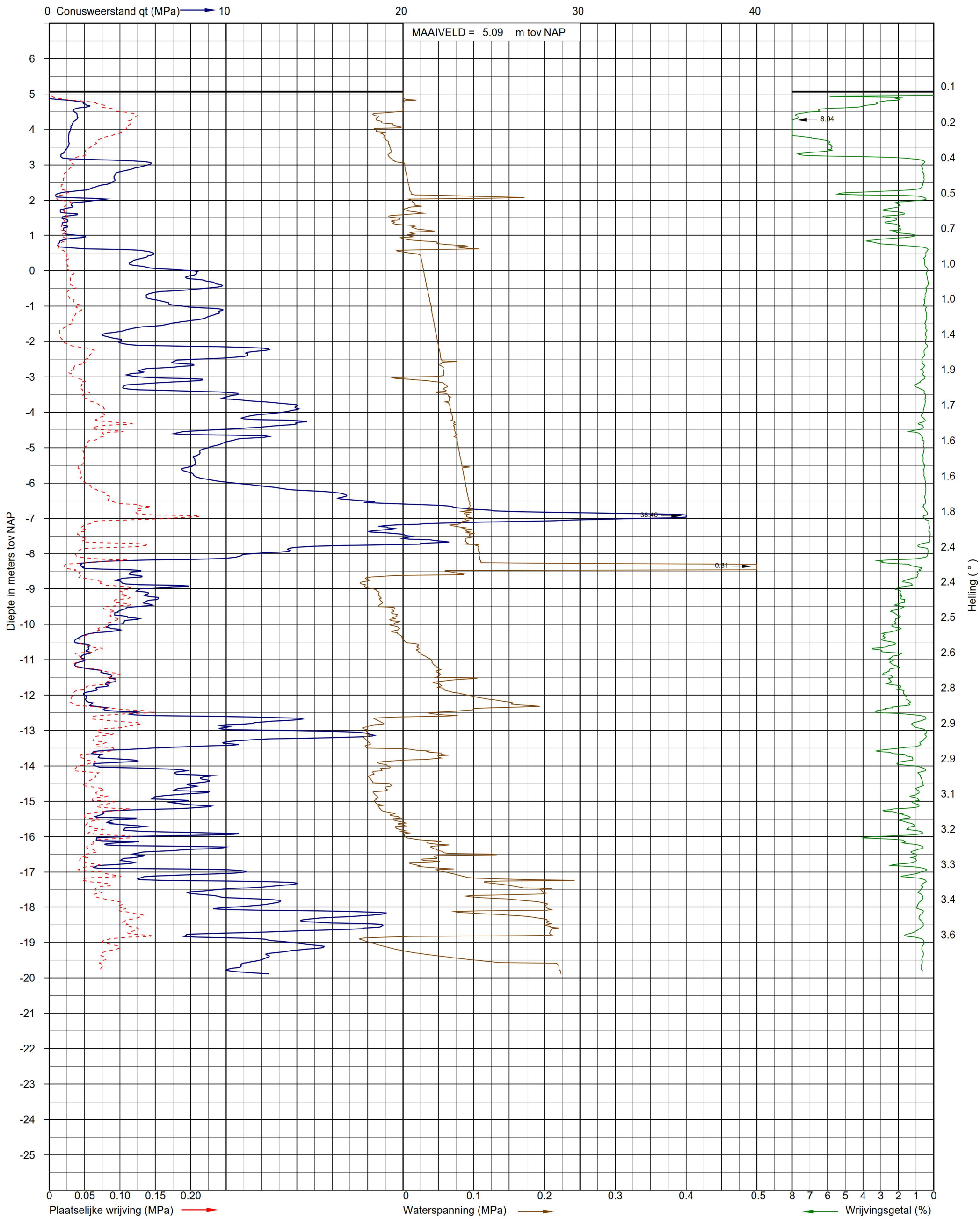
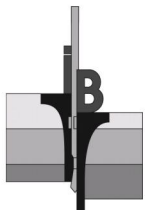


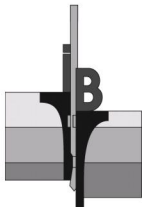
Opdracht : 02P011039
Project : HPT sonderingen WAM
Locatie : Wijk bij Duurstede - Amerongen



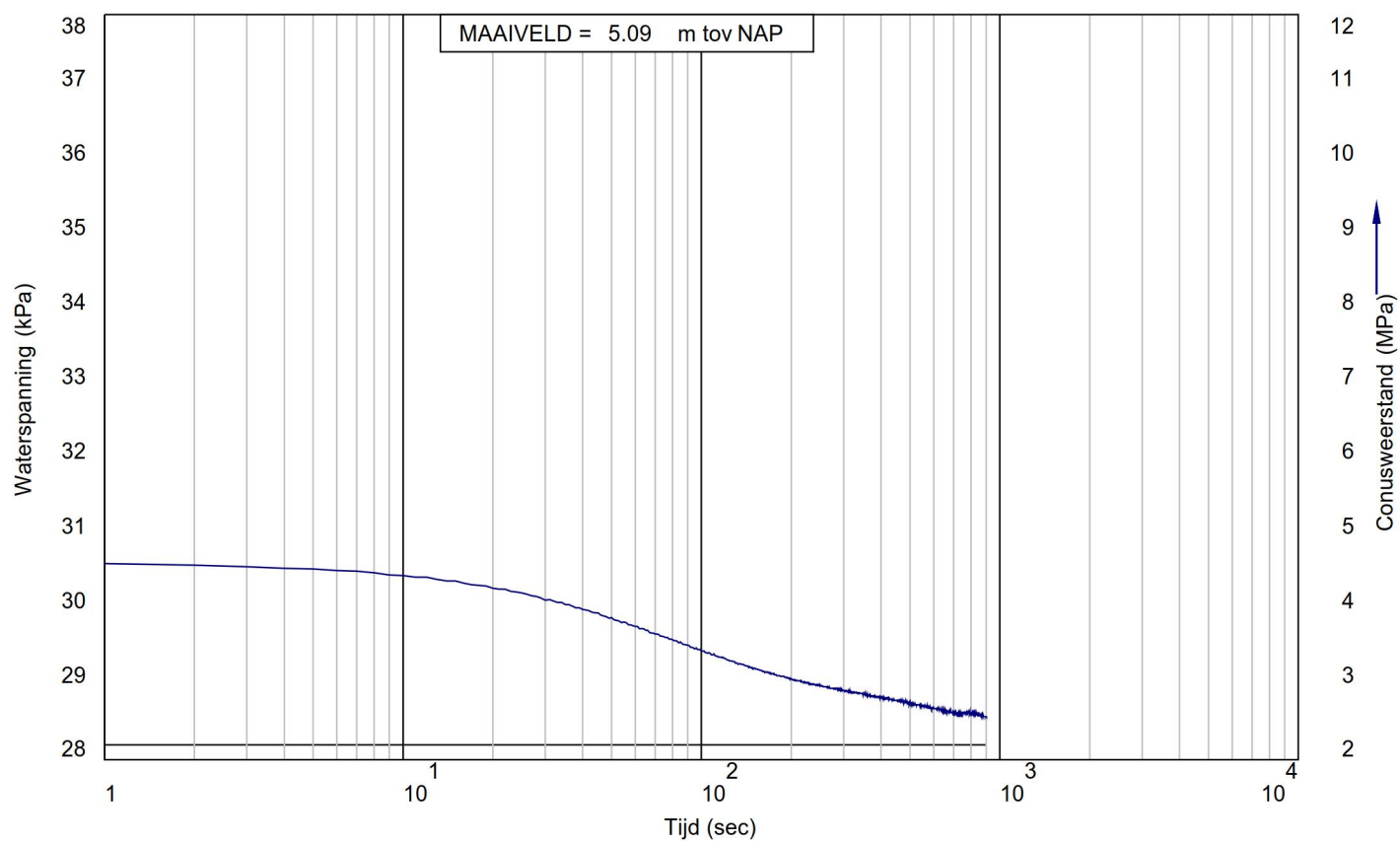
GWS: ca. 4,8 m + NAP

DP009+099_HPT_AL





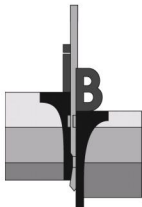
Opdracht: 02P011039-03
Project: Grondonderzoek Sterke Lekdijk Culemborgse Veer - Beatrixsluis (CUB)



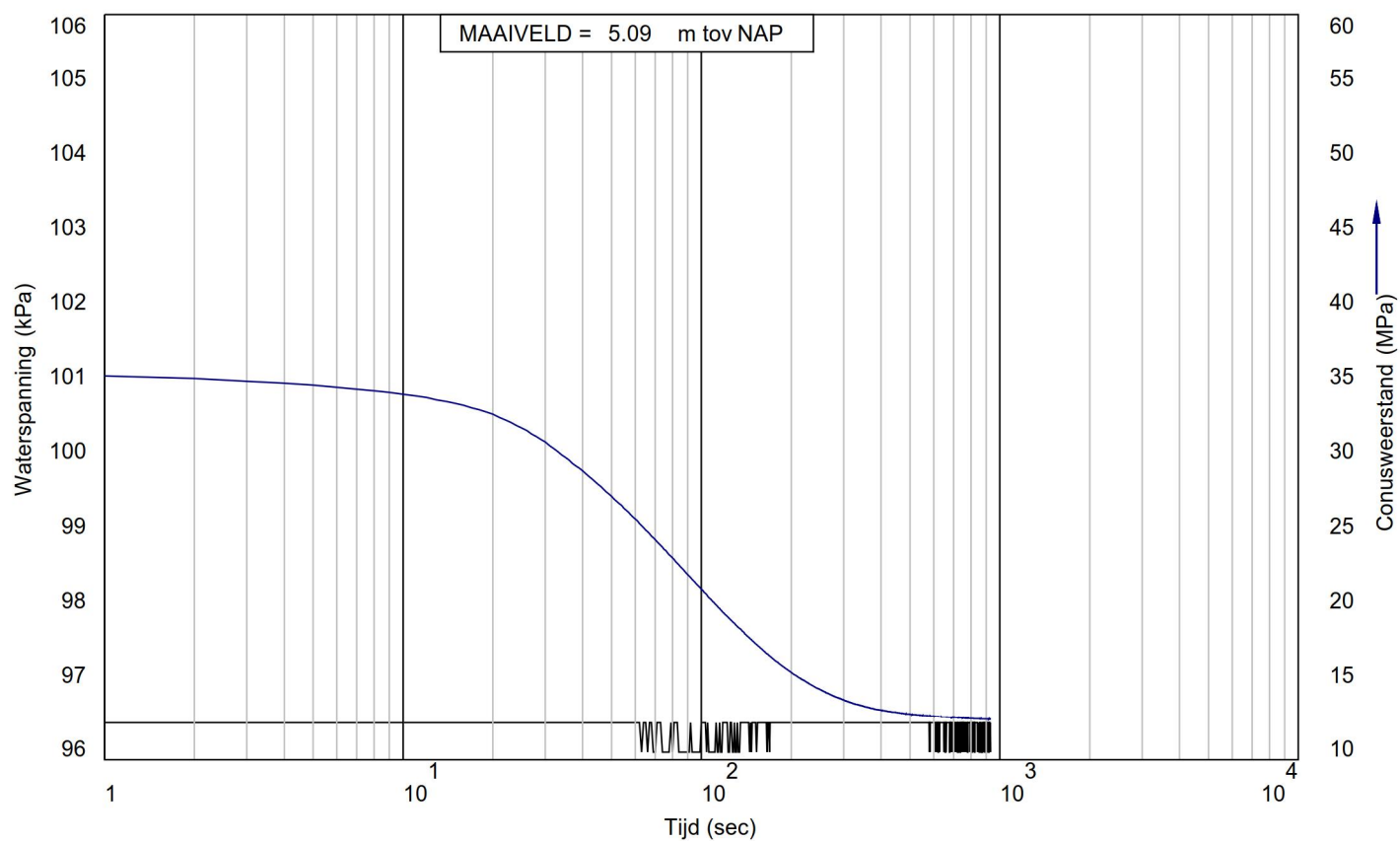
GWS (m-mv):
Conusnummer P10-CFIIP-10

Uitvoerder: RHL
Datum: 16-4-2019
X: 154310,662
Y: 443325,050

Sondering: DP064+005_HPT_AL
Dissipatietest: 5.01 m - mv



Opdracht: 02P011039-03
Project: Grondonderzoek Sterke Lekdijk Culemborgse Veer - Beatrixsluis (CUB)

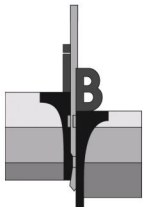


GWS (m-mv):
Conusnummer P10-CFIIP-10

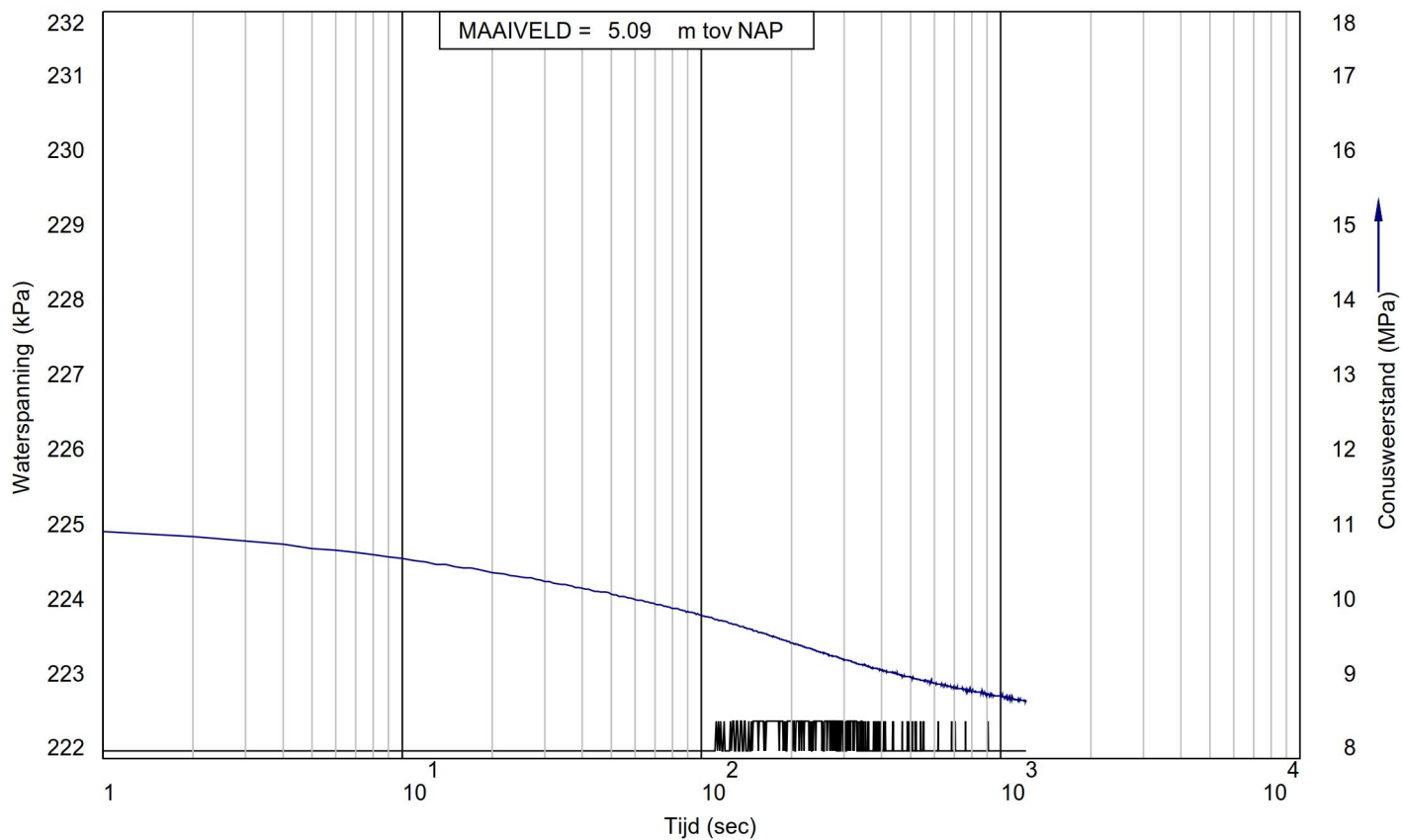
Uitvoerder: RHL
Datum: 16-4-2019

X: 154310,662
Y: 443325,050

Sondering: DP064+005_HPT_AL
Dissipatietest: 12.00 m - mv



Opdracht: 02P011039-03
Project: Grondonderzoek Sterke Lekdijk Culemborgse Veer - Beatrixsluis (CUB)

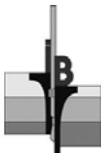


GWS (m-mv):
Conusnummer P10-CFIIP-10

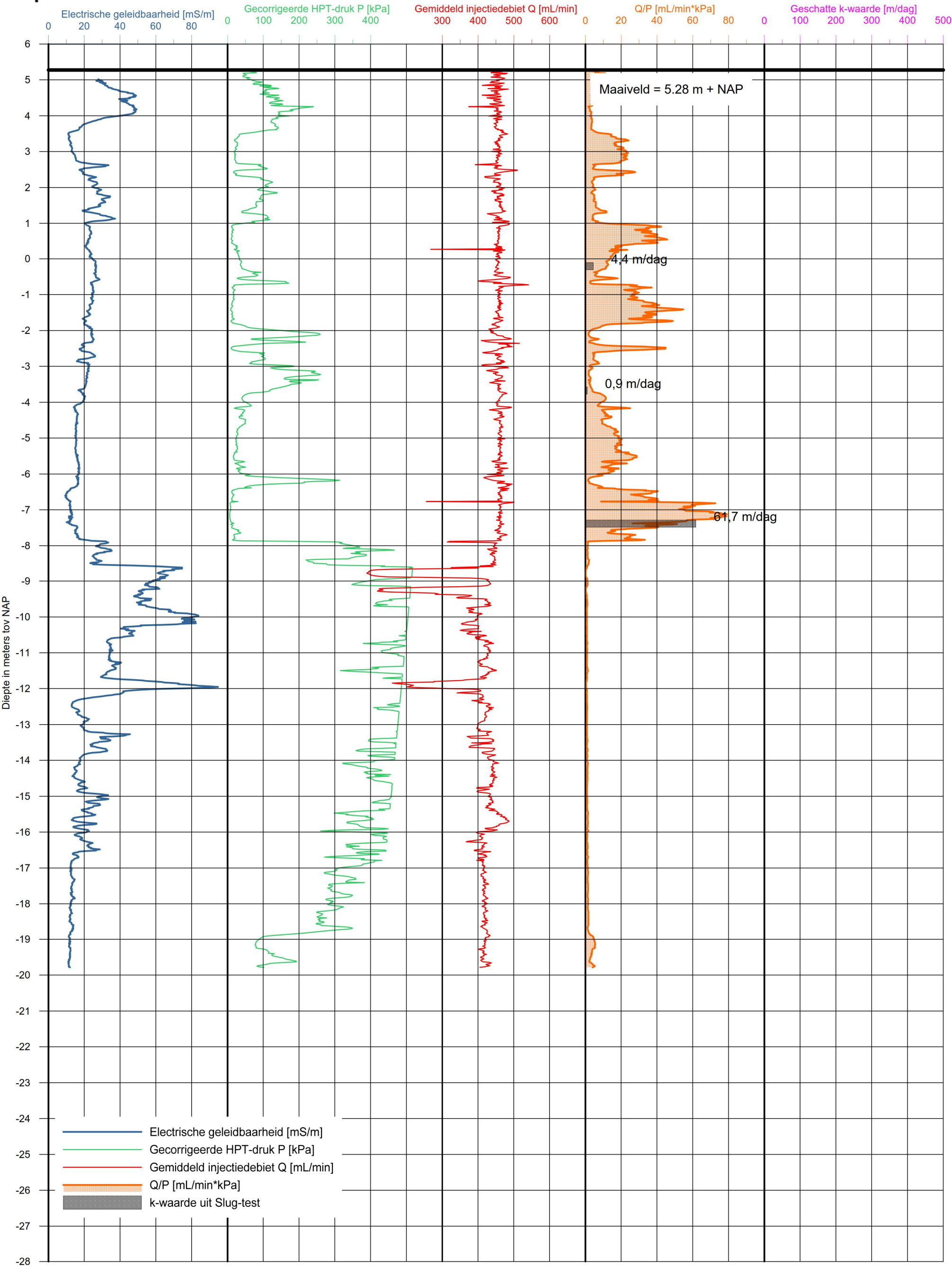
Uitvoerder: RHL
Datum: 16-4-2019

X: 154310,662
Y: 443325,050

Sondering: DP064+005_HPT_AL
Dissipatietest: 25.01 m - mv

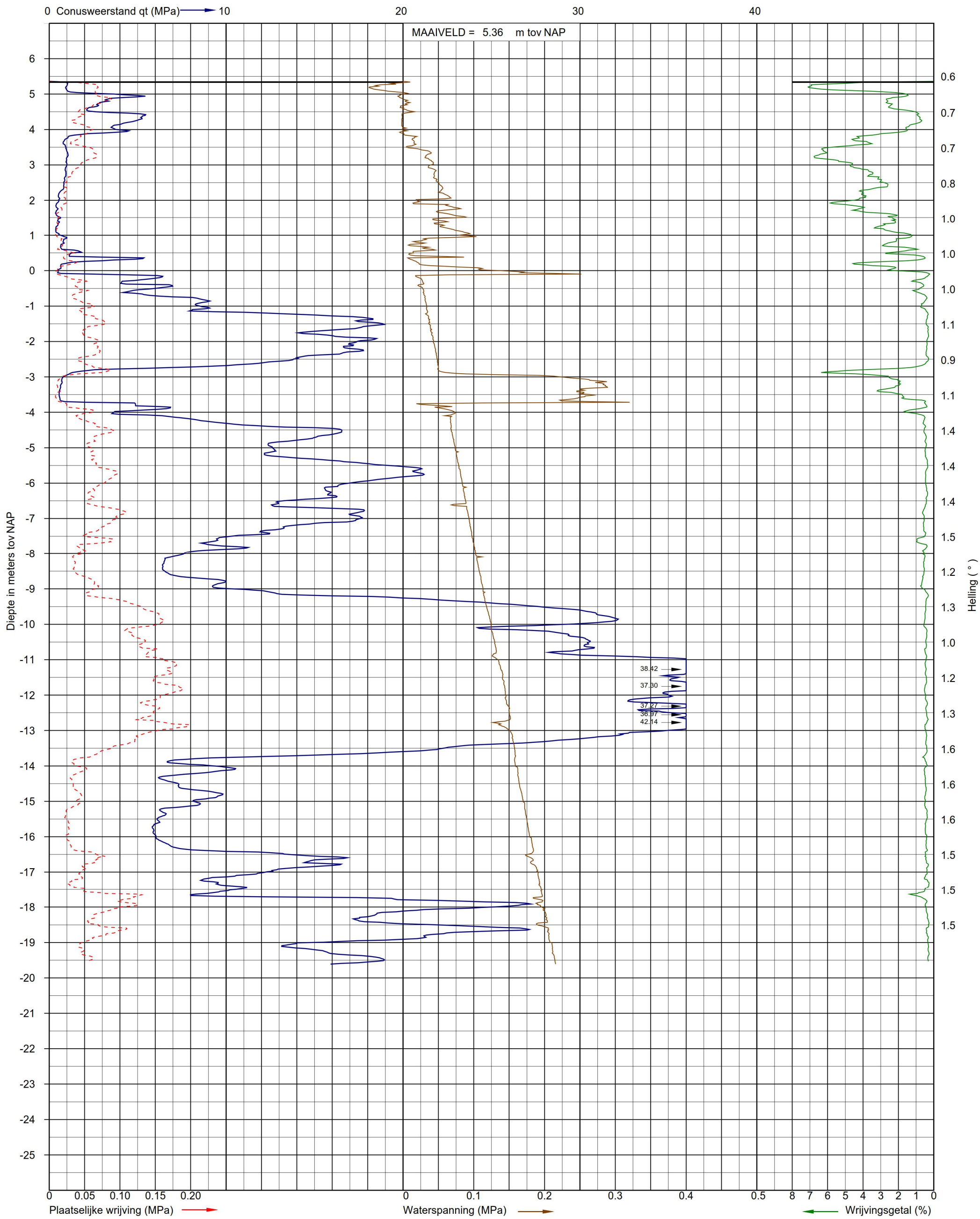
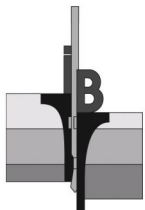


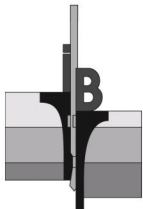
Opdracht : 02P011039
Project : HPT sonderingen WAM
Locatie : Wijk bij Duurstede - Amerongen



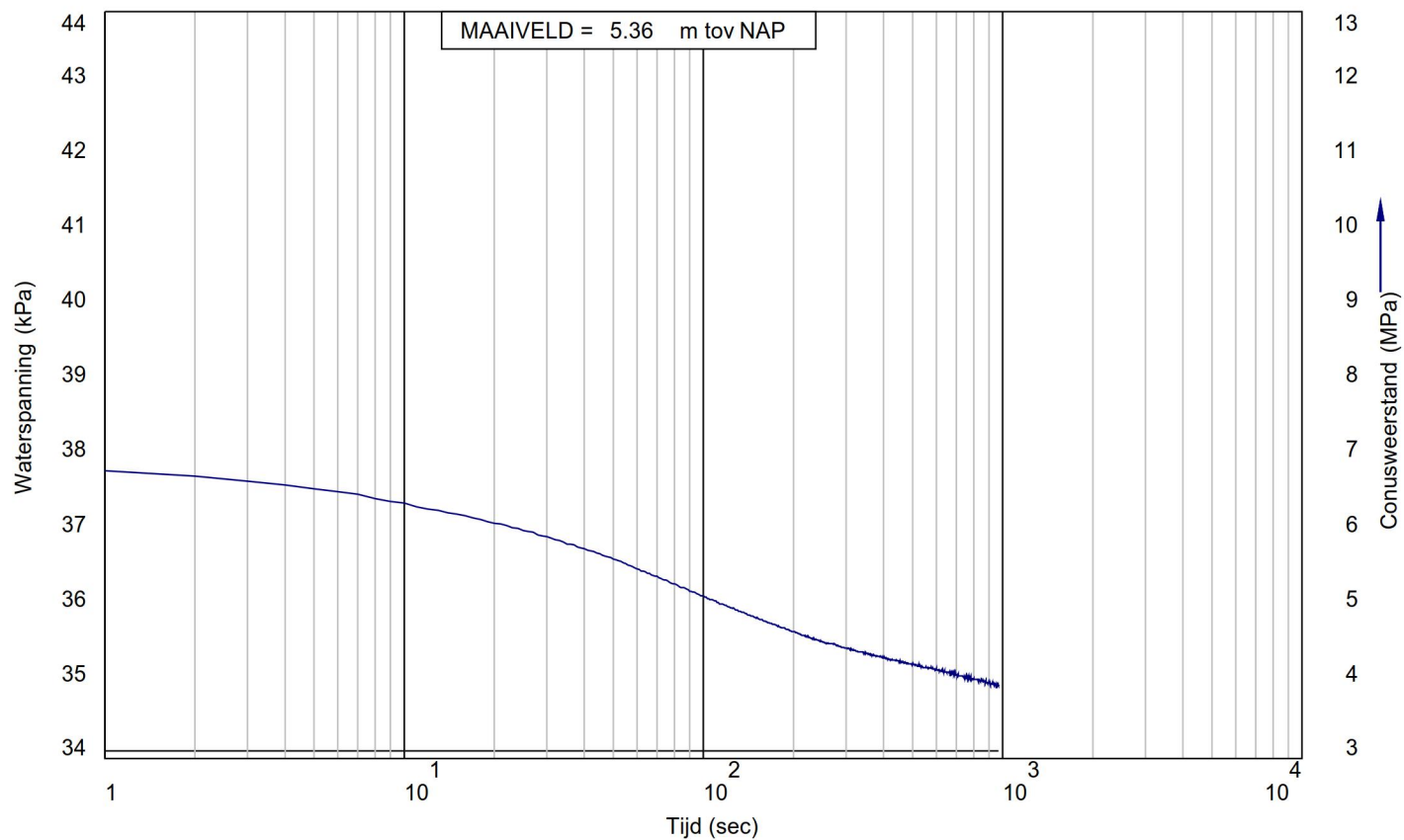
GWS: ca. 3,6 m + NAP

DP064+005_HPT_AL





Opdracht: 02P011039-03
Project: Grondonderzoek Sterke Lekdijk Culemborgse Veer - Beatrixsluis (CUB)

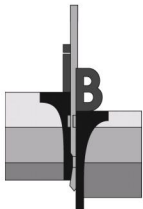


GWS (m-mv):
Conusnummer P10-CFIIP-10

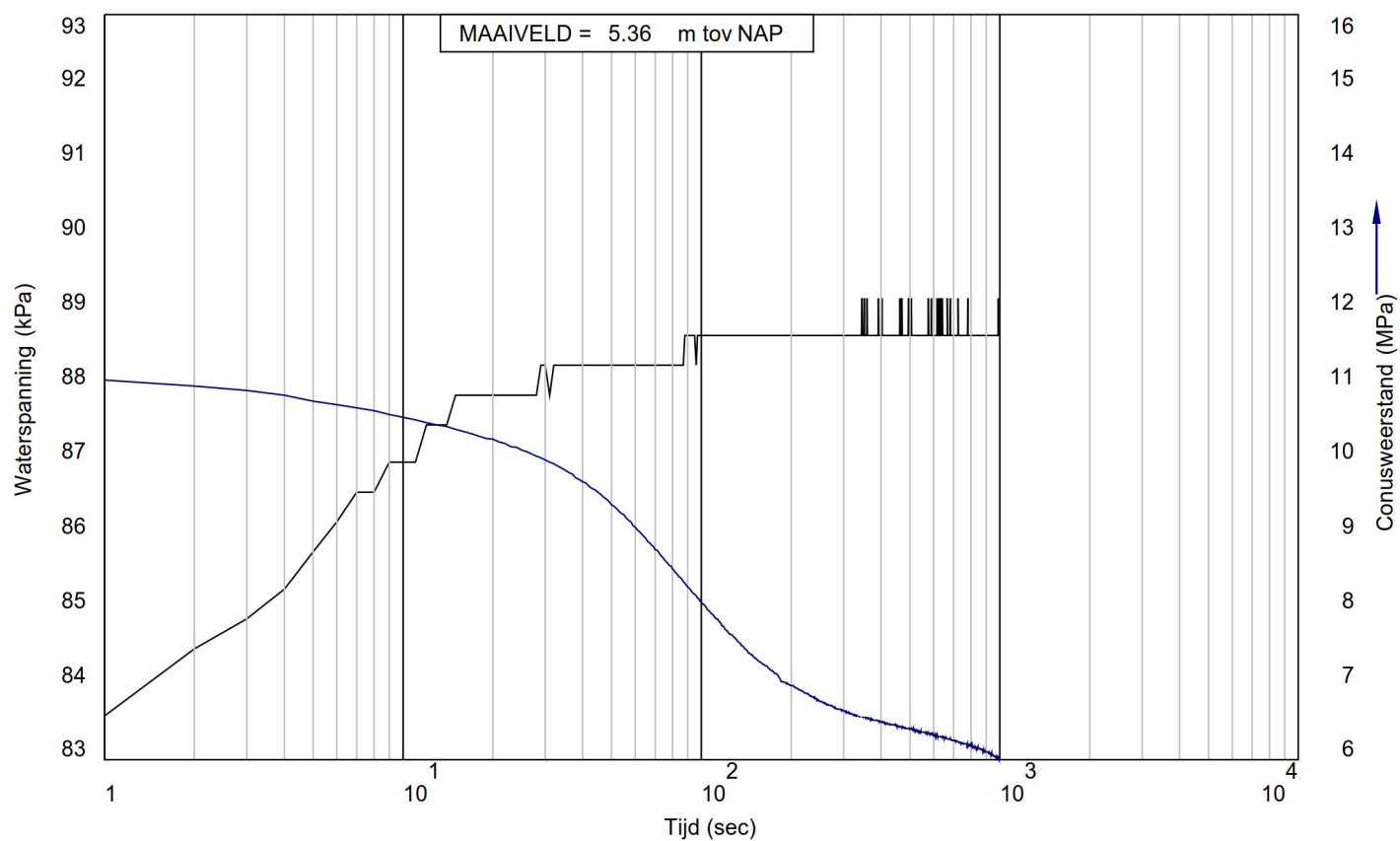
Uitvoerder: RHL
Datum: 17-4-2019

X: 152420,905
Y: 442812,532

Sondering: DP084+45_HPT_AL
Dissipatietest: 6.49 m - mv



Opdracht: 02P011039-03
Project: Grondonderzoek Sterke Lekdijk Culemborgse Veer - Beatrixsluis (CUB)

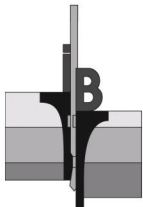


GWS (m-mv):
Conusnummer P10-CFIIP-10

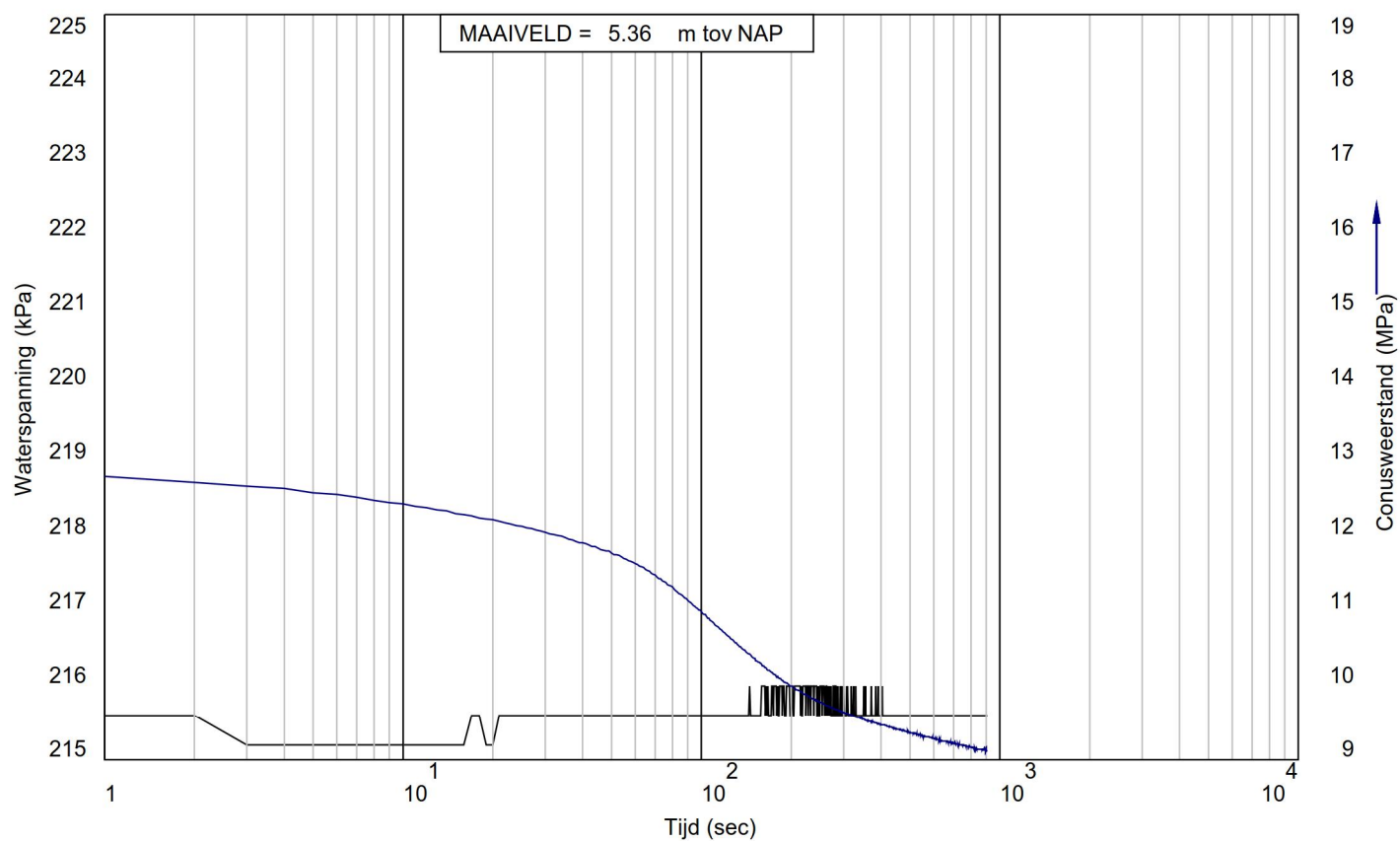
Uitvoerder: RHL
Datum: 17-4-2019

X: 152420,905
Y: 442812,532

Sondering: DP084+45_HPT_AL
Dissipatietest: 12.00 m - mv



Opdracht: 02P011039-03
Project: Grondonderzoek Sterke Lekdijk Culemborgse Veer - Beatrixsluis (CUB)

