

**Verdiepend effectonderzoek
waterkwaliteit en morfologie,
Afsluitdijk**



Verdiepend effectonderzoek waterkwaliteit en morfologie, Afsluitdijk

referentie	projectcode	status
RW1929-5-440/120	RW1929-5	definitief 3.0
projectleider	projectdirecteur	datum
drs.ing. P.W.T. Mulder	mw. ir. C.M. Sluis	30 januari 2015

autorisatie	naam	paraaf
goedgekeurd	mw. drs. J.E.C. Bulsink	

INHOUDSOPGAVE	blz.
1. INLEIDING	1
1.1. Aanleiding voor maatregelen aan de Afsluitdijk	1
1.2. Aanleiding voor effectonderzoek waterkwaliteit en morfologie	2
1.3. Doelstelling	3
1.4. Uitgangspunten	3
1.5. Leeswijzer	4
2. SYSTEEMBESCHRIJVING WADDENZEE	5
2.1. Hydrodynamica	5
2.2. Waterkwaliteit	6
2.3. Morfologie	7
3. BEOORDELINGSKADER	9
3.1. Relevante thema's	9
3.2. Beoordelingskader waterkwaliteit	10
3.3. Beoordelingskader morfologie	10
4. METHODE	13
4.1. Methodologie	13
4.2. TRIWAQ	14
4.3. Verificatie	14
4.4. Methodiek voor de bepaling van het baggeronderhoud in de havens	15
4.5. Conclusies en aanbevelingen	16
5. IMPLEMENTATIE VAN AUTONOME ONTWIKKELING EN VARIANTEN	17
5.1. Referentiesituatie	17
5.2. Autonome ontwikkeling	18
5.3. Varianten voor waterafvoer	19
5.3.1. Vaste pompen	20
5.3.2. Uithijsbare pompen	20
6. EFFECTEN OP SPUI- EN POMPDEBIETEN	21
6.1. Autonome ontwikkeling	21
6.2. Effecten van inzet van pompen	23
6.2.1. Den Oever	24
6.2.2. Kornwerderzand	27
6.3. Samenvatting spui- en pompdebiets	27
6.4. Doorkijk tot 2050	28
6.5. Gevoeligheid voor uitgangspunten	29
7. EFFECTEN OP WATERKWALITEIT WADDENZEE	31
7.1. Introductie	31
7.2. Saliniteit Waddenzeewater	32
7.3. Nutriëntenhuishouding	37
7.4. Vertroebeling	41
7.5. Conclusies waterkwaliteit	45
7.5.1. Conclusies autonome ontwikkeling	45
7.5.2. Conclusies effecten pompen	46
7.6. Doorkijk tot 2050	47
7.7. Gevoeligheid voor uitgangspunten	48

8. EFFECTEN OP MORFOLOGIE WADDENZEE	49
8.1. Introductie	49
8.2. Modelresultaten	51
8.2.1. Waterstand	51
8.2.2. Getijslag	54
8.2.3. Getijprisma en geulafmetingen	56
8.2.4. Sedimentbalans	59
8.2.5. Baggeronderhoud havens	63
8.3. Beoordeling morfologie	65
8.3.1. Kombergingsgebied en getijprisma	66
8.3.2. Oppervlakte intergetijdengebied en diepergelegen platen	67
8.3.3. Verandering van erosie	67
8.3.4. Baggeronderhoud geulen	68
8.3.5. Baggeronderhoud havens	68
8.4. Samenvatting morfologie	69
8.5. Doorkijk tot 2050	70
8.6. Gevoeligheid voor uitgangspunten	71
9. CONCLUSIES	73
9.1. Algemeen	73
9.2. Effecten op spui- en pompdebieten	73
9.3. Effecten op waterkwaliteit Waddenzee	73
9.4. Effecten op morfologie Waddenzee	74
9.5. Doorkijk tot 2050	75
9.6. Gevoeligheid voor uitgangspunten	75
10. REFERENTIES	77
laatste bladzijde	78
BIJLAGEN	aantal blz.
I Modelbeschrijving en modelverificatie	16
II Tijdreeksen spui- en pompdebieten	4

1. INLEIDING

Vanaf circa 2017 zijn gedurende vijf jaar grote werkzaamheden gepland aan de Afsluitdijk. Er zijn namelijk maatregelen nodig om zowel de Afsluitdijk te versterken als de mogelijkheden te vergroten voor het afvoeren van overtollig water vanuit het IJsselmeer naar de Waddenzee. In een eerder stadium zijn twee voorkeursbeslissingen genomen over waterveiligheid en waterafvoer [ref. 27.], waarmee de richting voor deze maatregelen vastligt. Deze twee voorkeursbeslissingen zijn in de planuitwerking Afsluitdijk uitgewerkt tot één projectbeslissing.

Onderdeel van de planuitwerking is de effectenbeschrijving voor het Rijksinpassingsplan (RIP). Dit zijn effecten op natuur, archeologie, morfologie, enzovoort. In eerdere fasen zijn deze effecten kwalitatief beschreven. Ten aanzien van waterhuishouding, waterkwaliteit en morfologie was het nodig de effecten grondiger te onderzoeken.

Dit rapport gaat in op de effecten van de varianten voor waterafvoer op de waterkwaliteit en morfologie van de Waddenzee.

1.1. Aanleiding voor maatregelen aan de Afsluitdijk

Waterveiligheid

Sinds 1932 beschermt de Afsluitdijk een groot deel van Nederland tegen overstromingen vanuit zee. In de veiligheidstoetsing in 2006 is vastgesteld dat de dijk, en spui- en schutsluizen daarin, niet meer voldoen aan de huidige veiligheidsnorm. De Afsluitdijk moet als primaire waterkering voldoen aan de zogenoemde veiligheidseis van 1/10.000 per jaar.

In de voorkeursbeslissing is vastgelegd dat het dijklichaam versterkt moet worden volgens het principe van een overslagbestendige dijk, met behoud van een groene (vegetatie) uitstraling. Daarnaast worden er maatregelen genomen om de huidige sluiscomplexen te versterken zodat ze tot tenminste 2050 voldoen aan de veiligheidseis van 1/10.000 per jaar.

Waterafvoer

Naast waterveiligheid is er nog een tweede reden waarom maatregelen aan de Afsluitdijk noodzakelijk zijn: de afvoer van water vanuit het IJsselmeer naar de Waddenzee. Deze afvoer naar de Waddenzee wordt geregeld via de spuisluizen bij Den Oever en Kornwerderzand. Als het water in de Waddenzee lager staat dan in het IJsselmeer, kunnen de spuisluizen geopend worden zodat het water uit het IJsselmeer naar de Waddenzee kan stromen. Staat het water in de Waddenzee hoger, dan zijn de spuisluizen gesloten.

In 1992 is het peilbesluit rijkswateren IJsselmeer genomen. In dit besluit zijn de zomer- en winterstreefpeilen van het IJsselmeer en omliggende meren vastgelegd. Al een paar decennia is sprake van te weinig afvoercapaciteit om onder alle omstandigheden in de winter het IJsselmeerpeil voldoende te kunnen beheersen. Dit probleem wordt in de toekomst vergroot door de zeespiegelstijging en de (te verwachten) toenemende piekafvoeren vanuit het achterland. Het doel van de waterafvoeropgave is om de huidige peildynamiek in het IJsselmeer tot tenminste 2050 te kunnen handhaven, ook bij een stijgende zeespiegel en hogere piekafvoeren vanuit het achterland.

Deze doelstelling wordt gerealiseerd door het inbouwen van pompcapaciteit in het spui-complex bij Den Oever. In de voorkeursbeslissing is gekozen voor een benadering die zich laat typeren als: 'spuien wanneer het kan, pompen als het moet'. Spuien is en blijft de aangewezen methode om grote hoeveelheden water relatief snel te kunnen afvoeren. Vooral in pieksituaties is het echter cruciaal te kunnen beschikken over een aanvullende methode

om water te lozen op de Waddenzee die te allen tijde inzetbaar is, ook wanneer spuien tijdelijk niet mogelijk is. Die methode waarvoor gekozen is, is inzet van pompen.

Regionale ambities

Naast bovengenoemde voorkeursbeslissingen spelen regionale ambities een rol in de planuitwerking Afsluitdijk. De verantwoordelijkheid daarvoor ligt bij de provincies Noord-Holland en Fryslân en de gemeenten Hollands Kroon, Súdwest-Fryslân en Harlingen, al dan niet in samenwerking met het bedrijfsleven en maatschappelijke organisaties. De gezamenlijke inzet van het Rijk en de regionale partners is 'slim werk met werk te maken' en ervoor te zorgen dat maatregelen voor waterveiligheid en waterafvoer in elk geval geen belemmeringen opwerpen voor de regionale ambities.

1.2. Aanleiding voor effectonderzoek waterkwaliteit en morfologie

Oplossingsruimte en effectbepaling

Voor de waterafvoer en voor de waterveiligheid wordt er een Rijksinpassingsplan (RIP) opgesteld. Het Rijksinpassingsplan schept de ruimtelijke voorwaarden om bepaalde maatregelen te kunnen nemen. Voor een Rijksinpassingsplan geldt vanuit de Natuurbeschermingswet 1998 de plicht om een plantoets uit te voeren. In het kader daarvan wordt een passende beoordeling uitgevoerd. Naast het Rijksinpassingsplan zijn vergunningen vereist, waaronder een vergunning ingevolge de Natuurbeschermingswet 1998.

De planuitwerking van het Rijksinpassingsplan is erop gericht om de oplossingsruimte af te bakenen. Op zo'n manier dat er voor de opdrachtnemer die de werkzaamheden gaat uitvoeren nog ruimte overblijft om maatwerk en kwaliteit te leveren, maar wél binnen grenzen die duidelijk zijn en die rechtszekerheid bieden aan betrokkenen.

Voor de Afsluitdijk wordt een zo globaal mogelijk Rijksinpassingsplan beoogd, zodat er veel flexibiliteit is voor de aannemer. Van deze planologische opzet dienen de maximale planologische effecten bepaald te worden, waarbij er rekening gehouden wordt met de randvoorwaarden vanuit de Natuurbeschermingswet en -vergunning. In het Rijksinpassingsplan bepaalt de functie de effecten en hiermee de bestemming. Vervolgens is daarmee bepalend wat er binnen de bestemming gebouwd kan worden.

In dit rapport zijn de effecten van de verschillende varianten onderbouwd en uitgewerkt voor waterafvoerdynamiek, waterkwaliteit en morfologie.

Waterkwaliteit en morfologie Waddenzee

Door klimaatverandering en een ander spuiregime, waarbij ook de inzet van pompen is voorzien, zal de waterkwaliteit veranderen op de Waddenzee. De zoetwaterpuls zal anders worden en ook zal de verhouding van te lozen water bij Kornwerderzand en Den Oever veranderen. Dit heeft gevolgen voor de waterkwaliteit, morfologie en ecologie op de Waddenzee. Door de verandering in ruimte en tijd van de zoetwaterlozing zal ook de nutriëntenhuishouding op de Waddenzee veranderen.

Door een ander afvoerregime wordt de intensiteit van waterafvoer anders. Dit heeft direct invloed op de morfologie. Door kortstondig meer of over langere tijd af te voeren zal de hoeveelheid sediment in suspensie wijzigen. Dit heeft direct gevolgen voor de troebelheid en morfodynamiek. Hierdoor kunnen het areaal en de kwaliteit van beschermde habitats veranderen. Ook kan het invloed hebben op de scheepvaart (geulen die aanzanden) of (water)afvoercapaciteit.

De redenen waarom een verdiepend effectonderzoek nodig is, is beschreven in de volgende paragraaf.

1.3. Doelstelling

Doelstelling

Dit verdiepend effectenonderzoek heeft de volgende doelstellingen:

- inzicht in het effect van verandering van de afvoer naar de Waddenzee op:
 - de invloedzone en intensiteit van zoet water in de Waddenzee;
 - de invloedzone en intensiteit van nutriëntrijk water in de Waddenzee;
 - de invloedzone en intensiteit van de mate van vertroebeling in de Waddenzee;
 - het onderhoud van de vaargeulen in de Waddenzee;
 - de morfologie in de Waddenzee.

Kennishiaten

Bij de kwalitatieve beoordeling zijn de volgende kennishiaten voor waterkwaliteit en morfologie van de Waddenzee gesignaleerd:

1. de effecten van verandering van de afvoer van zoetwater op de Waddenzee zijn niet gekwantificeerd. Het zoutgehalte (grootte en duur) kan wijzigen wat een directe invloed heeft op waterbeweging en ecologie;
2. de effecten van verandering van de afvoer van nutriëntrijk water op de Waddenzee zijn niet bekend, waardoor er geen beoordeling kan plaatsvinden van het ecologisch effect hiervan;
3. de effecten van verandering van de afvoer op de doorzicht/troebelheid van de Waddenzee zijn niet bekend, waardoor er geen beoordeling kan plaatsvinden van het ecologisch effect hiervan;
4. de morfologische effecten in de bestaande studies zijn vooralsnog gebaseerd op indicatieve waarden voor de spui- en afvoercapaciteit en zijn beknopt uitgewerkt. Er is geen onderzoek gedaan naar waar welke effecten precies optreden. Dit kan mogelijk gevolgen hebben voor archeologie, scheepvaart en ecologie;
5. onduidelijk is welke effecten het spuiregime en extra pompcapaciteit op het onderhoud van de vaargeulen en de havens heeft.

Onderzoeksstrategie

Daarom is de volgende onderzoeksstrategie gebruikt:

- onderzoeken wat de intensiteit en verdeling van het te lozen water worden tussen Kornwerderzand en Den Oever bij Klimaatscenario G en bij de verschillende varianten voor waterafvoer. Deze informatie wordt verkregen uit het onderdeel Waterhuishouding [ref. 35.];
- onderzoeken wat de grootschalige 3D waterbeweging op de Waddenzee is als gevolg van het andere spui/pompregime. Hiermee wordt inzicht gekregen in de zoetwater verspreiding en de nutriëntenbelasting;
- onderzoeken wat de morfologische veranderingen op de Waddenzee zijn als gevolg van het andere spui- en pompregime. Hiermee wordt inzicht gekregen in de vertroebeling en morfologie van de Waddenzee en aanzanding/aanslibbing van de scheepvaartgeulen en havens.

1.4. Uitgangspunten

Varianten

Om de waterafvoer via de Afsluitdijk toekomstbestendig te maken zijn er maatregelen nodig om de afvoercapaciteit van overtollig water vanuit het IJsselmeer naar de Waddenzee

te vergroten [ref. 27.]. Voor het vergroten van de afvoercapaciteit van de Afsluitdijk is er een principekeuze gemaakt om pompen aan te brengen in het spuicomplex bij Den Oever.

Voor het vergroten van de afvoercapaciteit van de Afsluitdijk zijn de volgende varianten beschouwd tijdens de planuitwerking:

- A1. vaste pompen inbouwen in een aantal spuiokers bij Den Oever;
- B1. uithijsbare pompen inbouwen in de bestaande schuiven van de spuiokers bij Den Oever;
- C1. nieuwe schuifconstructies met uithijsbare pompen op bestaande fundering van de spuiokers Den Oever aan de IJsselmeerzijde;
- D1. uithijsbare pompen in een nieuwe constructie bij Den Oever aan de IJsselmeerzijde.

Klimaatscenario

Voor het kwantificeren van de effecten van de inzet van pompen en gewijzigd spui-beheer op waterkwaliteit en morfologie van de Waddenzee is uitgegaan van klimaatscenario G van het KNMI uit 2006. Dit is in lijn met het Nationaal Waterplan [ref. 15.].

Zichtjaar

De doelstelling voor waterafvoer is het handhaven van de huidige peildynamiek in het IJsselmeer tot ten minste 2050, bij een stijgende zeespiegel en hogere piekafvoeren vanuit het achterland [ref. 27.].

Gekozen is om het inbouwen van pompen gefaseerd uit te voeren. Daarmee kan ingespeeld worden op de daadwerkelijke klimaatontwikkelingen: in de tweede fase kan bepaald worden of en hoeveel aanvullende pompcapaciteit er dan nodig is. Alleen de eerste fase wordt vooralsnog opgedragen aan de aannemer. De effectbeoordeling is daarom gericht op de 1^e fase van het inbouwen van pompen. De effecten fase 1 zijn gekwantificeerd voor 2028 en er is een kwalitatieve doorkijk gemaakt naar 2050. Het zichtjaar 2028 is gekozen omdat we de effecten van de varianten onderling willen vergelijken. Een zichtjaar omstreeks 2028 is hiervoor logisch, omdat dit ongeveer het einde van fase 1 is. Een nadere onderbouwing voor de keuze van 2028 is gemaakt in het ESA-project [ref. 25.]. In het ESA-project is gebleken dat het omslagpunt voor investeringskosten in 2028 verwacht wordt.

1.5. Leeswijzer

De rapportage over de effecten op waterkwaliteit en morfologie van de Waddenzee is als volgt opgebouwd. Als eerste is het watersysteem van de Waddenzee beschreven in hoofdstuk 2. Vervolgens wordt het beoordelingskader geschetst in hoofdstuk 3. Hoofdstuk 4 beschrijft de toegepaste methode. Hierin is een beknopte beschrijving opgenomen van het gebruikte modelinstrumentarium. De implementatie van de varianten in het modelinstrumentarium is weergegeven in hoofdstuk 5.

Een beschrijving van de effecten is te vinden in de hoofdstukken 6, 7 en 8. Hoofdstuk 6 gaat in op de effecten op de waterhuishouding door de spui- en pompdebieten bij Den Oever en Kornwerderzand. Hoofdstuk 7 beschrijft de effecten op de waterkwaliteit (saliniteit, nutriëntenbelasting en troebelheid) van de Waddenzee. De effecten op de morfologie van de Waddenzee zijn te vinden in hoofdstuk 8.

De conclusies en aanbevelingen van dit effectonderzoek zijn opgenomen in hoofdstuk 9.

De **snelle lezer** wordt geadviseerd om in ieder geval de systeembeschrijving in hoofdstuk 2 en de conclusies en aanbevelingen in hoofdstuk 9 te lezen.

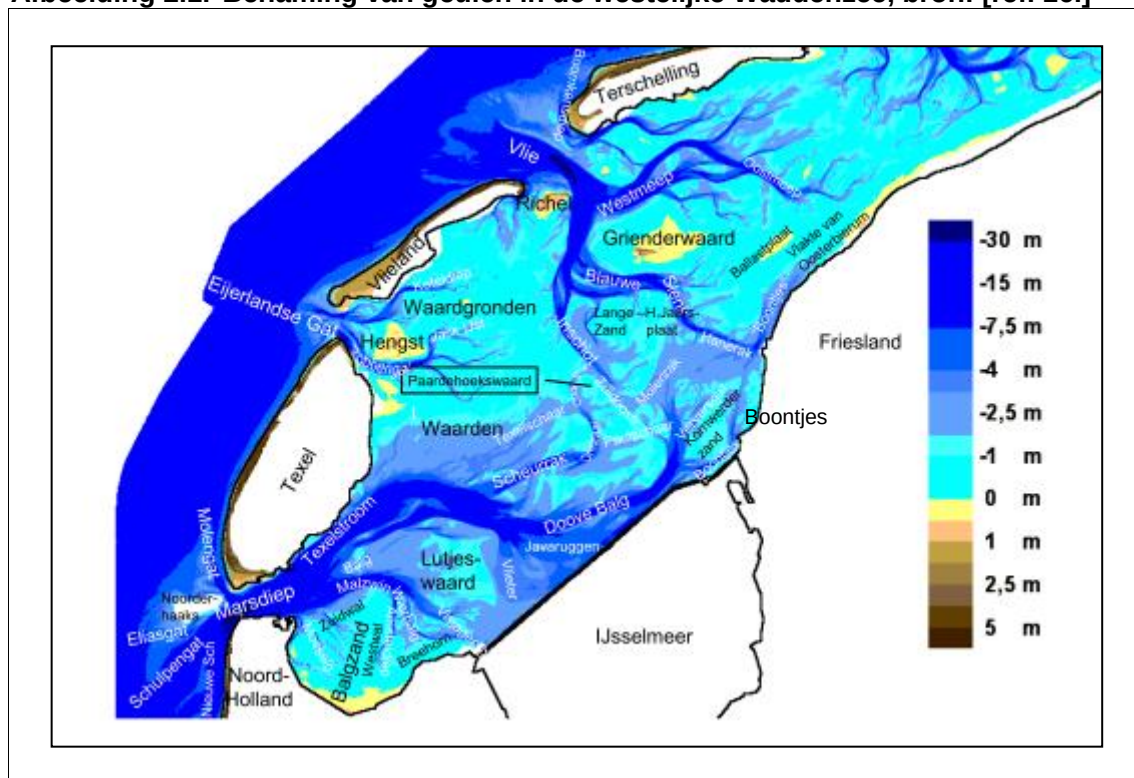
2. SYSTEEMBESCHRIJVING WADDENZEE

Dit hoofdstuk beschrijft het watersysteem van de Waddenzee. Achtereenvolgens komen de volgende onderwerpen aan de orde: in paragraaf 2.1 de hydrodynamica (waterbeweging), in paragraaf 2.2 de waterkwaliteit en in paragraaf 2.3 de morfologie van de Waddenzee.

2.1. Hydrodynamica

De westelijke Waddenzee - zoals beschouwd in dit rapport - is het deel van de Waddenzee tussen de kop van Noord Holland en het wantij van Terschelling. Aan de Noordzeekant wordt het begrensd door de eilanden Texel, Vlieland en (deels) Terschelling. De verbinding van de Waddenzee met het water van de Noordzee vindt plaats door het Zeegat van Texel (met name het Marsdiep), het Eierlandse Gat (tussen Texel en Vlieland) en het Zeegat van het Vlie (tussen Vlieland en Terschelling). In afbeelding 2.1 zijn de namen van de belangrijkste geulen en platen van de westelijke Waddenzee weergegeven.

Afbeelding 2.1. Benaming van geulen in de westelijke Waddenzee, bron: [ref. 16.]



De andere begrenzingen van het gebied bestaan uit de Afsluitdijk, delen van de Waddenzeekusten van Noord Holland en Friesland. De uitwateringssluizen in de Afsluitdijk - de Stevinssluizen bij Den Oever en de Lorentzsluizen bij Kornwerderzand - spuien zoet water vanuit het IJsselmeer op de Waddenzee. Dit is verreweg de grootste bron van zoet water voor het Waddenzeegebied. De sluisen spuien op dit moment onder vrij verval (bij laagwater). In de onderzochte varianten worden pompen bij Den Oever ingezet (om te kunnen uitwateren bij een stijgende zeespiegel). Hierdoor kan ook tijdens hoogwater IJsselmeerwater worden uitgemaal.

De oppervlakte van het westelijk deel van de Waddenzee - ten westen van het wantij van Terschelling - is ongeveer 1.500 km². Het getij vanuit de Noordzee is één van de belang-

rijkste aandrijvende krachten voor de hydrodynamica van de Waddenzee. De getijslag in het gebied varieert tussen de 1½ en 2 m. Het getijprisma¹ van de westelijke Waddenzee is ongeveer 2 á 2½ miljard m³ [ref. 11.].

De gespuide hoeveelheid zoet IJsselmeerwater, bij Den Oever en Kornwerderzand, is gemiddeld 22 miljoen m³ per getijcyclus (voor de periode 1976-1993). Tijdens de winter wordt meer gespuid: gemiddeld 29 miljoen m³ per getij terwijl tijdens zomer maar 15 miljoen m³ per getij wordt gespuid. Vergeleken met het getijprisma, is het gemiddeld gespuide volume per getij slechts ongeveer 1 %. Een simpel verdringingsmodel zou dan ook leiden tot een gemiddelde verblijfsduur in de Waddenzee van het zoete IJsselmeerwater van ongeveer 100 getijcycli. Echter, door de hydrodynamische processen van recirculatie en menging is de gemiddelde verblijfsduur ongeveer 20 á 24 getijcycli [ref. 18.].

Behalve de getij-indringing vanuit de Noordzee in de Waddenzee, worden de stromingen en waterstanden op de westelijke Waddenzee ook aangedreven door de wind, en (in mindere mate) ook door dichtheidseffecten - met name ten gevolge van de lozing van zoet IJsselmeerwater via de uitwateringscomplexen in de Afsluitdijk. In de geulen waardoor dit zoetere water wordt afgevoerd treedt soms gelaagdheid op, waardoor driedimensionale stromingseffecten belangrijk kunnen zijn [ref. 14]. Zeegolven dringen via de zeegaten de Waddenzee binnen. Echter, verder weg van de zeegaten (zoals bij de Afsluitdijk) worden de golfcondities geheel gedomineerd door lokaal opgewekte korte windgolven [ref. 8.].

De toe- en afvoer van water in de westelijke Waddenzee is geconcentreerd in de geulen, van waaruit het water de ondiepere platen op- en afstroomt. Zodoende treden de grootste debieten op in de geulen. De belangrijkste zeegaten (in termen van debiet) zijn die van Texel en Vlie met elk een getijprisma van 1,1 miljard m³, terwijl het Eierlandse Gat een veel kleiner getijprisma heeft: 0,21 miljard m³ [ref. 8.].

2.2. Waterkwaliteit

Saliniteit Waddenzeewater

De huidige situatie is als volgt:

- de Afsluitdijk vormt een grens tussen het zoete water van het IJsselmeer en het brakke water van de Waddenzee;
- het zoutgehalte (saliniteit) in de Waddenzee loopt van rond de 200 mg-Cl/l nabij de punten waar zoet water wordt gespuid tot 35.000 mg-Cl/l in de zeegaten [ref. 26.];
- er sprake van een pulseffect op het moment dat er gespuid wordt [ref. 1.]. Hierdoor is er sprake van een variatie in de zoutgradiënt bij de spuisluisen;
- ook is er sprake van seizoensvariaties van de saliniteit van de Waddenzee door onder andere seizoensvariaties in de spuidebieten bij Den Oever en Kornwerderzand die veroorzaakt worden door seizoensvariaties van neerslag, verdamping en rivierafvoeren van het achterland [ref. 1.].

Nutriëntenhuishouding

De grootste bron van nutriënten in de westelijke Waddenzee is het IJsselmeerwater. Het nutriëntengehalte van het IJsselmeer wordt bepaald door de aanvoer vanuit de Rijn, en de afwatering vanuit het omliggende land. De aanvoer van stikstof (N) en fosfor (P) wordt in belangrijke mate bepaald door menselijke activiteiten: de gehalten N en P zijn momenteel twee tot vijf keer de natuurlijke achtergrondgehalten [ref. 17.].

¹ Het getijprisma is het door de zeegaten de westelijke Waddenzee instromende volume water tijdens vloed. Dit is (praktisch) gelijk aan het tijdens eb door de zeegaten uitstromende volume Waddenwater.

Door regelgeving en daaruit volgende veranderingen is het N en P gehalte sterk gereduceerd ten opzichte van de piek in de zeventiger en tachtiger jaren van de vorige eeuw [ref. 17.].

De nutriënten zijn van grote invloed op het ecosysteem van IJsselmeer en Waddenzee. Veranderingen in de verdeling van uitgeslagen water vanuit het IJsselmeer - en daarmee van de verdeling van de aanvoer van nutriënten vanuit spuicomplex Den Oever dan wel spuicomplex Kornwerderzand kan het ecosysteem beïnvloeden.

De nutriëntenverdeling over de westelijke Waddenzee wordt op soortgelijke wijze als de saliniteit bepaald door de uitwatering vanuit de Afsluitdijk. De relatief geringe uitslag van IJsselmeerwater, ten opzichte van het volume van de Waddenzee en het getijprisma, zorgen ervoor dat er een accumulatie in de Waddenzee plaatsvindt. De verblijftijd van de nutriënten wordt vooral bepaald door de menging en het transport veroorzaakt door de waterstromingen. De in het water opgeloste nutriënten hebben dan ook een gemiddelde verblijftijd in de Waddenzee van 20 à 24 getijcycli [ref. 18.] (afgezien van nutriënten opgeslagen in flora en fauna).

Vertroebeling

De huidige situatie is als volgt:

- mede door de dynamiek in de waterstanden en opwoeling door windgolven op de ondiepe delen van de Waddenzee, is het doorzicht beperkt aan de Waddenzeezijde van de Afsluitdijk;
- van nature is er een voortdurende aanvoer van slib dat langs de Hollandse kust naar het noorden wordt vervoerd en dat accumuleert in de Waddenzee [ref. 34.]. In het stormseizoen is het zwevende stofgehalte hoger dan in de rest van het jaar, doordat dan een deel van het bezonken slib opgewerveld wordt en in de waterkolom terechtkomt [ref. 24.];
- er sprake van een pulseffect op het moment dat er gespuid wordt. Hierdoor is er lokaal sprake van extra vertroebeling in de Waddenzee.

2.3. Morfologie

In de huidige situatie is de morfologie van de Waddenzee zeer dynamisch met een plaatgeulsysteem dat constant in beweging is. De getijbekkens in de westelijke Waddenzee die invloed hebben op de Afsluitdijk zijn het Marsdiep en het Vlie (zie afbeelding 2.1), waarvan het Marsdiep het belangrijkste is. De morfologie op het IJsselmeer is statisch en bestaat uit ondiepe en diepe gebieden die zijn ontstaan voor de afsluiting van de Zuiderzee.

De grootste ingreep van afgelopen eeuwen in het morfologische systeem van de Waddenzee is de afsluiting van de Zuiderzee geweest, afgerond in 1932. De gevolgen van de bouw van de Afsluitdijk - in kaart gebracht door de intensieve meetcampagnes voor de Waddenzeebodem - geven een goede indruk van het morfologisch gedrag van het systeem. Deze kennis kan ook gebruikt worden voor een inschatting van de gevolgen van (een veel geleidelijker verlopende) zeespiegelrijzing en veranderingen in het uitwateringsregime van de spuicomplexen Den Oever en Kornwerderzand.

Sinds de afsluiting van de Zuiderzee neemt het getijvolume in de Waddenzee toe en verandert de oriëntatie van de hoofdgeulen van noord-zuid naar oost-west [ref. 16.]. De invloed van het Marsdiep is steeds groter geworden in de westelijke Waddenzee. Voor afsluiting stroomden zowel Marsdiep als Vlie naar de Zuiderzee, sindsdien is de grens tussen beide getijbekkens verschoven richting Harlingen. De waterbeweging rond de Afsluitdijk ten gevolge van het getij wordt nu gedomineerd door het Marsdiep. Door de afsluiting zijn geu-

len nabij de Afsluitdijk anders komen te liggen. Sommige diepe geulen zijn dichtgeslibd en niet meer herkenbaar in de lodingen. Door de relatief korte consolidatietijd kan het bouwtechnisch een risico zijn om op deze plaatsen in de Waddenzee bouwactiviteiten te gaan uitvoeren.