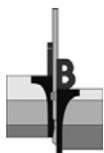


GWS (m-mv):
Conusnummer P10-CFIIP-10

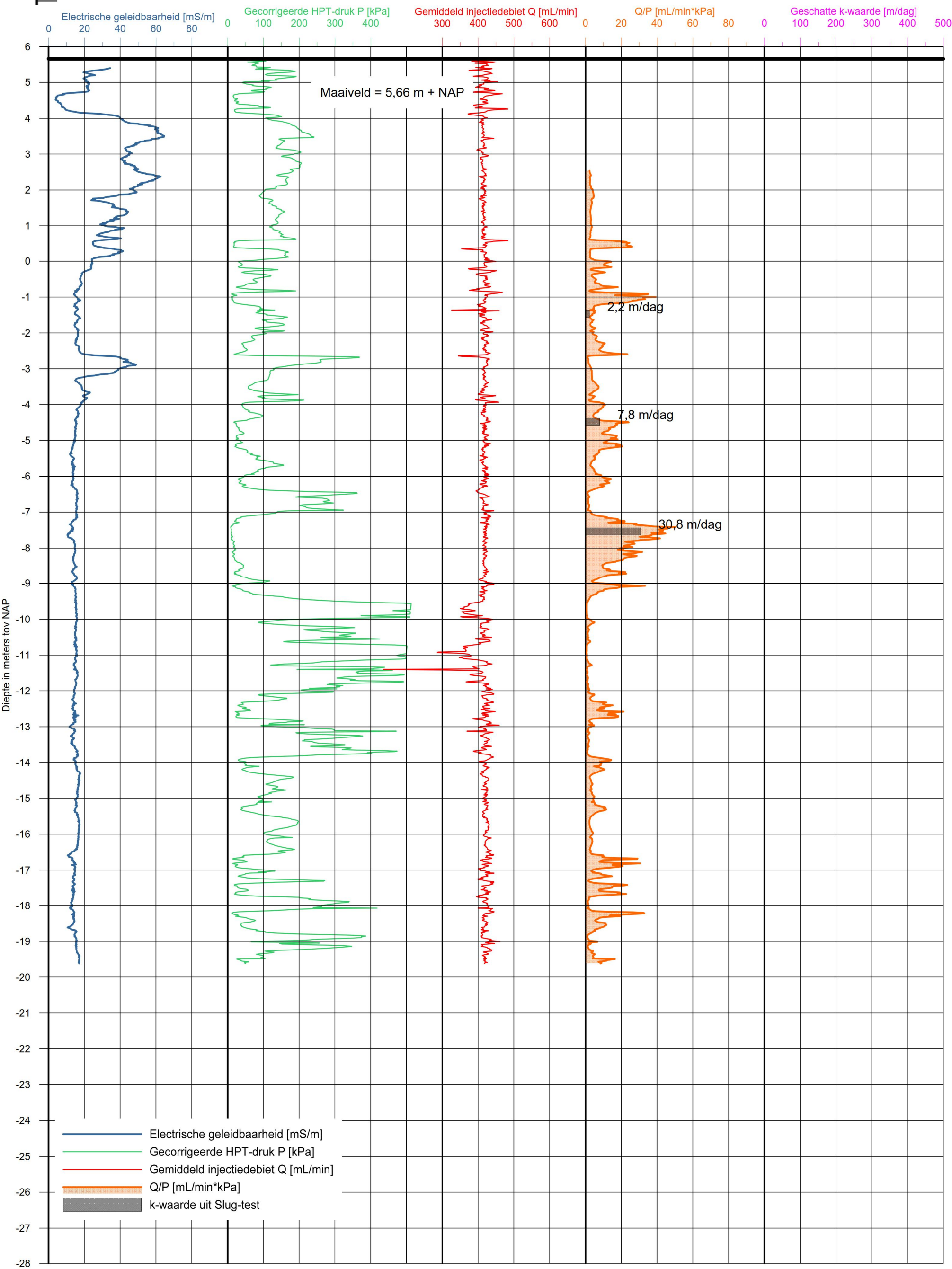
Uitvoerder: RHL
Datum: 17-4-2019

X: 152420,905
Y: 442812,532

Sondering: DP084+45_HPT_AL
Dissipatietest: 25.00 m - mv

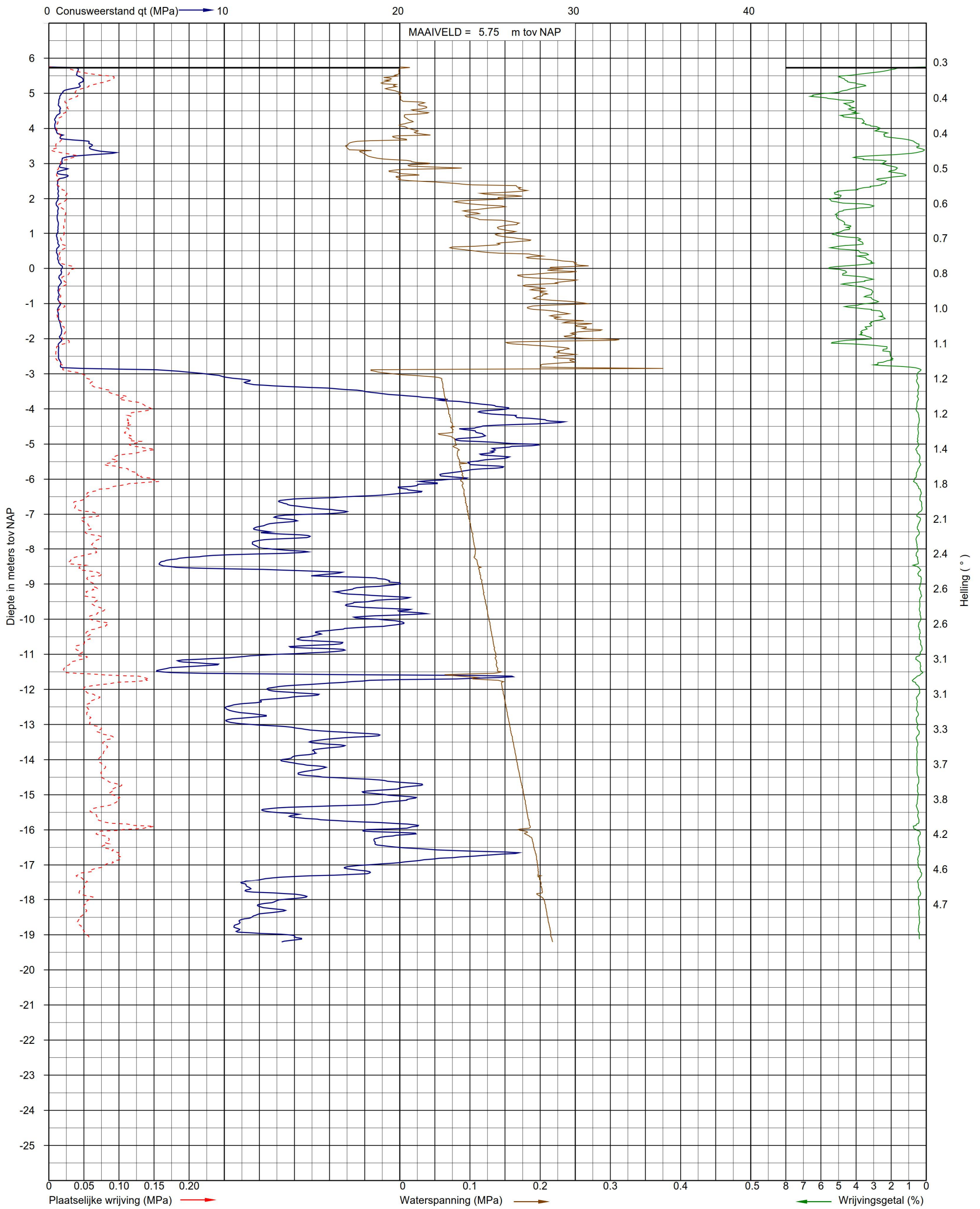
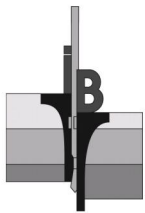


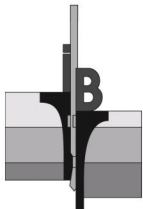
Opdracht : 02P011039
Project : HPT sonderingen WAM
Locatie : Wijk bij Duurstede - Amerongen



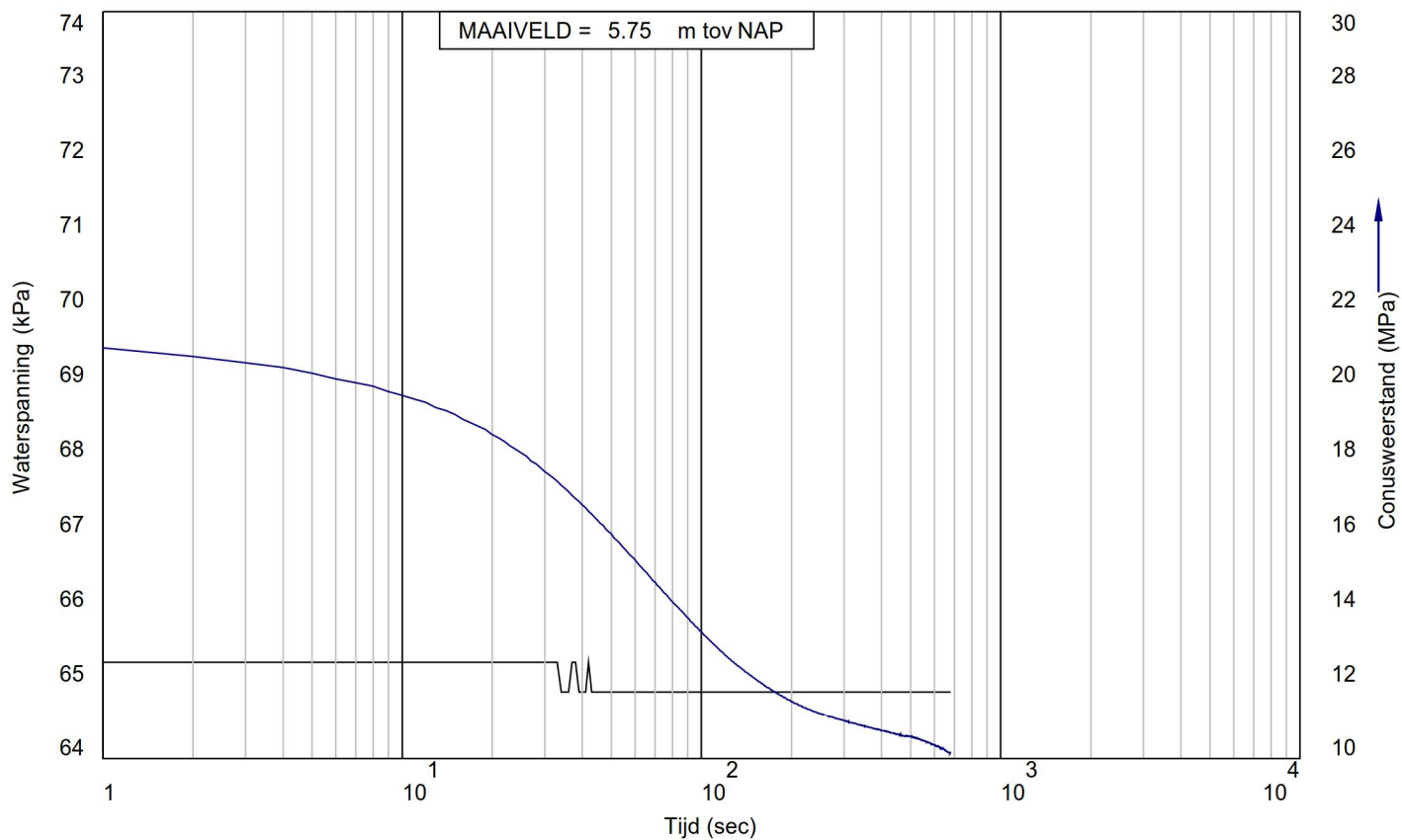
GWS: ca. 2,6 m + NAP

DP084+45_HPT_AL





Opdracht: 02P011039-03
Project: Grondonderzoek Sterke Lekdijk Culemborgse Veer - Beatrixsluis (CUB)

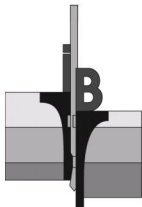


GWS (m-mv):
Conusnummer P10-CFIIP-10

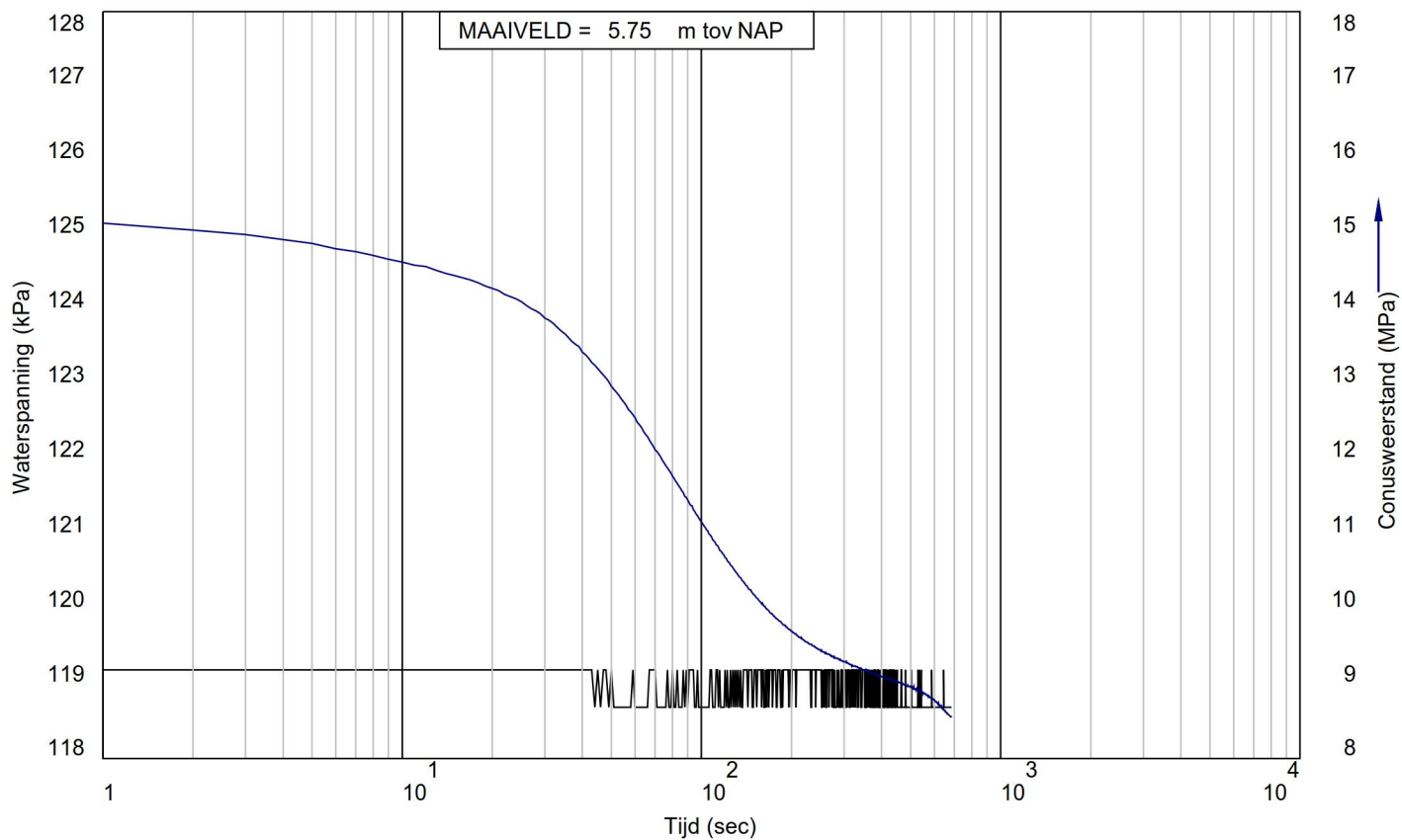
Uitvoerder: RHL
Datum: 18-4-2019

X: 151687,286
Y: 441818,071

Sondering: DP098+013_HPT_AL
Dissipatietest: 9.50 m - mv



Opdracht: 02P011039-03
Project: Grondonderzoek Sterke Lekdijk Culemborgse Veer - Beatrixsluis (CUB)

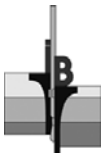


GWS (m-mv):
Conusnummer P10-CFIIP-10

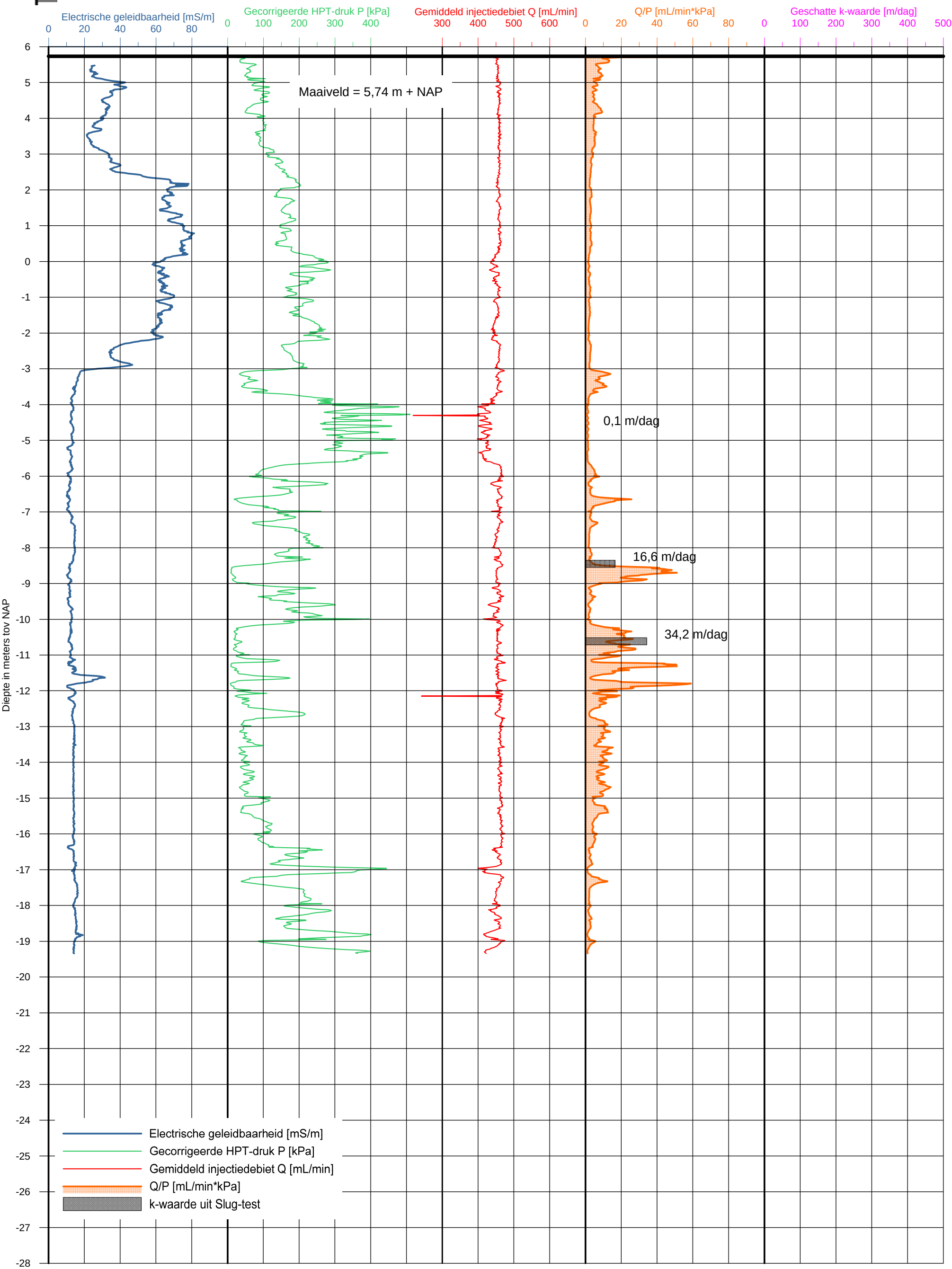
Uitvoerder: RHL
Datum: 18-4-2019

X: 151687,286
Y: 441818,071

Sondering: DP098+013_HPT_AL
Dissipatietest: 15.00 m - mv

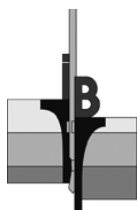


Opdracht : 02P011039
Project : HPT sonderingen WAM
Locatie : Wijk bij Duurstede - Amerongen



GWS: ca. 2,5 m + NAP

DP098+013_HPT_AL

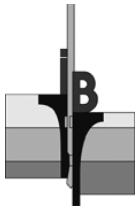


Opdracht : 02P011039-01
Document : 02P011039-01-RG-01
Project : Uitvoering HPT-sonderingen aan Sterke Lekdijk (WAM enCUB)

Peilbuis	Traject [m - NAP]		k-waarde [m/dag]
	van	tot	
DP009+099_HPT_AL	2,6	2,8	1,8
	3,6	3,8	22,4
	9,9	10,1	11,3
DP064+005_HPT_AL	0,1	0,3	4,4
	3,6	3,8	0,9
	7,3	7,5	61,7
DP084+045_HPT_AL	1,4	1,6	2,2
	4,4	4,6	7,8
	7,4	7,6	30,8
DP098+013_HPT_AL	4,5	4,7	0,1
	8,4	8,6	16,6
	10,5	10,7	34,2
DP207+014_HPT_AL	8,3	8,5	12,1
	9,5	9,7	12,4
	12,6	12,8	66,1
DP234+001_HPT_AL	7,0	7,2	6,2
	12,7	12,9	4,0
	16,9	17,1	82,4
DP273+108_HPT_AL	2,9	3,1	50,6
	4,8	5,0	20,0
	11,0	11,2	13,5
DP291+346_HPT_AL	15,1	15,3	6,4
	10,0	10,2	34,7
	16,1	16,3	3,8
	17,4	17,5	56,7

INPIJN-BLOKPOEL
ingenieursbureau

Geotechniek - Milieutechniek



Uitvoering HPT-sonderingen Sterke Lekdijk deeltraject Wijk bij Duurstede - Amerongen (WAM)

Betreft Resultaten onderzoek

Opdrachtnummer 02P011039-09

Documentnummer 02P011039-09-RG-01

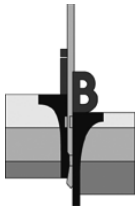
Opdrachtgever Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden
Poldermolen 2
3994 DD Houten

Opgesteld door : M.L.H.M. van Lipzig MSc
Gezien : K.K. Hertogh
Status : Definitief
Codering : RG

Paraaf :

Paraaf :

Datum rapport : 11 december 2019



Opdracht : 02P011039-09
Document : 02P011039-09-RG-01
Project : HPT-sonderingen Sterke Lekdijk, deeltraject Wijk bij Duurstede (WAM)

INHOUDSOPGAVE

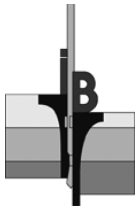
1. INLEIDING	1
2. ONDERZOEK	2
2.1 HPT-SONDERINGEN	2
2.2 PEILBUIZEN	2
2.3 DOORLATENDHEIDSMETINGEN	2
2.4 INMETING EN WATERPASSING	3
3. BEPALING K-WAARDE UIT HPT-SONDERINGEN	4

BIJLAGEN:

- A) Situatietekening en foto's
- B) Waterpasstaat
- C) Sondeergrafieken
- D) Resultaten waterdoorlatendheidsmetingen
- E) Toelichting pneumatische Slug-Test

VERZENDLIJST

1 x Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden te Houten t.a.v. de heer R.Bolt



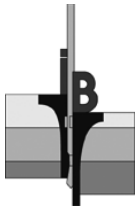
Opdracht : 02P011039-09
Document : 02P011039-09-RG-01
Project : HPT-sonderingen Sterke Lekdijk, deeltraject Wijk bij Duurstede (WAM)

1. INLEIDING

In het kader van het project Sterke Lekdijk wordt door ons bureau in opdracht van het Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden uit Houten divers geotechnisch onderzoek uitgevoerd.

Onderdeel van dit onderzoek is het uitvoeren van HPT-sonderingen. Middels de HPT-sondering wordt op een hoger detailniveau inzicht verkregen in de waterdoorlatendheid van de bodem en daarmee de aanwezigheid van waterremmende en watervoerende lagen.

Voorliggend worden de resultaten van het grondonderzoek gepresenteerd voor 5 HPT-sonderingen binnen het traject WAM. Daarnaast worden kort de bevinden van de HPT-sonderingen beschreven, waarbij tevens eerder door ons bureau uitgevoerde HPT-sonderingen worden betrokken.



Opdracht : 02P011039-09
Document : 02P011039-09-RG-01
Project : HPT-sonderingen Sterke Lekdijk, deeltraject Wijk bij Duurstede (WAM)

2. ONDERZOEK

2.1 HPT-Sonderingen

Er zijn 5 sonderingen gemaakt met een elektrische conus conform NEN-EN-ISO 22476-1. Bij alle sonderingen is naast de conusweerstand tevens de plaatselijke wrijving gemeten en geregistreerd. De relatie tussen conusweerstand, en plaatselijke wrijving, het wrijvingsgetal, geeft een indicatie van de verschillende grondsoorten onder het grondwaterniveau. Naast de conusweerstand en de plaatselijke wrijving is tevens de waterspanning geregistreerd. Op einddiepte is hierbij een dissipatietest uitgevoerd. De sonderingen zijn uitgevoerd door een sondeertruck.

Tevens zijn op dezelfde locaties 5 HPT-sonderingen uitgevoerd. Met een sondeerunit wordt een HPT-sonde in de grond gedrukt met een constante snelheid van 2 cm/s. Tijdens het sonderen wordt met een constant debiet water via cirkelvormig filter in de sonde de grond in gepompt. Naast het debiet wordt het drukverschil om het debiet constant te houden gedurende de proef gemeten (HPT-druk), evenals de elektrische geleidbaarheid. Tijdens de proef worden dissipatietesten gedaan om de hydrostatische druk op de locatie te bepalen. De waargenomen HPT-druk wordt dan gecorrigeerd voor deze hydrostatische druk, waarmee de gecorrigeerde HPT-druk wordt berekend. Deze gecorrigeerde HPT-druk is een indicatie van de relatieve doorlatendheid van de bodem.

Aan de hand van een aantal waterdoorlatendheidsmetingen, is een inschatting gemaakt van de absolute waterdoorlatendheid op de locatie op verschillende dieptes.

Voor de grafieken van de sonderingen wordt verwezen naar bijlage C; de locatie van de sondeerpunten is aangegeven op de situatietekening SIT-01, toegevoegd onder bijlage A. Voor een verklaring van de op de tekening gebruikte tekens wordt verwezen naar de "Verklaring Codering" die onder bijlage D aan dit rapport is toegevoegd.

2.2 Peilbuizen

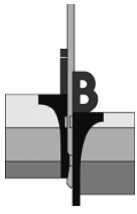
Met de sondeertruck zijn na de uitvoering van de HPT-sonderingen peilbuizen weggedrukt op verschillende dieptes. De peilbuizen hebben een binnendiameter van 28 mm, de filterlengte bedraagt 20 cm. De filterdieptes per HPT-sondering zijn gepresenteerd in bijlage D.

Allereerst is er een holle casing met een verloren punt weggedrukt, waarin vervolgens de peilbuis is geplaatst.

2.3 Doorlatendheidsmetingen

Bij pneumatische slug-testen wordt middels het verhogen van de luchtdruk de waterstand verlaagd in een afgesloten bron. Wanneer luchtdruk in de bron wordt verhoogd, daalt de waterstand totdat het verschil tussen de verhoogde luchtdruk en de verlaagde waterstand gelijk is. Zodra de waterstand (= totale druk) stabiel is, wordt de luchtdruk middels een "release valve" plotseling verlaagd. Vervolgens zal de waterstand zich herstellen. De verschillen in waterhoogte en tijd worden geregistreerd door de logger.

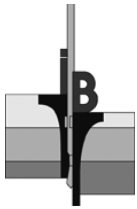
Op basis van de geregistreeerde waterhoogte in relatie tot de tijd kan de k-waarde worden berekend, middels de methode van Hvorslev (watervoerend pakket), of Bouwer-Rice (freatisch). De resultaten van deze proef zijn gepresenteerd in bijlage D. Voor een uitgebreide toelichting over de uitvoering en uitwerking van de proef wordt verwezen naar bijlage E.



Opdracht : 02P011039-09
Document : 02P011039-09-RG-01
Project : HPT-sonderingen Sterke Lekdijk, deeltraject Wijk bij Duurstede (WAM)

2.4 Inmeting en waterpassing

Met behulp van een GNSS meetsysteem zijn de locaties van de onderzoekspunten uitgezet in RD-coördinaten en is de hoogte van het maaiveld ter plaatse van ieder onderzoekspunt bepaald ten opzichte van NAP. De gemeten hoogte is gecontroleerd aan de hand van een NAP-referentieniveau in de omgeving van het werk. Voor de resultaten van de inmeting en waterpassing wordt verwezen naar de inmeet- en waterpasstaat bijlage B.



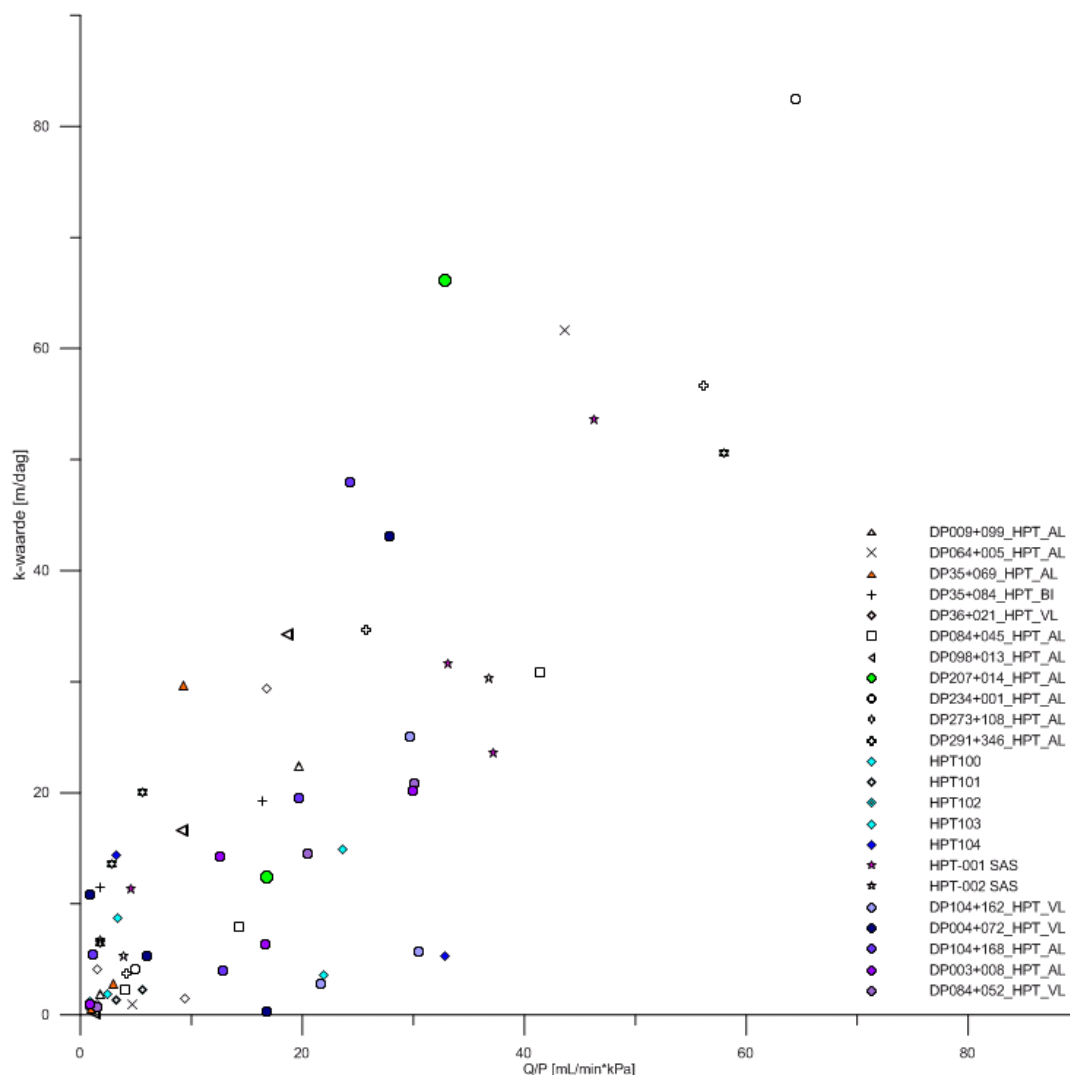
Opdracht : 02P011039-09
Document : 02P011039-09-RG-01
Project : HPT-sonderingen Sterke Lekdijk, deeltraject Wijk bij Duurstede (WAM)

3. BEPALING K-WAARDE UIT HPT-SONDERINGEN

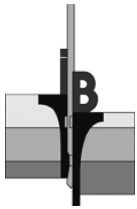
Nabij de HPT-sonderingen zijn op verschillende dieptes waterdoorlatendheidsmetingen uitgevoerd om een vertaalslag te maken van de gecorrigeerde HPT-druk naar een absolute waterdoorlatendheid (k-waarde). Per HPT-sondering zijn minimaal 3 slug-testen uitgevoerd bij hoge- een lage HPT-druk.

Er bestaat een verband tussen de waterdoorlatendheid (k-waarde) en het injectiedebiet gedeeld door de druk die nodig is om dit debiet te injecteren in het betreffende bodem materiaal. Hierbij gaat het om de gecorrigeerde HPT-druk, de gemeten druk minus de luchtdruk en de hydrostatische waterdruk.

In Figuur 1 is het verband weergegeven tussen de gemeten k-waarde (y-as) en het injectiedebiet gedeeld door de gecorrigeerde HPT-druk (x-as). Naast de recent uitgevoerde HPT-sonderingen, zijn ook de resultaten van de eerder door ons bureau uitgevoerde HPT-sonderingen gepresenteerd.



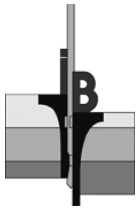
Figuur 1. Relatie tussen de gemeten k-waarde middels de pneumatische slug-testen en de verhouding tussen de stroomsnelheid en de gecorrigeerde HPT-druk (Q/P).



Opdracht : 02P011039-09
Document : 02P011039-09-RG-01
Project : HPT-sonderingen Sterke Lekdijk, deeltraject Wijk bij Duurstede (WAM)

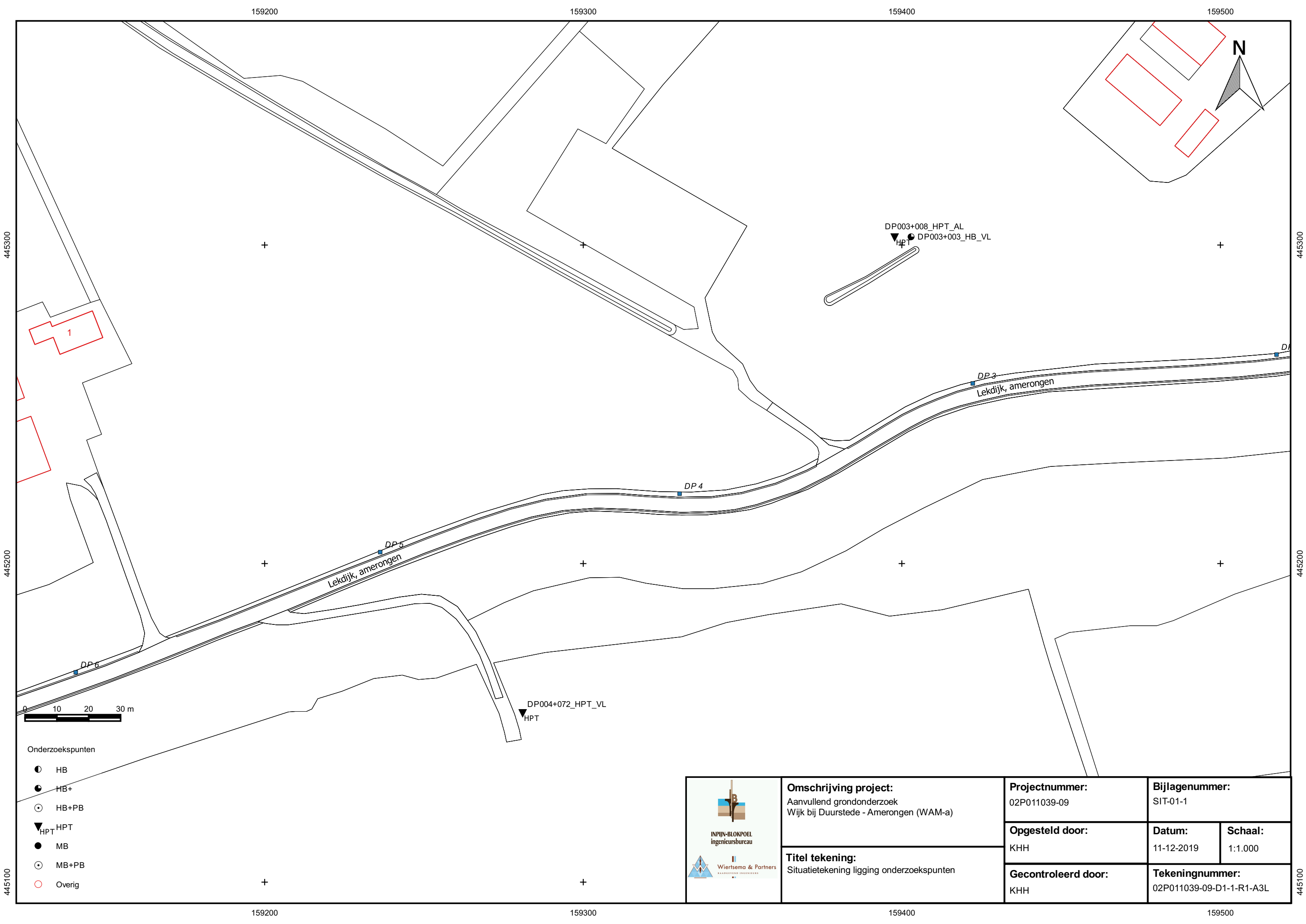
In het algemeen geldt de veronderstelling dat de k-waardes die gemeten worden middels slug-testen (of andere kleinschalige proeven) de daadwerkelijke k-waarde onderschatten. De k-waarden die worden gemeten door ons bureau zijn lager dan bijvoorbeeld de resultaten die uit Regis voortkomen.

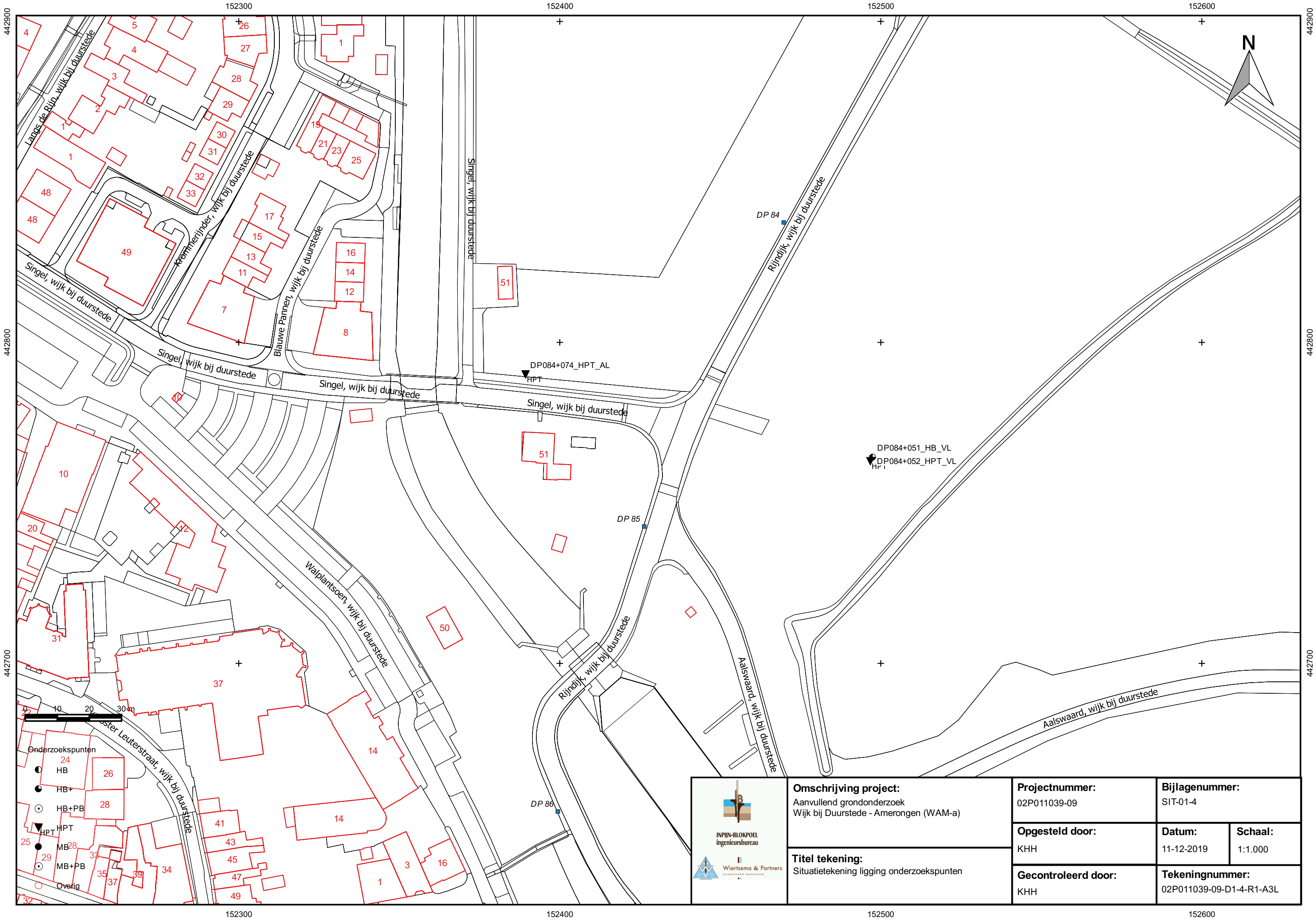
Naast het mogelijke schaal-effect, kunnen hier nog andere oorzaken aan ten grondslag liggen. Momenteel is ons bureau bezig met nader onderzoek naar mogelijke verklaringen voor deze onderschatting. Om onduidelijkheid over de vertaling van de Q/P naar een absolute k-waarde zoveel mogelijk te voorkomen, zal door ons bureau de vertaling naar absolute k-waarde gepresenteerd worden, zodra het onderzoek is afgerond. In de bijgevoegde HPT-sonderingen is dus enkel de Q/P gepresenteerd en de k-waarden die gemeten zijn in de peilbuizen. Indien wenselijk kunnen de resultaten wel gerelateerd worden aan de kD-waarden die uit Regis/WBI naar voren komen.



Opdracht : 02P011039-09
Document : 02P011039-09-RG-01
Project : HPT-sonderingen Sterke Lekdijk, deeltraject Wijk bij Duurstede (WAM)

Bijlage A





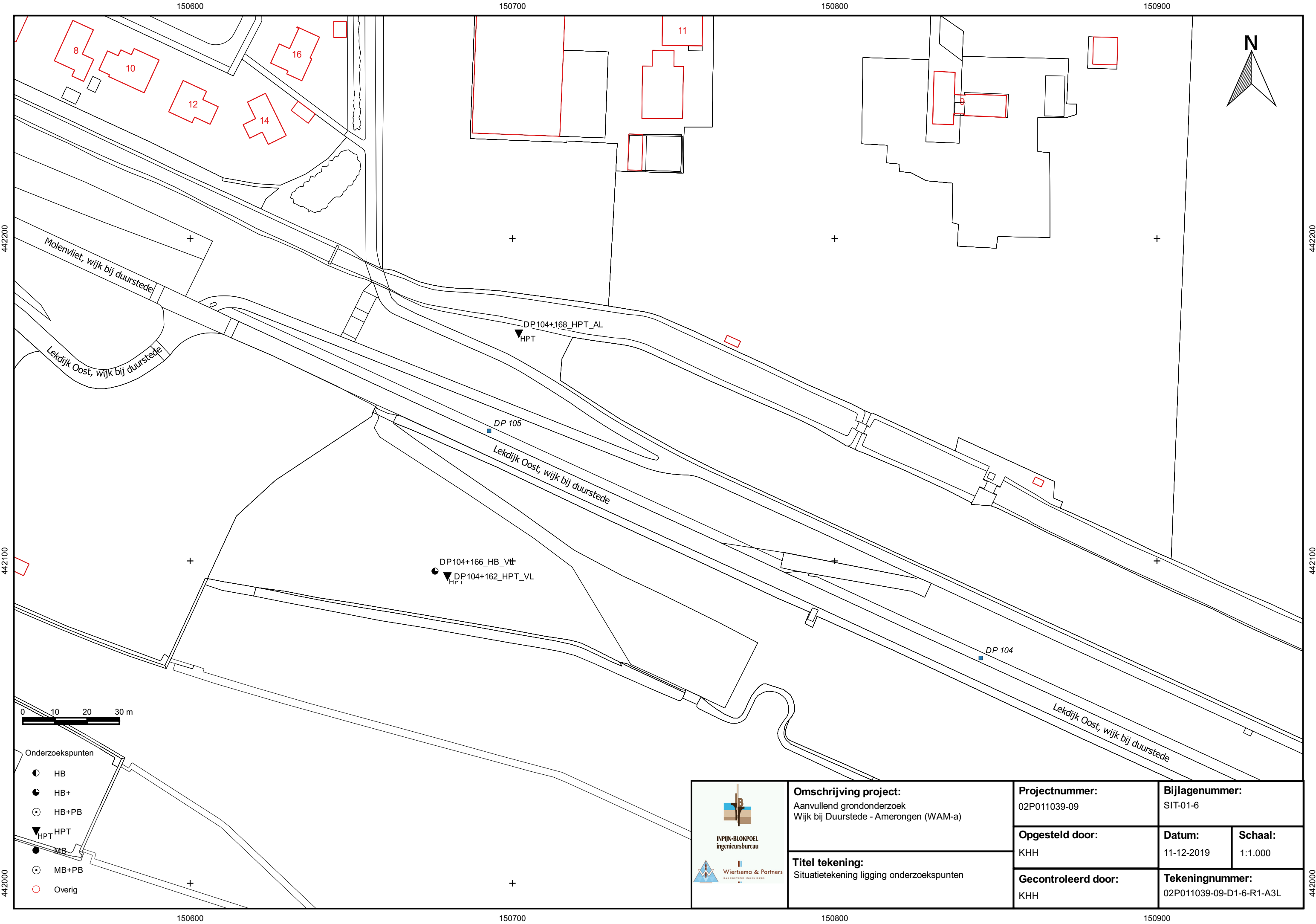


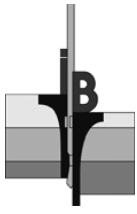
INPIJN-BLOKPOEL
ingenieursbureau



Wiersema & Partners
LANDSCHAP INGENIEURSBUREAU

Omschrijving project: Aanvullend grondonderzoek Wijk bij Duurstede - Amerongen (WAM-a)	Projectnummer: 02P011039-09		Bijlagenummer: SIT-01-4	
	Opgesteld door: KHH		Datum: 11-12-2019	Schaal: 1:1.000
Titel tekening: Situatietekening ligging onderzoekspunten	Gecontroleerd door: KHH		Tekeningnummer: 02P011039-09-D1-4-R1-A3L	

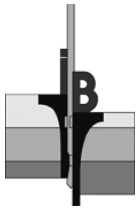




Opdracht : 02P011039-09
Document : 02P011039-09-RG-01
Project : HPT-sonderingen Sterke Lekdijk, deeltraject Wijk bij Duurstede (WAM)

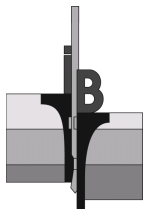
Bijlage B

Werknummer	Definitieve_Naam	X_def	Y_def	Z_def	Type_mp	Min_diepteMV	Locatie_dwp	Filters	Filter1	Filter2	Monstername	Dissipatietest	OPM_teknr	UITV_vrij	UITV_datum	UITV_diepte	UITV_afgerond	UITV_opgeleverd	Opmerking uitvoering
HPT001	DP004+072_HPT_VL	159281,00	445153,00	5,785	HPT	20	VL					Einddiepte	1		18-11-2019	22,70			
HPT002	DP104+168_HPT_AL	150702,00	442170,48	3,68	HPT	20	AL					Einddiepte	6		22-11-2019	12,9			
HPT003	DP084+074_HPT_AL	152389,36	442790,03	inmeten	HPT	20	AL					Einddiepte	4		vervallen				Deze HPT is in het kader van CUB op nagenoeg dezelfde positie uitgevoerd.
HPT004	DP003+008_HPT_AL	159397,77	445302,39	6,076	HPT	20	AL					Einddiepte	1		14-11-2019	22,8			
HPT005	DP084+052_HPT_VL	152496,77	442762,98	4,277	HPT	20	VL					Einddiepte	4		20-11-2019	14,4			
HPT006	DP104+162_HPT_VL	150679,85	442095,16	4,177	HPT	20	VL					Einddiepte	6		21-11-2019	18,7			

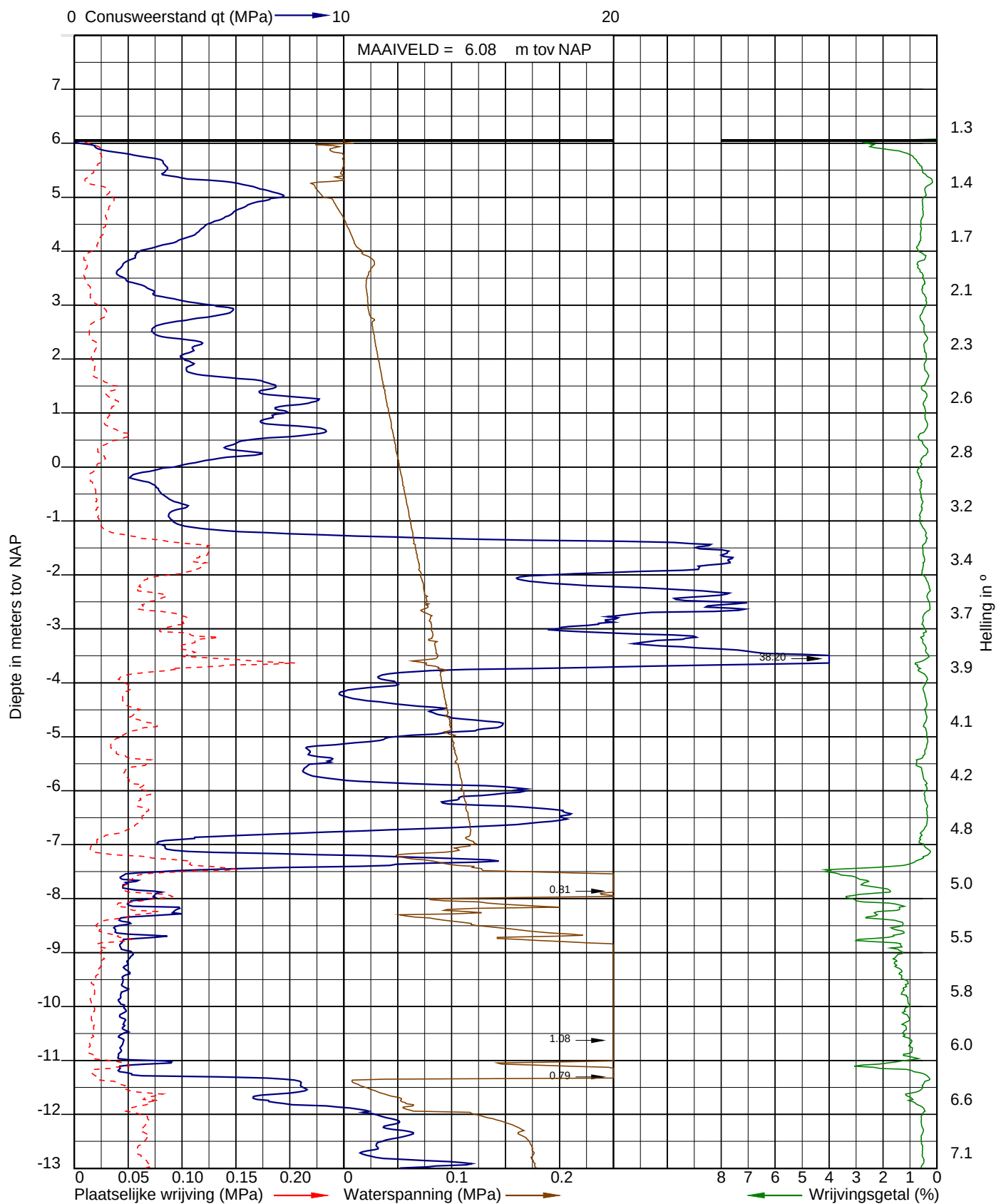


Opdracht : 02P011039-09
Document : 02P011039-09-RG-01
Project : HPT-sonderingen Sterke Lekdijk, deeltraject Wijk bij Duurstede (WAM)

Bijlage C



Opdracht: 02P011039-09
Project: Aanvullend grondonderzoek Wijk bij Duurstede - Amerongen (WAM-a)

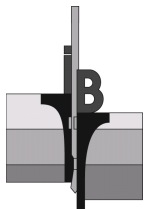


Sondering volgens NEN-EN-ISO 22476-1
Sondeerklasse 2
Conusnummer 060071

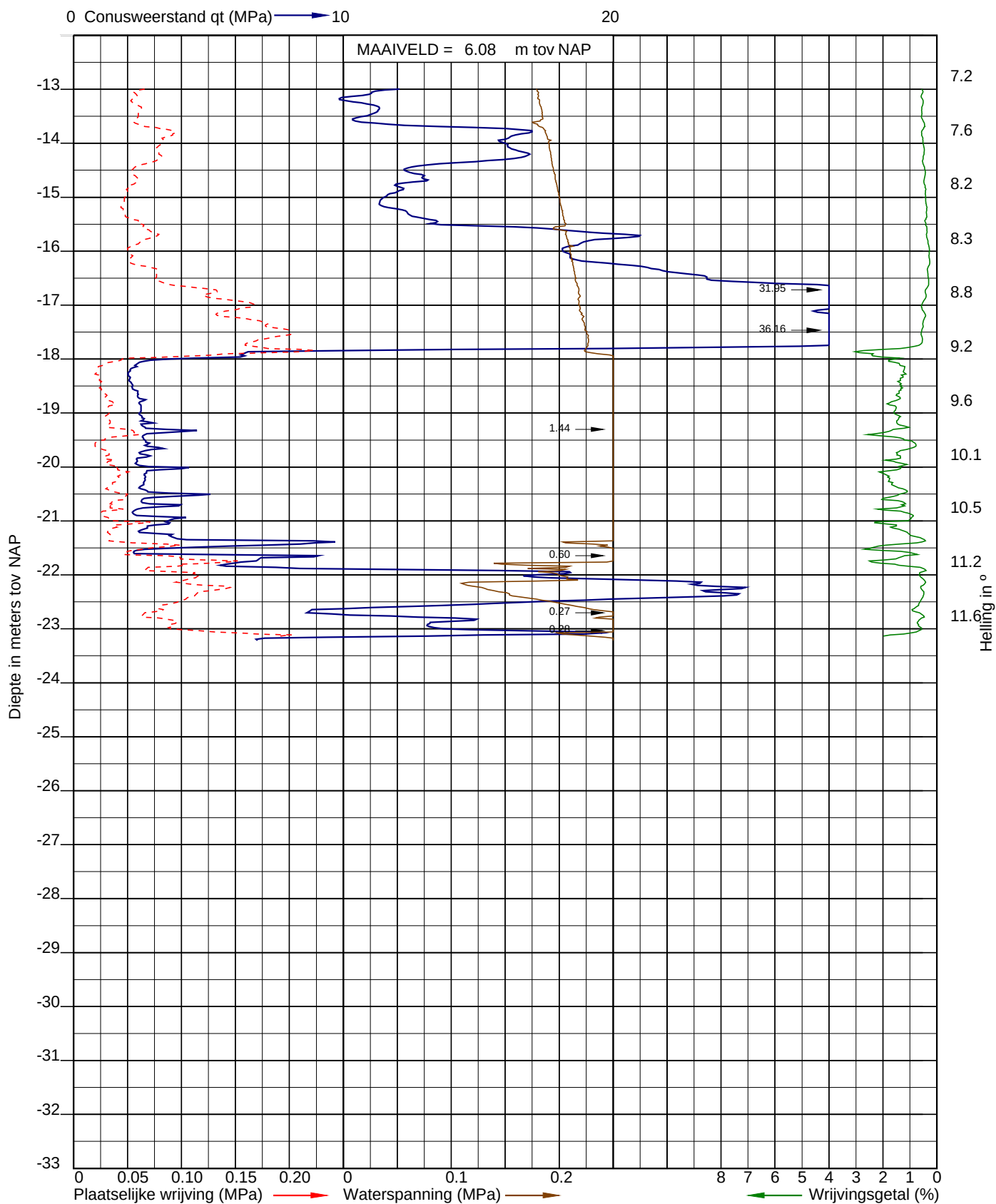
Uitvoerder: EDN
Datum: 14-11-2019
GWS (m-mv): 1.70

X: 159397,770
Y: 445302,390

Sondering: DP003+008_DKMP2_AL



Opdracht: 02P011039-09
Project: Aanvullend grondonderzoek Wijk bij Duurstede - Amerongen (WAM-a)

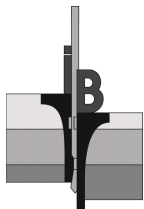


Sondering volgens NEN-EN-ISO 22476-1
Sondeerklasse 2
Conusnummer 060071

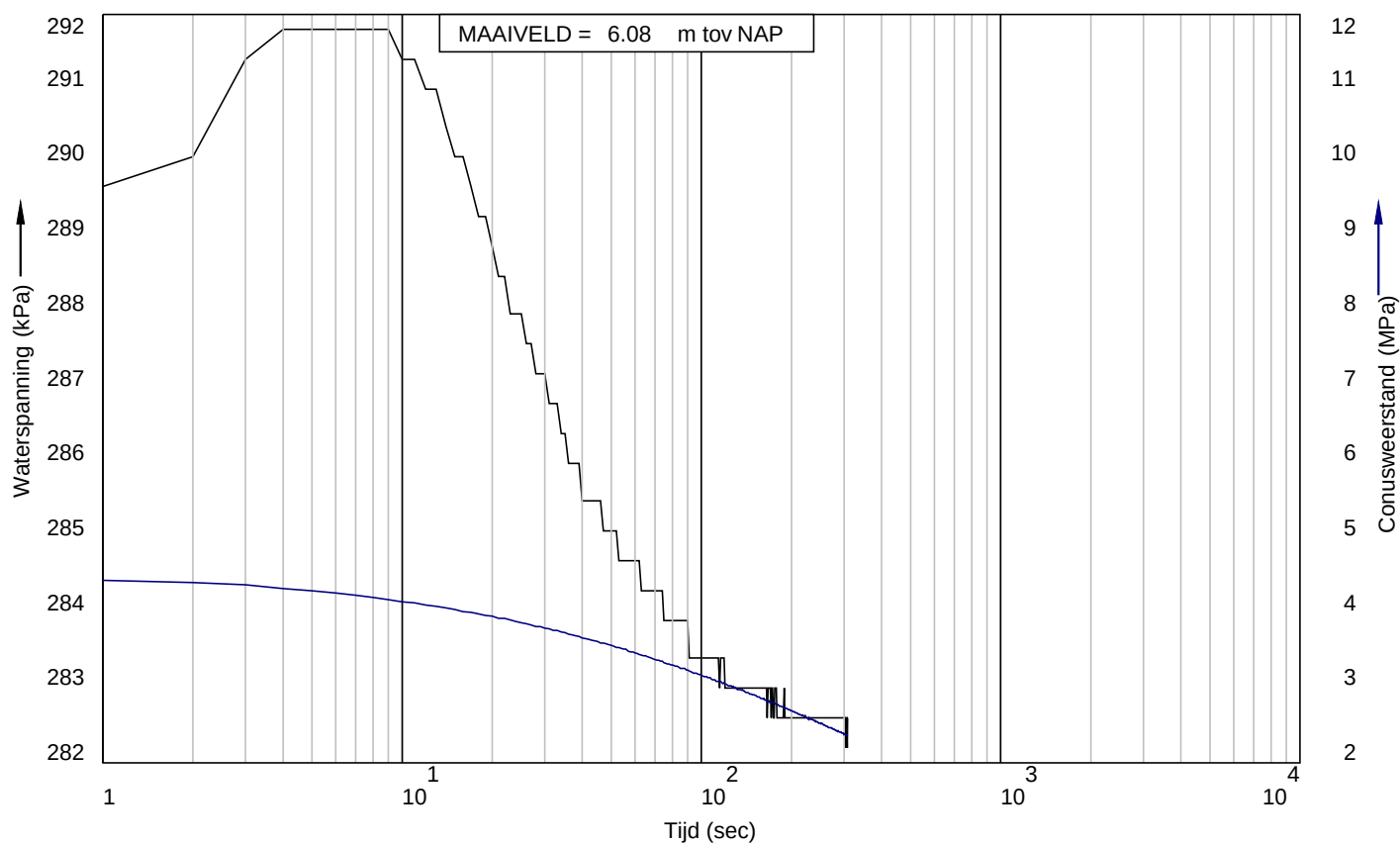
Uitvoerder: EDN
Datum: 14-11-2019
GWS (m-mv): 1.70

X: 159397,770
Y: 445302,390

Sondering: DP003+008_DKMP2_AL



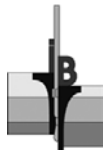
Opdracht: 02P011039-09
Project: Aanvullend grondonderzoek Wijk bij Duurstede - Amerongen (WAM-a)



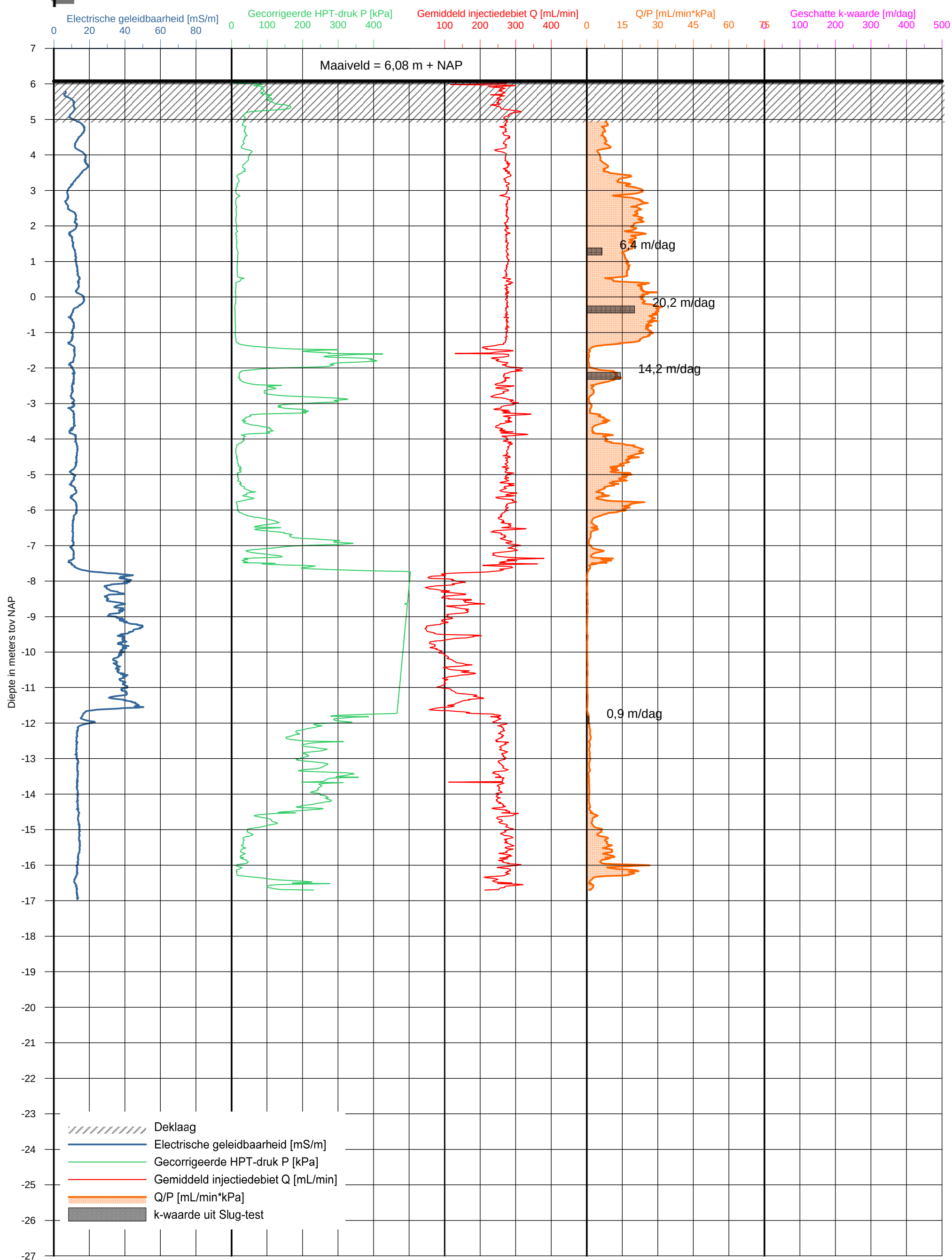
GWS (m-mv): 1.7
Conusnummer P10-CFIIP-10

Uitvoerder: EDN
Datum: 14-11-2019
X: 159397,770
Y: 445302,390

Sondering: DP003+008_DKMP2_AL
Dissipatietest: 29.50 m - mv

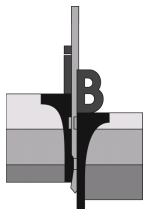


Opdracht : 02P011039-09
Project : HPT sonderingen WAM - concept
Locatie : Wijk bij Duurstede - Amerongen

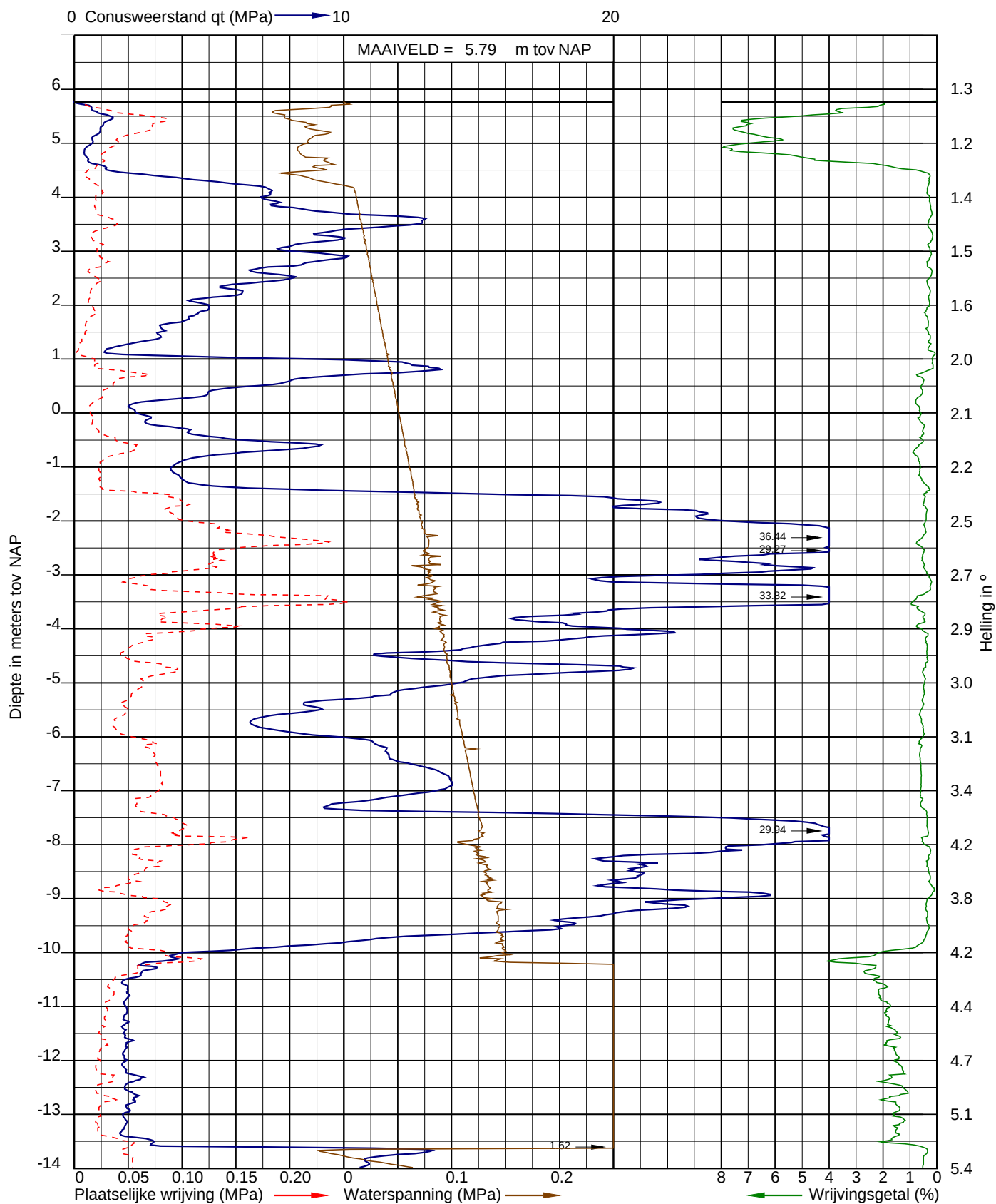


GWS: ca. 5,3 m + NAP

DP003+008_HPT_AL



Opdracht: 02P011039-09
Project: Aanvullend grondonderzoek Wijk bij Duurstede - Amerongen (WAM-a)