De veranderingen ten gevolge van de afsluiting van de Zuiderzee zijn nog niet voorbij. Volgens [ref. 8.] is de accumulatie van sediment in het Marsdiep bekken afgevlakt in de periode 1990-2005 in vergelijking met de periode 1935-1990. De import van sediment sinds de afsluiting van de Zuiderzee heeft geleid tot opvulling van niet-actieve geulen en tot sedimentatie langs de kustlijnen van de getijbekkens.

De morfologische ontwikkeling van de westelijke Waddenzee is in directe wisselwerking met het ecosysteem. Met name de kwaliteiten van het slib wordt veranderd door de aanwezige schelpdieren. Terwijl de kenmerken van het ecosysteem sterk beïnvloed worden door de bodemligging, waterstandsvariaties en stromingen.

Erosie

De Waddenzeebodem nabij de Afsluitdijk is redelijk stabiel en is niet erg aan erosie onderhevig. De stabiliteit van de dijk en sluiscomplexen komt hierdoor niet in gevaar. De sedimentatie van de havengeul bij Den Oever is wel een probleem. Door slim te spuien wordt de sedimentatie van de havengeul beperkt.

Oppervlakte intergetijdengebied en diepergelegen platen

De huidige oppervlakte van intergetijdengebieden en diepergelegen platen in de Waddenzee verandert weinig. Wel vindt er verschuiving plaats van de platen, maar dit heeft geen gevolgen voor de oppervlakten. De oppervlakte intergetijdengebied is belangrijk voor ecologie, omdat deze een randvoorwaarde is voor het ontstaan van belangrijk habitatgebied.

Komberging en getijprisma

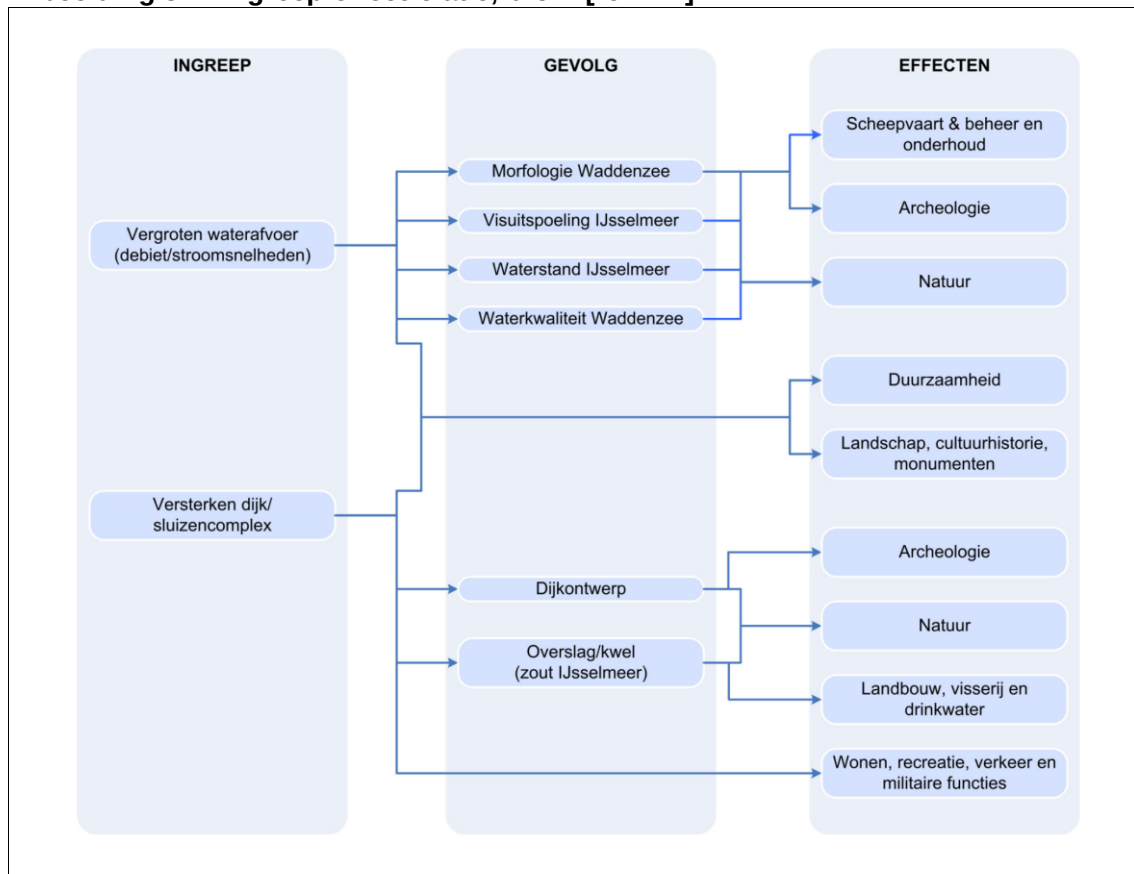
De komberging en het getijprisma van het Marsdiep en Vlie (afbeelding 2.1) neemt nog steeds toe, maar gaat mogelijk naar een evenwicht toe. Komberging en getijprisma zijn een maat voor de natuurlijke dynamiek van het gebied. Meer natuurlijkheid betekent een verbetering voor de ecologie.

3. BEOORDELINGSKADER

3.1. Relevante thema's

De ingreep-effectrelatie van het vergroten van de waterafvoer door pompen bij Den Oever is weergegeven in afbeelding 3.1. Hierbij zijn veranderingen van de waterkwaliteit en de morfologie van de Waddenzee een gevolg van het wijzigen van de waterafvoer. Veranderingen van de waterkwaliteit en morfologie kunnen vervolgens tot effecten leiden voor de thema's scheepvaart & beheer en onderhoud, archeologie en natuur.

Afbeelding 3.1. Ingreep-effectrelatie, bron: [ref. 27.]



Opgemerkt wordt dat effecten van dijkversterking en versterking van de kunstwerken (voor waterveiligheid) aangegeven zijn in afbeelding 3.1, maar geen onderdeel zijn van het verdiepend effectonderzoek.

Thema scheepvaart & beheer en onderhoud

Mogelijke toename van sedimentatie in vaargeulen en havens in de Waddenzee zou kunnen leiden tot extra baggeronderhoud en hinder voor scheepvaart.

Thema archeologie en objecten in de ondergrond

Mogelijke toename van erosie in de Waddenzee zou kunnen leiden tot het bloot komen te liggen van archeologische resten. Daarnaast kan erosie leiden tot het bloot komen te liggen van kabels en leidingen of explosieven.

Thema natuur

Een overzicht van mogelijke effecten op natuur in de Waddenzee is samengevat in tabel 3.1. De uitkomsten van dit verdiepend effectonderzoek waterkwaliteit en morfologie van de Waddenzee zullen worden gebruikt voor de beoordeling van de effecten van de natuur in onder andere de passende beoordeling en de natuurtoets.

Tabel 3.1. Overzicht van de effecten op natuur

verandering	effect op natuur
- morfologie Waddenzee	- veranderingen in de morfologie in de Waddenzee kunnen leiden tot afname in: · areaal en kwaliteit van beschermde habitattypen, zoals slikken en zandplaten. Verhouding (oppervlak) en kwaliteit habitattypen H1110, permanent overstroomde zandbanken en H1140, slik- en zandplaten kan wijzigen met mogelijk significant negatieve effecten als gevolg; · foerageermogelijkheden voor wadvogels en rustgebieden voor zeehonden met mogelijk significant negatieve effecten op kwalificerende vogelsoorten voor N2000 in de vorm van het verminderen van foerageergebied en rustplaats; - in het IJsselmeer wordt rekening gehouden met (lokale) sedimentatie op andere locaties door een ander spui- en pompregiem. In het IJsselmeer worden geen negatieve effecten voor de natuur verwacht, aangezien de aanzuigzone van de pompen geen leefgebied van beschermde habitatsoorten vormt en hier ook geen beschermde habitattypen voorkomen.
- troebelheid Waddenzee	- een toename van de troebelheid van het water kan tot een mogelijke verslechtering van de zichtbaarheid voor op vis jagende soorten met instandhoudingsdoelen leiden. Daarbij neemt hierdoor ook de hoeveelheid licht dat de bodem bereikt af, wat van negatieve invloed is op waterplanten en algen. Een afname van waterplanten en algen kan leiden tot een afname van voedselbeschikbaarheid voor soorten met instandhoudingsdoelen.
- nutriëntenaanvoer Waddenzee	- het voorkomen van algen- en schelpdierenbiomassa is rechtstreeks gecorreleerd aan de nutriëntenaanvoer; hoe meer nutriënten, hoe hoger de biomassa. Door een verandering in spuiregime kan een verandering in deze biomassa optreden. Schelpdieren vormen een belangrijke voedselbron voor vogels met instandhoudingsdoelen.
- zoet/zout gradiënt Waddenzee en IJsselmeer	- door het spuien komt zoetwater in de Waddenzee. Grote zoetwaterpulsen kunnen leiden tot sterfte van zoutwaterorganismen welke als voedselbron dienen voor soorten met instandhoudingsdoelen;

3.2. Beoordelingskader waterkwaliteit

De effecten op waterkwaliteit van de Waddenzee zijn meegenomen in de passende beoordeling en de natuurtoets. In de voorliggende rapportage worden de effecten op waterkwaliteit gekwantificeerd en beschreven, maar niet positief of negatief gewaardeerd. De score van de varianten voor waterkwaliteit vindt integraal plaats bij het thema natuur.

3.3. Beoordelingskader morfologie

Voor het onderdeel morfologie worden de volgende aspecten beoordeeld:

- verandering in de erosie: vindt er extra erosie plaats in Waddenzee of IJsselmeer?
- verandering in de IJsselmeerbodem: hoe verandert de bodem van het IJsselmeer?
- oppervlakte intergetijdengebied: hoe verandert het oppervlakte intergetijdengebied in de Waddenzee?
- invloed op het kombergingsgebied en getijprisma: hoe veranderen het kombergingsgebied en getijprisma op de Waddenzee?

Beoordeling van de effecten van de varianten voor waterafvoer op verandering van erosie in het IJsselmeer en op verandering van de IJsselmeerbodem zijn niet beschouwd in dit verdiepend effectonderzoek, omdat de morfologische activiteit van het IJsselmeer nabij de Afsluitdijk klein is vergeleken met de Waddenzee. Sinds de afsluiting van de Zuiderzee is de waterdiepte relatief groot terwijl debieten en stroomsnelheden klein zijn. Hierdoor is de sedimenttransportcapaciteit sterk afgenomen en hiermee ook de morfologische activiteit in grote gedeelten van het IJsselmeer. De effecten op verandering van erosie in het IJsselmeer en op verandering van de IJsselmeerbodem zijn kwalitatief beschouwd in de Varianten Analyse Nota en in de MER.

In de onderstaande tabel is het beoordelingskader opgenomen. Bij de beoordelingen wordt normaal gesproken onderscheid gemaakt tussen de gebruiksfase (het uiteindelijke ontwerp) en de aanlegfase (bouw). Omdat de effecten in de aanlegfase niet onderscheidend zijn tussen de varianten en sterk afhangen van de uitvoeringsplanning van de aannemer, zijn ze hier niet verder uitgewerkt.

Tabel 3.2. Beoordelingskader morfologie voor waterafvoer

aspect	criterium	uitwerking/methode
morfologie	verandering in de erosie in Waddenzee	morfologische analyse op basis van numerieke modellering van waterbeweging
	verandering in de erosie in IJsselmeer	expert judgement
	verandering in de IJsselmeerbodem	expert judgement
	oppervlakte intergetijdengebieden	morfologische analyse op basis van numerieke modellering van waterbeweging
	invloed op het kombergingsgebied en getijprisma	morfologische analyse op basis van numerieke modellering van waterbeweging

In tabel 3.3 tot en met tabel 3.5 zijn de waarderingen voor de in tabel 3.2 beschreven aspecten beschreven.

Erosie

Erosie wordt als negatief beschouwd omdat dit de constructie van dijk en sluizen kan ondermijnen en kan zorgen voor sedimentatie elders (bijvoorbeeld in scheepvaartgeulen). Erosie kan ook leiden tot het blootleggen van archeologisch interessante locaties, wat negatief is omdat deze dan verloren kunnen raken.

Tabel 3.3. Concretisering beoordeling verandering in de erosie

score	maatlat
++	sterk positief, zeker geen erosie
+	positief, geen erosie
0	neutraal, geen verandering ten opzichte van de referentie situatie
-	negatief, kleine toename erosie (maximaal 20 cm)
--	sterk negatief, grote toename erosie (meer dan 20 cm)

Hierbij merken we op dat erosie bij dijk en sluizen kleinschalige (near-field) modellen vereisen, hetgeen buiten het kader van dit (grootschalig, far-field) onderzoek valt.

Oppervlakte intergetijdengebied

Toename van het oppervlakte intergetijdengebied is gunstig omdat hierdoor gewenst areaal habitat ontstaat (zie tabel 3.1).

Tabel 3.4. Concretisering beoordeling oppervlakte intergetijdengebieden

score	maatlat
+ +	sterk positief, grote toename oppervlakte intergetijdengebieden en diepergelegen platen (+5 ‰ ten opzichte van huidige situatie)
+	positief, toename oppervlakte intergetijdengebieden (+2 ‰ ten opzichte van huidige situatie)
0	neutraal, geen invloed op oppervlakte intergetijdengebieden
-	negatief, afname oppervlakte intergetijdengebieden (-2 ‰ ten opzichte van huidige situatie)
- -	sterk negatief, grote afname oppervlakte intergetijdengebieden (-5 ‰ ten opzichte van huidige situatie)

Kombergingsgebied en getijprisma

Toename van het kombergingsgebied en getijprisma de Waddenzee is gunstig omdat hierdoor meer dynamiek in het gebied komt. Meer dynamiek wordt beoordeeld als gunstig voor de natuurlijkheid.

Tabel 3.5. Concretisering beoordeling invloed op het kombergingsgebied en getijprisma

score	maatlat
+ +	sterk positief, grote toename kombergingsgebied en getijprisma (+2 ‰ ten opzichte van huidige situatie)
+	positief, toename kombergingsgebied en getijprisma (+1 ‰ ten opzichte van huidige situatie)
0	neutraal, geen invloed op kombergingsgebied en getijprisma
-	negatief, afname kombergingsgebied en getijprisma (-1 ‰ ten opzichte van huidige situatie)
- -	sterk negatief, grote afname kombergingsgebied en getijprisma (-2 ‰ ten opzichte van huidige situatie)

Voor het aspect intergetijdengebied, komberging en getijprisma wordt er van uitgegaan dat 2 ‰ verandering in intergetijdengebied (of 1 ‰ in het totale kombergingsgebied) van het getijbekken Marsdiep optreedt als de Afsluitdijk 10 m of meer de Waddenzee in gaat en 5 ‰ van het intergetijdengebied of 2 ‰ van het kombergingsgebied als de verschuiving 30 m of meer is (gebaseerd op Eysink en Biegel (1992), [ref. 10.]).

Baggeronderhoud vaargeulen en havens

De effecten op het baggeronderhoud van de vaargeulen in de Waddenzee en van de Waddenzeehavens zijn beoordeeld in het thema hinder scheepvaart. Daarnaast zijn de bevindingen van dit onderzoek invoer voor de life cycle cost (LCC) van het spuicomplex Den Oever.

4. METHODE

4.1. Methodologie

Het verdiepend effectenonderzoek is uitgevoerd om te onderzoeken wat:

- de gevolgen zijn van de klimaatsverandering bestaande uit zeespiegelstijging en een grotere rivieraafvoer op de waterafvoerdynamiek (autonome ontwikkeling);
- de gevolgen zijn van de inzet van pompen en gewijzigd spui-beheer op de waterafvoerdynamiek (effecten waterafvoer);
- de effecten zijn van veranderingen van de waterafvoerdynamiek op de waterkwaliteit en morfologie van de Waddenzee (effecten waterkwaliteit en morfologie).

Het effectenonderzoek waterkwaliteit en morfologie is volgens een aantal stappen uitgevoerd. Hierbij is op de volgende wijze gewerkt van grof naar fijn:

1. het bepalen van spui- en pompgebieten (waterhuishouding IJsselmeer);
2. het bepalen van het invloedsgebied van pompen (met een WAQUA-model van de Waddenzee);
3. het kwantificeren van effecten van pompen op de waterkwaliteit en morfologie van de Waddenzee (met een TRIWAQ-model van de Waddenzee).

Het bepalen van spui- en pompgebieten

De spui- en pompgebieten zijn bepaald met een SOBEK model van het IJsselmeer. De uitgangspunten en methodiek zijn beschreven in [ref. 35].

De berekende tijdreeksen van spui- en pompgebieten bij Den Oever en Kornwerderzand zijn randvoorwaarden voor het berekenen van de waterbeweging in de westelijke Waddenzee. Analyse van deze spui- en pompgebieten helpt om de autonome ontwikkeling en de effecten van pompen op waterkwaliteit en morfologie van de Waddenzee te verklaren. De resultaten en bevindingen van deze analyse zijn gepresenteerd in hoofdstuk 6.

Het bepalen van het invloedsgebied van pompen

Vervolgens is gekeken in hoeverre de veranderingen van de zoetwaterlozingen bij Den Oever en Kornwerderzand doorwerken in de hydrodynamica en waterkwaliteit van de Waddenzee. Dit is gedaan met een 2D WAQUA model van de westelijke Waddenzee. Het rekenrooster van dit model is horizontaal een factor 3 fijner dan van het reeds beschikbare Kuststrook-fijn model [ref. 22.], zodat de stroming in de belangrijkste geulen in de westelijke Waddenzee met voldoende nauwkeurigheid berekend kan worden. Hierbij is gerekend met een online koppeling¹ [ref. 23.] tussen het model van de westelijke Waddenzee en het Kuststrook-fijn model.

Uit de 2D modelresultaten is gebleken dat de effecten van pompen merkbaar zijn op de saliniteit van een groot deel van de westelijke Waddenzee (niet getoond). Op grond hiervan is in overleg met deskundigen van Rijkswaterstaat, Witteveen+Bos en met prof. Z.B. Wang (Deltares) besloten om effecten van pompen op waterkwaliteit en morfologie van de Waddenzee te baseren op modelresultaten van een 3D waterbewegingsmodel (TRIWAQ). De tussenresultaten van WAQUA zijn niet gerapporteerd, omdat ze niet gebruikt zijn voor het kwantificeren van de effecten.

¹ Met horizontale domeindecompositie.

Het kwantificeren van effecten van pompen

Om de effecten van pompen op waterkwaliteit en morfologie van de Waddenzee te kwantificeren is een 3D TRIWAQ modelschematisatie van de westelijke Waddenzee ontwikkeld. De gerapporteerde resultaten in hoofdstuk 7 en 8 zijn gebaseerd op (nabewerking van) uitkomsten van dit TRIWAQ model. De karakteristieken van dit TRIWAQ model zijn beknopt beschreven in de volgende paragraaf.

4.2. TRIWAQ

Model

TRIWAQ is een numeriek waterbewegingsmodel van Rijkswaterstaat. Met dit driedimensionale model kunnen waterstanden, stroomsnelheden en concentraties verdeeld over de waterkolom berekend worden in zeeën, estuaria, meren en rivieren.

Fysische processen

De gebruikte TRIWAQ modelschematisatie van de westelijke Waddenzee is ontwikkeld met behulp van de WAQUA Kuststrook-fijn modelschematisatie ([ref. 5.] en [ref. 31.]). De volgende fysische processen zijn meegenomen in de uitgevoerde berekeningen van de waterbeweging in de westelijke Waddenzee:

- getijbeweging;
- spuien en pompen;
- saliniteitsverschillen;
- 3D-effecten;
- zeespiegelstijging.

In overeenstemming met eerdere soortgelijke studies in de Waddenzee [ref. 3.], [ref. 11.] en [ref. 20.] wordt de bijdrage van wind op de waterbeweging van de Waddenzee verwaarloosd. Windeffecten zijn wel meegenomen in het bepalen van de spui- en pompdebieten [ref. 35.].

Windgolven zijn niet meegenomen in de berekeningen van de waterbeweging, omdat de grootschalige stroming in de Waddenzee gedomineerd wordt door het getij en omdat geen (grootschalig, dat wil zeggen niet-lokaal) effect van de spuiregime op de windgolven zal optreden.

Een uitgebreidere beschrijving van de gebruikte modelschematisatie is te vinden in bijlage I.

4.3. Verificatie

De kwaliteit van de ontwikkelde modelschematisatie van de westelijke Waddenzee is geverifieerd door de modelresultaten te vergelijken met metingen en met de resultaten van andere modelschematisaties. Deze vergelijking is uitgevoerd met de beschikbare tijdreeksen van waterstanden en saliniteit. Andere parameters, zoals stroomsnelheden, waren niet beschikbaar.

De resultaten van deze modelverificatie zijn opgenomen in bijlage I.

Waterstanden

Uit een vergelijking met gemeten waterstanden blijkt dat het TRIWAQ-model van de westelijke Waddenzee qua waterstanden meestal iets beter presteert dan het WAQUA kuststrook-fijn model voor de beschouwde meetstations en de beschouwde periodes. Een verklaring hiervoor is dat het TRIWAQ-model van de westelijke Waddenzee (horizontaal en

verticaal) gedetailleerder is en dat hierdoor de getij-indringing door de geulen nauwkeuriger berekend wordt dan in het WAQUA kuststrook-fijn model. De nauwkeurigheid van het TRIWAQ model is voldoende voor dit effectenonderzoek waar de effecten relatief ten opzichte van de autonome ontwikkeling worden beschouwd.

Saliniteit

Het TRIWAQ model van de westelijke Waddenzee - wat gebruikt is voor het kwantificeren van de effecten van pompen - benadert de gemeten saliniteit bij Doove Balg west beter dan het 2D WAQUA-model van de westelijke Waddenzee. De verschillen tussen berekeningen en metingen bij Doove Balg oost zijn van dezelfde orde van grootte als het WAQUA model van de westelijke Waddenzee.

Uit de vergelijking van berekende saliniteit en gemeten saliniteit concluderen we dat het toegepaste 3D (TRIWAQ) model beter presteert dan het reeds beschikbare 2D WAQUA kuststrook-fijn model en dan het 2D WAQUA model van de westelijke Waddenzee.

Verdere verbetering van het model zou mogelijk kunnen zijn als meer metingen beschikbaar komen.

4.4. Methodiek voor de bepaling van het baggeronderhoud in de havens

Voor de bepaling van het verwachte baggeronderhoud van de havens is een integraal model gebruikt. Dit integrale model maakt gebruik van de methode Eysink [ref. 9.], in combinatie met vereenvoudigingen door van Rijn [ref. 29.]. Het Eysink model is een combinatie van empirische en fysische methodes, gekalibreerd en geverifieerd voor een aantal havens in Nederland en elders.

De belangrijkste parameters in het model die van belang zijn voor de aanslibbing in de havens zijn:

- oppervlakte van de haven;
- getijslag bij de havenmond;
- breedte (en vorm) van de havenmond;
- diepte van de haven en haveningang;
- getijgeïnduceerde stroomsnelheid (en oscillaties daarvan);
- dichtheidsvariaties bij de havenmond gedurende de getijcyclus;
- slibconcentratie bij de haveningang.

Het model schat het volume water dat iedere getijcyclus de haven indringt. In combinatie met het slibgehalte van het inkomende water en de retentietijd in het havenbekken wordt de sedimentatie in het havenbassin berekend.

Verificatie van de methode - toegepast op de belangrijkste havens rond de westelijke Waddenzee - heeft reeds eerder plaatsgevonden [ref. 11.]. Dezelfde modelinstellingen zijn gebruikt in de huidige berekeningen, en de berekende baggervolumes in de huidige situatie zijn conform [ref. 11.].

De effecten van de autonome ontwikkeling 2012 tot 2028, als mede die van de varianten A1 en B1/C1 met pompen in het uitwateringscomplex bij Den Oever, zijn onderzocht door de veranderingen in de hydrodynamische condities - getijslag, stroomsnelheden en dichtheidsvariaties zoals bepaald met het TRIWAQ model- toe te passen op de modelinvoer voor de methode Eysink. Het geverifieerde model voor de huidige situatie dient hierbij als de basis; relatieve veranderingen in hydrodynamische grootheden (verticaal getij, stroom-

snelheden en saliniteit) worden toegepast op de geverifieerde invoerparameters van het havenaanslibbingsmodel.

Andere factoren die de betrouwbaarheid van de modelvoorspellingen met het Eysink-model beïnvloeden zijn de beperkte kennis en modellering van morfologische processen, het gebrek aan metingen voor kalibreren en verifiëren van het model, het gebruik van een integraal model (in plaats van een twee- of driedimensionaal model). De betrouwbaarheidsband van de modelresultaten ligt dan ook niet in de procenten, maar in de tientallen procenten (of meer). Echter, de onderlinge vergelijking van modelresultaten voor de verschillende varianten geeft wel een indicatie voor de toekomstige veranderingen in het baggeronderhoud in de havens.

4.5. Conclusies en aanbevelingen

Conclusies

Het ontwikkelde TRIWAQ modelschematisatie van de westelijke Waddenzee is in staat om de grootschalige waterbeweging met voldoende mate van nauwkeurigheid te berekenen. Dit blijkt uit een vergelijking van de modelresultaten met metingen van waterstanden en saliniteit. Het model wordt geschikt geacht om de effecten van de inzet van pompen en gewijzigd spuibeheer te kwantificeren voor het doel van deze studie.

Het model kan goed ingezet worden om een relatieve vergelijking te maken tussen effecten van varianten en de autonome ontwikkeling. De absolute waarden van de modeluitkomsten dienen echter met de nodige voorzichtigheid gebruikt te worden (onder andere door de onzekerheden in de toekomstige autonome morfologische ontwikkeling, en het gebruik van twee tijdvensters van 15 dagen als representatief voor zomer en winter).

Beperkingen van het model zijn dat het:

- bij Den Oever en Kornwerderzand een roosterresolutie heeft van ongeveer 70 m en;
- uitgaat van een hydrostatische drukverdeling over de verticaal waardoor de gedetailleerde hydrodynamica en de resulterende effecten op waterkwaliteit en morfologie niet kan worden weergegeven vlak bij (en in) de spuicomplexen Den Oever en Kornwerderzand. Het onderhavige verdiepend effectonderzoek richt zich echter op een grotere schaal dan de lokale effecten vlak bij de spuicomplexen.

Aanbevelingen

De toegepaste TRIWAQ-modelschematisatie is afgeregeld met de toen beschikbare meetgegevens. Een verdere afregeling van de toegepaste TRIWAQ-modelschematisatie is mogelijk als meer meetgegevens beschikbaar komen.

5. IMPLEMENTATIE VAN AUTONOME ONTWIKKELING EN VARIANTEN

Dit hoofdstuk beschrijft de referentiesituatie en de autonome ontwikkeling die gebruikt is voor de effectbeschrijving. Verder is aangegeven hoe de varianten voor waterafvoer geïmplementeerd zijn in de modellering.

5.1. Referentiesituatie

De effecten van de ingreep worden vergeleken met de referentiesituatie. De referentiesituatie wordt hier kort uiteengezet. Zonder de projectbeslissing Afsluitdijk zou er geen veiligheidsopgave en waterafvoeropgave (zonder stijging van het peil) opgelost worden. De effecten van de varianten worden daarom vergeleken met een situatie zonder ingrepen aan de Afsluitdijk voor veiligheid en waterafvoer. De situatie zonder ingrepen aan de Afsluitdijk voor veiligheid en waterafvoer zijn alleen bedoeld als referentie voor de alternatieven. Het is geen realistisch alternatief omdat in de voorkeursbeslissingen al eerder is besloten om wel tot ingrepen over te gaan.

Projecten op en rondom de Afsluitdijk waarover reeds is besloten, en die relevant zijn voor het ontwerp of de effectbepaling van de varianten, worden eveneens meegenomen in de referentiesituatie. Het gaat daarbij om:

- het verdiepen van de vaargeul naar Harlingen (De Boontjes). De vaarweg tussen Harlingen en Kornwerderzand is over een lengte van circa 2 km ondieper. In 2012 is begonnen met het verdiepen van de vaarweg naar klasse Va om meer goederenvervoer over het water naar Harlingen mogelijk te maken. Een gedeelte is in 2013 aangepakt. De verdieping van de vaargeul de Boontjes is niet opgenomen in de bathymetrie van het toegepaste TRIWAQ model, omdat deze verdieping nog niet in de beschikbare bathymetrische gegevens staat. De meest recente ontvangen bathymetrische gegevens zijn van maart 2012. De verdieping van de Boontjes is echter afgerond in december 2013. De gevoeligheid van de conclusies voor het wel of niet meenemen van de verdieping van de Boontjes in de referentiesituatie zijn kwalitatief beschreven in paragraaf 6.5 voor de spui- en pompdebieten, in paragraaf 7.7 voor waterkwaliteit en in paragraaf 8.6 voor morfologie;
- dijkversterking Den Oever. Deze dijkversterking sluit aan op de Afsluitdijk. Het voorkeursalternatief (ophogen van de dijk met maximaal 1,5 m, berm op het haventerrein en versterking van de dam ten noorden van de vissershaven) wordt verder uitgewerkt. Eind 2013 zal de besluitvorming rond het ontwerpprojectplan plaatsvinden. De dijk moet in 2017 op orde zijn. Deze dijkversterking heeft een te verwaarlozen invloed op de hydrodynamica van de Waddenzee en is daarom niet meegenomen in de modelberekeningen;
- opgave Kaderrichtlijn water. Hiervoor worden een vispassage bij Den Oever en twee zoutwaterafvoersystemen bij de Afsluitdijk aangelegd. De zoutwaterafvoersystemen moeten het teveel aan zout afvoeren dat in het IJsselmeer terecht komt, via het toekomstig in te stellen visvriendelijke sluisbeheer. De geplande vispassage bij Kornwerderzand is uitgesteld, in afwachting van het onderzoek naar de vismigratierivier. Over de vismigratierivier is nog niet besloten en deze wordt daarom niet meegenomen in de referentiesituatie. In 2015 moeten de vispassage en de zoutwaterafvoersystemen gereed zijn. Deze debieten door de zoutwaterafvoersystemen hebben een verwaarloosbaar effect op de hydrodynamica en waterkwaliteit (saliniteit) van de Waddenzee, omdat de maximale debieten enkele orde groottes kleiner zijn dan de spuicapaciteit van de nabijgelegen spuicomplexen. De debieten door de zoutwaterafvoersystemen zijn daarom niet meegenomen in de modelberekeningen.

Eén van de regionale ambities is de vismigratierivier. De afzonderlijke effecten van de vismigratierivier en de cumulatieve effecten van vismigratierivier en project Afsluitdijk worden meegenomen in de m.e.r.-procedure voor de vismigratierivier. De vismigratierivier is daarom in dit effectonderzoek niet beschouwd.