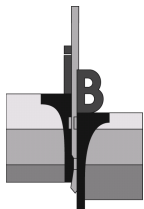


Sondering volgens NEN-EN-ISO 22476-1
Sondeerklasse 2
Conusnummer 060071

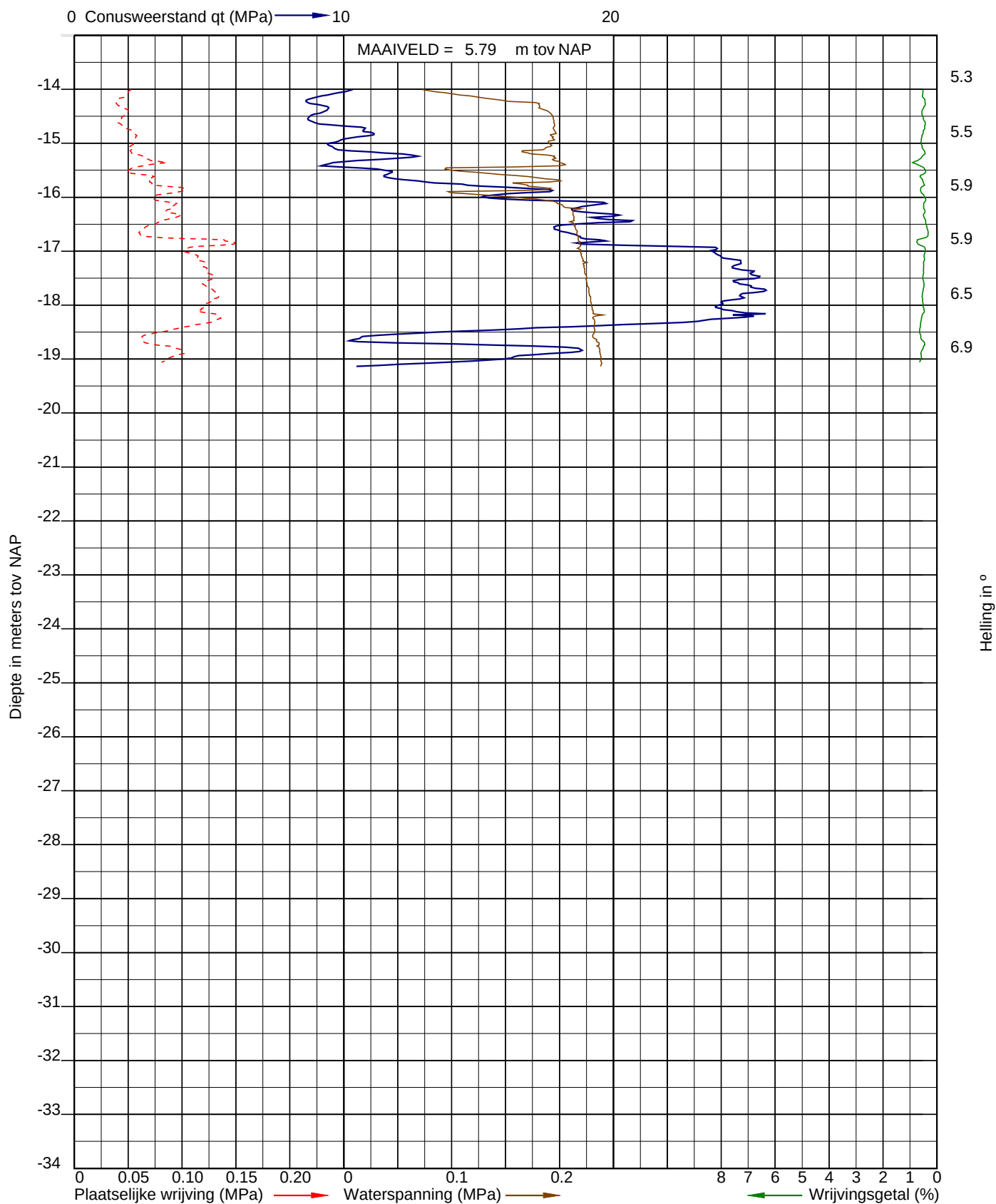
Uitvoerder: EDN
Datum: 18-11-2019
GWS (m-mv): 1.00

X: 159281,000
Y: 445153,000

Sondering: DP004+072_DKMP2_VL



Opdracht: 02P011039-09
Project: Aanvullend grondonderzoek Wijk bij Duurstede - Amerongen (WAM-a)

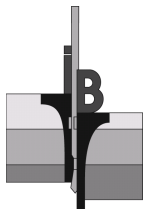


Sondering volgens NEN-EN-ISO 22476-1
Sondeerklasse 2
Conusnummer 060071

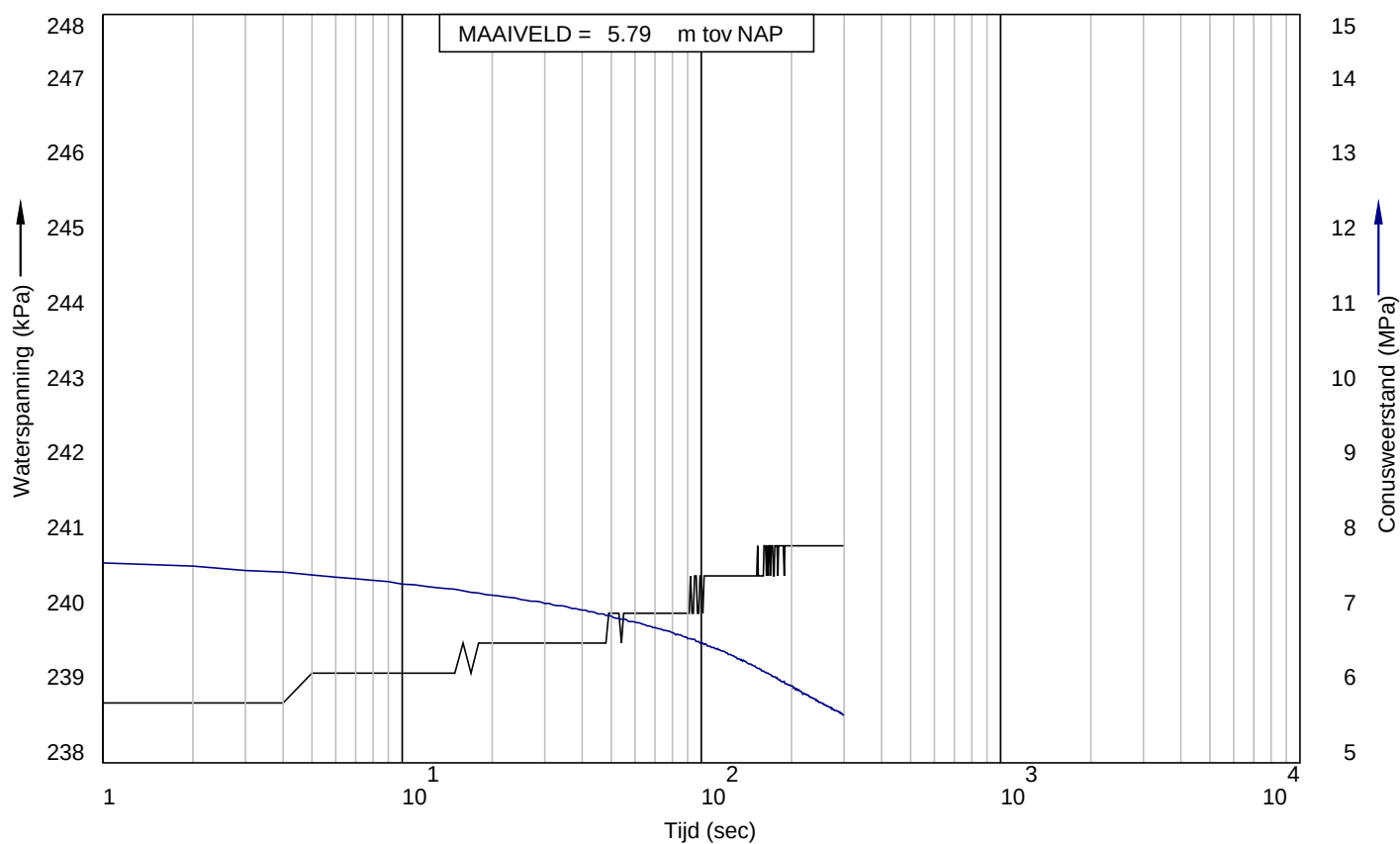
Uitvoerder: EDN
Datum: 18-11-2019
GWS (m-mv): 1.00

X: 159281,000
Y: 445153,000

Sondering: DP004+072_DKMP2_VL



Opdracht: 02P011039-09
Project: Aanvullend grondonderzoek Wijk bij Duurstede - Amerongen (WAM-a)

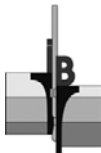


GWS (m-mv): 1.0
Conusnummer P10-CFIIP-10

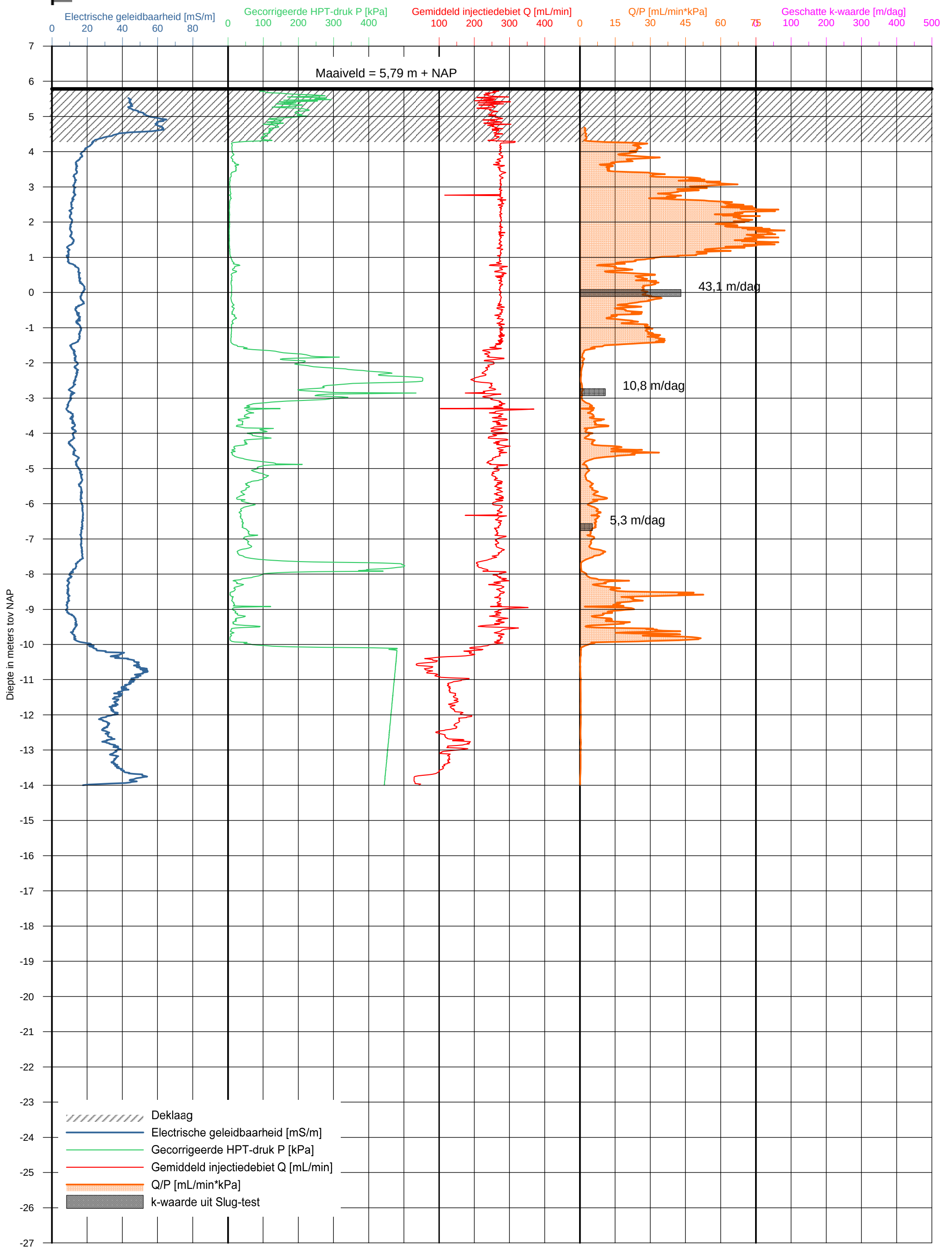
Uitvoerder: EDN
Datum: 18-11-2019

X: 159281,000
Y: 445153,000

Sondering: DP004+072_DKMP2_VL
Dissipatietest: 25.00 m - mv

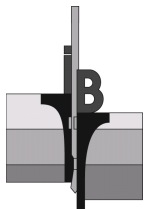


Opdracht : 02P011039-09
Project : HPT sonderingen WAM - concept
Locatie : Wijk bij Duurstede - Amerongen

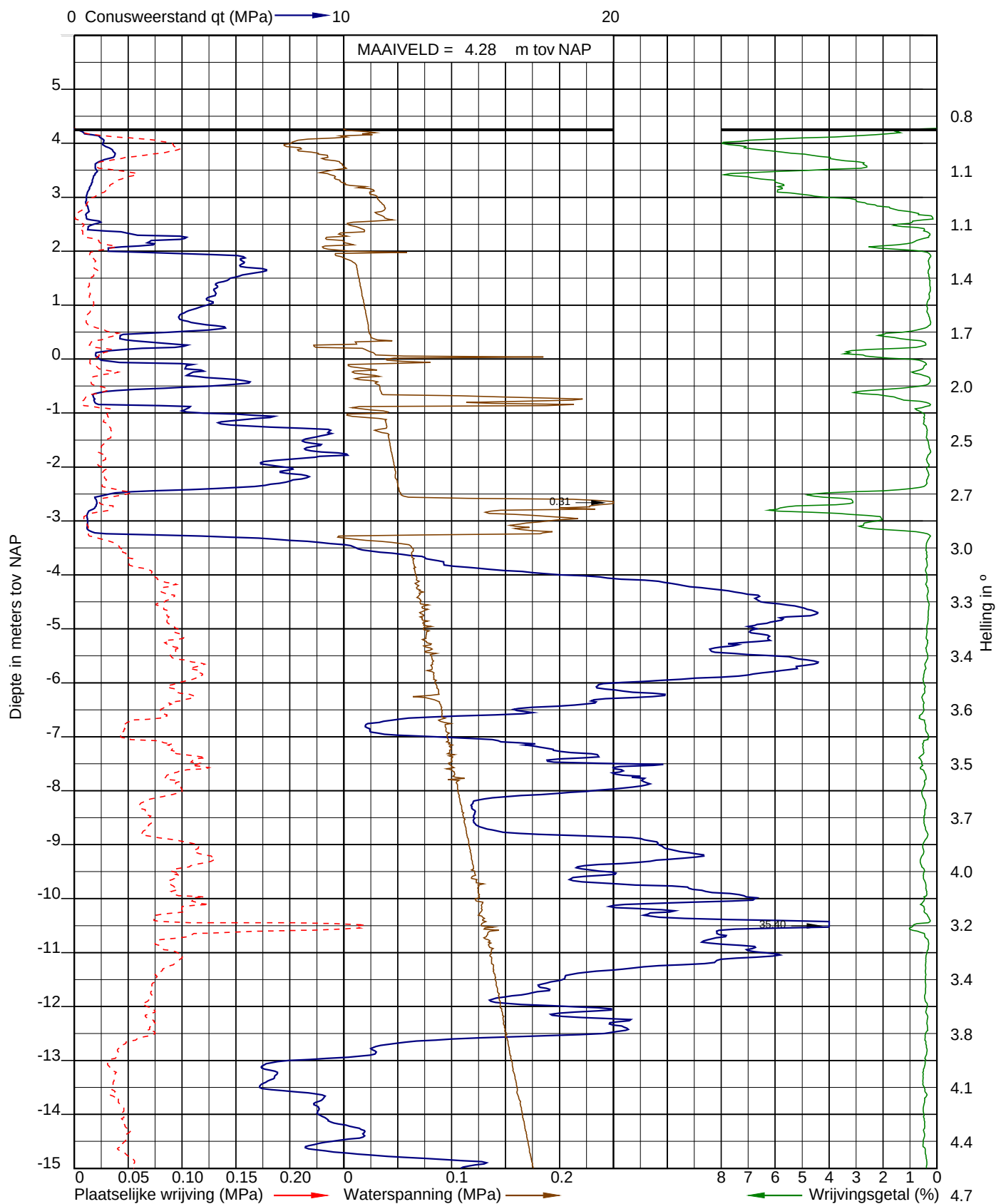


GWS: ca. 5,1 m + NAP

DP004+072_HPT_VL



Opdracht: 02P011039-09
Project: Aanvullend grondonderzoek Wijk bij Duurstede - Amerongen (WAM-a)

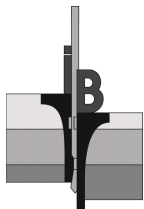


Sondering volgens NEN-EN-ISO 22476-1
Sondeerklasse 2
Conusnummer 060071

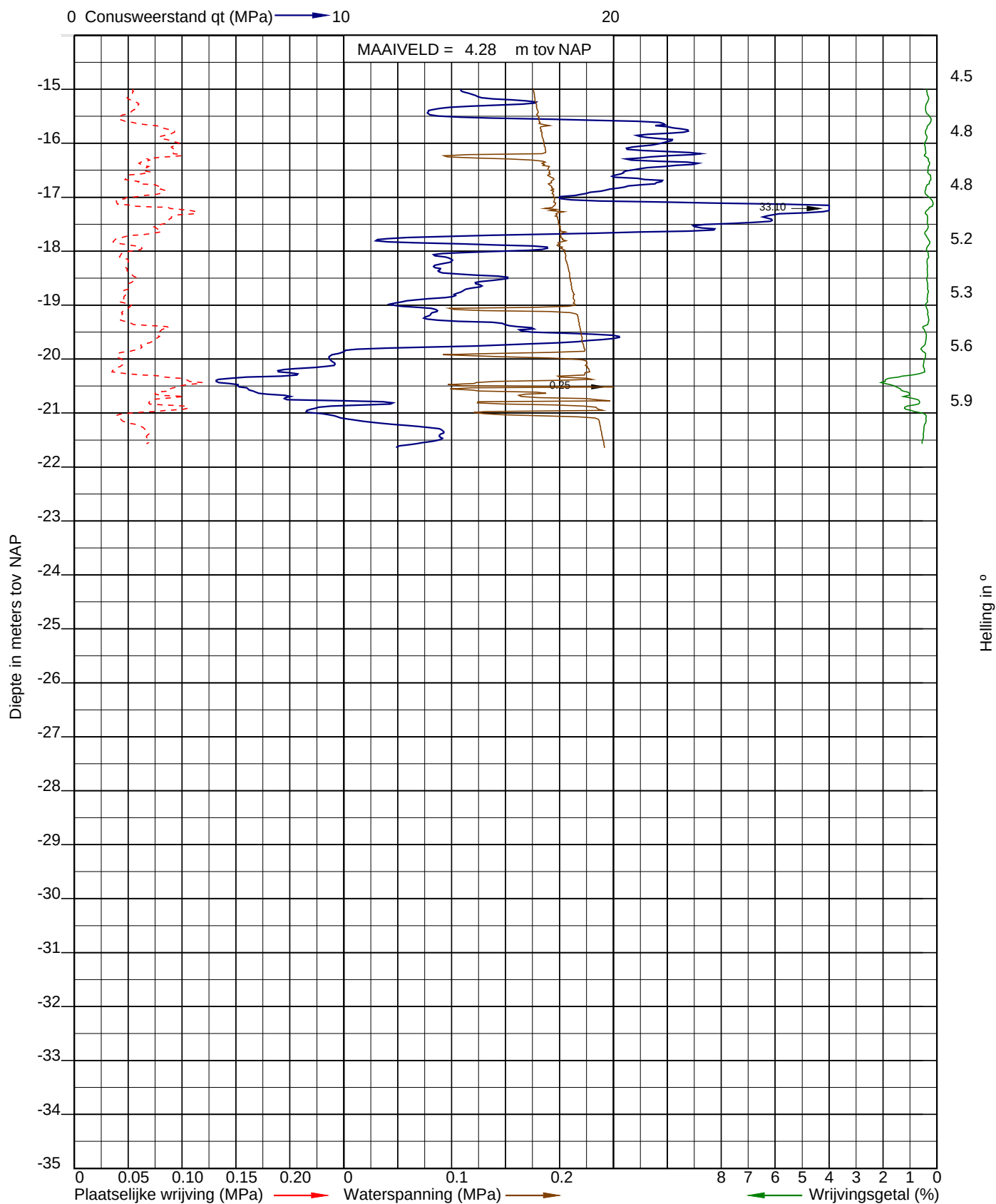
Uitvoerder: EDN
Datum: 20-11-2019
GWS (m-mv): 1.80

X: 152496,770
Y: 442762,980

Sondering: DP084+052_DKMP2_VL



Opdracht: 02P011039-09
Project: Aanvullend grondonderzoek Wijk bij Duurstede - Amerongen (WAM-a)

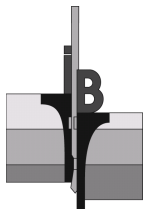


Sondering volgens NEN-EN-ISO 22476-1
Sondeerklasse 2
Conusnummer 060071

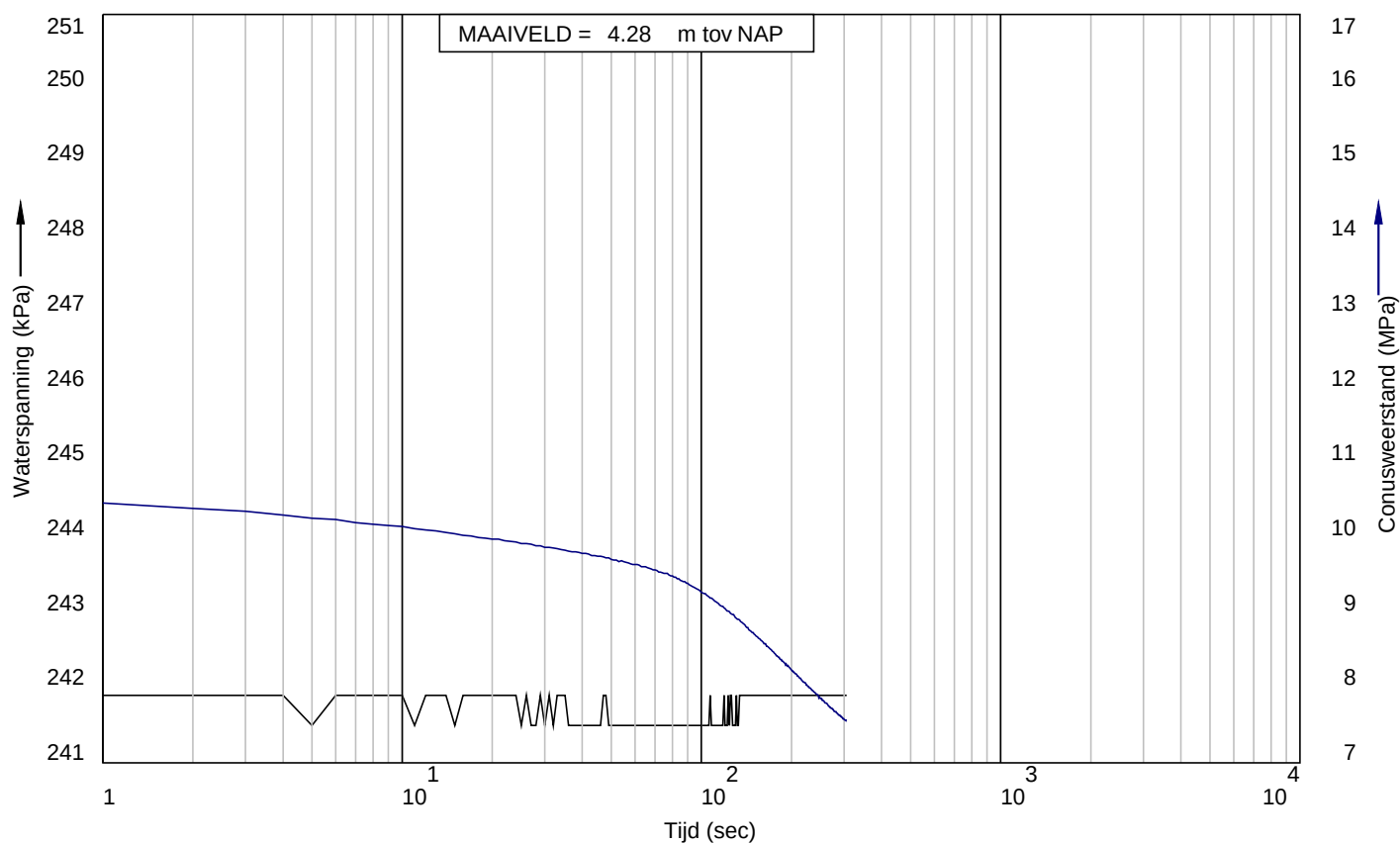
Uitvoerder: EDN
Datum: 20-11-2019
GWS (m-mv): 1.80

X: 152496,770
Y: 442762,980

Sondering: DP084+052_DKMP2_VL



Opdracht: 02P011039-09
Project: Aanvullend grondonderzoek Wijk bij Duurstede - Amerongen (WAM-a)

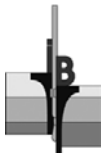


GWS (m-mv): 1.8
Conusnummer P10-CFIIP-10

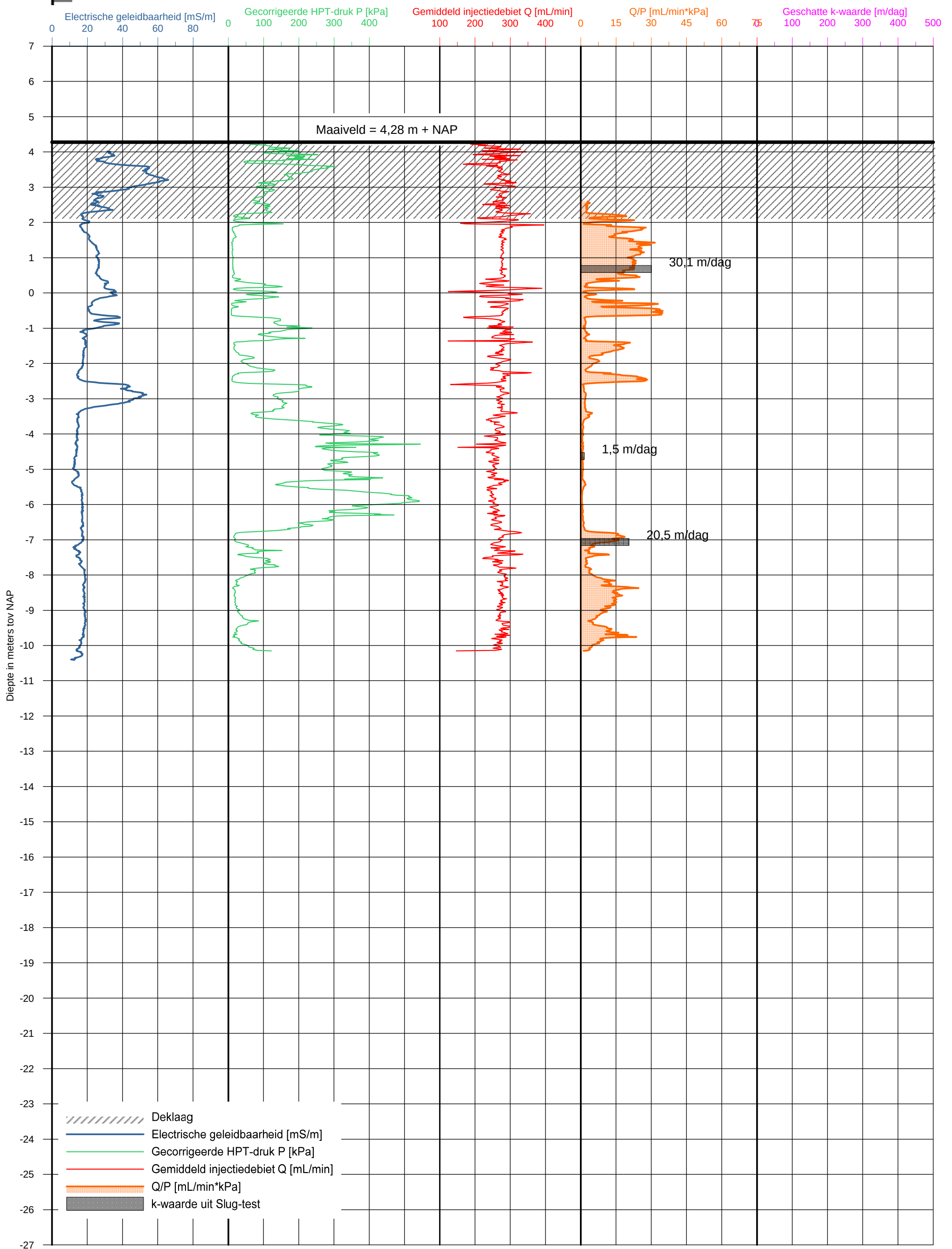
Uitvoerder: EDN
Datum: 20-11-2019

X: 152496,770
Y: 442762,980

Sondering: DP084+052_DKMP2_VL
Dissipatietest: 26.00 m - mv

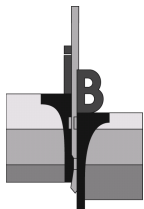


Opdracht : 02P011039-09
Project : HPT sonderingen WAM - concept
Locatie : Wijk bij Duurstede - Amerongen

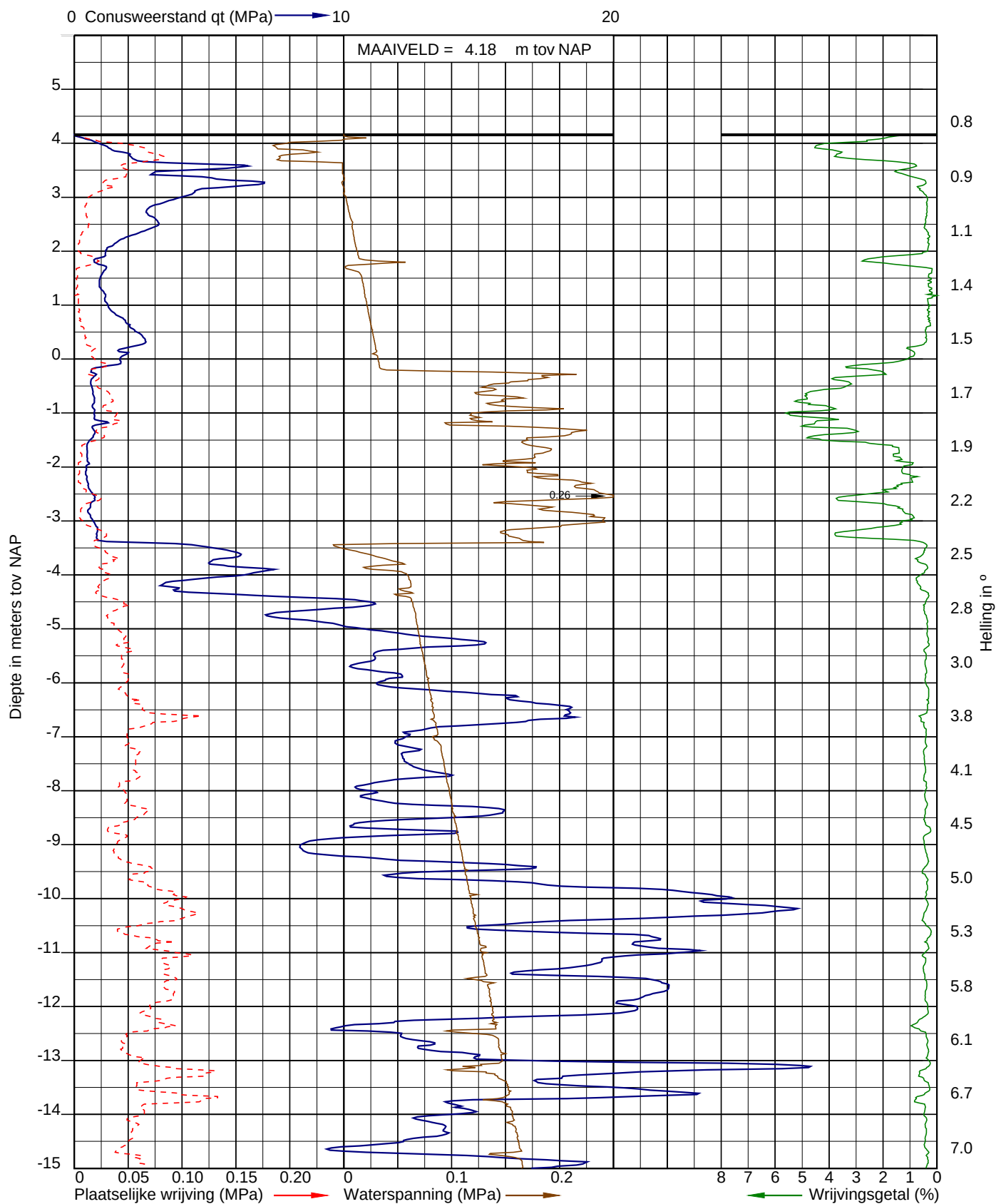


GWS: ca. 2,8 m + NAP

DP084+052_HPT_VL



Opdracht: 02P011039-09
Project: Aanvullend grondonderzoek Wijk bij Duurstede - Amerongen (WAM-a)

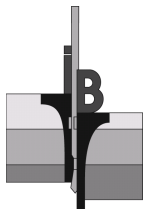


Sondering volgens NEN-EN-ISO 22476-1
Sondeerklasse 2
Conusnummer 060071

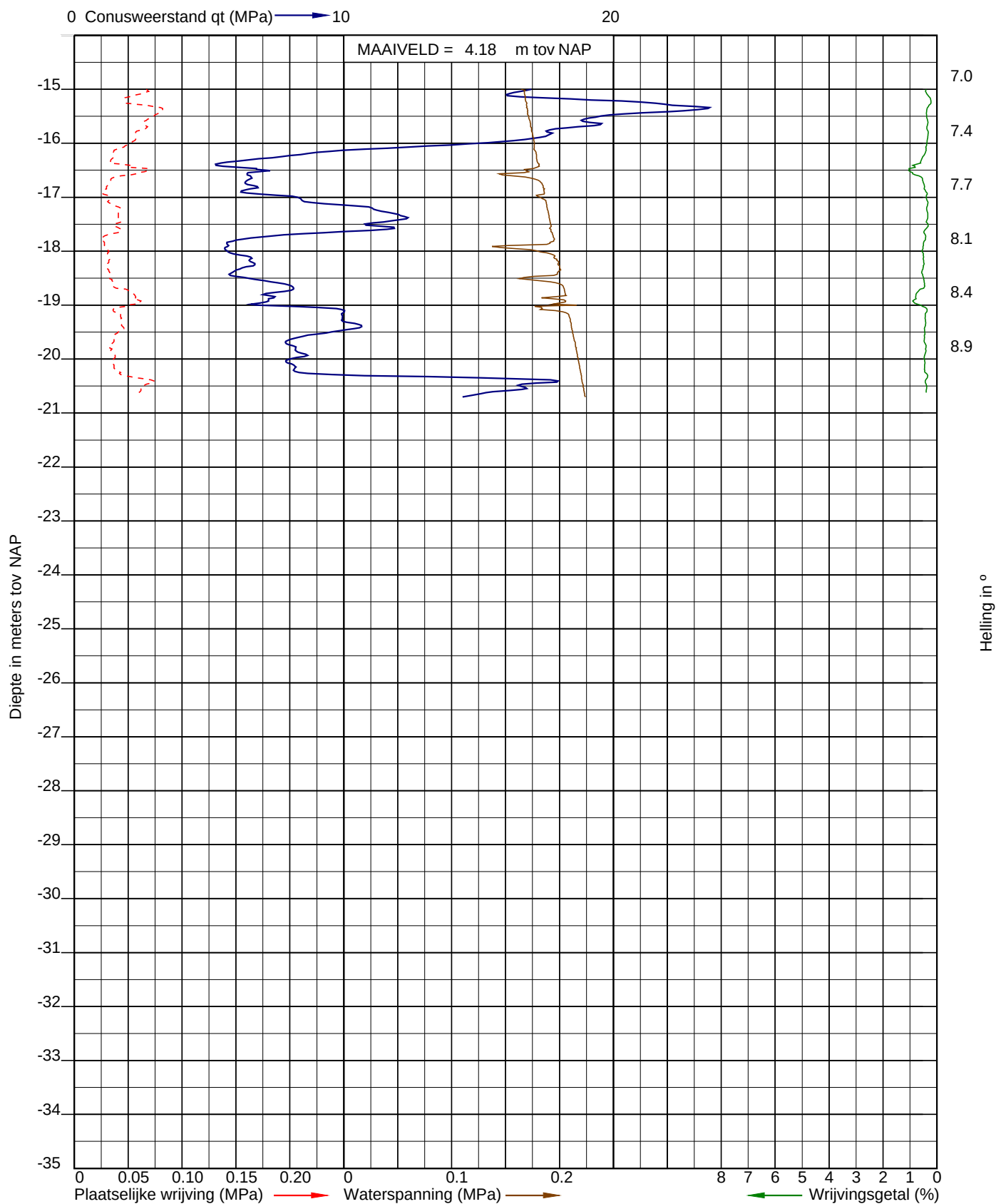
Uitvoerder: EDN
Datum: 21-11-2019
GWS (m-mv): 2.60

X: 150679,850
Y: 442095,160

Sondering: DP104+162_DKMP2_VL



Opdracht: 02P011039-09
Project: Aanvullend grondonderzoek Wijk bij Duurstede - Amerongen (WAM-a)

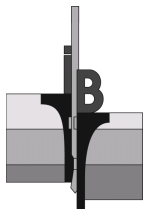


Sondering volgens NEN-EN-ISO 22476-1
Sondeerklasse 2
Conusnummer 060071

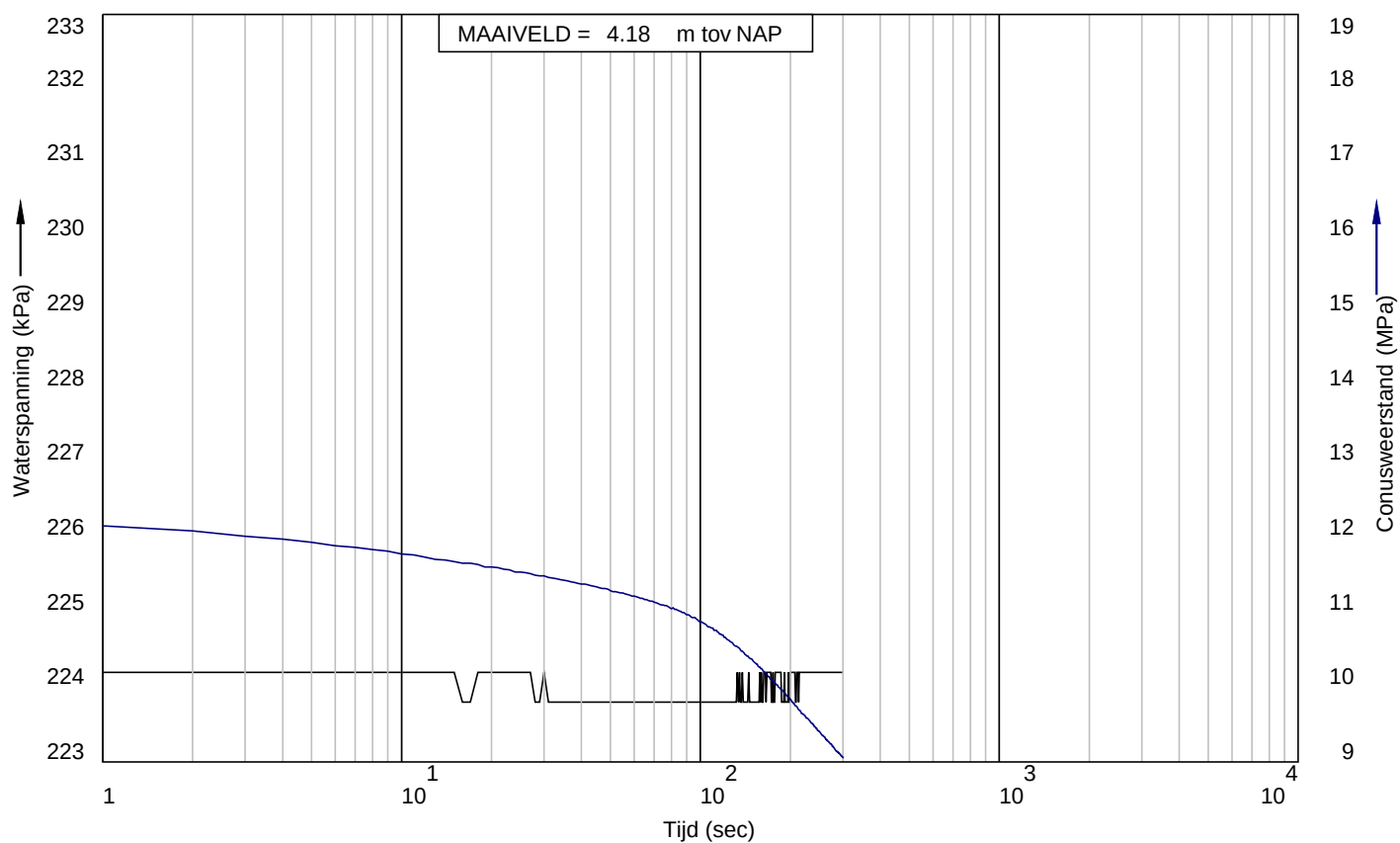
Uitvoerder: EDN
Datum: 21-11-2019
GWS (m-mv): 2.60

X: 150679,850
Y: 442095,160

Sondering: DP104+162_DKMP2_VL



Opdracht: 02P011039-09
Project: Aanvullend grondonderzoek Wijk bij Duurstede - Amerongen (WAM-a)

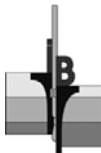


GWS (m-mv): 2.6
Conusnummer P10-CFIIP-10

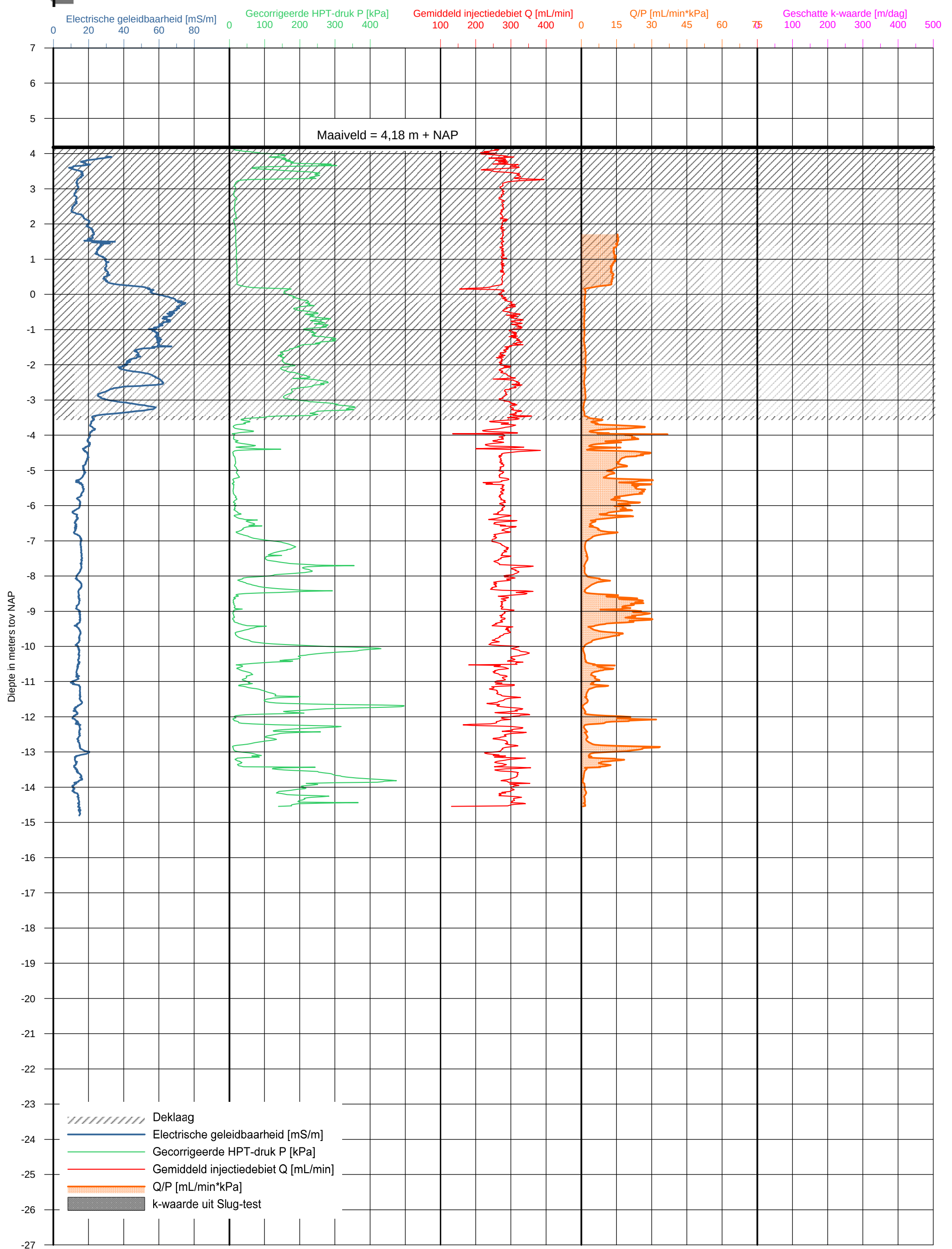
Uitvoerder: EDN
Datum: 21-11-2019

X: 150679,850
Y: 442095,160

Sondering: DP104+162_DKMP2_VL
Dissipatietest: 25.00 m - mv

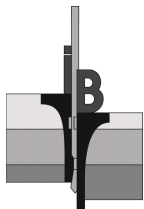


Opdracht : 02P011039-09
Project : HPT sonderingen WAM - concept
Locatie : Wijk bij Duurstede - Amerongen

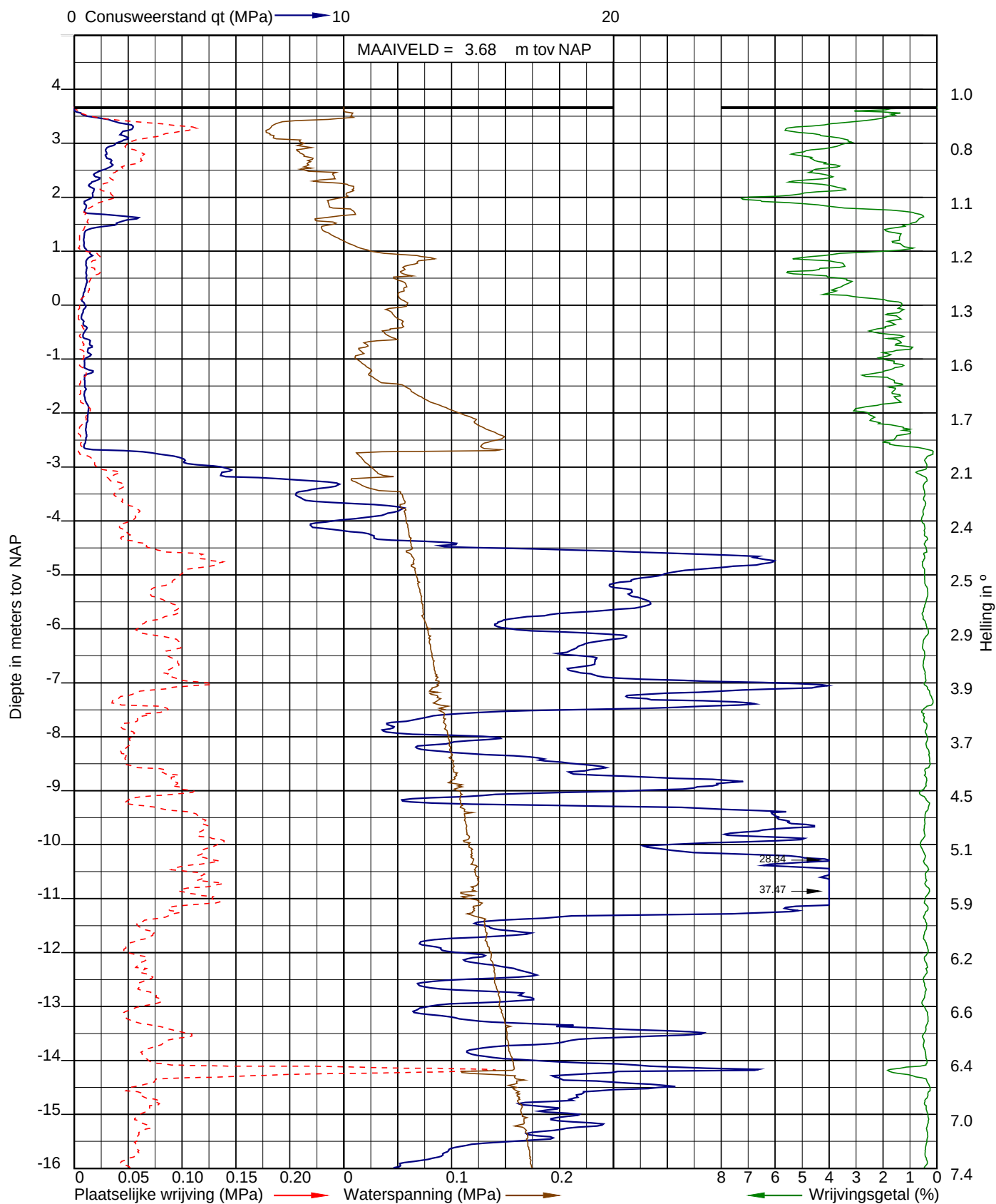


GWS: ca. 1,9 m + NAP

DP104+162_HPT_VL



Opdracht: 02P011039-09
Project: Aanvullend grondonderzoek Wijk bij Duurstede - Amerongen (WAM-a)

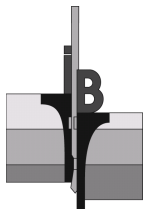


Sondering volgens NEN-EN-ISO 22476-1
Sondeerklasse 2
Conusnummer 060071

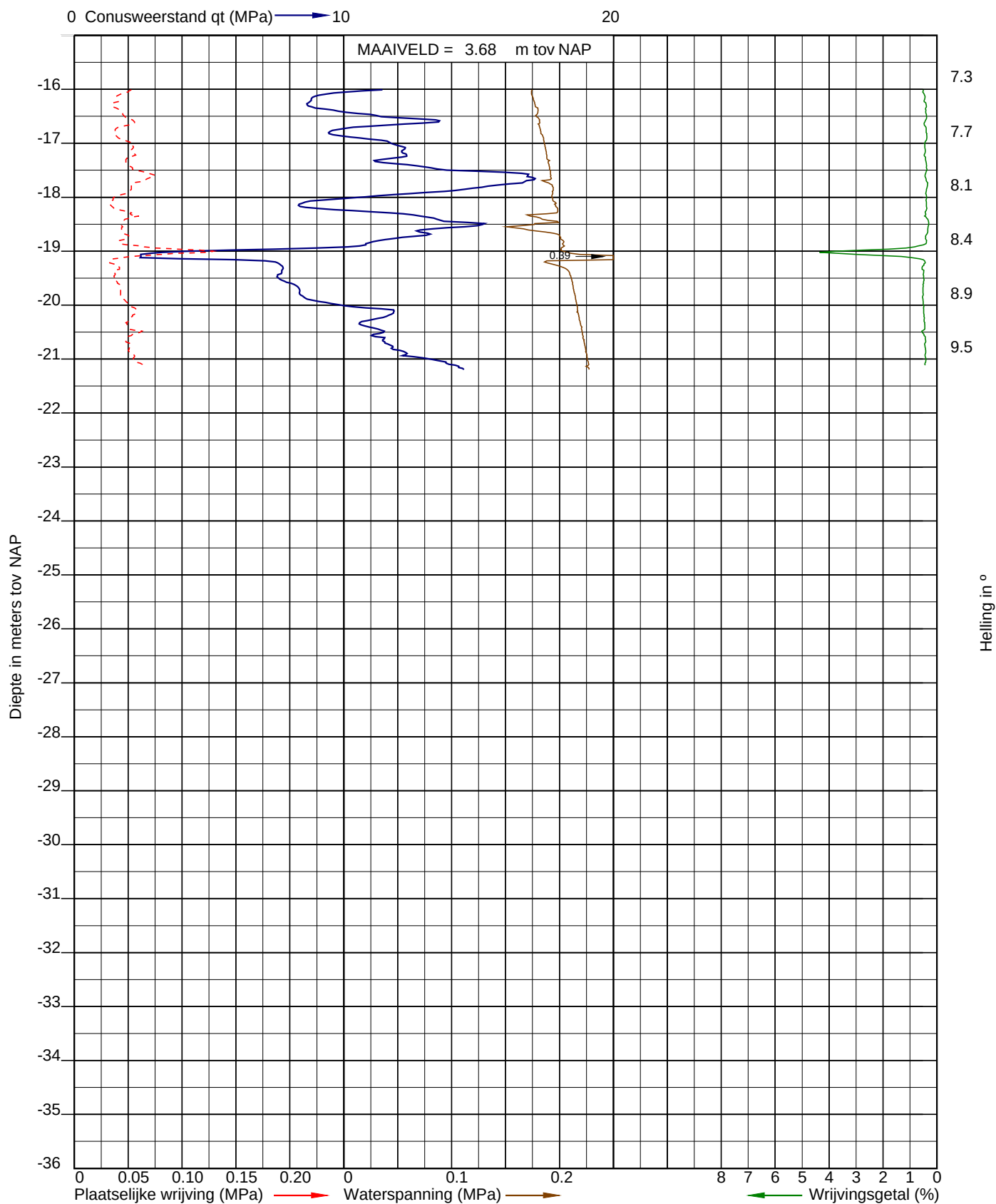
Uitvoerder: EDN
Datum: 22-11-2019
GWS (m-mv): 2.20

X: 150702,000
Y: 442170,480

Sondering: DP104+168_DKMP2_AL



Opdracht: 02P011039-09
Project: Aanvullend grondonderzoek Wijk bij Duurstede - Amerongen (WAM-a)

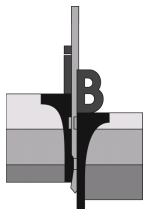


Sondering volgens NEN-EN-ISO 22476-1
Sondeerklasse 2
Conusnummer 060071

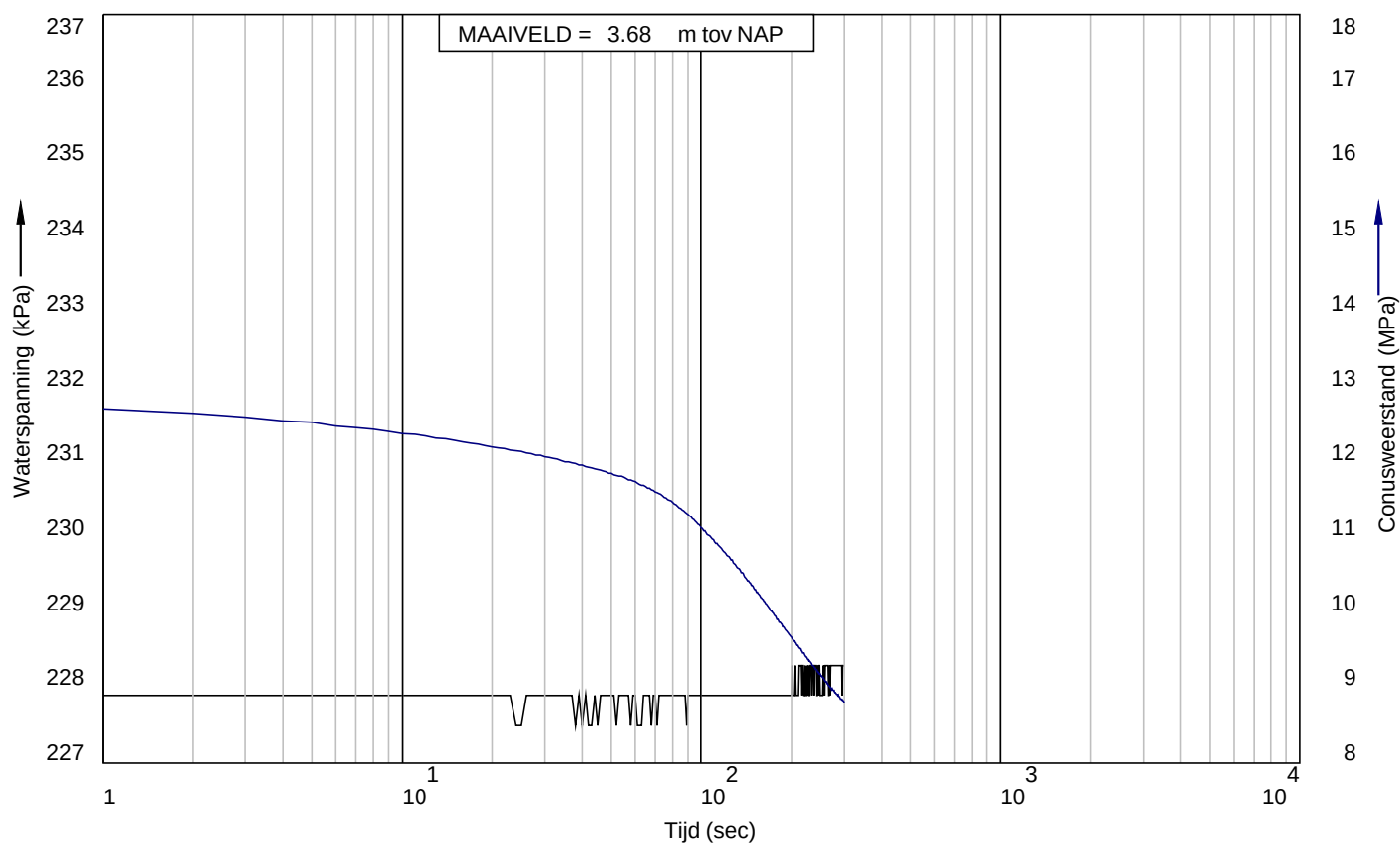
Uitvoerder: EDN
Datum: 22-11-2019
GWS (m-mv): 2.20

X: 150702,000
Y: 442170,480

Sondering: DP104+168_DKMP2_AL



Opdracht: 02P011039-09
Project: Aanvullend grondonderzoek Wijk bij Duurstede - Amerongen (WAM-a)

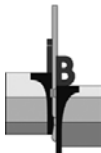


GWS (m-mv): 2.2
Conusnummer P10-CFIIP-10

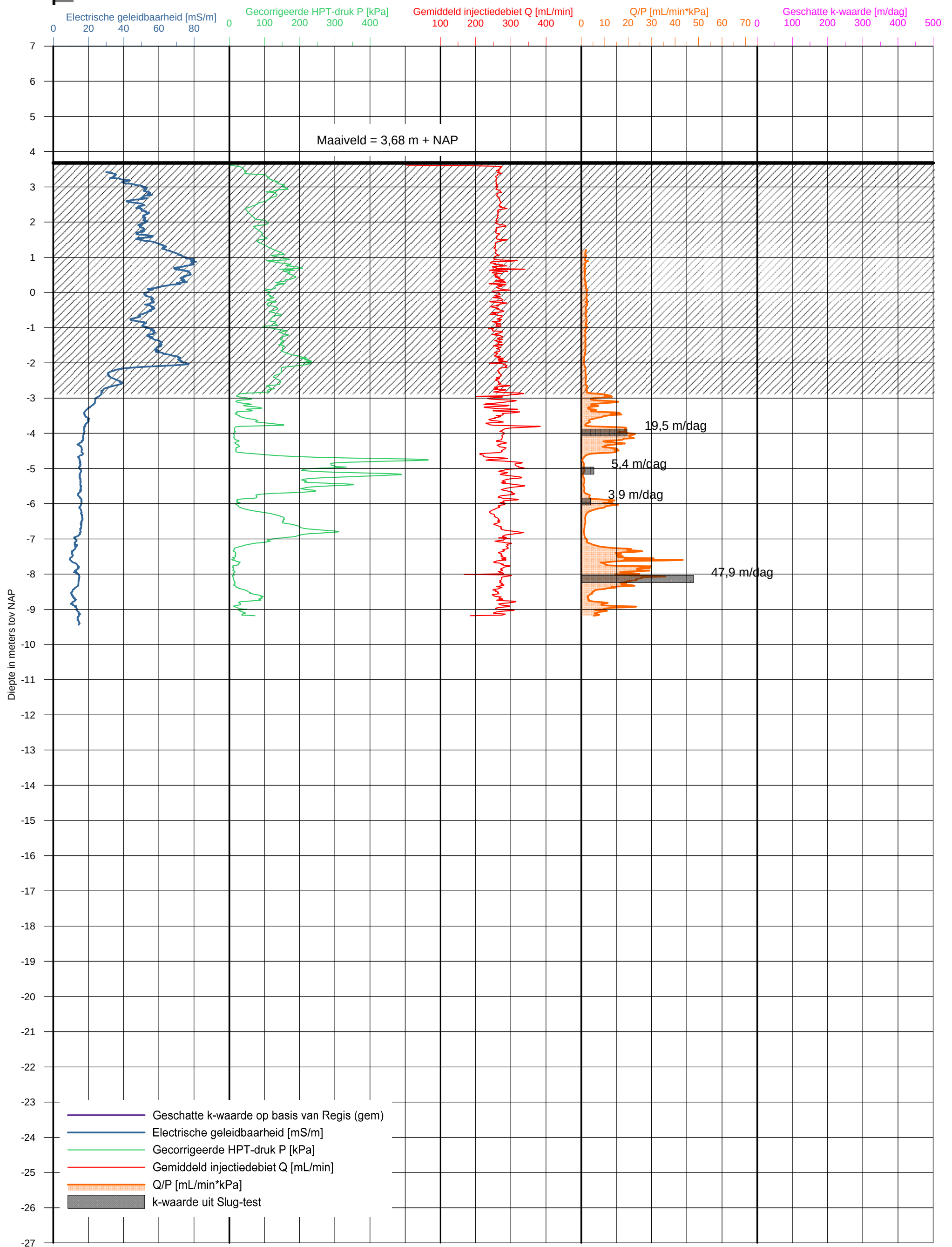
Uitvoerder: EDN
Datum: 22-11-2019

X: 150702,000
Y: 442170,480

Sondering: DP104+168_DKMP2_AL
Dissipatietest: 25.00 m - mv

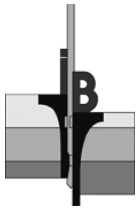


Opdracht : 02P011039-09
Project : HPT sonderingen WAM - concept
Locatie : Wijk bij Duurstede - Amerongen



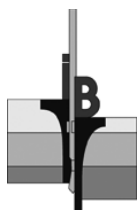
GWS: ca. 1,8 m + NAP

DP104+168_HPT_AL



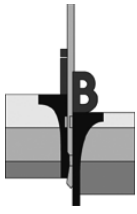
Opdracht : 02P011039-09
Document : 02P011039-09-RG-01
Project : HPT-sonderingen Sterke Lekdijk, deeltraject Wijk bij Duurstede (WAM)

Bijlage D



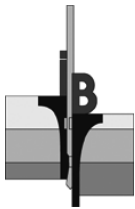
Opdracht : 02P011039-09
Document : 02P011039-09-RG-01
Project : HPT-sonderingen Sterke Lekdijk, deeltraject Wijk bij Duurstede (WAM)

HPT	Diepte peilbuis [m t.o.v. NAP]		k-waarde [m/dag]
	van	tot	
DP004+072_HPT_VL	0,09 +	0,12 +	43,1
	2,74 -	2,94 -	10,8
	6,57 -	6,77 -	5,3
	3,88 -	4,08 -	19,5
DP104+168_HPT_AL	4,96 -	5,16 -	5,4
	5,84 -	6,04 -	3,9
	8,04 -	8,24 -	47,9
	1,38 -	1,18 -	6,4
DP003+008_HPT_AL	0,25 -	0,45 -	20,2
	2,12 -	2,32 -	14,2
	11,82 -	12,02 -	0,9
	0,79 -	0,59 +	30,1
DP084+052_HPT_VL	4,52 -	4,72 -	1,5
	6,96 -	7,16 -	20,5
	5,57 -	5,77 -	29,7
	6,90 -	7,10 -	21,7
DP104+162_HPT_VL	10,42 -	10,62 -	30,6



Opdracht : 02P011039-09
Document : 02P011039-09-RG-01
Project : HPT-sonderingen Sterke Lekdijk, deeltraject Wijk bij Duurstede (WAM)

Bijlage E



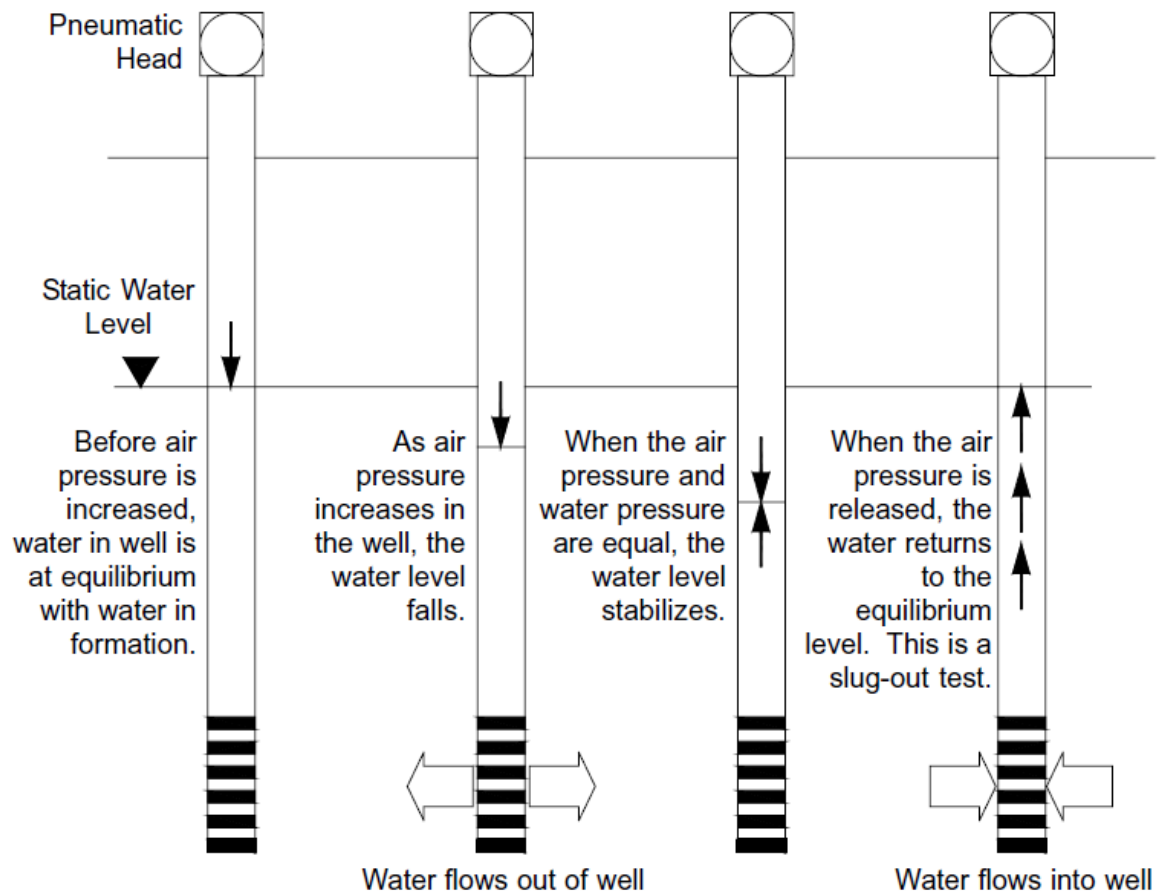
PNEUMATISCHE SLUG-TEST

Principewerking van Pneumatische Slug-Test

Bij pneumatische slug-testen wordt middels het verhogen of verlagen van de luchtdruk de waterstand in een afgesloten bron verlaagd of verhoogd. Wanneer de luchtdruk in de bron wordt verhoogd, daalt de waterstand, totdat luchtdruk en de waterstand in evenwicht zijn. Zodra de waterstand (= totale druk) stabiel is, wordt de luchtdruk middels een "release valve" plotseling verlaagd. Vervolgens zal de waterstand zich herstellen (rising head-test). Het drukverloop gedurende de tijd wordt geregistreerd door een datalogger.

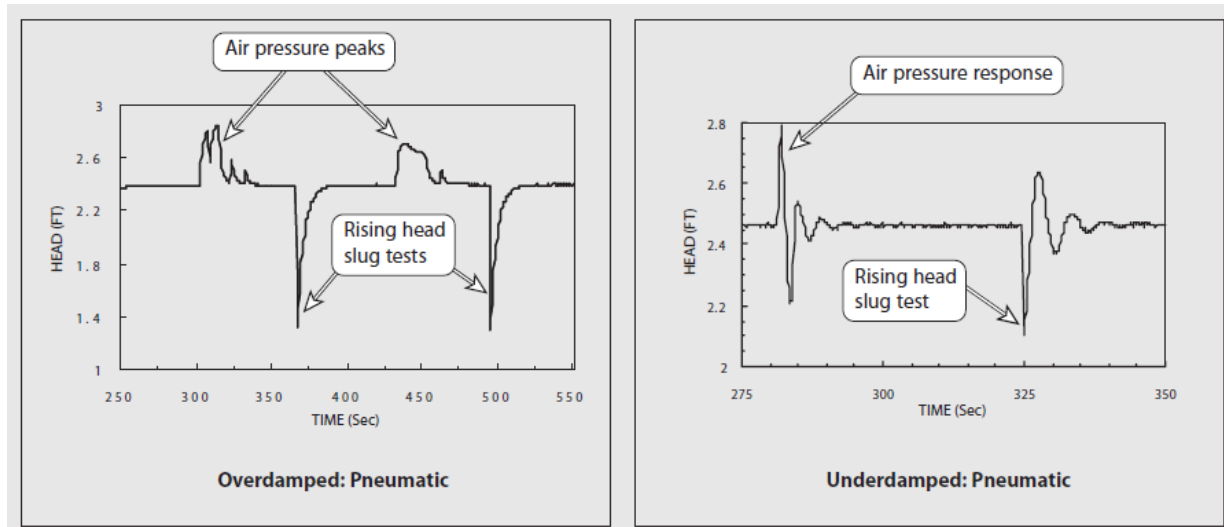
Op basis van de het geregistreeerde drukverloop in relatie tot de tijd kan de waterdoorlatendheid (k-waarde) worden berekend, middels de methode van Hvorslev (watervoerend pakket), of Bouwer-Rice (freatisch). Pneumatische slug-testen generen gegevens van zeer hoge kwaliteit, met (in principe) geen ruis of interferentie, welke vaak wel voorkomen bij de andere type slug testen. Dit wordt belangrijker bij zeer hoge k-formaties, die een oscillerende reactie op slugtesen kunnen opleveren. De navolgende figuur geeft het principe van een pneumatische slug-test weer, alsmede het resultaat van een rising head reactie en een oscillerende reactie.

De proeven worden uitgevoerd met de "Pneumatic Slug Test Kit (GW1600) van Geoprobe, de gegevens worden verwerkt met de Geoprobe Slug Test Analysis Software V3.0.



Figuur 1. Principeschets werking van een pneumatische slug-test (rising head-test).