Een belangrijk onderdeel van de referentiesituatie is de klimaatontwikkeling. Ook zonder dit project zullen klimaatveranderingen optreden. De effecten van de maatregelen voor waterveiligheid worden vergeleken met de situatie zonder maatregelen, maar met klimaatveranderingen volgens klimaatscenario¹ W+. De effecten van de maatregelen voor waterafvoer worden vergeleken met de effecten zonder maatregelen bij klimaatscenario² G. Naast autonome klimaatontwikkelingen kunnen per onderwerp nog andere autonome ontwikkelingen spelen, bijvoorbeeld autonome morfologische veranderingen in de Waddenzee, verandering in natuurwaarden in het IJsselmeer, ontwikkelingen in verkeer of scheepvaart. In het MER worden deze ontwikkelingen per onderwerp beschreven en meegenomen in de referentiesituatie.

5.2. Autonome ontwikkeling

Voor de autonome ontwikkeling van de waterkwaliteit en morfologie van de westelijke Waddenzee zijn de volgende zaken relevant:

- zeespiegelstijging ten gevolge van klimaatverandering;
- verandering van de spuidebieten als gevolg van klimaatverandering;
- morfologische ontwikkeling van de Waddenzee. Door ingrepen in het verleden en door klimaatverandering verandert de bodemligging van de Waddenzee autonoom.

De verwachte autonome ontwikkeling wordt in dit verdiepend effectonderzoek gekwantificeerd over de periode 2012 tot 2028³. Hierbij is 2012 representatief voor de huidige situatie, omdat voor dit jaar zowel hydrodynamische meetgegevens als bathymetrische meetgegevens beschikbaar zijn. De motivatie voor zichtjaar 2028 is te vinden in paragraaf 1.4.

Zeespiegelstijging

Voor het kwantificeren van de autonome ontwikkeling en de effecten van de varianten voor waterafvoer is klimaatscenario G het uitgangspunt. Dit betekent dat de volgende waarden voor zeespiegelstijging zijn aangehouden:

Tabel 5.1. Toegepaste zeespiegelstijging in effectonderzoek waterkwaliteit en morfologie Waddenzee

zichtjaar	zeespiegelstijging in zichtjaar ten opzichte van 1990 volgens klimaatscenario G [m]	bron	relevantie
2012	0,044	KNMI (2011) [ref. 13.]	autonome ontwikkeling waterkwaliteit en morfologie Waddenzee.
2028	0,132	KNMI (2011) [ref. 13.]	referentiesituatie voor effectbepaling waterkwaliteit en morfologie Waddenzee; autonome ontwikkeling waterkwaliteit

¹ Klimaatscenario W+ gaat uit van 2° C temperatuurstijging op aarde in 2050 ten opzichte van 1990 en van veranderingen in luchtstromingspatronen in West-Europa. Een nadere toelichting is te vinden in [ref. 15.].

² Klimaatscenario G gaat uit van 1° C temperatuurstijging op aarde in 2050 ten opzichte van 1990 en van **geen** veranderingen in luchtstromingspatronen in West-Europa. Een nadere toelichting is te vinden in [ref. 15.].

³ In verdiepend effectonderzoek waterhuishouding [ref. 35.] zijn de effecten op peildynamiek van het IJsselmeer gekwantificeerd voor de periode 1990 - 2028, conform de doelstelling van het project Afsluitdijk voor waterafvoer.

zichtjaar	zeespiegelstijging in zichtjaar ten opzichte van 1990 volgens klimaatscenario G [m]	bron	relevantie
			en morfologie Waddenzee.
2050	0,250	KNMI (2006)	referentiesituatie voor effectbepaling waterkwaliteit en morfologie Waddenzee; autonome ontwikkeling waterkwaliteit en morfologie Waddenzee.

Spuidebieten

De gehanteerde spuidebieten zijn voor ieder zichtjaar bepaald met een Sobek model van het IJsselmeer waarbij uitgegaan is van klimaatscenario G. Klimaatscenario G heeft hierbij betrekking op de zeespiegelstijging (van de Waddenzee), de verandering van de afvoer van de IJssel en de verandering van neerslag en verdamping (zie [ref. 35.]).

Bodemligging Waddenzee

Het is waarschijnlijk dat er veranderingen in de bodemligging van de Waddenzee optreden tussen 2012 en 2028 doordat de hydrodynamische belasting (golven, stroming) verandert onder invloed van klimaatverandering en zeespiegelstijging. Een andere bodemligging kan op zijn beurt weer effect hebben op de hydrodynamica van de gehele Waddenzee.

Om een beeld te krijgen van de gevoeligheid van de waterkwaliteit en morfologie voor de autonome morfologische ontwikkeling zijn twee situaties beschouwd: één zonder bodemverandering sinds 2012 (zie bijlage I) en één met een uniform met de zeespiegel meestijgende bodem¹. Daaruit volgt een bandbreedte voor de effecten van bodemveranderingen op de autonome ontwikkeling van de waterkwaliteit van de Waddenzee.

Gevoeligheid voor klimaatscenario

De gevoeligheid van de conclusies voor andere klimaatscenario's is kwalitatief beschreven in paragraaf 6.5 voor de spui- en pompgebieden, in paragraaf 7.7 voor waterkwaliteit en in paragraaf 8.6 voor morfologie.

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de zeespiegelstijging en verandering van de IJsselafoer bij verschillende klimaatscenario's. In dit verdiepend effectonderzoek is uitgegaan van de bovengrens van klimaatscenario G.

Tabel 5.2. Zeespiegelstijging en verandering van IJsselafoer bij verschillende klimaatscenario's

klimaatscenario	zeespiegelstijging in zichtjaar ten opzichte van 1990 [m]	toename van IJsselafoer [%] volgens [ref. 6.]	afname van IJsselafoer [%] volgens [ref. 6.]
G volgens KNMI (2006)	0,15 tot 0,25	tot +6,8 %	geen afname
W volgens KNMI (2006)	0,20 tot 0,35	tot +6,9 %	tot -14,0 %
W+ volgens KNMI (2006)	0,20 tot 0,35	tot +14,1 %	tot -28,8 %

5.3. Varianten voor waterafvoer

Voor het vergroten van de afvoercapaciteit van de Afsluitdijk zijn de volgende varianten beschouwd tijdens de planuitwerking:

A1. vaste pompen inbouwen in een aantal spuiokers bij Den Oever;

¹ Tot nu toe is de sedimentatiesnelheid van het Nederlandse deel van de Waddenzee groter dan de zeespiegelstijging [ref. 34.].

- B1. uithijsbare pompen inbouwen in de bestaande schuiven van de spuikokers bij Den Oever;
- C1. nieuwe schuifconstructies met uithijsbare pompen op bestaande fundering van de spuikokers Den Oever aan de IJsselmeerzijde;
- D1. uithijsbare pompen in een nieuwe constructie bij Den Oever aan de IJsselmeerzijde.

Deze varianten zijn te bundelen in twee categorieën: vaste pompen (variant A1) en uithijsbare pompen (variant B1/C1/D1).

De benodigde pompcapaciteit is gebaseerd op het feit dat rond 2028 de criteria voor gemiddeld winterpeil, gemiddeld peil en maximaal peil niet ten opzichte van de situatie 1990 mogen veranderen.

5.3.1. Vaste pompen

De pomp- en spuidebieten bij variant A1 met vaste pompen zijn gebaseerd op de volgende uitgangspunten [ref. 35.]:

- inbouw van pompen in zes spuikokers. De resterende spuibreedte bij Den Oever is hierdoor 108 m (in plaats van 180 m in de referentiesituatie);
- een totale pompcapaciteit van 538 m³/s.

5.3.2. Uithijsbare pompen

De pomp- en spuidebieten bij variant B1/C1 met uithijsbare pompen zijn gebaseerd op de volgende uitgangspunten [ref. 35.]:

- de huidige spuibreedte bij Den Oever (180 m) is ook beschikbaar als uithijsbare pompen zijn geïnstalleerd;
- een totale pompcapaciteit van 414 m³/s.

De pomp- en spuidebieten bij variant D1 met uithijsbare pompen zijn gebaseerd op de volgende uitgangspunten [ref. 35.]:

- de huidige spuibreedte bij Den Oever (180 m) is ook beschikbaar als uithijsbare pompen zijn geïnstalleerd;
- een totale pompcapaciteit van 445 m³/s.

Omdat de pomp- en spuidebieten van variant D1 nauwelijks verschillen van variant B1/C1, is de effectbeschrijving van variant B1/C1 is daarom ook representatief voor variant D1.

6. EFFECTEN OP SPUI- EN POMPDEBIETEN

6.1. Autonome ontwikkeling

Voor de effectbeoordeling is het van belang om inzicht te hebben in de bestaande situatie en de autonome ontwikkeling. Inzicht in de autonome ontwikkeling is van belang, zodat de effecten van het aanbrengen van pompen hier tegen afgezet kunnen worden. Bovendien kunnen hiermee de cumulatieve effecten van de autonome ontwikkelingen in combinatie met het aanbrengen van pompen bepaald worden.

Voor de effectbepaling en de autonome ontwikkeling zijn de toename van neerslag en verdamping, IJsselafoer en zeespiegelstijging als gevolg van klimaatverandering van belang. Deze veranderingen hebben op hun beurt effect op de spuihoeveelheden bij Den Oever en Kornwerderzand.

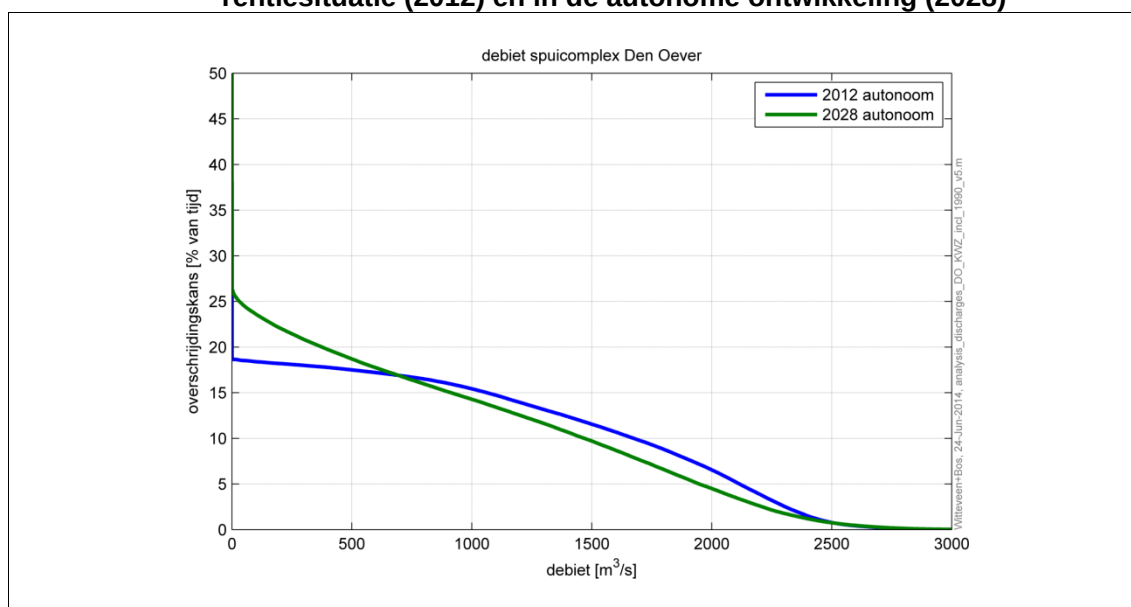
De autonome ontwikkeling van de overschrijdingskans van de spuidebieten in de spuicomplexen van Den Oever en Kornwerderzand wordt getoond in respectievelijk afbeelding 6.1 en afbeelding 6.2. De debieten zijn gebaseerd op de modelresultaten van het Sobek-model van het IJsselmeer [ref. 35.]. Het blijkt dat de spui frequentie inderdaad toeneemt (vaker open, bijvoorbeeld bij Den Oever van 19 % naar 27 %) en dat de gemiddelde hoeveelheid die wordt gespuid afneemt bij beide spuicomplexen (bijvoorbeeld bij Den Oever wordt 10 % van de tijd nog maar 1.480 m³/s in plaats van 1.690 m³/s gespuid).

De spuihoeveelheden veranderen, doordat het spui venster korter wordt. Het spui venster is de tijd waarin de waterstand aan de IJsselmeerzijde van de spuicomplexen hoger is dan aan de Waddenzeezijde en er onder vrij verval water van het IJsselmeer naar de Waddenzee kan stromen, zie afbeelding 6.3. Door zeespiegelstijging wordt deze tijd korter en het verval wordt kleiner, zodat er in een gemiddeld spui venster minder water gespuid kan worden. Door zeespiegelstijging neemt de spuicapaciteit af, doordat het verval over de spuicomplexen kleiner wordt.

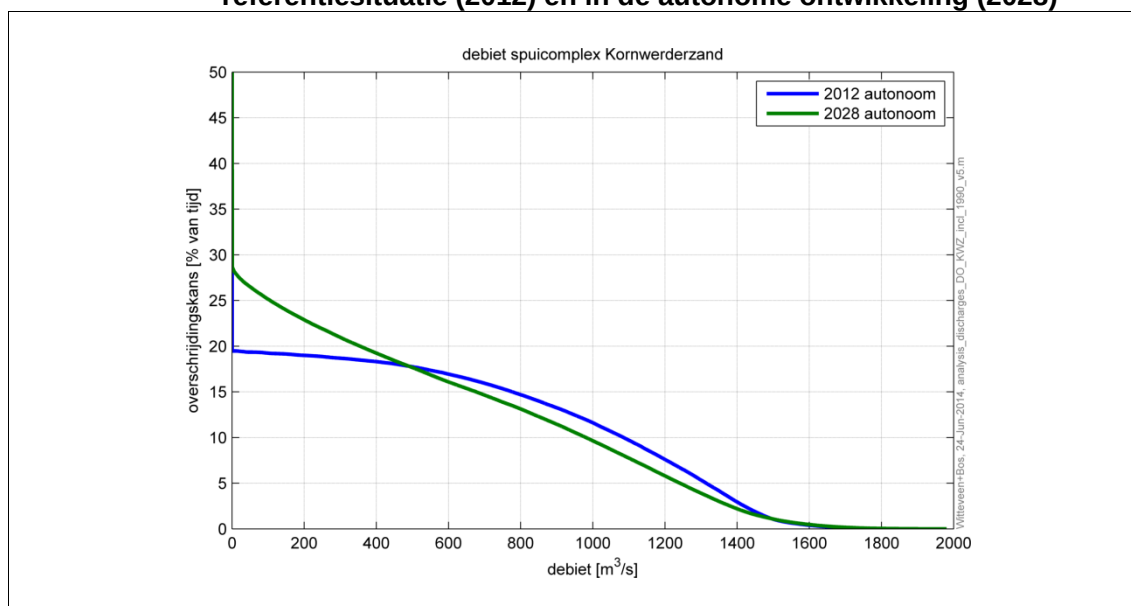
Het resultaat hiervan is dat er (zonder ingrepen) in de toekomst vaker gespuid moet worden. In 2012 wordt gemiddeld 19 % van de tijd gespuid bij Den Oever. In 2028 zal dit 27 % van de tijd nodig zijn bij Den Oever op basis van de modelberekeningen. Een vergelijkbare toename van de overschrijdingskans is ook zichtbaar bij Kornwerderzand (afbeelding 6.2): 20 % van de tijd in 2012 toenemend tot 28 % van de tijd in 2028.

De autonome ontwikkeling van de spuidebieten bij Den Oever en Kornwerderzand is ook gevisualiseerd in bijlage II. Bijlage II bevat afbeeldingen van tijdreeksen van het cumulatieve volume door de spuicomplexen Den Oever en Kornwerderzand.

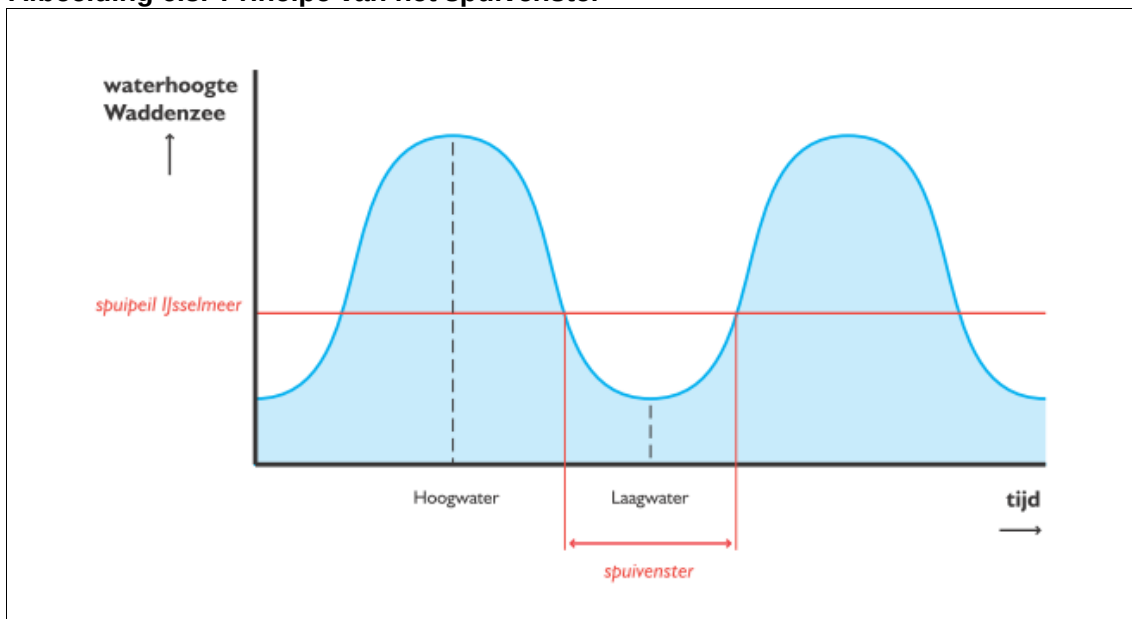
Afbeelding 6.1. Overschrijdingskans van debiet spuicomplex Den Oever in de referentiesituatie (2012) en in de autonome ontwikkeling (2028)



Afbeelding 6.2. Overschrijdingskans van debiet spuicomplex Kornwerderzand in de referentiesituatie (2012) en in de autonome ontwikkeling (2028)



Afbeelding 6.3. Principe van het spuivenster



6.2. Effecten van inzet van pompen

De pompvarianten zijn wat betreft waterhuishouding te verdelen in 2 duidelijk verschillende groepen: vaste pompen (variant A1) en uithijsbare pompen (varianten B1/C1/D1). De pompen worden ingebouwd in het spuicomplex bij Den Oever. Dit zal leiden tot een andere verdeling over de tijd van de debieten bij beide spuicomplexen en tot een andere verdeling van de debieten over de spuicomplexen. De effecten van vaste pompen zullen verschillen met die van de uithijsbare pompen omdat de vaste pompen in plaats komen van een deel van de spuicapaciteit, terwijl de uithijsbare pompen alleen worden ingezet buiten het spuivenster. Om die reden is de benodigde pompcapaciteit van vaste pompen groter dan van uithijsbare pompen.

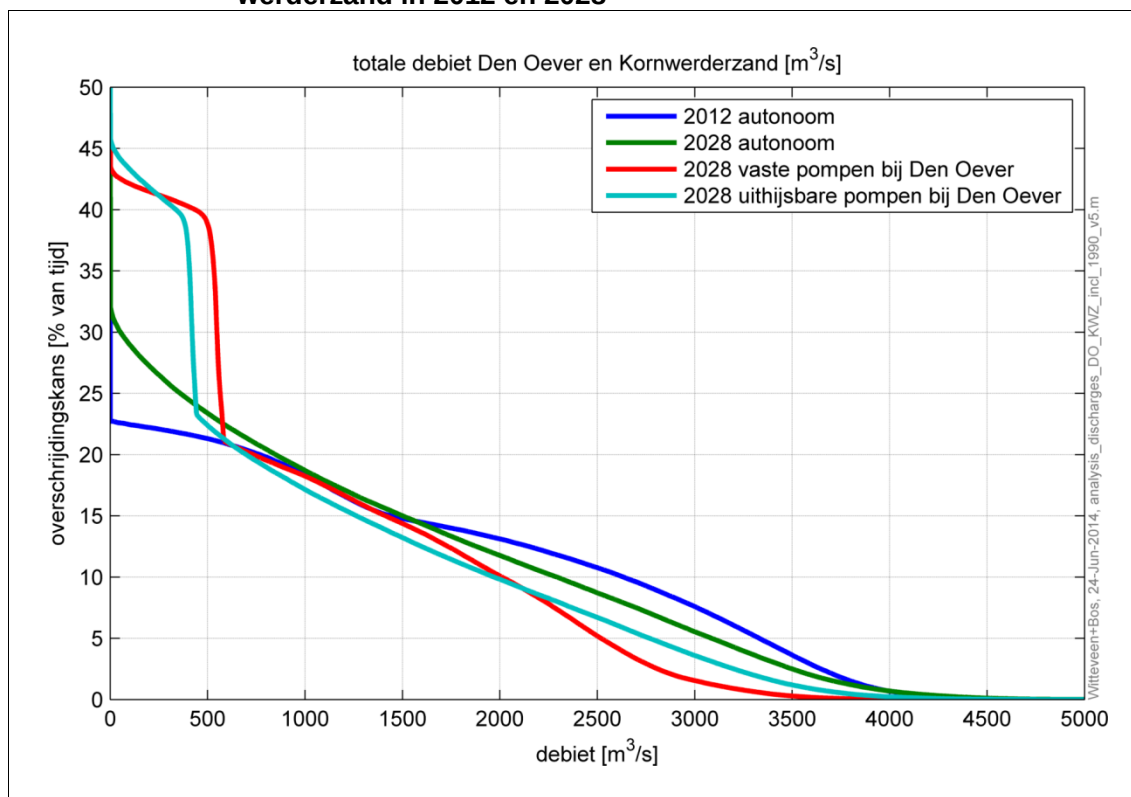
Een van de effecten van de inzet van pompen is dat er vaker water zal worden geloosd (spuien en pompen) bij Den Oever en Kornwerderzand, zie de overschrijdingskans van het totale debiet bij Den Oever en Kornwerderzand in afbeelding 6.4. Het percentage van de tijd dat er water afgevoerd wordt, neemt voor de variant met uithijsbare pompen bijvoorbeeld toe van 31 % in de referentiesituatie in 2028 naar 46 % met uithijsbare pompen in 2028 en 43 % bij vaste pompen in 2028. Door inzet van pompen kan er minder hard gespuid te worden (zie afname debieten bij een overschrijdingskans tussen 0 % en 15 %), omdat het IJsselmeerpeil bij de pompvarianten beter beheerst kan worden en daardoor lager is dan in de situatie zonder pompen in 2028. Door het lagere IJsselmeerpeil is het verval bij de spuicomplexen kleiner waardoor de spuidebieten kleiner zijn dan in de situatie zonder pompen in 2028.

In Den Oever en Kornwerderzand wordt in 2012 elk minder dan 20 % van tijd gespuid en gezamenlijk 23 % van de tijd. Reden hiervan is dat er een faseverschil is tussen het getij bij Den Oever en Kornwerderzand. Het spuivenster is hierdoor niet op hetzelfde moment bij beide locaties.

De effecten van de inzet van pompen op de spui- en pompdebieten bij Den Oever en Kornwerderzand is ook gepresenteerd in bijlage II. Bijlage II bevat afbeeldingen van tijd-

reeksen van het cumulatieve volume door de spuicomplexen Den Oever en Kornwerderzand.

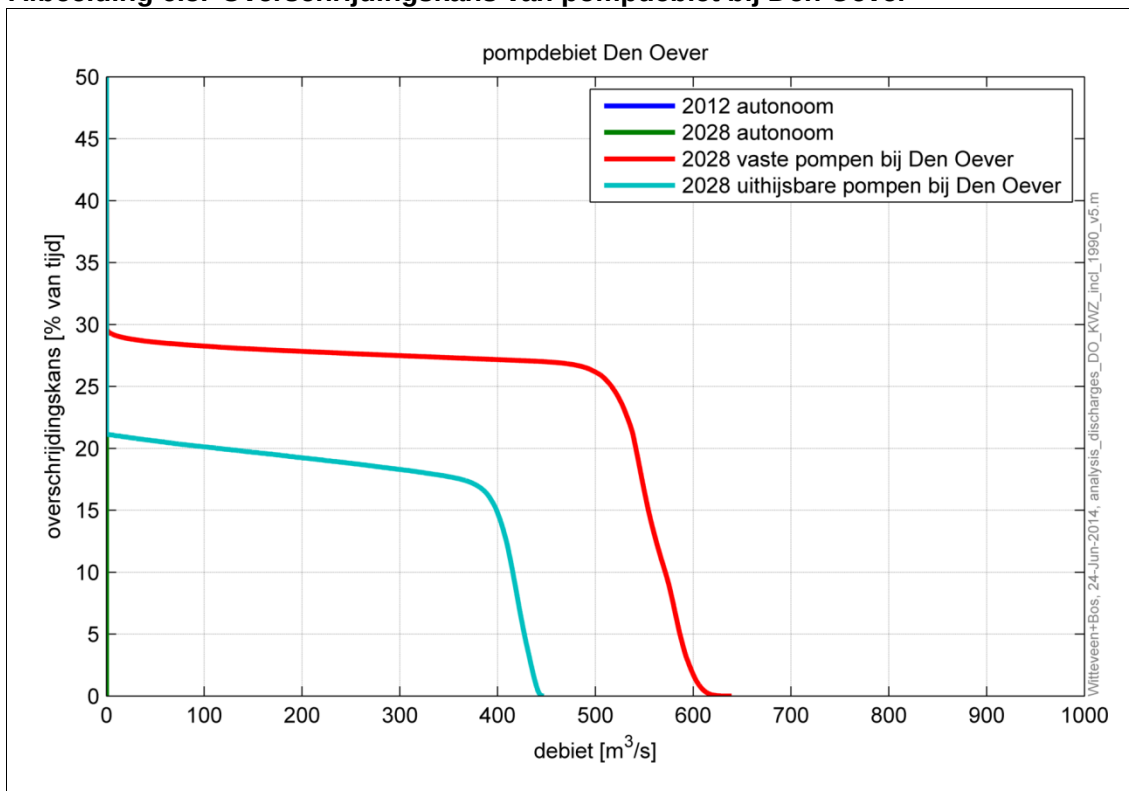
Afbeelding 6.4. Overschrijdingskans van het totale debiet bij Den Oever en Kornwerderzand in 2012 en 2028



6.2.1. Den Oever

Vaste pompen zullen vaker ingezet moeten worden dan uithijsbare pompen. Ook zijn de pompdebieten bij vaste pompen hoger dan bij uithijsbare pompen. Dit is zichtbaar in afbeelding 6.5. Reden is dat bij vaste pompen de resterende spuicapaciteit kleiner is dan bij uithijsbare pompen.

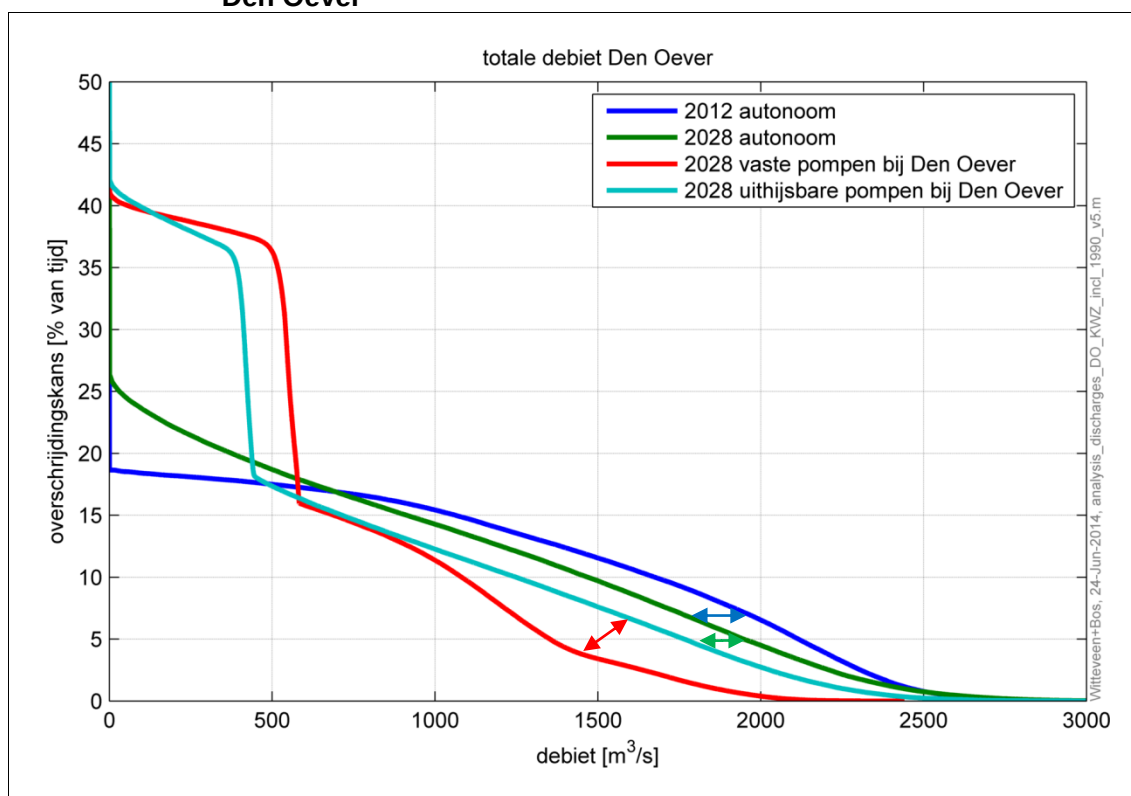
Afbeelding 6.5. Overschrijdingskans van pompdebiet bij Den Oever



Door de inzet van pompen neemt het maximum debiet bij Den Oever af. Dit is zichtbaar in afbeelding 6.6. Bij een overschrijdingskans die kleiner is dan ongeveer 15 % is het volgende zichtbaar:

- autonoom neemt de spuicapaciteit af (horizontale verschil tussen blauwe en groene lijnen) (blauwe pijl);
- bij uithijsbare pompen is de spuicapaciteit kleiner dan autonoom, dit komt doordat het peil van het IJsselmeer lager is bij inzet van pompen dan in de autonome situatie zonder pompen (groene pijl);
- bij vaste pompen is de spuicapaciteit nog kleiner dan bij uithijsbare pompen. Dit komt doordat bij vaste pompen minder spuiokers beschikbaar zijn om te spuien (rode pijl).