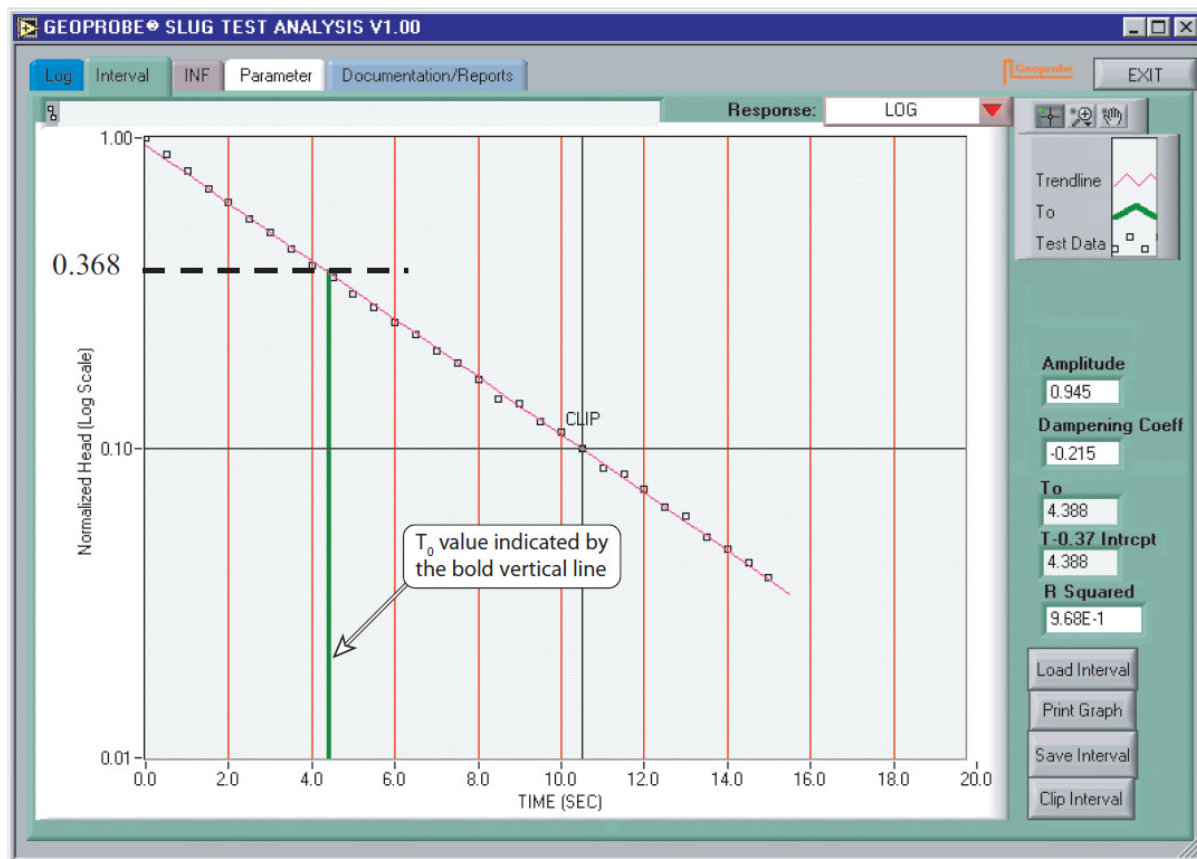
PNEUMATISCHE SLUG-TEST



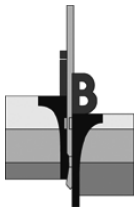
Figuur 2. Schematische weergave van de resultaten van een pneumatische slug-test met een rising head reactie (links) en een oscillerende reactie (rechts).

Uitwerking Pneumatische Slug-Test

In de veel gevallen zal het resultaat van de pneumatic slug test een rising/falling head reactie laten zien. Een rising head reactie treedt op bij het creëren van overdruk in de peilbuis, een falling-head reactie treedt op bij het creëren van onderdruk. Op basis van de T_0 , de tijd die nodig is voor het grondwaterniveau om 37 % ten opzichte van de initiële verlaging dan wel verhoging te stijgen/dalen, kan een k -waarde worden berekend. Een voorbeeld van deze reactie, geplot op log-schaal is weergegeven in Figuur 3.

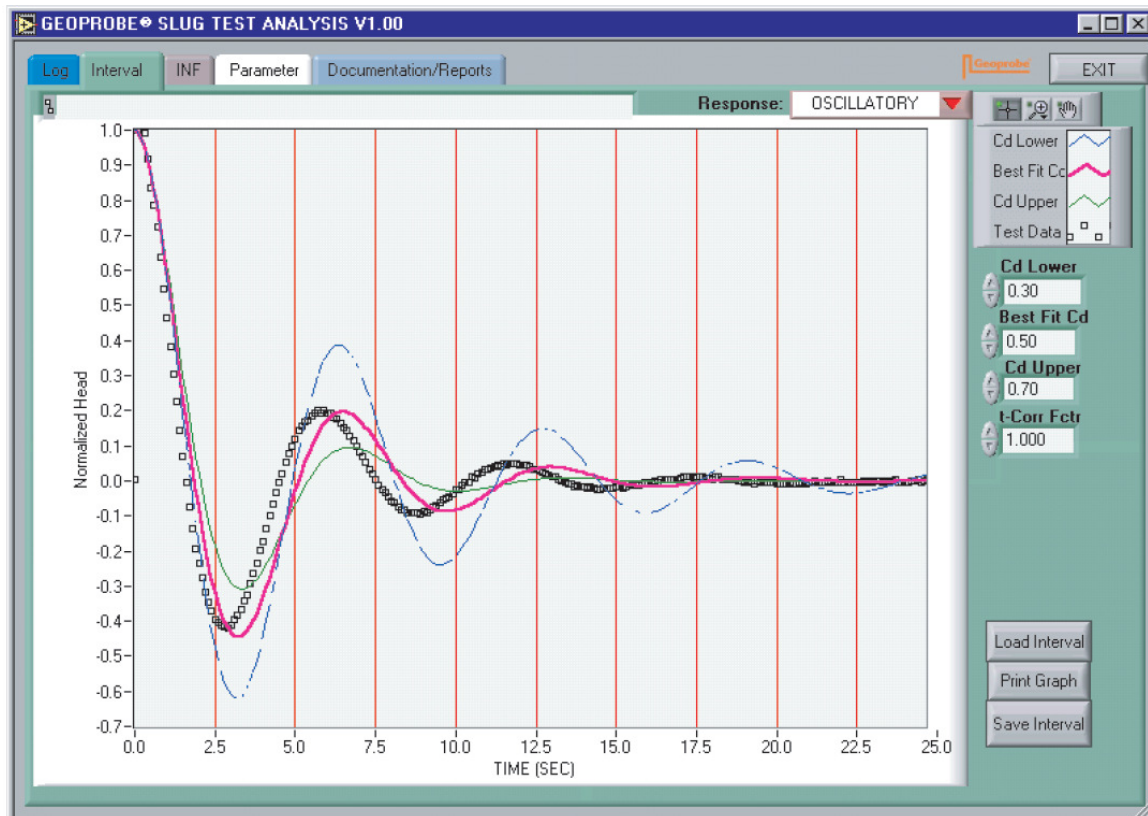


Figuur 3. Best fit lijn en T_0 waarde wordt bepaald op basis van de resultaten van een rising/falling head reactie.



PNEUMATISCHE SLUG-TEST

Wanneer er een oscillerende reactie optreedt tijdens de slug test, zal het waterniveau eerst stijgen tot boven de initiële waterstand, waarna de waterstand weer daalt onder het initiële waterniveau etc. (zie ook Figuur 4). Op basis van de damping parameter (C_d), mogelijk in combinatie met een tijd-correctiefactor, kan de k -waarde worden berekend.



Figuur 4. Veldgegevens (witte blokjes) waar een oscillerende reactie waarneembaar is. Door de best fit C_d te kiezen, in combinatie met de t -corr factor, kan de k -waarde worden berekend.

Aan dit document liggen de navolgende documenten ten grondslag (open source):

Geoprobe Slug-Test Analysis Software - V2.0, User's guide, december 2009;

<https://geoprobe.com/literature/slug-test-analysis-sta-software-v20-users-guide-technical-bulletin-mk3087>

Geoprobe Pneumatic Slug Test Kit, standard operating procedure, February 2002.

Geoprobe Pneumatic Slug Test Kit (GW1600), Installation and Operation Instructions, January, 2011.

<https://geoprobe.com/literature/mk3181-pneumatic-slug-test-kit-instructions-for-gw1600>

Voor meer informatie over de uitvoering en uitwerking van de proeven wordt verwezen naar bovenstaande documenten.

ADVISERING GEOTECHNIEK

Paalfundering
Fundering op staal

Bouwputontwerp
Bemaling
Grondkerende constructie
Taludstabiliteit

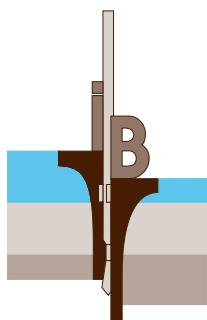
Bouwrijp maken terrein
Grondbalans
Drainage
Afkoppelen en infiltreren
Geo-hydrologische studie

Toezicht heiwerk

Funderingsrenovatie
Schade expertise

Pijpleidingen
Gestuurde boringen

Trillingsanalyse
Geluidsanalyse



INPIJN-BLOKPOEL
ingenieursbureau



Ingenieursbureau Inpijn-Blokpoel Son B.V.

Ekkersrijt 2058
postbus 94 - 5690 AB Son
telefoon (0499) 47 17 92
telefax (0499) 47 72 02
e-mail post@inpijn-blokpoel.com

VELDWERK

Sonderen
Boren
Pompproeven
Peilbuizen

Landmeetkundig werk
Nauwkeurigheidswaterpassing
DGPS-metingen
Inmeten palenplan

Trillingsmeting
Geluidsmeting
Akoestische paalcontrole
Geo-monitoring

Heibegeleiding
Toezicht bouwputten

LABORATORIUM

Classificatie proeven
Mechanische eigenschappen
Chemische analyse

MILIEU-ONDERZOEK

Verkenkend-, nader- en
saneringsonderzoek
Advisering
Projectbegeleiding
Akoestisch onderzoek
Partijkeuringen besluit bodemkwaliteit (Bbk)



www.inpijn-blokpoel.com

Bijlage 3 Verdere kennisontwikkeling : STOWA-rapport van
Acacia Water naar effect van het intrede en uittrede
weerstand op piping

Analyse STOWA-Rapport “Optimalisatie rekenregels ‘piping’ en regionale keringen: invloed maatgevende geohydrologische parameterwaarden”

Het rapport [2.] in opdracht van STOWA-onderzoekt de invloed van de maatgevende geohydrologische parameterwaarden op de stijghoogte in het watervoerend pakket, bepalend voor de pipingberekening. Dit betreft voornamelijk de invloed van de intrede- en uittredeweerstand.

Het onderzoek is uitgevoerd op basis van de analyses van de literatuurstudies en casussen op verschillende locaties in Nederland (Zuid _Willemsvaart, Twentekanaal). In het rapport is ingegaan op de bepaling van de doorlatendheid van een sliblaag door combinatie van de geofysische methode (bepaling dikte) en laboratorium analyse van de slibmonsters of door insitu metingen (infiltrometers). Dit aspect is voor WAM van minder belang.

Vervolgens zijn diverse gevoeligheidsanalyses uitgevoerd met de variaties van de doorlatendheid en breedte van de intrede punt, (boezem) en de hydraulische weerstand van het uittredepunt (sloot) in combinatie van de diverse doorlatendheden van de zandlaag.

Voor WAM kunnen de aanbevelingen t.a.v. de optimalisatie piping analyse (regel van Sellmeijer) van belang zijn.

Om een eventuele correctiefactor voor piping te bepalen dient deze afgestemd te worden op het mechanisme dat een rol speelt bij het ontstaan van piping. Kwelweglengte is één van de bepalende parameters bij het mechanisme piping en geeft de lengte van de weg die het kwelwater af moet leggen tussen het in- en uittredepunt. Het in- en uittredepunt wordt vaak gemakshalve genomen in de binnen- en buitenteen van een dijk. Dit is een conservatieve benadering omdat bijvoorbeeld als gevolg van een afdekkende kleilaag het intredepunt verder van de dijk kan liggen, en een sloot aan de achterlandzijde in een polder de afstand tussen het uittredepunt en de dijk eveneens kan vergroten.

Indien wordt aangesloten bij de kwelweglengte voor het bepalen van de correctiefactor voor het stijghoogteverloop in het watervoerende pakket is het verschil tussen het boezempeil (en in het geval van de primaire waterkering maatgevend hoogwaterstand) en de stijghoogte ter plaatse van het uittredepunt bepalend.

Momenteel wordt bij de berekening van de kans op piping nadat het kritische verval is berekend gebruik gemaakt van de volgende formule:

$$(\Delta H - 0.3d) \leq \frac{1}{\gamma} \Delta H_c$$

In dit piping criterium is een reducerende werking van de deklaag verwerkt door te corrigeren voor de dikte van de deklaag gebruikmakend met een factor 0,3. Tevens wordt gebruik gemaakt van een veiligheidsfactor (γ).

Uit het STOWA-onderzoek is naar voren gekomen dat de weerstand van de boezembodem (en in het geval van de primaire keringen weerstand van de deklaag in het voorland) en de weerstand van de deklaag in het achterland in hoge mate bepalend zijn voor het verloop van de stijghoogte in de zandondergrond.

In de huidige berekeningen voor piping controle middels de formule van Sellmeijer wordt geen voorland(deklaag)weerstand meegenomen. De modelsimulaties hebben laten zien dat dit leidt tot een overschatting van het risico op piping in deze situaties. De beoogde situaties waarvoor de modelberekeningen worden uitgevoerd zijn consistent van opbouw.

Met de analytische formule kunnen de berekende modelresultaten worden nagerekend. Aanbevolen wordt om het verhang wat wordt gebruikt bij de piping controle te corrigeren gebruikmakend van de analytische oplossing. In de huidige situatie wordt bij de piping controle gebruikt hoogwater bij norm (φ_0) en polderpeil (φ_3).

$$(\Delta H - 0,3d) = ((\varphi_0 - \varphi_3) - 0,3d) \leq \frac{1}{\gamma} \Delta H_c$$

Op basis van de analytische formule wordt geadviseerd om de volgende aanpassing te doen van deze piping controle:

Gebruikmaken van de stijghoogtes bij de voet van de waterkering en het polderpeil:

$$(\varphi_1 - \varphi_3) \leq \frac{1}{\gamma} \Delta H_c$$

Met

$$\varphi_1 = \varphi_3 + ((\varphi_0 - \varphi_3) \frac{L_2 + \lambda_3}{\lambda_1 + L_2 + \lambda_3})$$

$$\varphi_3 = \text{polderpeil}$$

Hierbij is tevens het gebruik van een correctie voor de dikte van de deklaag achterwegen gelaten. Als vervolgstap hierop kan gebruik wordt gemaakt van het verhang in de watervoerende laag op basis van de stijghoogte bij de voet en de teen van de waterkering:

$$(\varphi_1 - \varphi_2) \leq \frac{1}{\gamma} \Delta H_c$$

Met

$$\varphi_1 = \varphi_3 + ((\varphi_0 - \varphi_3) \frac{L_2 + \lambda_3}{\lambda_1 + L_2 + \lambda_3})$$

$$\varphi_2 = \varphi_3 + ((\varphi_0 - \varphi_3) \frac{\lambda_3}{\lambda_1 + L_2 + \lambda_3})$$

Aanbeveling van het rapport tav optimalisatie piping analyse

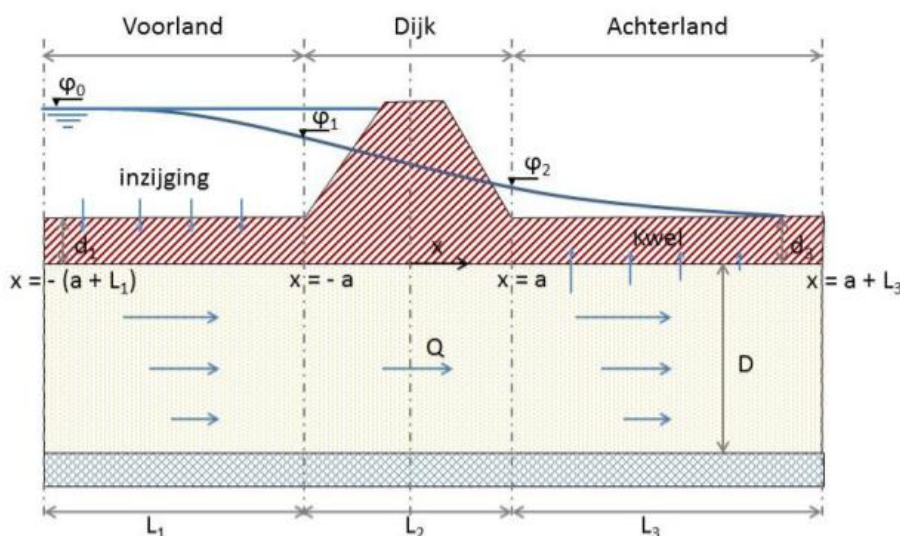
Om een eventuele correctiefactor voor piping te bepalen is het van belang deze af te stemmen op het mechanisme dat een rol speelt bij het ontstaan van piping. Kwelweglengte is één van de bepalende parameters bij het mechanisme piping en geeft de lengte van de weg die het kwelwater af moet leggen tussen het in- en uittredepunt. Het in- en uittredepunt wordt vaak gemakshalve genomen in de binnen- en buitenteen van een dijk. Dit is een conservatieve benadering omdat bijvoorbeeld als gevolg van een afdekkende kleilaag het intredepunt verder van de dijk kan liggen, en een sloot aan de achterlandzijde in een polder de afstand tussen het uittredepunt en de dijk eveneens kan vergroten. Indien wordt

aangesloten bij de kwelweglengte voor het bepalen van de correctiefactor voor het stijghoogteverloop in het watervoerende pakket is het verschil tussen het boezempeil en de stijghoogte ter plaatse van het uittredepunt bepalend.

Momenteel wordt bij de berekening van de kans op piping nadat het kritische verval is berekend gebruik gemaakt van de volgende formule:

$$(\Delta H - 0.3d) \leq \frac{1}{\gamma} \Delta H_c$$

In dit piping criterium is een reducerende werking van de deklaag verwerkt door te corrigeren voor de dikte van de deklaag gebruikmakend met een factor 0,3. Tevens wordt gebruik gemaakt van een veiligheidsfactor (γ) van 1,2. Uit dit onderzoek is naar voren gekomen dat de weerstand van de boezembodem en de weerstand van de deklaag in het achterland in hoge mate bepalend zijn voor het verloop van de stijghoogte in de zandondergrond. Het zou daarom beter zijn om in plaats van het corrigeren voor de dikte van de deklaag een correctie door te voeren op basis van het stijghoogteverval. Temeer een dikte van een deklaag niet direct een maat is voor de weerstand van de deklaag en deze weerstand een bepalende factor is.



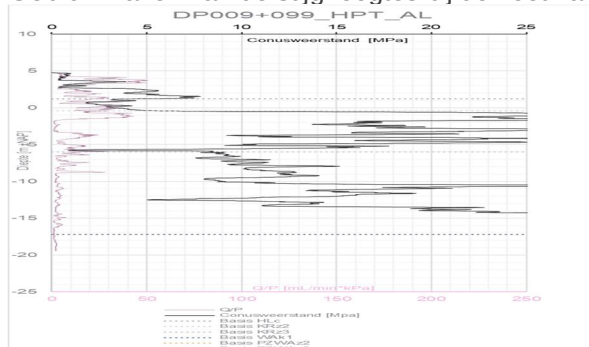
Figuur 54. Situatieschets bij stationaire stroming onder een dijk waarbij infiltratie plaatsvindt via een boezembodem en kwel via een deklaag.

In de huidige berekeningen voor piping controle middels de formule van Sellmeijer wordt geen boezembodemweerstand meegenomen. De modelsimulaties hebben laten zien dat dit leidt tot een overschatting van het risico op piping in deze situaties. De beoogde situaties waarvoor de modelberekeningen worden uitgevoerd zijn consistent van opbouw. Met de analytische formule kunnen de berekende modelresultaten worden nagerekend. Aanbevolen wordt om het verhang wat wordt gebruikt bij de piping controle te corrigeren gebruikmakend van de analytische oplossing. In de huidige situatie maakt wordt bij de piping controle gebruikt van boezempeil (φ_0) en polderpeil (φ_3).

$$(\Delta H - 0.3d) = ((\varphi_0 - \varphi_3) - 0.3d) \leq \frac{1}{\gamma} \Delta H_c$$

Op basis van de analytische formule wordt geadviseerd om de volgende aanpassing te doen van deze piping controle (zie ook figuur):

Gebruikmaken van de stijghoogtes bij de voet van de boezemkade en het polderpeil:



Hierbij is tevens het gebruik van een correctie voor de dikte van de deklaag achterwegen gelaten. Als vervolgstap hierop kan gebruik wordt gemaakt van het verhang in de watervoerende laag op basis van de stijghoogte bij de voet en de teen van de kade:

$$(\varphi_1 - \varphi_2) \leq \frac{1}{\gamma} \Delta H_c$$

Met

$$\varphi_1 = \varphi_3 + ((\varphi_0 - \varphi_3) \frac{L_2 + \lambda_3}{\lambda_1 + L_2 + \lambda_3})$$

$$\varphi_2 = \varphi_3 + ((\varphi_0 - \varphi_3) \frac{\lambda_3}{\lambda_1 + L_2 + \lambda_3})$$

$$(\varphi_1 - \varphi_2) \leq \frac{1}{\gamma} \Delta H_c$$

Met

$$\varphi_1 = \varphi_3 + ((\varphi_0 - \varphi_3) \frac{L_2 + \lambda_3}{\lambda_1 + L_2 + \lambda_3})$$

$$\varphi_2 = \varphi_3 + ((\varphi_0 - \varphi_3) \frac{\lambda_3}{\lambda_1 + L_2 + \lambda_3})$$

Hierbij is tevens het gebruik van een correctie voor de dikte van de deklaag achterwege gelaten. Als vervolgstap hierop kan gebruik wordt gemaakt van het verhang in de watervoerende laag op basis van de stijghoogte bij de voet en de teen van de kade:

$$\varphi_1 - \varphi_2 < 1$$

$$\gamma \Delta H_c$$

Effect optimalisatie op de pipingopgave

In het geval dat we kiezen voor het aangescherpte aanpak op basis van de in het rapport [2.] onderbouwde werkwijze, zal gebruik gemaakt worden van de volgende formule:

$$(\varphi_1 - \varphi_2) \leq \frac{1}{\gamma} \Delta H_c$$

Met gebruik van het aangepaste potentiaal, alleen onder de buitenteen van de waterkering is de hoeveelheid afgekeurde trajecten nog nagenoeg gelijk. Resultaat van de berekening is opgenomen in deze bijlage.

De opgave is in de meeste onvoldoende vakken met circa 20 m verkleind ten opzichte van de werkwijze uit de scopebepaling. In een aantal vakken is met deze rekenregel geringe opgave ontstaan waar die met de berekening met regel van Sellmeijer in de oorspronkelijke scopebepaling niet aanwezig was. Netto brengt deze werkwijze geen significante afname van de opgave.

Het toepassen van de inzichten uit het rapport [2.] behoeven een nader onderzoek en inbedding in het huidige instrumentarium. Gezien dit nog geen gangbare werkwijze is voor het beoordelen van het mechanisme piping, zal in een afstemming met Adviesteam Dijkontwerp en BOI (onafhankelijk van dit project) bediscussieerd worden de eventuele aanscherping van de tools ten aanzien van het beoordelen en ontwerpen van mechanisme piping.

Oordeel piping scopebepalingsfase en partiele optimalisatie volgens STOWA-onderzoek

Eindoordeel	Scope maart 2019		Scope na optimalisatie	
	Aantal doorsnedes	Lengte [km]	Aantal doorsnedes	Lengte [km]
Voldoet	17	1,9	21	2,3
Voldoet niet	84	8,8	80	8,4
n.v.t.		0,2		0,2

Uit het rapport is de aanbeveling hier verder. Ook is hier het resultaat van de rekenwijze met aangepaste rekenregel opgenomen.

Toepassing van alternatieve rekenwijze voor project WAM

Het toepassen van de aangepaste formule is gedaan voor de profielen die ook met Sellmeijer regel zijn berekend. Resultaat is hier opgenomen.

Het doorontwikkelen van de hier geschetste werkwijze heeft meer tijd nodig dan de tijdspad van het project WAM (en Sterke Lekdijk). Deze werkwijze heeft voor het project WAM geen toegevoegde waarde.

voldoende of onvoldoende $\Delta H_c / \gamma_n \cdot \gamma_b$
 $> \Delta H - 0,3d$

	marge tussen voldoende/onvoldoende inclusief schematiseringsfactor								
Dijkpaal [DP]	BIT	BIT+5m	laagst MV	Laagst WG	-	-	-	-	-
DP1									
DP2	5,40	4,67	4,27		o	o	o		o
DP3	5,33	3,67		4,32	o	o		o	o
DP4	4,65	4,04		4,08	o	o		o	o
DP5	3,83	3,73		2,93	v	o		v	o
DP6	5,25	5,18	5,04		o	o	o		o
DP7	7,00	6,22	3,94		o	o	v		o
DP8	4,27	4,11	3,13		o	o	o		o
DP9	3,88	3,44	3,21		o	o	o		o
DP10	4,04	3,77	2,89		o	o	o		o
DP11	4,41	4,23	3,44		o	o	o		o
DP12	4,52	4,19	3,62		o	o	o		o
DP13	4,76	3,89		3,72	o	o		o	o
DP14	4,21	3,75	3,17		o	o	o		o
DP15	4,51	4,38		3,70	o	o		v	o
DP16	4,60	4,28		3,80	o	o		o	o
DP17	4,93	4,47		3,66	o	o		o	o
DP18	4,06	3,63		3,40	o	o		o	o
DP19	3,95	3,87		3,15	o	o		o	o
DP20	3,89	3,98	3,39		o	o	o		o
DP21	3,55	3,22	2,40		o	o	o		o
DP22	3,97	3,79		3,42	o	o		o	o
DP23	3,19	3,06		2,93	o	o		o	o
DP24	3,67	3,58		2,99	o	o		o	o
DP25	3,02	2,78	2,36		o	o	o		o
DP26	4,09	4,59		2,95	o	o		o	o
DP27	7,46	3,88	2,21		o	o	o		o
DP28	3,79	3,66		2,88	o	o		o	o
DP29	3,73	2,59		2,94	o	o		o	o
DP30	5,37	5,16		3,13	o	o		o	o
DP31	5,14	4,67		3,41	o	o		v	o
DP32	4,35	4,04		3,01	o	o		o	o
DP33	4,97	4,89		3,48	o	o		o	o
DP34	5,85	5,42		4,17	o	o		o	o
DP35	4,92	4,55		3,81	o	o		o	o
DP36	4,01	4,03		3,04	o	o		o	o
DP37	2,71	2,38		2,26	v	o		v	o
DP38	2,88	2,68		2,12	v	o		v	o
DP39	2,89	2,76		2,34	v	o		v	o
DP40	4,03	3,76		3,35	o	o		o	o
DP41	4,06	3,93		3,83	o	o		o	o
DP42	4,82	4,33		4,26	o	o		o	o
DP43	5,20	5,03		4,42	o	o		o	o
DP44	5,88	6,54		4,09	o	o		v	o
DP45	6,71	6,20		4,20	o	o		v	o
DP46	6,76	6,28		4,71	o	o		o	o
DP47	5,96	5,42		4,63	o	o		o	o
DP48	11,82	11,18		5,98	v	v		v	v
DP49	6,63	6,56		4,33	o	o		v	o
DP50	6,11	5,86		5,08	o	o		o	o
DP51	6,52	6,12		5,06	o	o		o	o
DP52	9,53	8,89		7,28	v	v		v	v
DP53	8,15	7,58		5,83	o	o		v	o
DP54	6,02	5,61	4,79		o	o	v		o
DP55	4,07	3,85		3,44	o	o		o	o
DP56	4,50	4,68		3,71	o	o		o	o
DP57	3,24	3,36		3,08	o	o		o	o
DP58	3,87	4,40		3,89	o	o		o	o

kwelweglengte aanwezig [m]			
BIT	BIT+5m	laagst MV	Laagst WG
98,0	106,5	111,5	
100,0	127,0		129,5
107,5	116,0		123,5
106,5	105,0		144,5
95,5	95,5	97,0	
70,0	76,5	156,5	
95,0	95,0	111,5	
101,5	106,5	111,0	
101,5	105,0	124,0	
100,0	102,0	117,5	
105,5	111,0	123,0	
96,0	110,5		125,0
104,5	111,5	124,0	
97,0	98,0		120,0
94,0	98,0		112,5
89,5	95,5		122,0
106,5	112,0		126,5
108,0	107,0		126,5
107,5	103,5	114,5	
114,0	119,0	140,0	
109,5	111,5		123,0
127,5	128,0		132,5
109,5	110,0		128,0
124,5	128,0	140,0	
98,5	89,0		126,5
66,0	102,0	145,5	
105,5	107,0		141,0
107,5	133,5		141,0
87,5	90,0		141,0
93,5	100,0		144,0
109,5	113,5		141,5
104,5	105,5		136,0
96,0	102,0		121,5
107,5	113,5		137,5
120,0	119,0		145,5
130,5	136,0		154,5
118,5	119,5		154,0
116,5	116,5		147,5
106,5	112,5		130,5
125,0	130,0		134,5
110,0	119,5		118,5
105,5	108,5		114,5
96,5	88,5		161,5
92,0	98,0		156,5
94,5	100,0		123,0
98,0	105,5		116,5
112,0	117,0		205,5
96,5	97,0		162,5
110,0	113,5		123,0
111,5	117,0		129,0
104,0	109,0		133,0
102,5	105,0		136,0
116,0	119,0	135,5	
148,5	155,0		160,0
155,0	151,0		174,5
157,0	152,5		167,5
160,5	145,5		161,0

kwehweglengtetekort [m]			
BIT	BIT+5m	laagst MV	Laagst WG
30,5	34,0	29,0	
27,0	48,5		51,5
26,0	29,5		34,5
27,5	21,0		0,0
20,5	15,5	16,0	
2,0	3,5	0,0	
23,5	18,5	17,5	
28,5	28,5	24,0	
15,0	13,5	15,0	
14,5	11,5	13,0	
23,5	23,5	30,5	
16,0	25,5		27,0
27,5	29,5	14,5	
21,5	17,5		0,0
17,0	16,0		17,5
13,5	14,5		23,0
38,0	38,5		47,0
42,0	36,0		28,5
39,5	30,5	31,0	
45,5	45,5	56,0	
38,5	35,5		37,0
53,0	48,5		44,5
36,0	31,5		22,0
49,5	48,0	49,5	
33,5	19,0		5,0
0,0	30,5	34,0	
26,0	22,5		41,5
38,5	59,5		64,5
26,0	23,5		12,0
30,0	31,5		0,0
48,5	47,5		18,0
37,0	33,0		9,5
29,5	30,5		8,0
42,5	43,5		60,0
46,5	40,5		12,5
54,0	54,5		62,0
49,0	45,0		30,5
34,5	29,0		0,0
19,5	20,5		33,5
0,0	0,0		0,0
29,5	23,0		13,0
35,5	33,5		15,5
20,5	7,5		0,0
26,5	27,5		0,0
32,0	32,5		0,0
32,0	34,5		21,5
0,0	0,0		0,0
26,0	21,5		0,0
44,5	43,0		34,5
44,0	44,0		22,5
0,0	0,0		0,0
4,0	1,5		18,0
15,0	13,0	17,0	
71,0	72,5		34,0
72,5	63,5		49,0
77,5	68,0		87,0
83,0	63,0		82,5

totale vereiste kwelweglengte [m]				maatgevende berekening	type watergang
BIT	BIT+5m	laagst MV	Laagst WG	-	
128,5	140,5	140,5		BIT+5m	
127,0	175,5		181,0	Laagst WG	teensloot
133,5	145,5		158,0	Laagst WG	kopsloot
134,0	126,0		144,5	Laagst WG	kopsloot
116,0	111,0	113,0		BIT	
72,0	80,0	156,5		laagst MV	
118,5	113,5	129,0		laagst MV	
130,0	135,0	135,0		BIT+5m	
116,5	118,5	139,0		laagst MV	
114,5	113,5	130,5		laagst MV	
129,0	134,5	153,5		laagst MV	
112,0	136,0		152,0	Laagst WG	kopsloot diagonaal
132,0	141,0	138,5		BIT+5m	
118,5	115,5		120,0	Laagst WG	kopsloot
111,0	114,0		130,0	Laagst WG	kopsloot
103,0	110,0		145,0	Laagst WG	kopsloot
144,5	150,5		173,5	Laagst WG	kopsloot
150,0	143,0		155,0	Laagst WG	kopsloot diagonaal
147,0	134,0	145,5		BIT	
159,5	164,5	196,0		laagst MV	
148,0	147,0		160,0	Laagst WG	teensloot
180,5	176,5		177,0	BIT	
145,5	141,5		150,0	Laagst WG	kopsloot diagonaal
174,0	176,0	189,5		laagst MV	
132,0	108,0		131,5	BIT	
66,0	132,5	179,5		laagst MV	
131,5	129,5		182,5	Laagst WG	kopsloot diagonaal
146,0	193,0		205,5	Laagst WG	kopsloot diagonaal
113,5	113,5		153,0	Laagst WG	kopsloot diagonaal
123,5	131,5		144,0	Laagst WG	kopsloot
158,0	161,0		159,5	BIT+5m	
141,5	138,5		145,5	Laagst WG	kopsloot
125,5	132,5		129,5	BIT+5m	
150,0	157,0		197,5	Laagst WG	kopsloot
166,5	159,5		158,0	BIT	
184,5	190,5		216,5	Laagst WG	kopsloot
167,5	164,5		184,5	Laagst WG	kopsloot
151,0	145,5		147,5	BIT	
126,0	133,0		164,0	Laagst WG	kopsloot
125,0	130,0		134,5	Laagst WG	kopsloot
139,5	142,5		131,5	BIT+5m	
141,0	142,0		130,0	BIT+5m	
117,0	96,0		161,5	Laagst WG	kopsloot diagonaal
118,5	125,5		156,5	Laagst WG	kopsloot
126,5	132,5		123,0	BIT+5m	
130,0	140,0		138,0	BIT+5m	
112,0	117,0		205,5	Laagst WG	kopsloot
122,5	118,5		162,5	Laagst WG	kopsloot
154,5	156,5		157,5	Laagst WG	kopsloot
155,5	161,0		151,5	BIT+5m	
104,0	109,0		133,0	Laagst WG	kopsloot
106,5	106,5		154,0	Laagst WG	kopsloot
131,0	132,0	152,5		laagst MV	
219,5	227,5		194,0	BIT+5m	
227,5	214,5		223,5	BIT	
234,5	220,5		254,5	Laagst WG	parallele sloot
243,5	208,5		243,5	BIT	

resultaat regel Sellmeijer	resultaat aangepast regel piping STOWA rapport
0	0
0	0
0	0
0	V
0	0
V	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	V
0	0
0	V
0	V
0	0
0	V
0	V
0	0
0	0
V	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	V
0	0
0	0
V	0
0	0
0	0
V	0
V	0
V	0
0	0
V	V
V	0
0	0
0	0
V	V
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0

	marge tussen voldoende/onvoldoende inclusief schematiseringsfactor								
Dijkpaal [DP]	BIT	BIT+5m	laagst MV	Laagst WG	-	-	-	-	-
DP59	3,79	3,80	3,19		V	O	V		O
DP60	8,20	7,68		6,18	V	V		V	V
DP61	6,97	6,67		4,97	O	V		V	O
DP62	7,18	6,75		5,02	O	O		V	O
DP63	6,81	6,20		5,94	V	V		V	V
DP64	3,67	3,20	2,26		O	O	V		O
DP65	3,80	3,46	2,28		O	O	V		O
DP66	3,79	4,65	3,64		O	O	O		O
DP67	3,49	3,40	3,01		V	V	V		V
DP68	3,76	3,62	3,34		V	V	V		V
DP69	1,98	1,88	1,86		V	V	V		V
DP70	3,65	3,51		2,71	V	V		V	V
DP71	3,31	3,12	3,12		O	O	O		O
DP72	3,37	3,11	2,84		O	O	O		O
DP73	2,54	3,14	2,50		V	V	V		V
DP74	2,26	1,86		1,72	V	V		V	V
DP75	2,41	2,11		1,94	V	V		V	V
DP76	3,19	2,94	2,78		O	O	O		O
DP77	3,02	2,85	2,70		V	O	O		O
DP78	2,43	2,39	1,00		V	V	V		V
DP79	4,44	4,39	2,53		V	V	V		V
DP80	5,56	5,25	2,86		V	V	V		V
DP81	4,58	4,24	1,84		V	V	V		V
DP82	4,85	4,59	2,24		O	O	V		O
DP83	4,35	4,01		2,99	O	O		V	O
DP84	5,76	5,64		3,37	O	O		O	O
DP85	5,16	4,86		3,03	O	O		V	O
DP86	4,97	4,76	4,67		O	O	O		O
DP87									

kwelweglengte aanwezig [m]			
BIT	BIT+5m	laagst MV	Laagst WG
114,0	109,0	135,0	
122,5	127,5		140,0
104,5	109,5		157,0
104,5	109,5		161,5
105,0	110,0		113,0
99,0	108,0	159,0	
95,0	100,0	130,5	
121,0	103,5	124,5	
102,0	100,0	110,5	
100,0	99,5	106,5	
149,0	145,0	145,5	
106,0	105,5		153,0
110,0	112,5	112,5	
110,0	113,0	119,5	
128,0	107,5	123,0	
124,0	126,0		149,0
127,0	129,0		152,0
113,5	116,5	121,0	
114,5	115,5	121,0	
133,0	129,5	171,0	
144,5	138,0	198,5	
122,5	122,5	188,0	
134,0	134,5	196,5	
126,5	128,5	190,0	
147,5	149,5		190,0
136,0	137,0		223,5
139,5	142,5		233,0
133,0	131,5	134,0	

kwelweglengtetekort [m]			
BIT	BIT+5m	laagst MV	Laagst WG
34,0	24,0	54,0	
0,0	0,0		0,0
0,0	0,0		0,0
0,0	0,0		0,0
0,0	0,0		0,0
10,0	13,5	0,0	
9,0	9,0	13,5	
36,5	13,5	38,0	
13,0	5,0	1,5	
6,0	0,0	1,5	
50,5	41,5	44,0	
5,5	0,0		0,0
15,0	12,5	12,5	
35,5	33,0	21,0	
55,0	27,5	50,5	
52,5	49,5		23,0
39,5	36,0		24,0
24,0	22,0	13,5	
26,0	22,0	0,0	
40,0	31,5	64,5	
47,0	35,5	78,0	
24,0	19,0	72,0	
36,5	32,0	67,0	
38,5	35,5	31,0	
79,0	75,5		37,5
65,0	61,0		91,5
66,5	64,0		98,0
73,0	66,5	70,5	

totale vereiste kwelweglengte [m]				maatgevende berekening	type watergang
BIT	BIT+5m	laagst MV	Laagst WG	-	
148,0	133,0	189,0		laagst MV	
122,5	127,5		140,0	Laagst WG	kopsloot
104,5	109,5		157,0	Laagst WG	kopsloot
104,5	109,5		161,5	Laagst WG	kopsloot
105,0	110,0		113,0	Laagst WG	kopsloot
109,0	121,5	159,0		laagst MV	
104,0	109,0	144,0		laagst MV	
157,5	117,0	162,5		laagst MV	
115,0	105,0	112,0		BIT	
106,0	99,5	108,0		laagst MV	
199,5	186,5	189,5		BIT	
111,5	105,5		153,0	Laagst WG	kopsloot
125,0	125,0	125,0		BIT	
145,5	146,0	140,5		BIT+5m	
183,0	135,0	173,5		BIT	
176,5	175,5		172,0	BIT	
166,5	165,0		176,0	Laagst WG	kopsloot
137,5	138,5	134,5		BIT+5m	
140,5	137,5	121,0		BIT	
173,0	161,0	235,5		laagst MV	
191,5	173,5	276,5		laagst MV	
146,5	141,5	260,0		laagst MV	
170,5	166,5	263,5		laagst MV	
165,0	164,0	221,0		laagst MV	
226,5	225,0		227,5	Laagst WG	watergang
201,0	198,0		315,0	Laagst WG	watergang
206,0	206,5		331,0	Laagst WG	watergang
206,0	198,0	204,5		BIT	

resultaat regel Sellmeijer	resultaat aangepast regel piping STOWA rapport
O	V
V	V
V	O
V	O
V	V
O	O
O	O
O	O
O	V
O	V
O	V
O	V
O	O
O	O
O	V
O	V
O	O
O	V
O	O
O	O
O	O

Bijlage 4 Gevoeligheidsanalyse D- Geo Flow-
scopebepalingsfase

Bijlage 7 - Piping analyse D-Geo Flow

Onderwerp: Piping analyse D-Geo Flow
Projectnummer: 360562 / C03011.000750.0100
Referentienummer:
Datum: 27-03-2019

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Voor het traject Wijk bij Duurstede – Amerongen (WAM) volgt uit de uitgevoerde beoordeling op piping een zeer grote opgave. Deze beoordelingen zijn uitgevoerd met behulp van de analytische formule van Sellmeijer. Berekeningen met een meer geavanceerd model kunnen mogelijk resulteren in een optimalisatie van de opgave.