Abbeelding 6.6. Overschrijdingskans van het totale debiet (pompen en spuien) bij Den Oever



In de tijdreeksen van debieten bij Den Oever kwam naar voren dat ook de maximale spui-debieten afnemen bij inzet van pompen. Dit is te verklaren door afname van het IJssel-meerpeil. De autonome ontwikkeling en de effecten van de pompvarianten zijn ook terug te vinden in de onderstaande tabellen: tabel 6.1, tabel 6.2 en tabel 6.3. De middelste kolom toont het percentage van de tijd dat er gespuid en/of gepompt wordt bij Den Oever. De rechterkolom toont het volume gedurende een periode van 14 maanden. Het totale volume met pompen neemt toe ten opzichte van de autonome ontwikkeling omdat er nu meer bij Den Oever wordt afgevoerd en minder bij Kornwerderzand.

Tabel 6.1. Autonome ontwikkeling en effecten op spui-frequentie en spui-volume bij Den Oever

situatie	duur spuien (% tijd)	spuivolume (*10 ⁹ m ³)
referentie 2012	19 %	11,3
2028 autonome ontwikkeling	27 %	11,0
2028 vaste pompen	18 %	5,5
2028 uithijsbare pompen	24 %	8,6

Tabel 6.2. Pompfrequentie en pompvolume voor vaste en uithijsbare pompen bij Den Oever

situatie	duur pompen (% tijd)	pompvolume (*10 ⁹ m ³)
referentie 2012	-	-
2028 autonome ontwikkeling	-	-
2028 vaste pompen	30 %	6,7
2028 uithijsbare pompen	21 %	3,8

Tabel 6.3. Totale duur waterverplaatsing en volume bij Den Oever; referentie, autonome ontwikkeling en effecten vaste en uithijsbare pompen

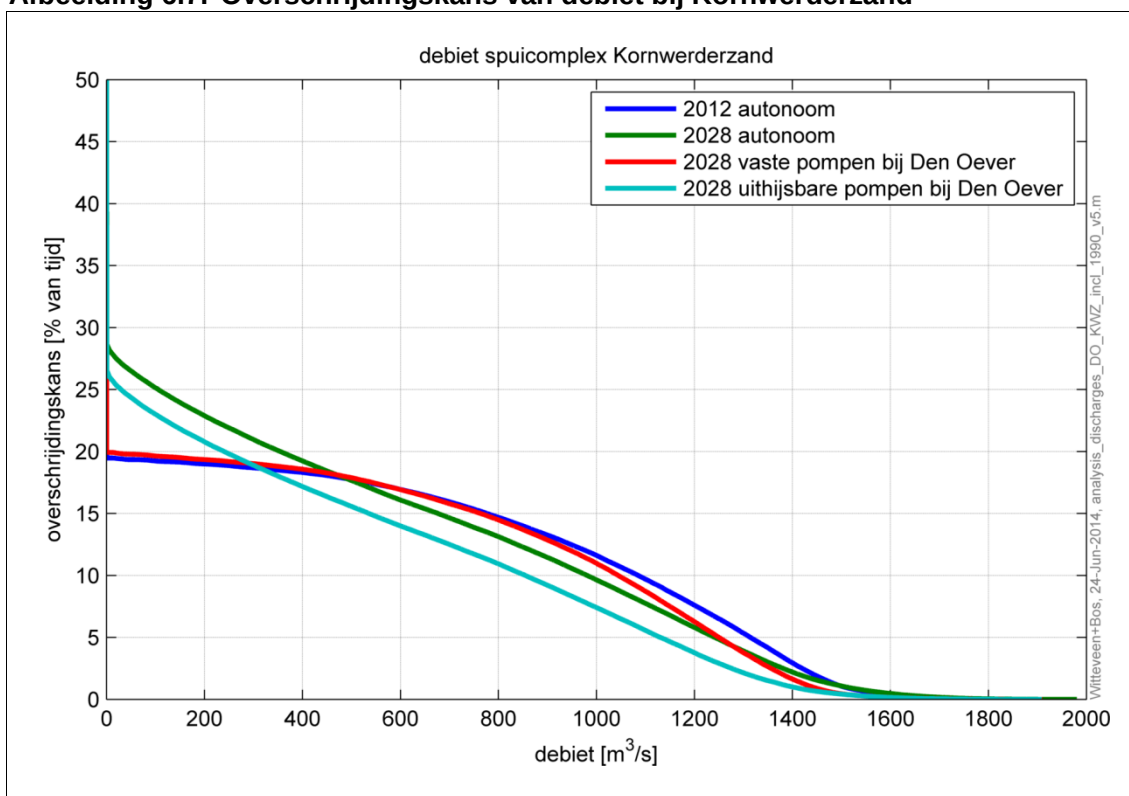
situatie	duur waterverplaatsing (% tijd)	volume (*10 ⁹ m ³)
referentie 2012	19 %	11,3
2028 autonome ontwikkeling	27 %	11,0
2028 vaste pompen	41 %	12,2
2028 uithijsbare pompen	42 %	12,4

6.2.2. Kornwerderzand

Ook de debieten bij spuicomplex Kornwerderzand worden beïnvloed door de pompen bij Den Oever. Dit is zichtbaar in afbeelding 6.7. De volgende zaken vallen op:

- autonoom wordt vaker gespuid en is de spuicapaciteit kleiner;
- vaste pompen bij Den Oever zorgen ervoor dat spuicomplex Kornwerderzand minder vaak hoeft te worden ingezet dan in de autonome ontwikkeling in 2028. Bij een overschrijdingskans tussen 5 en 18 % is het debiet bij Kornwerderzand bij vaste pompen in Den Oever iets hoger dan in de autonome ontwikkeling in 2028 (vergelijk rode en groene lijn);
- bij uithijsbare pompen bij Den Oever hoeft er minder vaak gespuid te worden bij Kornwerderzand dan in de situatie zonder pompen. Ook nemen de spuicapaciteit bij Kornwerderzand af doordat het IJsselmeerpeil door de inzet van pompen lager is dan in de situatie zonder pompen.

Afbeelding 6.7. Overschrijdingskans van debiet bij Kornwerderzand



6.3. Samenvatting spui- en pompdebieten

De autonome ontwikkeling van de spuidebieten bij Den Oever en Kornwerderzand toont dat in 2028 door klimaatverandering vaker gespuid moet worden dan in 2012 en dat de

spuicapaciteit afneemt door zeespiegelstijging. In 2012 wordt gemiddeld 19 % van de tijd gespuid bij Den Oever. In 2028 zal dit volgens de modelresultaten in 27 % van de tijd nodig zijn bij Den Oever. Bij Kornwerderzand is dat 20 % van de tijd in 2012 toenemend tot 28 % van de tijd in 2028.

Pompen bij Den Oever hebben de volgende effecten op de spui- en pompdebieten:

- er zal in 2028 vaker worden geloosd bij Den Oever en Kornwerderzand dan in de situatie zonder pompen;
- vaste pompen bij Den Oever zullen vaker ingezet moeten worden dan uithijsbare pompen. Ook zijn de pompdebieten bij vaste pompen hoger dan bij uithijsbare pompen;
- het maximale debiet bij Den Oever neemt af bij de inzet van pompen. Dit komt doordat het water meer gespreid over de tijd wordt afgevoerd;
- met pompen wordt er jaargemiddeld meer water via Den Oever afgevoerd en minder via Kornwerderzand;
- vaste pompen bij Den Oever zorgen ervoor dat spuicomplex Kornwerderzand minder vaak hoeft te worden ingezet dan in de autonome ontwikkeling in 2028. Bij een overschrijdingskans tussen 5 en 18 % is het debiet bij Kornwerderzand bij vaste pompen in Den Oever hoger dan in de autonome ontwikkeling in 2028;
- bij uithijsbare pompen bij Den Oever hoeft er minder vaak gespuid te worden bij Kornwerderzand dan in de situatie zonder pompen. Ook nemen de spuicapaciteit bij Kornwerderzand af doordat het IJsselmeerpeil door de inzet van pompen lager is dan in de situatie zonder pompen.

6.4. Doorkijk tot 2050

Pompcapaciteit

De verschillen tussen de benodigde pompcapaciteit van vaste en uithijsbare pompen zijn voor 2050 kleiner dan de verschillen in 2028, zie [ref. 35.]. De oorzaak hiervan is het gecombineerde effect van het afnemen van de tijd dat er gespuid kan worden en het afnemen van het gerealiseerde spuidebiet als gevolg van het verminderen van het verval. Het spui-venster neemt af als gevolg van de zeespiegelstijging. Het verval neemt af als gevolg van zowel zeespiegelstijging als de inzet van de pompen.

Spuicapaciteit

De spuibreedte en hiermee de spuicapaciteit van variant A1 (vaste pompen) zal verder afnemen doordat extra vaste pompen ingebouwd moeten worden in de periode tot 2050.

De spuicapaciteit bij zowel variant A1 als variant B1/C1 zal afnemen door de afname van het verval door verdere zeespiegelstijging.

Spui- en pompdebieten

De effecten die voor zichtjaar 2028 gekwantificeerd en beschreven zijn, zullen in de periode tot 2050 in versterkte mate optreden, omdat de spuicapaciteit zal afnemen en de pompcapaciteit zal toenemen (door inbouw van extra pompen).

De verschillen tussen variant A1 (vaste pompen) en variant B1/C1 (uithijsbare pompen) zullen kleiner worden, omdat bij variant B1/C1 kan minder worden gespuid terwijl bij variant A1 er langer (met grotere capaciteit) gepompt kan worden.

6.5. Gevoeligheid voor uitgangspunten

Klimaatscenario

Het hanteren van een ander klimaatscenario dan klimaatscenario G van KNMI uit 2006 heeft de volgende effecten op de spui- en pompdebieten:

- versnelde zeespiegelstijging zal ertoe leiden dat pompen vaker zullen ingezet worden. Daarnaast zullen de spuidebieten afnemen doordat de spuicapaciteit afneemt als gevolg van afname van het verval;
- tragere zeespiegelstijging zal ertoe leiden dat pompen minder vaak zullen ingezet worden. Daarnaast zullen de spuidebieten minder hard afnemen doordat de spuicapaciteit afneemt als gevolg van kleinere afname van het verval dan in het geval van klimaatscenario G van KNMI uit 2006;
- toename van neerslag en afvoer zal ertoe leiden dat de spui- en pompdebieten toenemen.

Verdieping Boontjes

Het wel of niet meenemen van de verdieping van de Boontjes heeft geen invloed op de berekende spui- en pompdebieten. De reden hiervan is dat de waterstand op de Waddenzee niet beïnvloed zal worden door de drempelverwijdering in de vaargeul van de Boontjes volgens [ref. 12.].

7. EFFECTEN OP WATERKWALITEIT WADDENZEE

7.1. Introductie

Het inzetten van pompen in de Afsluitdijk kan gevolgen hebben voor de waterkwaliteit in de Waddenzee doordat de lozing van het IJsselmeerwater in de Waddenzee anders verdeeld is over ruimte en tijd. Het IJsselmeerwater dat op de Waddenzee geloosd wordt, heeft een andere samenstelling dan het Waddenzeewater. Belangrijke aspecten voor de waterkwaliteit die daardoor kunnen worden beïnvloed zijn het zoutgehalte (saliniteit), de nutriëntenbelasting en de troebelheid van het water in de Waddenzee. Onder andere de variatie in de tijd en de minimum en maximum waarden van deze aspecten (dynamiek) zijn belangrijk bij de beoordeling van de effecten op de waterkwaliteit van de Waddenzee.

Om de effecten van het inzetten van pompen te beoordelen wordt eerst gekeken hoe de waterkwaliteit op de Waddenzee zich tot het zichtjaar 2028 ontwikkelt zonder ingrepen in het systeem, de autonome ontwikkeling. De autonome ontwikkeling wordt onder invloed van klimaatverandering bepaald door zeespiegelstijging, een ander neerslagpatroon (intensiteit, hoeveelheid, spreiding door het jaar) en daaruit resulterende andere rivierafvoeren naar het IJsselmeer. Deze veranderingen hebben op hun beurt effect op de spuihoeveelheden bij Den Oever en Kornwerderzand. Voor de beoordeling van de autonome ontwikkeling wordt de ontwikkeling van de waterkwaliteit in de Waddenzee in de periode van 2012 tot 2028 beschouwd door de situatie in 2012 te vergelijken met de verwachte situatie in 2028.

Het inzetten van pompen zal (mogelijk) leiden tot extra effecten bovenop de autonome ontwikkeling in 2028. De effecten worden beoordeeld door de situatie met pompen in 2028 te vergelijken met de autonome ontwikkeling in 2028.

Voor zowel de autonome ontwikkeling als de effecten van de inzet van pompen worden een zomer- en een winterperiode van 15 dagen beschouwd. In de winter zal er zowel gespuid als gepompt worden. In de zomer zal voornamelijk gespuid worden. Door voor beiden een representatieve periode te beschouwen, kan een beeld gegeven worden van de effecten gedurende het gehele jaar.

Hieronder wordt de waterkwaliteit beschreven op basis van de aspecten saliniteit, nutriëntengehalte en vertroebeling van het water. Per aspect is zowel de autonome ontwikkeling als de effecten van het inzetten van pompen beschouwd.

Gevoeligheid waterkwaliteit voor autonome morfologische ontwikkeling

Voor de beoordeling van de autonome ontwikkeling is uitgegaan van een zeespiegelstijging van 13,2 cm in 2028 [ref. 13.]. Dit heeft gevolgen voor de lengte van het spuivenster en daarmee voor het spuiregime en -hoeveelheden. Dit is berekend met Sobek en de uitvoer van deze simulaties is gebruikt als invoer voor de huidige 3D-modellering met TRIWAQ.

Het is waarschijnlijk dat er veranderingen in de bodemligging van de Waddenzee optreden tussen 2012 en 2028 doordat de hydrodynamische belasting (golven, stroming) verandert onder invloed van klimaatverandering en zeespiegelstijging. Een andere bodemligging kan op zijn beurt weer effect hebben op de hydrodynamica van de gehele Waddenzee.

Om een beeld te krijgen van de gevoeligheid van de waterkwaliteit voor de autonome morfologische ontwikkeling zijn twee situaties beschouwd: één zonder bodemverandering en één met meestijgende bodem (gelijk opgaand met de zeespiegelstijging). Daaruit volgt een

bandbreedte voor de effecten van bodemveranderingen op de autonome ontwikkeling van de waterkwaliteit van de Waddenzee.

Toelichting op effectbepaling

Door het inzetten van pompen verandert het regime waarmee water naar de Waddenzee wordt geloosd (zie hoofdstuk 6). In de huidige situatie kan alleen worden gespuid met laagwater op de Waddenzee en treden er dus periodiek hoge debieten op. Pompen worden voornamelijk ingezet als niet gespuid kan worden (met hoogwater op de Waddenzee). Als pompen ingebouwd worden in de spuikokers zal het debiet meer verspreid worden over de tijd en de piekdebieten zullen lager zijn.

Daarnaast worden alleen pompen geplaatst bij Den Oever, waardoor er een herverdeling zal zijn van de debieten over de complexen bij Den Oever en Kornwerderzand. De gemiddelde debieten bij Den Oever zullen toenemen (als zowel gespuid en gepompt wordt) en de debieten en spui frequentie bij Kornwerderzand zullen afnemen.