Deze memo beschrijft de met het rekenmodel D-Geo Flow uitgevoerde gevoeligheidsberekeningen. De beschouwde locatie betreft het “proefveld” piping. Op deze locatie is veel informatie beschikbaar over de bodemopbouw en doorlatendheid van de watervoerende zandlagen.

1.2 Doel

Het doel van de gevoeligheidsberekeningen is onderzoeken of gebruik van het meer geavanceerde rekenmodel D-Geo Flow resulteert in een optimalisatie ten opzichte van de analytische rekenmethode met Sellmeijer. D-Geo Flow houdt rekening met de werkelijke geometrie en bodemopbouw en heeft de mogelijkheid om rekening te houden met gelaagdheid en anisotropie.

1.3 Werkwijze

Voor de gevoeligheidsanalyse zijn de volgende berekeningen uitgevoerd:

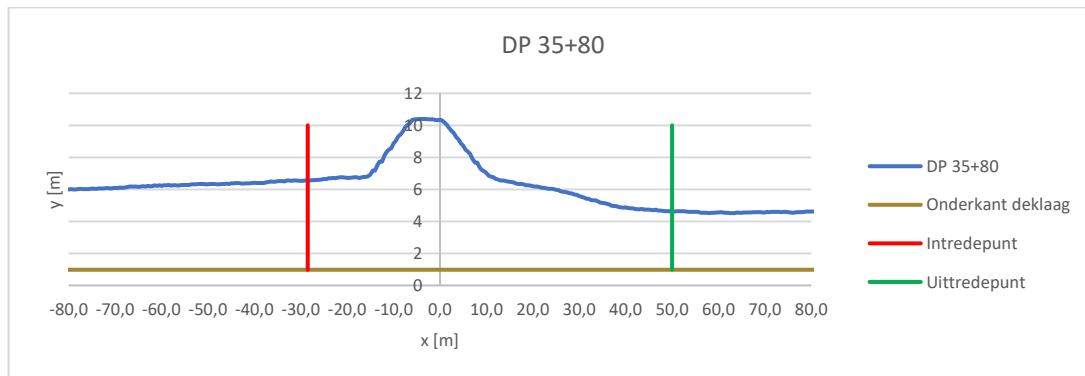
1. kalibratie D-Geo Flow model aan resultaat analytische formule Sellmeijer
2. gevoeligheidsanalyses invloed gelaagdheid en anisotropie watervoerend pakket
3. gevoeligheidsanalyses dikte watervoerend pakket
4. invloed tijdsafhankelijk versus tijdsafhankelijk rekenen

Voor alle varianten is het toelaatbare verval zonder veiligheidsfactoren en schematiseringsfactor berekend. Op basis van deze resultaten zijn conclusies aanbevelingen opgesteld.

2 Uitgangspunten

2.1 Geometrie

De geometrie is in Figuur 2-1 gevisualiseerd, het intredepunt en uittredepunt is schematisch weergegeven. Uit onderzoek van HDSR in het voorland is gebleken dat op enige afstand de deklaagdikte zeer beperkt is en in het verleden is afgegraven. Daarmee is de voorlandlengte beperkt tot 15 m en ligt het intredepunt op $x = -28,5$ m. In het achterland is het aannemelijk dat opbarsten plaatsvindt, het uittredepunt in het achterland komt te liggen op $x = 50,0$ m. De onderkant van de deklaag ligt op een niveau van NAP +0,98 m.



Figuur 2-1 Schematische weergave piping model + geometrie DP 35+80

2.2 Parameters D-Geo Flow en Sellmeijer analytisch kalibratie

Voor de kalibratie van het D-Geo Flow model is een basisschematisering vastgesteld. Deze schematisering komt één op één overeen met de voor de analytische formule van Sellmeijer gebruikte invoer:

• Aanwezig verval	= 4,80	[m]
• Aanwezige kwelweglengte	= 78,50	[m]
• Dikte watervoerende zandlaag	= 10,15	[m]
• Doorlatendheid watervoerend pakket	= 70,26	[m/dag]
• 70% percentiel van de korreldiameter	= 0,00025	[m]
• Volumiek gewicht water	= 9,81	[kN/m ³]
• Rolweerstand van de zandkorrels	= 37,0	[°]
• Volumiek gewicht zandkorrels onder water	= 16,50	[kN/m ³]
• Coëfficiënt van White	= 0,25	[-]

Specifiek voor D-Geo Flow zijn nog de volgende parameters van toepassing:

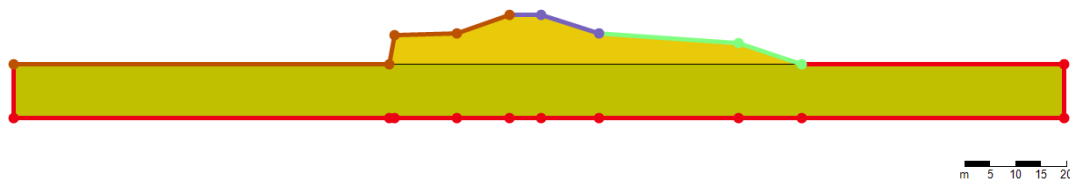
• Porositeit	= 0,4	[-]
• Dichtheid vaste stof	= 2650	[kg/m ³]
• Compressibility soil & water	= 0	[m ² /N]

Door de compressibility (samendrukbaarheid) van de grond en het water gelijk te stellen aan nul wordt een tijdsafhankelijke berekening (stationaire situatie) uitgevoerd.

Dit is voor de kalibratie vereist om een vergelijking te kunnen maken tussen de analytische formule van Sellmeijer die per definitie een tijdsafhankelijk resultaat geeft. Daarnaast bestaat er nog onzekerheid over de bruikbaarheid van tijdsafhankelijke resultaten. Er zijn nog aanvullende gevoeligheidsberekeningen uitgevoerd om de invloed van tijdsafhankelijkheid te verkennen.

2.3 Randvoorwaarden rekenmodel en grid

De randvoorwaarden van het rekenmodel zijn vastgelegd in Figuur 2-2. De hoogwatergolf (bruin) zit aan de linkerzijde van het model vanaf de rivierzijde tot aan de buitenkruinlijn van de dijk. Vanaf de buitenkruin tot aan het binnentalud is een kwel (paars) randvoorwaarde opgelegd. Ter plaatse van het uittredepunt heerst het polderpeil NAP +4,67 m (groen). Om vrije uitstroom te voorkomen is op de rest van de randen een no flow (rood) randvoorwaarde opgelegd.

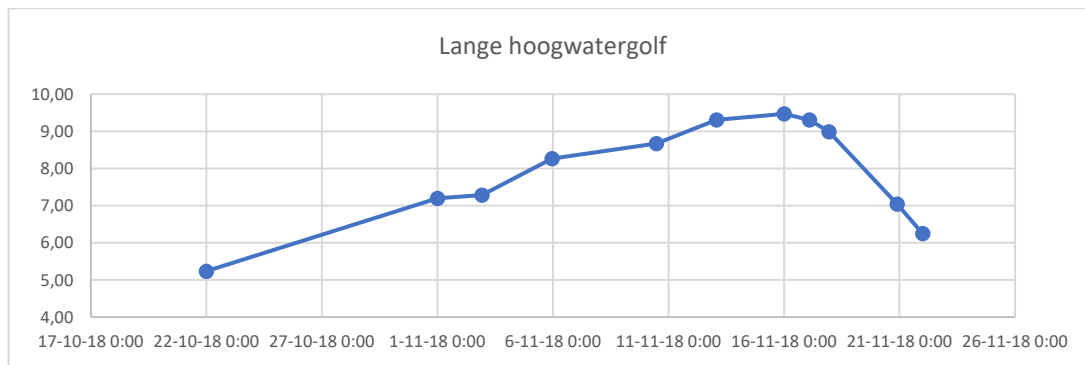


Figuur 2-2 Randvoorwaarden D-Geo Flow basismodel

Het rekengrid heeft een standaard afmeting van 2,0 m met een factor 3 verfijning rond de pijp. Het model loopt van 08-03-2019 tot 08-04-2019 met 248 tijdstappen van 3 uur.

2.4 Hoogwatergolf en polderpeil

In Figuur 2-3 is de hoogwatergolf gegeven, deze heeft een piek op een niveau van NAP+9,47 m. Het polderpeil bedraagt NAP+4,67 m, daarmee is het maximale verval in de berekening 4,80 m.



Figuur 2-3 Verloop hoogwatergolf

2.5 Versie

De berekeningen zijn uitgevoerd met D-Geo Flow, versie 1.0.39057 (beta versie)

3 Kalibratie

Doel van de kalibratie is aantonen dat het model in D-Geo Flow correct is opgebouwd. Voor de kalibratie wordt een met de analytische formule vergelijkbare vereenvoudigde bodemopbouw en geometrie gemodelleerd. Aangezien het Sellmeijer criterium ingebouwd is in D-Geo Flow moet het berekende toelaatbare verval orde grote vergelijkbaar zijn met het resultaat van de analytische formule van Sellmeijer.

Voor de kalibratie zijn vier berekeningen uitgevoerd met zowel D-Geo Flow als de analytische formule:

- Basisschematisering;
- Basisschematisering & doorlatendheid WVP 35 m/dag;
- Basisschematisering & 70% percentiel van de korreldiameter 0,000170 m;
- Basisschematisering & dikte WVP 33 m

De resultaten van de kalibratie zijn opgenomen in Tabel 3-1. Met de analytische formule van Sellmeijer is voor de basisschematisering een toelaatbaar verval van 4,05 m berekend. Het toelaatbare verval inclusief veiligheidsfactor en schematiseringsfactor bedraagt 2,72 m. Dit resulteert in een kwelweglengtetekort van 31,5 m.

Het D-Geo Flow basismodel berekent met dezelfde uitgangspunten een toelaatbaar verval van 4,40 m. Dit resulteert in een toename van 0,35 m ofwel circa 9%. Uit eerdere studies volgt dat D-Geo Flow veelal een optimistischer resultaat geeft met een verschil tot enkele decimeters, het resultaat ligt daarmee in de lijn der verwachting.

Ook voor de overige varianten liggen de resultaten in dezelfde range. Opvallend is dat met een dikker watervoerend pakket de resultaten meer overeenkomen dan met een dunner watervoerend pakket.

Tabel 3-1 Resultaten kalibratie

Variant berekening	Toelaatbaar verval D-Geo Flow [m]	Toelaatbaar verval analytisch [m]	Verskil verval [m]
Basisschematisering	4,40	4,05	0,35
Verlaging doorlatendheid WVP	5,53	5,10	0,43
Verlaging D_{70}	3,77	3,47	0,30
Dikker WVP	3,20	3,12	0,08

4 Gevoeligheidsanalyses

Binnen de gevoeligheidsanalyse zijn de volgende onderdelen van het model beschouwd:

- invloed gelaagdheid en effect anisotropie (verschil tussen horizontale en verticale waterdoorlatendheid watervoerend pakket);
- invloed dikte watervoerend pakket;
- invloed tijdsafhankelijk versus tijdsafhankelijk rekenen.

4.1 Invloed gelaagdheid en anisotropie watervoerend pakket

Op basis van de beschikbare HPT-sonderingen getoond in figuur 4-1 is een schematisering opgesteld waarin de watervoerende zandlaag is opgedeeld in verschillende sublagen met elk een andere doorlatendheid. Om een zinvolle vergelijking met de basisschematisering te kunnen maken zijn de volgende parameters gelijk gehouden:

- Totale dikte watervoerend pakket blijft 10,15 m;
- Gesommeerde kD waarde van alle sublagen is $713 \text{ m}^2/\text{dag}$.

De onderverdeling in sublagen is weergegeven in Tabel 4-1.

Tabel 4-1 Onderverdeling doorlatendheid zandlagen

b.k. laag	Laag	k-waarde [m/dag]
NAP +0,98 m	Echteld I	65
NAP -0,5 m	Echteld II	55
NAP -1,5 m	Echteld III	90
NAP -4,0 m	Kreftenheye I	20
NAP -4,5 m	Kreftenheye II	70



Figuur 4-1 Verdeling watervoerend pakket op basis van HPT-sonderingen

Met het bovenstaande als uitgangspunt zijn de volgende varianten opgesteld:

- HPT variant 0, met de laagindeling zoals in Tabel 4-1.
- HPT variant 1, gelijk aan variant 0 maar dan met een slecht doorlatende laag op de plek van Kreftenheye I ($k = 0,5 \text{ m/d}$).

- HPT variant 2, gelijk aan variant 0 maar dan met anisotropie¹ effect in de holocene pakketten (Echteld). Verticale doorlatendheid met een factor 2 verlaagt ten opzichte van de horizontale doorlatendheid.
- HPT variant 3, gelijk aan variant 0 maar dan met effect anisotropie in de pleistocene pakketten (Kreftenheye). Verticale doorlatendheid met een factor 2 verlaagt ten opzichte van de horizontale doorlatendheid.
- HPT variant 4, gelijk aan variant 2 maar dan met een anisotropiefactor 5.
- HPT variant 5, gelijk aan variant 3 maar dan met een anisotropiefactor 5.
- HPT variant 6 variant 1, 4 en 5 gecombineerd. Dus met slecht doorlatend tussenlaagje en anisotropie met een factor 5 over het hele watervoerend pakket.
- HPT variant 7, gelijk aan variant 0 met een lagere doorlatendheid boven in het watervoerend pakket en een hogere onder in het watervoerend pakket. Doorlatendheid Echteld I en II gelijk aan 30 m/d, Echteld III 90 m/d en Kreftenheye I en II 80 m/d. Hierbij wordt nog wel voldaan aan een gemiddelde van ongeveer 70,3 m/d.

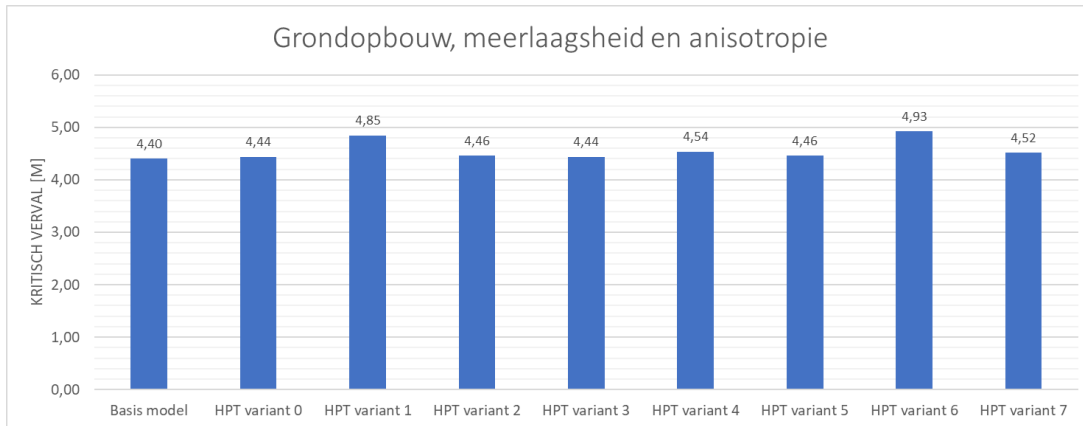
De resultaten zijn opgenomen in tabel 4-2 en tevens getoond in Figuur 4-2. Op basis van de resultaten kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De grootste invloed op het resultaat kan daarmee behaald worden door het gebruik van D-Geo Flow in plaats van de analytische formule, voor de basisschematisering neemt het toelaatbare verval toe met 0,35 m of circa 9%. Dit resulteert om en nabij in een afname van het kwelweglengtetekort van 31,5 m naar 22 m
- Zowel het effect van meerlaagsheid als anisotropie in de waterdoorlatendheid heeft een beperkte invloed op het resultaat. Ook bij een vrij hoge anisotropie factor van 5 blijft de invloed beperkt tot maximaal circa 3% extra winst. Dit resulteert in een afname van het kwelweglengtetekort van 31,5 m naar circa 19 m.
- Ook een aangenomen andere verdeling in de doorlatendheid met een relatief lage k-waarde van 30 m/dag aan de bovenzijde in plaats van 65 m/dag heeft weinig invloed. Het verschil in doorlatendheid moet veel groter zijn om een significant effect te hebben
- De toevoeging van een relatief slecht waterdoorlatende laag heeft wel een significante invloed van circa 10%. Deze waterremmende laag is echter alleen lokaal aanwezig, dit effect kan derhalve niet tot zeer lastig verzilverd worden.

Tabel 4-2 Resultaten gevoeligheidsberekeningen gelaagdheid en anisotropie

Som	Beschrijving	Toelaatbaar verval	Invloed t.o.v. basis	Invloed t.o.v. basis
[-]	[-]	[m]	[m]	[%]
Basis	Basisschematisatie	4,40	-	-
0	Meerlaagsheid	4,44	0,04	0,9
1	Slecht doorlatende laag tussen Holocene - Pleistoceen	4,85	0,45	10
2	Meerlaagsheid anisotropiefactor 2 Holocene	4,46	0,06	1,4
3	Meerlaagsheid anisotropiefactor 2 Pleistoceen	4,44	0,04	0,9
4	Meerlaagsheid anisotropiefactor 5 Holocene	4,54	0,14	3,2
5	Meerlaagsheid anisotropiefactor 5 Pleistoceen	4,46	0,06	1,4
6	Combinatie variant 1, 4 en 5	4,93	0,53	12
7	Lagere doorlatendheid top Holocene	4,52	0,12	2,7

¹ Voor deze zanden is het effect van anisotropie op het verschil in waterdoorlatendheid in horizontale en verticale richting ingeschat op minimaal 2 en maximaal 5. Deze waarden zijn niet in het veld bepaald. Doel van de berekeningen is om vast te stellen of het zinvol is om hier nader onderzoek voor uit te voeren.



Figuur 4-2 Resultaten gevoeligheidsberekeningen op basis van HPT sonderingen

4.2 Invloed dikte watervoerend pakket

De dikte van het watervoerende pakket verspringt binnen het traject Wijk bij Duurstede – Amerongen ter hoogte van dijkpaal 79 van gemiddeld 12 m voor het oostelijke deel naar gemiddeld 32 m voor het westelijke deel.

De in paragraaf 4.1 beschouwde situatie en bijbehorende conclusies zijn representatief voor het oostelijke deel. Voor het westelijke deel zijn twee aanvullende gevoeligheidsanalyse uitgevoerd:

- WVP variant 1; met homogeen watervoerende pakket van 33 m en doorlatendheid van circa 70 m/dag.
- WVP variant 2, gelijk aan variant 1 maar dan met anisotropie effect over de gehele laag. Verticale doorlatendheid met een factor 2 verlaagt ten opzichte van de horizontale doorlatendheid.

De resultaten zijn opgenomen in tabel 4-3. Op basis van de resultaten kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De invloed op het resultaat door het gebruik van D-Geo Flow in plaats van de analytische formule levert in deze situatie beperkte winst op van 0,08 m of circa 3%. Dit resulteert om en nabij in een afname van het fictieve kwelweglengtetekort van 71 m naar 67 m
- Het effect van anisotropie is zoals verwacht kan worden bij het veel dikkere watervoerende pakket wel significant. De winst bedraagt maximaal 0,53 m of circa 17%. Dit resulteert om en nabij in een afname van het fictieve kwelweglengtetekort van 71 m naar 44 m

Tabel 4-3 Resultaten gevoeligheidsberekeningen dikte watervoerend pakket

Som	Beschrijving	Toelaatbaar verval [m]	Invloed t.o.v. basis [m]	Invloed t.o.v. basis [%]
[-]	[-]			
1	Homogeen watervoerend pakket D=33m	3,20	-	-
2	Anisotropiefactor 5 gehele pakket	3,73	0,53	16,6

4.3 Invloed tijdsafhankelijk versus tijdsafhankelijk rekenen.

Het toelaatbare verval in paragraaf 4.1 en 4.2 is tijdsafhankelijk (stationair) berekend. Dit veronderstelt dat er permanent sprake is van een hoogwatersituatie. In werkelijkheid is dit niet het geval en is er sprake van een tijdsafhankelijke belasting. Om de invloed van tijdsafhankelijkheid te onderzoeken zijn twee aanvullende gevoeligheidsberekeningen uitgevoerd:

- SDR variant 1, gelijk aan basisschematisering, maar dan tijdsafhankelijkheid met verloop hoogwatergolf conform figuur 2-2. Effect van tijdsafhankelijkheid wordt berekend door rekening te houden met samendrukbaarheid grond $1,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{N}$ en samendrukbaarheid water $5,0 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$.
- SDR variant 2, gelijk aan variant 1, echter met een veel sneller verloop van de hoogwatergolf. De piek wordt bereikt in 3 dagen in plaats van 25 dagen. Hierbij is de hoeveelheid tijdstappen (248) gelijk gehouden om wel ongeveer dezelfde nauwkeurigheid, functie van stijging water per tijdstap, te houden. Dit is geen realistisch scenario, de berekening is uitgevoerd om na te gaan in hoeverre het verloop van de hoogwatergolf invloed heeft op de uitkomst in D-Geo Flow.

De resultaten zijn opgenomen in tabel 4-3. Op basis van de resultaten kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Het effect van tijdsafhankelijkheid door rekening te houden met de samendrukbaarheid heeft geen significant effect. Ook het verloop van de hoogwatergolf heeft geen significant effect op het resultaat.

Tabel 4-4 Resultaten gevoeligheidsberekeningen tijdsafhankelijkheid

Som	Beschrijving	Toelaatbaar verval	Invloed t.o.v. basis	Invloed t.o.v. basis
[-]	[-]	[m]	[m]	[%]
Basis	Basisschematisatie tijdsafhankelijk	4,40	-	-
1	Basisschematisatie tijdsafhankelijk	4,38	0,02	-0,5%
2	Basisschematisatie tijdsafhankelijk en snel verloop hoogwatergolf	4,27	0,13	-3,0%

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

Het gebruik van D-Geo Flow in plaats van de analytische formule van Sellmeijer resulteert in een optimistischere berekening van het toelaatbare verval variërend van circa 0,10 tot 0,35 m. Bij de beschouwde doorsnedes resulteert dit in een afname van het kwelweglengtetekort van circa 4 tot 10 m.

De invloed van een meerlaagsheid is verwaarloosbaar tenzij er sprake is van zeer significante verschillen in waterdoorlatendheid. Aanzienlijk meer dan de nu beschouwde factor 2. Daarnaast is vanwege de grote variaties zeer intensief onderzoek vereist om een bepaalde gelaagdheid representatief te stellen voor een langer traject.

De invloed van anisotropie is zeer beperkt voor de beschouwde situatie met een dikte van het watervoerende pakket van circa 10 m (oostelijk deel traject WAM). De invloed van anisotropie is wel significant bij een grotere dikte van het watervoerende pakket van circa 33 m (westelijk deel traject WAM). Bij de beschouwde (fictieve) doorsnede resulteert dit in een afname van het kwelweglengtetekort van 27 m. Bij een lagere kD waarde heeft anisotropie een sterker effect.

Het uitvoeren van tijdsafhankelijke berekeningen levert geen optimalisatie op.

5.2 Aanbevelingen

Wij bevelen aan om:

- Voor alle secties (in het ontwerpproces) D-Geo Flow berekeningen op te stellen;
- Veld- laboratorium en literatuuronderzoek uit te voeren om het werkelijke effect van anisotropie te verkennen op het verschil in horizontale en verticale doorlatendheid met focus op het deel ten westen van dijkpaal 79;
- Nader onderzoek uit te voeren naar de doorlatendheid van het voorland en deze vervolgens te verwerken in de D-Geo Flow berekeningen. In de huidige berekeningen is zeer beperkt rekening gehouden met de invloed van het voorland.
- Na te gaan of er formele beperkingen zijn die het gebruik van D-Geo Flow voor het ontwerp van pipingmaatregelen in de weg staan. Dit aangezien het nog een beta-versie betreft.

Verantwoording

Titel	Piping analyse D-Geo Flow
Projectnummer	360562 / C03011.000750.0100
Referentienummer	Bijlage 7 - Dgeoflow analyse.docx
Revisie	Definitief
Datum	11-03-2019
Auteur	Vincent Moerland Orin van Loon Leo Kwakman
E-mailadres	vincent.moerland@sweco.nl orin.vanloon@arcadis.com leo.kwakman@arcadis.com
Gecontroleerd door	Leo Kwakman
Paraaf gecontroleerd	
Goedgekeurd door	Marco Veendorp
Paraaf goedgekeurd	

Bijlage 5 Onderbouwing hypothese versterkingsopgave

	Tekort scopebepaling Maart 2019 [m]	Aanscherping schadefactor [m]	Winst dempen sloot [m]	Opgave incl winst door optimalisatie oktober 2019 4à 10 m [m]	Opgave incl winst door optimalisatie januari 2020 4à 12 m [m]	Reservering [m]
DP1	-	-	-	-	-	-
DP2	35,0	31,0		25	25	25
				40-50	40-50	Op basis van de hypothese bij opgave rondom 50 m 25 m reservering aangehouden
DP3	61,0	56,5				25
DP4	43,5	39,5	-10	25	25	25
DP5	2,0	0,0	-33,5	0	0	Door slootdemping geen opgave
				<10	<10	Gereserveerd 25 m als in de rest van het vak
DP6	14,0	11,0		0	0	0
DP7	0,0	0,0		15	15	Gereserveerd 25 m als in de rest van het vak
DP8	27,5	24,0		15	15	Gereserveerd 25 m als in de rest van het vak
DP9	33,0	29,0		10	10	Gereserveerd 25 m als in de rest van het vak
DP10	25,5	21,5		10	10	Gereserveerd 25 m als in de rest van het vak
DP11	19,5	15,5		20	20	Gereserveerd 25 m als in de rest van het vak
DP12	34,5	30,5		10	10	Gereserveerd 25 m als in de rest van het vak door slootdemping
DP13	35,5	31,5	-19	10	10	Gereserveerd 25 m als in de rest van het vak
DP14	23,0	19,0		0	0	Door slootdemping geen opgave
DP15	0,0	0,0	-20,5	0	0	Door slootdemping geen opgave
DP16	25,0	21,0	-20	0	0	Door slootdemping geen opgave
DP17	31,5	28,0	-34,5	25	25	25 m met slootdemping
DP18	56,5	52,5	-18	<10	<10	25 gereserveerd
DP19	38,5	34,5	-25,5	25	25	50 m gereserveerd
DP20	37,0	33,0				

DP21	69,0	64,0		50	50	50 m gereserveerd
DP22	43,5	39,5		25	25	50 m gereserveerd
DP23	54,0	50,0	-7	25-35	25-35	25 m gereserveerd
DP24	31,0	27,0	-24	<10	<10	25 m gereserveerd
DP25	62,0	57,0		25	25	25 m gereserveerd
DP26	15,0	11,0	-51	0	0	Door slootdemping geen opgave
DP27	47,0	42,0		25	25	25 m gereserveerd
				<10	<10	Door slootdemping en optimalisatie geen opgave
DP28	52,5	48,0	-44			
DP29	76,5	72,0	-9	50	50	50 m reserveren
DP30	21,0	16,5	-71	0	0	Door slootdemping geen opgave
DP31	0,0	0,0	-52	0	0	Door slootdemping geen opgave
DP32	26,5	22,0	-38,5	0	0	Door slootdemping geen opgave
DP33	10,5	6,0	-46	0	0	Door slootdemping geen opgave
DP34	0,0	0,0		0	0	0
DP35	58,5	55,0	-36	<10	<10	10 m reserveren na slootdemping
DP36	16,5	12,0	-39,5	0	0	Geen opgave
				50	50	25 m reserveren door verwacht resultaat van de D-Geo Flow analyse
DP37	77,0	72,0	-21,5			
DP38	47,0	42,0	-41	<10	<10	10 m reserveren
DP39	4,5	0,0	-26,5	0	0	Geen opgave na slootdemping
DP40	38,5	34,0	-26,5	<10	<10	10 m reserveren na slootdemping
DP41	0,0	0,0		0	0	Geen opgave
DP42	0,0	0,0	-5	0	0	Geen opgave
DP43	0,0	0,0	-13	0	0	Geen opgave
DP44	0,0	0,0		0	0	Geen opgave
DP45	0,0	0,0		0	0	Geen opgave
DP46	0,0	0,0		0	0	Geen opgave
DP47	6,5	3,5	-19	0	0	Geen opgave na slootdemping
DP48	0,0	0,0		0	0	Geen opgave
DP49	0,0	0,0		0	0	Geen opgave
DP50	8,5	5,5	-17	0	0	Geen opgave na slootdemping
DP51	0,0	0,0	-31,5	0	0	Geen opgave
DP52	0,0	0,0		0	0	Geen opgave

DP53	30,5	26,0	-42	0	0	Geen opgave na slootdemping
DP54	29,5	25,0		15	15	25 m reserveren
DP55	21,0	16,5	-10	<10	<10	25 m reserveren
DP56	12,0	7,5		<10	<10	25 m reserveren
DP57	87,0	82,0		50	50	50 m reserveren
DP58	47,0	43,5		25-50	25-50	50 m reserveren
DP59	68,0	63,5		50	50	50 m reserveren
DP60	0,0	0,0		0	0	Geen opgave
DP61	0,0	0,0		0	0	Geen opgave
DP62	0,0	0,0		0	0	Geen opgave
DP63	0,0	0,0		0	0	Geen opgave
DP64	19	15		<10	<10	10 m reserveren
DP65	25,5	21,0		<10	<10	10 m reserveren
				<25	<25	10 m reserveren zoals in de naburige dijkvakken. Door de verdere optimalisatie me D-Geo Flow is de verwachting dat de oplossing binnen 10 m ruimtebeslag valt
DP66	33,0	29,0				10 m gereserveerd
DP67	14,0	10,0		<10	<10	10 m gereserveerd
DP68	13,5	10,0		<10	<10	10 m gereserveerd
DP69	61,0	56,0		<50	<50	50 m gereserveerd
DP70	12	7	-39	0	0	Door slootdemping geen opgave
DP71	19,5	15,5		<10	<10	10 m gereserveerd
				15- 20	15- 20	10 m gereserveerd door verwachte winst door verdere optimalisatie
DP72	30,0	26,0				gemaximaliseerd
DP73	65,0	60,0		50	50	
DP74	64	59,5	-26	<25	<25	25 m na slootdemping
DP75	49,5	44	-26	<25	<25	25 m na slootdemping
DP76	31	27		<25	<25	25 m
DP77	31,5	28		<25	<25	25 m
DP78	84,5	78,5		50	50	gemaximaliseerd
DP79	101,0	94,5		50	50	gemaximaliseerd
DP80	94,0	87,5		50	50	gemaximaliseerd
DP81	90,0	83,5		50	50	gemaximaliseerd
DP82	51,0	44,5		25-50	25-50	50 m
DP83	56,5	49,5		25-50	25-50	50 m
DP84	111,0	103,5		50	50	gemaximaliseerd

DP85	121,0	113,0		50	50	gemaximaliseerd
DP86	78,5	74,0		50	50	gemaximaliseerd
DP87				Beermuur	Beermuur	
DP88				Beermuur	Beermuur	
DP89				Beermuur	Beermuur	
DP90	99,0	92,0		50	50	gemaximaliseerd
DP91	77,0	70,0		50	50	gemaximaliseerd
DP92	109,5	103,0		50	50	gemaximaliseerd
DP93	55,0	48,5		50	50	gemaximaliseerd
DP94	75,0	68,5		50	50	gemaximaliseerd
DP95	0,0	0,0		0	0	Geen opgave
DP96	47,0	41,0	-80	0	0	Geen opgave
DP97	0,0	0,0		0	0	Geen opgave
DP98	0,0	0,0		0	0	Geen opgave
DP99	0,0	0,0		0	0	Geen opgave
DP100	68,0	63,0		50	50	gemaximaliseerd
DP101	83,0	77,5		50	50	gemaximaliseerd
DP102	97,5	92,0		50	50	gemaximaliseerd
DP103	96,0	90,0		50	50	gemaximaliseerd
DP104	106,0	100,0		50	50	gemaximaliseerd
DP105	146,5	139,0		50	50	gemaximaliseerd

Bijlage 6 Resultaten optimalisatie Sellmeijer - schadefactor

	marge tussen voldoende/onvoldoende inclusief schematiseringsfactor				
Dijkpaal [DP]	BIT	BIT+5m	laagst MV	Laagst WG	-
DP1					
DP2	0,74	0,71	0,75		o
DP3	0,79	0,63		0,61	o
DP4	0,79	0,75		0,72	o
DP5	0,76	0,79		1,02	o
DP6	0,85	0,90	0,89		o
DP7	1,12	1,06	1,39		v
DP8	0,77	0,81	0,82		o
DP9	0,74	0,73	0,77		o
DP10	0,87	0,87	0,85		o
DP11	0,90	0,91	0,88		o
DP12	0,84	0,83	0,77		o
DP13	0,89	0,79		0,78	o
DP14	0,77	0,75	0,87		o
DP15	0,82	0,85		1,05	o
DP16	0,86	0,86		0,83	o
DP17	0,91	0,89		0,80	o
DP18	0,68	0,67		0,63	o
DP19	0,65	0,69		0,76	o
DP20	0,67	0,73	0,74		o
DP21	0,63	0,63	0,60		o
DP22	0,70	0,72		0,71	o
DP23	0,62	0,64		0,67	o
DP24	0,71	0,74		0,82	o
DP25	0,63	0,63	0,64		o
DP26	0,71	0,86		0,93	o
DP27	1,55	0,74	0,75		o
DP28	0,80	0,83		0,70	o
DP29	0,69	0,56		0,55	o
DP30	0,84	0,88		0,90	o
DP31	0,81	0,79		1,12	o
DP32	0,63	0,64		0,86	o
DP33	0,79	0,84		0,96	o
DP34	0,96	0,94		1,05	o
DP35	0,75	0,75		0,62	o
DP36	0,70	0,76		0,93	o
DP37	0,61	0,60		0,59	o

kwelweglengte aanwezig [m]			
BIT	BIT+5m	laagst MV	Laagst WG
67,5	72,5	82,5	
73,0	78,5		78,0
81,5	86,5		89,0
79,0	84,0		144,5
75,0	80,0	81,0	
68,0	73,0	156,5	
71,5	76,5	94,0	
73,0	78,0	87,0	
86,5	91,5	109,0	
85,5	90,5	104,5	
82,0	87,5	92,5	
80,0	85,0		98,0
77,0	82,0	109,5	
75,5	80,5		120,0
77,0	82,0		95,0
76,0	81,0		99,0
68,5	73,5		79,5
66,0	71,0		98,0
68,0	73,0	83,5	
68,5	73,5	84,0	
71,0	76,0		86,0
74,5	79,5		88,0
73,5	78,5		106,0
75,0	80,0	90,5	
65,0	70,0		121,5
66,0	71,5	111,5	
79,5	84,5		99,5
69,0	74,0		76,5
61,5	66,5		129,0
63,5	68,5		144,0
61,0	66,0		123,5
67,5	72,5		126,5
66,5	71,5		113,5
65,0	70,0		77,5
73,5	78,5		133,0
76,5	81,5		92,5

kwelweglengtetekort [m]			
BIT	BIT+5m	laagst MV	Laagst WG
27,0	34,5	31,0	
22,5	53,5		56,5
24,0	32,0		39,5
29,0	25,5		0,0
14,5	10,0	11,0	
0,0	0,0	0,0	
23,5	20,5	24,0	
29,0	33,0	29,0	
14,0	15,0	21,5	
11,0	9,5	15,5	
17,5	19,5	30,5	
11,5	29,5		31,5
26,0	34,5	19,0	
18,5	19,0		0,0
14,0	18,0		21,0
8,5	15,0		28,0
36,5	44,5		52,5
41,0	40,0		34,5
38,5	33,0	33,0	
45,0	52,5	64,0	
34,0	36,5		39,5
52,5	55,5		50,0
34,5	34,5		27,0
50,5	57,0	57,0	
30,0	15,5		11,0
0,0	31,0	42,0	
22,0	23,5		48,0
36,0	70,0		72,0
13,0	12,5		16,5
17,0	23,5		0,0
41,0	45,5		22,0
20,5	18,5		6,0
2,5	7,5		0,0
24,5	30,0		55,0
35,5	31,5		12,0
56,0	66,5		72,0

totale vereiste kwelweglengte [m]				maatgevende berekening	type watergang
BIT	BIT+5m	laagst MV	Laagst WG	-	
94,5	107,0	113,5		laagst MV	
95,5	132,0		134,5	Laagst WG	teensloot
105,5	118,5		128,5	Laagst WG	kopsloot
108,0	109,5		144,5	Laagst WG	kopsloot
89,5	90,0	92,0		laagst MV	
68,0	73,0	156,5		laagst MV	
95,0	97,0	118,0		laagst MV	
102,0	111,0	116,0		laagst MV	
100,5	106,5	130,5		laagst MV	
96,5	100,0	120,0		laagst MV	
99,5	107,0	123,0		laagst MV	
91,5	114,5		129,5	Laagst WG	kopsloot diagonaal
103,0	116,5	128,5		laagst MV	
94,0	99,5		120,0	Laagst WG	kopsloot
91,0	100,0		116,0	Laagst WG	kopsloot
84,5	96,0		127,0	Laagst WG	kopsloot
105,0	118,0		132,0	Laagst WG	kopsloot
107,0	111,0		132,5	Laagst WG	kopsloot diagonaal
106,5	106,0	116,5		laagst MV	
113,5	126,0	148,0		laagst MV	
105,0	112,5		125,5	Laagst WG	teensloot
127,0	135,0		138,0	Laagst WG	kopsloot
108,0	113,0		133,0	Laagst WG	kopsloot diagonaal
125,5	137,0	147,5		laagst MV	
95,0	85,5		132,5	Laagst WG	kopsloot diagonaal
66,0	102,5	153,5		laagst MV	
101,5	108,0		147,5	Laagst WG	kopsloot diagonaal
105,0	144,0		148,5	Laagst WG	kopsloot diagonaal
74,5	79,0		145,5	Laagst WG	kopsloot diagonaal
80,5	92,0		144,0	Laagst WG	kopsloot
102,0	111,5		145,5	Laagst WG	kopsloot diagonaal
88,0	91,0		132,5	Laagst WG	kopsloot
69,0	79,0		113,5	Laagst WG	parallele sloot
89,5	100,0		132,5	Laagst WG	kopsloot
109,0	110,0		145,0	Laagst WG	kopsloot
132,5	148,0		164,5	Laagst WG	kopsloot

DP38	0,61	0,62		0,77	O
DP39	0,72	0,74		1,00	O
DP40	0,90	0,88		0,76	O
DP41	1,20	1,19		1,17	V
DP42	0,94	0,99		1,06	O
DP43	0,88	0,91		1,04	O
DP44	1,15	1,51		1,43	V
DP45	1,17	1,12		1,39	V
DP46	1,10	1,07		1,31	V
DP47	0,95	0,90		0,97	O
DP48	1,89	1,92		1,88	V
DP49	1,18	1,27		1,43	V
DP50	0,89	0,92		0,95	O
DP51	1,01	1,01		1,12	V
DP52	1,38	1,36		1,42	V
DP53	1,00	1,01		0,84	O
DP54	0,88	0,87	0,84		O
DP55	0,65	0,65		0,90	O
DP56	0,81	0,93		0,95	O
DP57	0,58	0,64		0,53	O
DP58	0,67	0,88		0,67	O
DP59	0,72	0,77	0,59		O
DP60	1,74	1,69		1,32	V
DP61	1,77	1,76		1,74	V
DP62	1,95	1,84		1,85	V
DP63	2,01	1,72		1,54	V
DP64	0,93	0,87	1,07		O
DP65	0,93	0,91	0,86		O
DP66	0,78	1,06	0,77		O
DP67	0,86	0,89	0,92		O
DP68	0,92	0,94	0,92		O
DP69	0,67	0,69	0,67		O
DP70	0,93	0,95		1,02	O
DP71	0,88	0,88	0,88		O
DP72	0,70	0,71	0,81		O
DP73	0,59	0,72	0,58		O
DP74	0,59	0,59		0,80	O
DP75	0,70	0,70		0,80	O
DP76	0,80	0,80	0,86		O
DP77	0,78	0,79	0,96		O
DP78	0,71	0,74	0,61		O
DP79	0,69	0,72	0,60		O

69,5	74,5		123,5
82,0	87,5		147,5
87,0	92,0		97,0
125,0	130,0		134,5
80,5	96,5		105,5
70,0	75,0		99,0
76,0	81,0		161,5
65,5	70,5		156,5
62,5	67,5		123,0
66,0	71,0		95,0
112,0	117,0		205,5
70,5	75,5		162,5
65,5	70,5		88,5
67,5	73,0		106,5
104,0	109,0		133,0
98,5	103,5		118,0
101,0	106,0	118,5	
77,5	82,5		126,0
82,5	87,5		125,5
79,5	84,5		80,5
77,5	82,5		78,5
80,0	85,0	81,0	
122,5	127,5		140,0
104,5	109,5		157,0
104,5	109,5		161,5
105,0	110,0		113,0
89,0	94,5	159,0	
86,0	91,0	117,0	
84,5	90,0	86,5	
89,0	95,0	109,0	
94,0	99,5	105,0	
98,5	103,5	101,5	
100,5	105,5		153,0
95,0	100,0	100,0	
74,5	80,0	98,5	
73,0	80,0	72,5	
71,5	76,5		126,0
87,5	93,0		128,0
89,5	94,5	107,5	
88,5	93,5	121,0	
93,0	98,0	106,5	
97,5	102,5	120,5	

50,5	55,0		42,0
36,0	38,0		0,0
11,0	17,0		34,0
0,0	0,0		0,0
5,0	4,0		0,0
11,0	11,0		0,0
0,0	0,0		0,0
0,0	0,0		0,0
4,5	11,5		3,5
0,0	0,0		0,0
0,0	0,0		0,0
8,5	9,5		5,5
0,0	2,0		0,0
0,0	0,0		0,0
0,0	3,0		26,0
15,5	22,0	25,0	
47,0	54,5		16,5
22,0	11,0		7,5
67,0	59,0		82,0
43,0	16,0		43,5
35,5	32,0	63,5	
0,0	0,0		0,0
0,0	0,0		0,0
0,0	0,0		0,0
0,0	0,0		0,0
8,0	19,0	0,0	
7,0	13,5	21,0	
26,0	0,0	29,0	
16,0	16,0	10,0	
9,0	10,5	10,0	
56,0	53,0	56,0	
8,5	6,5		0,0
15,0	15,5	15,5	
36,0	37,0	26,0	
59,0	36,0	60,0	
57,0	60,0		35,5
42,5	45,0		35,0
25,0	27,0	19,0	
28,0	27,5	6,0	
43,5	40,0	78,5	
51,0	46,0	94,5	

120,0	129,5		165,5	Laagst WG	kopsloot
118,0	125,5		147,5	Laagst WG	kopsloot
98,0	109,0		131,0	Laagst WG	kopsloot
125,0	130,0		134,5	Laagst WG	kopsloot
85,5	100,5		105,5	Laagst WG	kopsloot
81,0	86,0		99,0	Laagst WG	kopsloot
76,0	81,0		161,5	Laagst WG	kopsloot diagonaal
65,5	70,5		156,5	Laagst WG	kopsloot
62,5	67,5		123,0	Laagst WG	kopsloot
70,5	82,5		98,5	Laagst WG	kopsloot
112,0	117,0		205,5	Laagst WG	kopsloot
70,5	75,5		162,5	Laagst WG	kopsloot
74,0	80,0		94,0	Laagst WG	kopsloot
67,5	75,0		106,5	Laagst WG	kopsloot
104,0	109,0		133,0	Laagst WG	kopsloot
98,5	106,5		144,0	Laagst WG	kopsloot
116,5	128,0	143,5		laagst MV	
124,5	137,0		142,5	Laagst WG	kopsloot
104,5	98,5		133,0	Laagst WG	parallele sloot
146,5	143,5		162,5	Laagst WG	parallele sloot
120,5	98,5		122,0	Laagst WG	parallele sloot
115,5	117,0	144,5		laagst MV	
122,5	127,5		140,0	Laagst WG	kopsloot
104,5	109,5		157,0	Laagst WG	kopsloot
104,5	109,5		161,5	Laagst WG	kopsloot
105,0	110,0		113,0	Laagst WG	kopsloot
97,0	113,5	159,0		laagst MV	
93,0	104,5	138,0		laagst MV	
110,5	90,0	115,5		laagst MV	
105,0	111,0	119,0		laagst MV	
103,0	110,0	115,0		laagst MV	
154,5	156,5	157,5		laagst MV	
109,0	112,0		153,0	Laagst WG	kopsloot
110,0	115,5	115,5		BIT+5m	
110,5	117,0	124,5		laagst MV	
132,0	116,0	132,5		laagst MV	
128,5	136,5		161,5	Laagst WG	kopsloot
130,0	138,0		163,0	Laagst WG	kopsloot
114,5	121,5	126,5		laagst MV	
116,5	121,0	127,0		laagst MV	
136,5	138,0	185,0		laagst MV	
148,5	148,5	215,0		laagst MV	

DP80	0,80	0,81	0,61		0
DP81	0,73	0,73	0,64		0
DP82	0,74	0,75	0,80		0
DP83	0,51	0,52		0,78	0
DP84	0,61	0,65		0,60	0
DP85	0,59	0,60		0,58	0
DP86	0,50	0,53	0,51		0
DP87					
DP88					
DP89					
DP90	0,80	0,78		0,62	0
DP91	0,74	0,69		0,72	0
DP92	0,62	0,57		0,58	0
DP93	1,50	2,05		0,79	0
DP94	0,92	0,93	0,67		0
DP95	1,25	1,08		1,04	V
DP96	1,39	1,15		0,77	0
DP97	3,66	3,10	1,44		V
DP98	4,34	3,40	3,19		V
DP99	1,94	1,82		1,26	V
DP100	1,16	1,06		0,63	0
DP101	0,85	0,82		0,57	0
DP102	0,72	0,72		0,53	0
DP103	0,73	0,68		0,54	0
DP104	0,68	0,66		0,51	0
DP105	0,69	0,65		0,43	0

98,5	103,5	116,0	
97,5	102,5	129,5	
88,0	93,0	159,0	
68,5	74,0		152,5
71,0	76,0		132,0
73,0	78,5		135,0
60,0	65,0	63,5	
109,5	115,0		132,0
108,5	113,5		155,0
117,0	118,5		122,0
116,0	121,0		158,5
115,0	120,0	123,5	
81,5	86,5		175,5
86,0	91,0		124,0
82,0	87,0	100,0	
170,0	175,5	188,0	
142,5	147,5		202,5
79,5	84,5		94,0
75,0	80,0		87,0
75,0	80,0		88,5
77,0	82,0		89,0
74,0	79,0		89,0
74,0	79,0		90,0

28,0	28,5	87,5	
40,5	43,0	83,5	
36,0	36,5	44,5	
79,0	80,5		49,5
53,5	49,0		103,5
61,0	61,0		113,0
73,0	69,5	74,0	
52,0	37,5		92,0
43,0	57,5		70,0
81,5	105,0		103,0
0,0	0,0		48,5
10,5	15,0	68,5	
0,0	0,0		0,0
0,0	0,0		41,0
0,0	0,0	0,0	
0,0	0,0	0,0	
0,0	0,0		0,0
0,0	0,0		63,0
15,5	23,5		77,5
35,0	40,5		92,0
33,5	48,5		90,0
40,0	52,5		100,0
39,5	53,5		139,0

126,5	132,0	203,5		laagst MV	
138,0	145,5	213,0		laagst MV	
124,0	129,5	203,5		laagst MV	
147,5	154,5		202,0	Laagst WG	watergang
124,5	125,0		235,5	Laagst WG	watergang
134,0	139,5		248,0	Laagst WG	watergang
133,0	134,5	137,5		laagst MV	
161,5	152,5		224,0	Laagst WG	watergang
151,5	171,0		225,0	Laagst WG	watergang
198,5	223,5		225,0	Laagst WG	watergang
116,0	121,0		207,0	Laagst WG	watergang
125,5	135,0	192,0		laagst MV	
81,5	86,5		175,5	Laagst WG	kopsloot
86,0	91,0		165,0	Laagst WG	kopsloot
82,0	87,0	100,0		laagst MV	
170,0	175,5	188,0		laagst MV	
142,5	147,5		202,5	Laagst WG	watergang
79,5	84,5		157,0	Laagst WG	watergang
90,5	103,5		164,5	Laagst WG	watergang
110,0	120,5		180,5	Laagst WG	watergang
110,5	130,5		179,0	Laagst WG	watergang
114,0	131,5		189,0	Laagst WG	watergang
113,5	132,5		229,0	Laagst WG	watergang

Bijlage 7 Werkhypothese ruimtebeslag piping maatregelen

Circa			Veiligheidsopgave				
Dijkvak	Van	Tot	Lengte	STBI macro	STBI overslag	STPH KWT	HT (m)
1	0-65	0+50	135	-	-	-	-
2	0+50	17+95	1745	-	-	dp 1+60 - 6+50 dp 7+50 - 17+95 dempen kopsloten DP 3 tot 5 , DP 13 en 15 t/m DP 18 na demping geen opgave begin tot DP 3 en DP 14 hypothese opgave 25 m	-
3	17+95	34+20	1625	-	-	Geheel 50 m reserveren bij demping kopsloot DP18, DP19, 22 en 24, 28 t/m 31 en 33 geen opgave	-
4	34+20	39+30	510	-	dp 34+55 - 35+40 dp 37+50 - 38+50 Taludverflauwing 1: 3,5	Geheel 25 m reserveren	-
5	39+30	42+10	290	-	-	dp 39+30 - 40+45 10 m reserveren dp 41+40 - 42+10 kopsloot dempen	-
6	42+10	50+20	810	-	dp 47+45 - 50+15 Taludverflauwing 1: 3,5	dp 42+10 - 43+50 10m reserveren dp 46+50 - 47+50 - 10m reserveren dp 49+50 - 50+20 kopsloot dempen	-
7	50+20	61+45	1125	Verhoging bestaande berm 0,75 m.	-	dp 50+20 - 51+50 kopsloot dempen dp 54+50 - 59+50 gemiddeld: 42 m. DP 53 kopsloot dempen 25 m reserveren vanaf DP 59 geen opgave	dp 53+50 - dp 54+60: 0,03 m dp 56+50 - 57+40: 0,15 m
8	61+45	72+25	1080	-	dp 61+45 - 65+50 Taludverflauwing 1: 3,5	dp 63+50 - 72+25 gemiddeld 37 m. reserveren 10 m bij DP 70 kopsloot dempen	dp 61+50 - dp 62+50: 0,02 m
9	72+25	74+50	225	-	-	Geheel reserveren 25 m	-

10	74+50	85+40	1090	-	-	Geheel reserveren 25 m	-
11	85+40	86+90	150	-	-	Geheel gemiddeld: 82 m. reserveren 50 m	-
12	86+90	86+335	245	-	-	-	Verhogen Beermuur, max. 0,30 m
13	86+335	92+60	325	-	-	Geheel gemiddeld : 119 m. reserveren 50 m	-
14	92+60	96+50	390	-	-	dp 92+60 - 94+50 DP 94 10 m reserveren rest van het vak geen opgave	-
15	96+50	99+70	320	-	-	-	-
16	99+70	105+95	625	-	-	hypothese 50 m ruimtereservering	-

Speciale trajecten							
2a	14+60	14+85	35	Berm niet mogelijk. Constructie of asverschuiving.	-	Geheel, 10 m reserveren.	-
6a	43+75	44+45	72	Taludverflauwing 1: 3,5	Taludverflauwing 1: 3,5	-	-
10a	79+45	80+0	62	Berm niet mogelijk. Constructie of asverschuiving.	-	Geheel, 111 m. hypothese 50 m ruimtereservering	-
11a	85+40	85+55	15	-	-	-	-

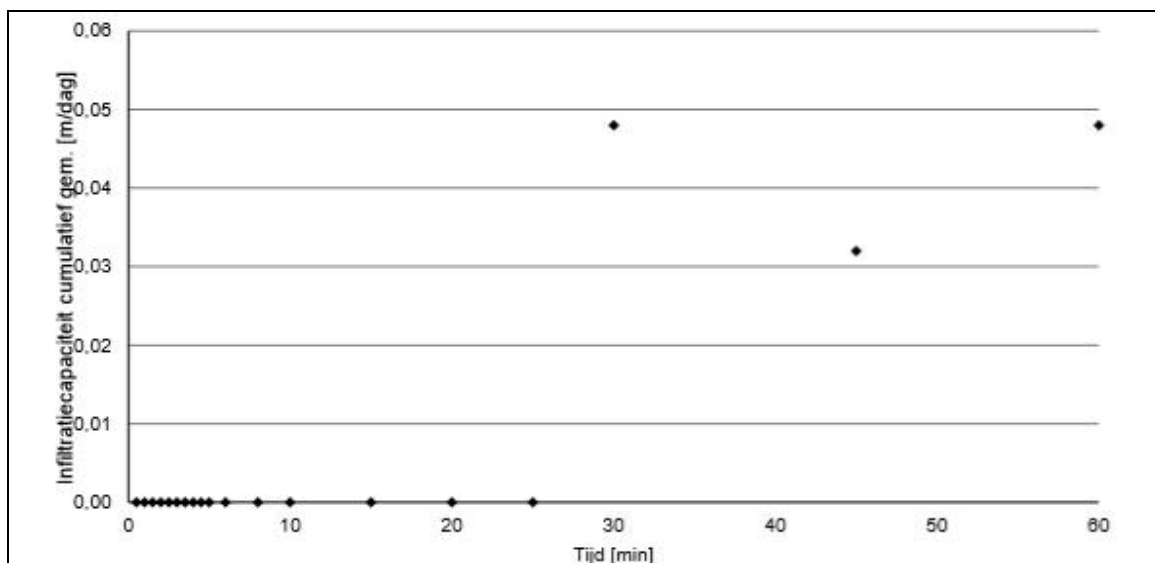
Bijlage 8 Interpretatie Infiltratie metingen

Interpretatie Infiltratie metingen

Op 3 december 2019 heeft Inpijn en Blokpoel drietal infiltratie proeven uitgevoerd. De proeven zijn gemaakt met een dubbele ring (buitenring 57 cm en binnering 33 cm). Na het uitvoeren van de proef zijn op zelfde locatie boringen uitgevoerd om inzicht te hebben in beproefd grondslag.

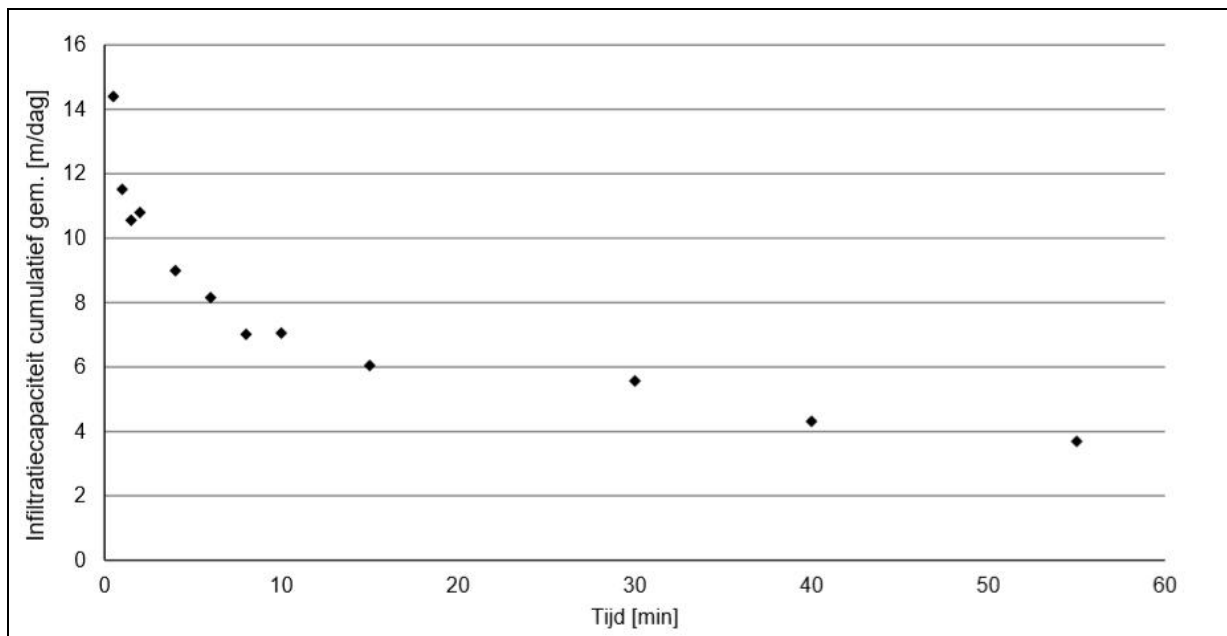
Bij ring infiltratie metingen wordt de hydraulische doorlatendheid gemeten van de bodem boven de grondwaterspiegel. De metingen hebben in principe betrekking op de onverzadigde doorlatendheid, maar onder bepaalde voorwaarden kan het verschil tussen de gemeten waarden en de verzadigde doorlatendheid klein zijn. In praktische zin heeft de heterogeniteit van de bodem meer invloed op de meetwaarde dan de afwijking van de werkelijke verzadigde doorlatendheid. Met andere woorden: in de praktijk kan de gevonden waarde worden gebruikt als zijnde de 'verzadigde doorlatendheid'.

De infiltratiesnelheid aan het eind van de meting kan, bij benadering worden gebruikt als de verzadigde doorlatendheid van het bodemprofiel.



Figuur 1: Metingen DP003+003_HB_VL_BOL (zandig profiel)

Er is geen structuur in de metingen. De meting lijkt mislukt.

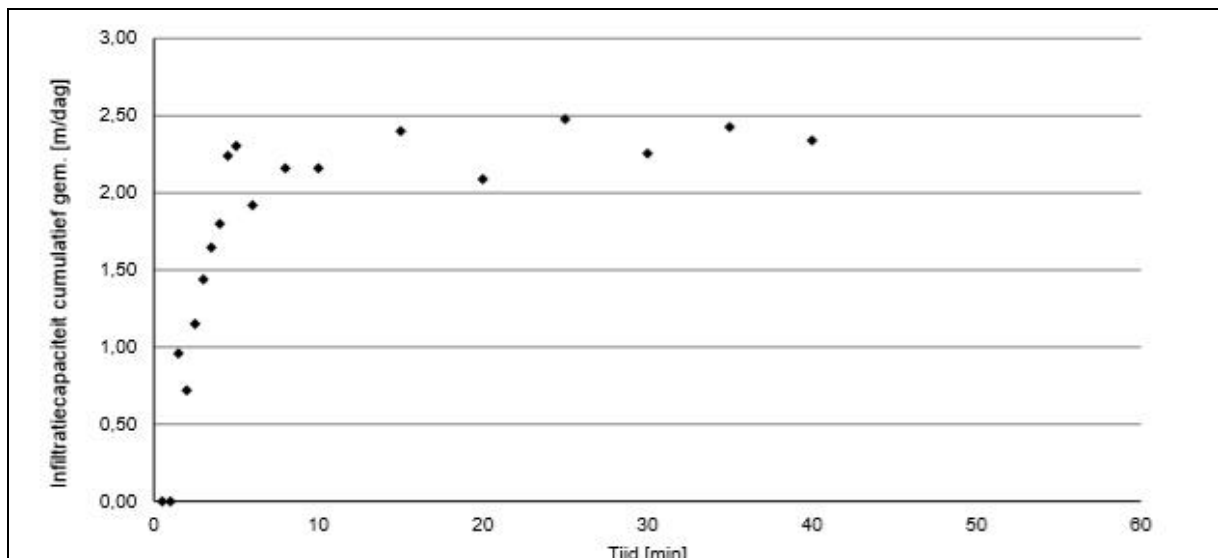


Figuur 2: DP084+051_HB_VL_BOL: tot 1,9 m-mv klei, matig siltig.

De infiltratiesnelheid neemt af tot een constante waarde van ongeveer 2,7 m/d. Dit is logisch in een klei profiel waarin eerst scheuren vollopen, waarna na zwelling de doorlatendheid vermindert. De gevonden doorlatendheid (2,7 m/dag) is relatief hoog voor een matig siltig klei profiel. Tabel 0-1 uit het grondwaterzakboekje (B. Bot, 2011) toont de horizontale doorlatendheid van verschillende grondsoorten. Daaruit blijkt dat de gemeten doorlatendheid ligt tussen die van 'teelaarde' en 'lichte zavel'.

Tabel 8-1 *Hori zontal e doorl atendhei d van verschi l l ende grondsoorten (B. Bot, 2011)*

Grondsoort	Doorlatendheid [m/d]	Grondsoort	Doorlatendheid [m/d]
zware klei	0.0001	lichte zavel	0,5
potklei	0.001	teelaarde	5
matig zware klei	0.01	schelpen	30
zandige klei	0,05	fijn zand	1 - 10
keileem	0,05	duinzand	7
veen	0.001 - 0.1	grof zand	30
kleiig veen	0,005	zeer grof zand	80
sterk zandig veen	0,05	uiterst grof zand	200
leem/löss	0,05	fijn grind	1.000 - 10.000
zandige leem	0,3	grof grind	10.000 - 100.000



Figuur 3: DP104+166_HB_VL_BOL (tot 0,5 m-mv klei, matig zandig).

De infiltratiesnelheid neemt toe tot ongeveer 2,3 m/dag. De relatief lage infiltratiesnelheid aan het begin van de meting kan verband houden met het feit dat droge grond een (veel) lagere doorlatendheid heeft dan bevochtigde grond. De gevonden doorlatendheid (2,3 m/d) is in dezelfde orde-grootte als de doorlatendheid die is gevonden in de meting 'DP084+051_HB_VL_BOL'. Ook hier geldt dat de gevonden doorlatendheid (2,3 m/dag) is relatief hoog is voor een matig zandig klei profiel.

De gebruikte ruwe data van de infiltratie proeven is hier opgenomen:

DP003+003_HB_VL (HB006)

Diameter buitenring [cm]	57
Diameter binnenring [cm]	33
Bovenkant ringen [m t.o.v. mv]	0,2
Onderkant ringen [m t.o.v. mv]	-0,05
Grondwaterstand [m t.o.v. mv]	2,4

Tijd [min]	Infiltratiecapaciteit [mm/min]	Infiltratiecapaciteit [m/dag]	cumulatief gem. Infiltratiecapaciteit [mm/min]	cumulatief gem. Infiltratiecapaciteit [m/dag]
0				
0,5	0,0	0,0	0,0	0,0
1	0,0	0,0	0,0	0,0
1,5	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0
2,5	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	0,0	0,0
3,5	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0
4,5	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0
20	0,0	0,0	0,0	0,0
25	0,0	0,0	0,0	0,0
30	0,2	0,3	0,0	0,0
45	0,0	0,0	0,0	0,0
60	0,1	0,1	0,0	0,0

Boring:

Uitvoering op: 06-12-2019
 Uitvoering door: DWZ
 Uitgevoerd nabij: HB006

DP003+003_HB_VL**Boring volgens NEN-EN-ISO 22475-1**

Maaiveldhoogte [m]: 5.968 N.A.P.
 Grondwaterstand [cm-mv]: 183

Classificatie volgens NEN 5104

x-coördinaat [m RD]: 159402.91
 y-coördinaat [m RD]: 445302.60



DP084+051_HB_VL (HB007)

Diameter buitenring [cm]	55
Diameter binnenring [cm]	31
Bovenkant ringen [m t.o.v. mv]	0,2
Onderkant ringen [m t.o.v. mv]	-0,05
Grondwaterstand [m t.o.v. mv]	2,4

Tijd [min]	Infiltratiecapaciteit [mm/min]	Infiltratiecapaciteit [m/dag]	cumulatief gem. Infiltratiecapaciteit [mm/min]	cumulatief gem. Infiltratiecapaciteit [m/dag]
0				
0,5	10,0	14,4	10,0	14,4
1	6,0	8,6	8,0	11,5
1,5	6,0	8,6	7,3	10,6
2	8,0	11,5	7,5	10,8
4	5,0	7,2	6,3	9,0
6	4,5	6,5	5,7	8,2
8	2,5	3,6	4,9	7,0
10	5,0	7,2	4,9	7,1
15	2,8	4,0	4,2	6,0
30	3,5	5,1	3,9	5,6
40	0,4	0,6	3,0	4,3
55	1,4	2,0	2,6	3,7
75	1,4	1,9	2,2	3,2
95	0,9	1,2	1,9	2,8
120	1,6	2,3	1,9	2,7

Boring:

Uitvoering op: 06-12-2019
 Uitvoering door: DWZ
 Uitgevoerd nabij: HB007

DP084+051_HB_VL**Boring volgens NEN-EN-ISO 22475-1**

Maaiveldhoogte [m]: 4.331 N.A.P.
 Grondwaterstand [cm-mv]: 189

Classificatie volgens NEN 5104

x-coördinaat [m RD]: 152497.44
 y-coördinaat [m RD]: 442764.28



DP104+166_HB_VL (HB003)

Diameter buitenring [cm]	57
Diameter binnenring [cm]	33
Bovenkant ringen [m t.o.v. mv]	0,2
Onderkant ringen [m t.o.v. mv]	-0,05
Grondwaterstand [m t.o.v. mv]	2,4

Tijd [min]	Infiltratiecapaciteit [mm/min]	Infiltratiecapaciteit [m/dag]	cumulatief gem. Infiltratiecapaciteit [mm/min]	cumulatief gem. Infiltratiecapaciteit [m/dag]
0				
0,5	0,0	0,0	0,0	0,0
1	0,0	0,0	0,0	0,0
1,5	2,0	2,9	0,7	1,0
2	0,0	0,0	0,5	0,7
2,5	2,0	2,9	0,8	1,2
3	2,0	2,9	1,0	1,4
3,5	2,0	2,9	1,1	1,6
4	2,0	2,9	1,3	1,8
4,5	4,0	5,8	1,6	2,2
5	2,0	2,9	1,6	2,3
6	0,0	0,0	1,3	1,9
8	2,0	2,9	1,5	2,2
10	1,5	2,2	1,5	2,2
15	2,0	2,9	1,7	2,4
20	0,8	1,2	1,5	2,1
25	2,8	4,0	1,7	2,5
30	0,8	1,2	1,6	2,3
35	2,4	3,5	1,7	2,4
40	1,2	1,7	1,6	2,3

Boring:

Uitvoering op: 06-12-2019
 Uitvoering door: DWZ
 Uitgevoerd nabij: HB003

DP104+166_HB_VL**Boring volgens NEN-EN-ISO 22475-1**

Maaiveldhoogte [m]: 4.174 N.A.P.
 Grondwaterstand [cm-mv]: 171

Classificatie volgens NEN 5104

x-coördinaat [m RD]: 150675.97
 y-coördinaat [m RD]: 442096.83