Voor de effectbepaling van de inzet van pompen in de Afsluitdijk zijn modelsimulaties uitgevoerd voor de variant met vaste pompen (A1) en de variant met uithijsbare pompen (B1/C1). De effecten van de pompen worden vergeleken met de autonome ontwikkeling in 2028, zoals beschreven in de vorige paragraaf.

Er zijn in principe simulaties uitgevoerd voor een zomer- en een winterperiode voor beide varianten. Omdat er in de zomer bijna niet wordt gepompt, zullen er bij de variant met uithijsbare pompen geen effecten in de zomer optreden ten opzichte van de autonome ontwikkeling. De spuicapaciteit blijft in de zomer ongewijzigd omdat de pompen uithijsbaar zijn. De resultaten voor uithijsbare pompen zijn dus in de zomer gelijk aan de resultaten van de autonome ontwikkeling.

De simulaties voor de effectbepaling van de varianten zijn uitgevoerd met een vaste (= niet meestijgende) bodem. De hieronder beschreven effecten zijn daarom bepaald ten opzichte van de autonome ontwikkeling in 2028 met vaste bodem.

Variant D1 - uithijsbare pompen in een nieuwe constructie bij Den Oever aan de IJsselmeerzijde

De effecten van variant D1 op de waterkwaliteit zullen niet of nauwelijks verschillen van de variant B1/C1, omdat de pomp- en spuidebieten nauwelijks verschillen van variant B1/C1. De effectbeschrijving van variant B1/C1 is daarom ook representatief voor variant D1.

7.2. Saliniteit Waddenzeewater

De ontwikkeling van de saliniteit wordt na overleg met ecologen beoordeeld aan de hand van de volgende twee indicatoren:

- gemiddelde saliniteit bij het wateroppervlak (ruimtelijk);
- overschrijdingskansen van saliniteit bij het wateroppervlak.

De gemiddelde saliniteit geeft een beeld van de verandering van de saliniteit in de gehele westelijke Waddenzee. Op verschillende locaties in de Waddenzee is de overschrijdingskans van de saliniteit bepaald: deze geeft aan hoe vaak een bepaalde waarde van de saliniteit overschreden wordt en biedt inzicht in de dynamiek gedurende de gesimuleerde periodes in de zomer en winter.

Voor de figuren met de overschrijdingskansen is een aantal locaties gekozen waar de veranderingen het sterkst zijn, zoals vastgesteld is aan de hand van de ruimtelijke figuren.

Gemiddelde saliniteit bij het wateroppervlak

Met behulp van overzichtskaarten kan de gemiddelde saliniteit bij het wateroppervlak in de Waddenzee ruimtelijk worden beschouwd. In afbeelding 7.1 is de tijdsgemiddelde saliniteit aan het wateroppervlak weergegeven voor de gehele Waddenzee voor een aantal cases voor een periode van 15 dagen. De bovenste afbeeldingen geven de absolute waarde van de saliniteit weer in de referentiesituatie (2012) en de 2^e rij afbeeldingen laten het verschil in gemiddelde saliniteit zien tussen de autonome ontwikkeling (met vaste bodem) en de referentiesituatie. De 3^e rij toont de effecten van vaste pompen ten opzichte van de autonome ontwikkeling in 2028. De onderste rij toont de effecten van uithijsbare pompen ten opzichte van de autonome ontwikkeling in 2028.

Saliniteit wordt weergegeven als 'parts per thousand' (ppt). Een saliniteit rond 0 ppt duidt op zoet water, terwijl waardes rond 30-35 ppt gebruikelijk zijn in bijvoorbeeld de Noordzee. Er is te zien dat in de Waddenzee een sterke ruimtelijke variatie van de saliniteit bestaat. In de referentiesituatie heeft het water op de Waddenzee dichtbij Den Oever en Kornwerderzand in de winter een lage saliniteit door de lozingen van zoet IJsselmeerwater. In de zomer is het water daarentegen veel minder zoet, omdat er veel minder (zoet water) gespuid wordt naar de Waddenzee. Richting de Noordzee neemt de saliniteit sterk toe.

Uit deze afbeeldingen kan een aantal conclusies worden getrokken wat betreft de autonome ontwikkeling, met vaste bodem:

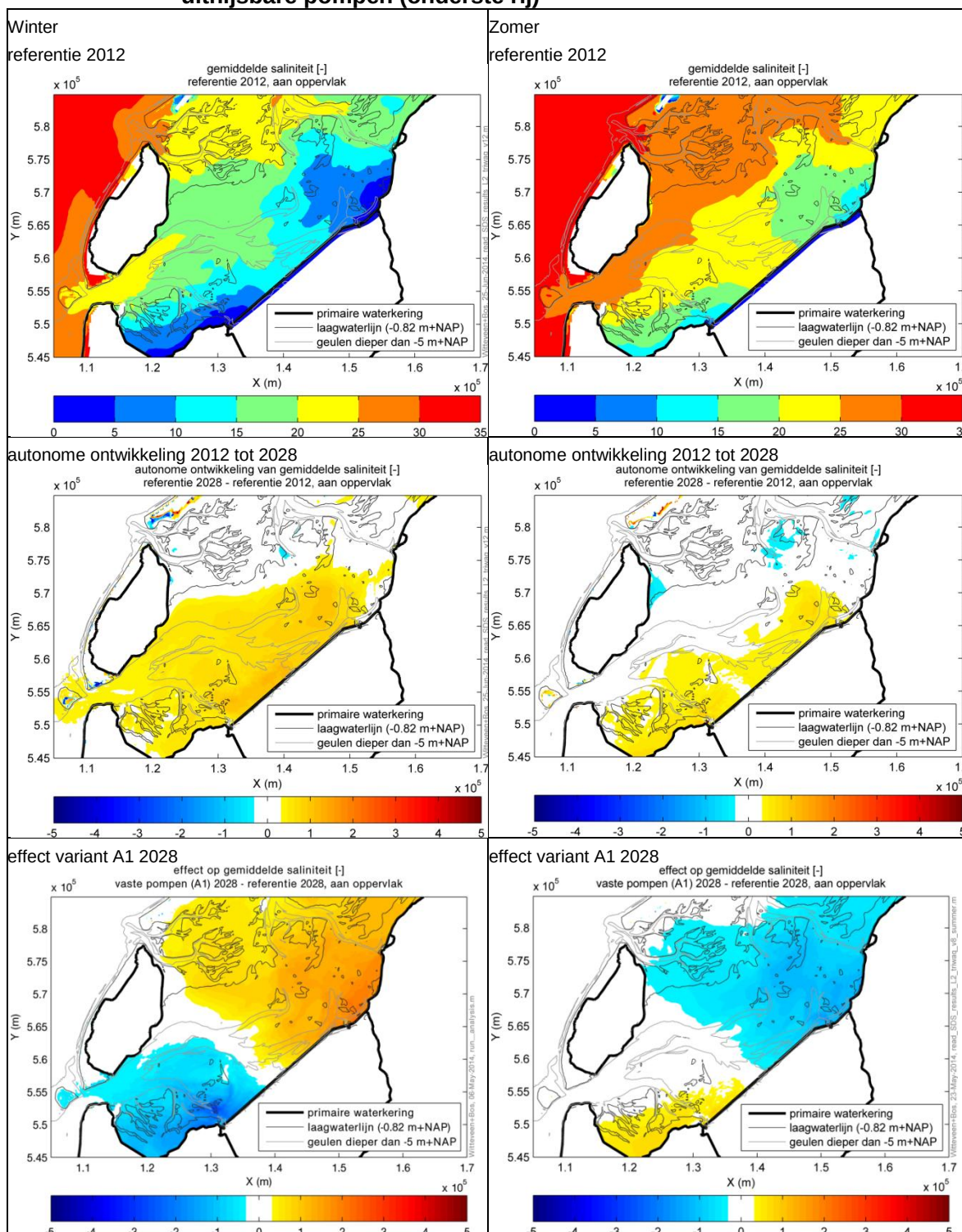
- in de winter neemt de saliniteit vrijwel overal in de Waddenzee toe met maximaal 2-3 ppt. Dit heeft te maken met de toegenomen getij-indringing door de zeespiegelstijging, waardoor er meer zout water de Waddenzee instroomt;
- in de zomer neemt de saliniteit ten westen van Kornwerderzand licht toe, terwijl de saliniteit ten noorden van Kornwerderzand juist licht afneemt. Het feit dat de veranderingen kleiner zijn in de zomer is te verklaren doordat er in de zomer minder gespuid wordt. Hierdoor is het saliniteitsverschil tussen de Waddenzee en de Noordzee in deze periode lager dan in periodes waarin meer gespuid wordt.

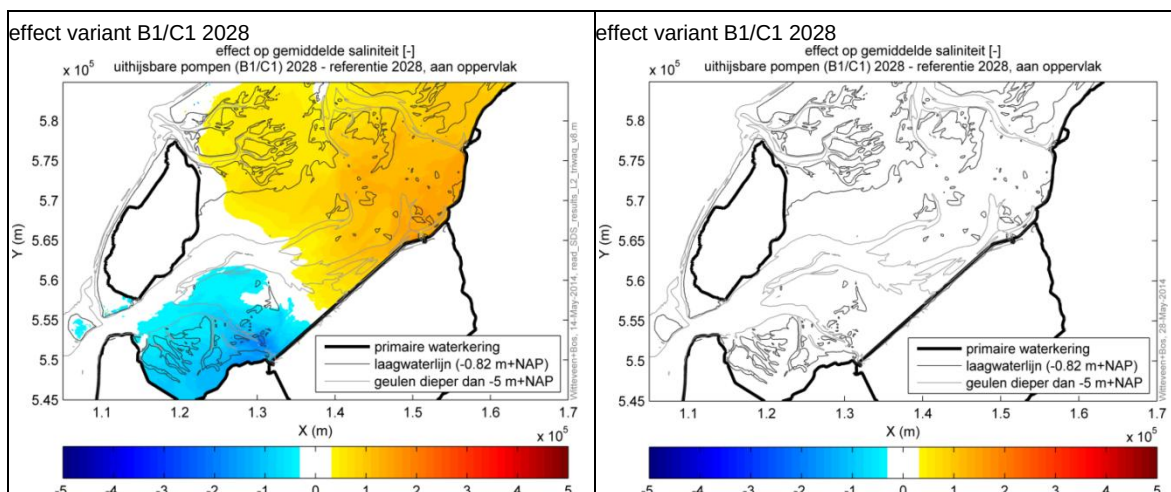
De volgende effecten zijn zichtbaar:

- een duidelijke herverdeling van de saliniteit rond Den Oever en Kornwerderzand voor beide varianten in de zomer en winter (behalve in de zomer bij variant B1/C1 met uithijsbare pompen);
- in de winterperiode neemt de saliniteit rond en ten noorden van Kornwerderzand toe met maximaal 2-3 ppt en neemt met maximaal 2-3 ppt af bij Den Oever ten opzichte van de autonome ontwikkeling. Dit is te verklaren doordat er bij Den Oever meer zoet water de Waddenzee in wordt gepompt en dat er minder wordt gespuid bij Kornwerderzand;
- in de zomerperiode is het omgekeerde effect te zien bij variant A1. De saliniteit rond Kornwerderzand neemt af met 1 ppt en rond Den Oever toe met 0,5 tot 1 ppt. Dit komt doordat er in de zomer voornamelijk wordt gespuid en de spuicapaciteit (onder vrij verval) bij Den Oever is afgenomen, doordat vaste pompen zijn ingebouwd in een aantal spuikokers. Spuicomplex Kornwerderzand moet dan vaker ingezet worden wat leidt tot een afname van de saliniteit bij Kornwerderzand.

De effecten van de variant met vaste pompen (A1) zijn over het algemeen groter dan die van de variant met uithijsbare pompen (B1/C1).

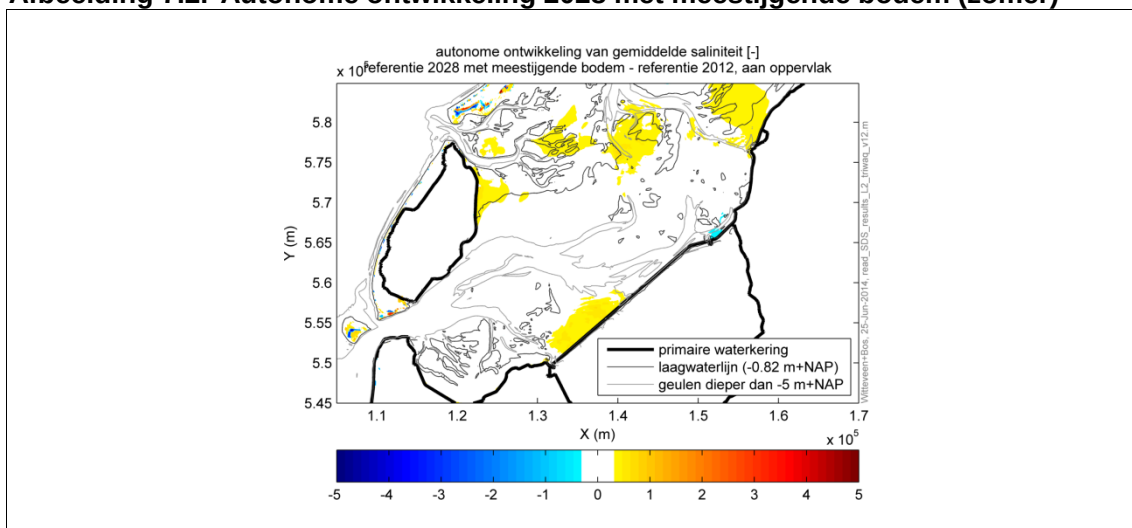
Afbeelding 7.1. Gemiddelde saliniteit in de referentiesituatie in 2012 (bovenste rij); de autonome ontwikkeling in 2028 ten opzichte van referentiesituatie (2^e rij) in winter en zomer, de effecten van vaste pompen (3^e rij) ten opzichte van de autonome ontwikkeling in 2028 en de effecten van uithijsbare pompen (onderste rij)





De autonome ontwikkeling met een meestijgende bodem laat zeer weinig veranderingen zien in de saliniteit ten opzichte van de referentiesituatie 2012, zie afbeelding 7.2. Dit geldt zowel voor de zomer als voor de winter. De ondergrens van de te verwachten autonome ontwikkeling van de (gemiddelde) saliniteit is dan ook vrijwel gelijk aan de referentiesituatie van 2012.

Afbeelding 7.2. Autonome ontwikkeling 2028 met meestijgende bodem (zomer)



Overschrijdingskansen van saliniteit bij het wateroppervlak

Ruimtelijke afbeeldingen laten zien dat de gemiddelde saliniteit op vrijwel de gehele westelijke Waddenzee zal veranderen onder invloed van de autonome ontwikkeling. Om ook veranderingen van de dynamiek te kunnen waarnemen is op een aantal locaties de overschrijdingskansen uitgezet tegen de saliniteit op basis van een onderzochte periode van 15 dagen, zie afbeelding 7.3. Ook hier is te zien dat voor alle simulaties de saliniteit in de winter flink lager is dan in de zomer. De pijl geeft de dynamiek over een geheel jaar aan (winter en zomer), waarbij met de dynamiek het verschil tussen de maximum en de minimum concentratie over een geheel jaar wordt bedoeld.

Vooraf op de locatie Balgzand, ten westen van Den Oever, is een verschuiving zichtbaar in de autonome ontwikkeling ten opzichte van de referentiesituatie. Wanneer echter naar de

spreiding van de saliniteit over het gehele jaar wordt gekeken, is te zien dat de veranderingen in saliniteit klein zijn.

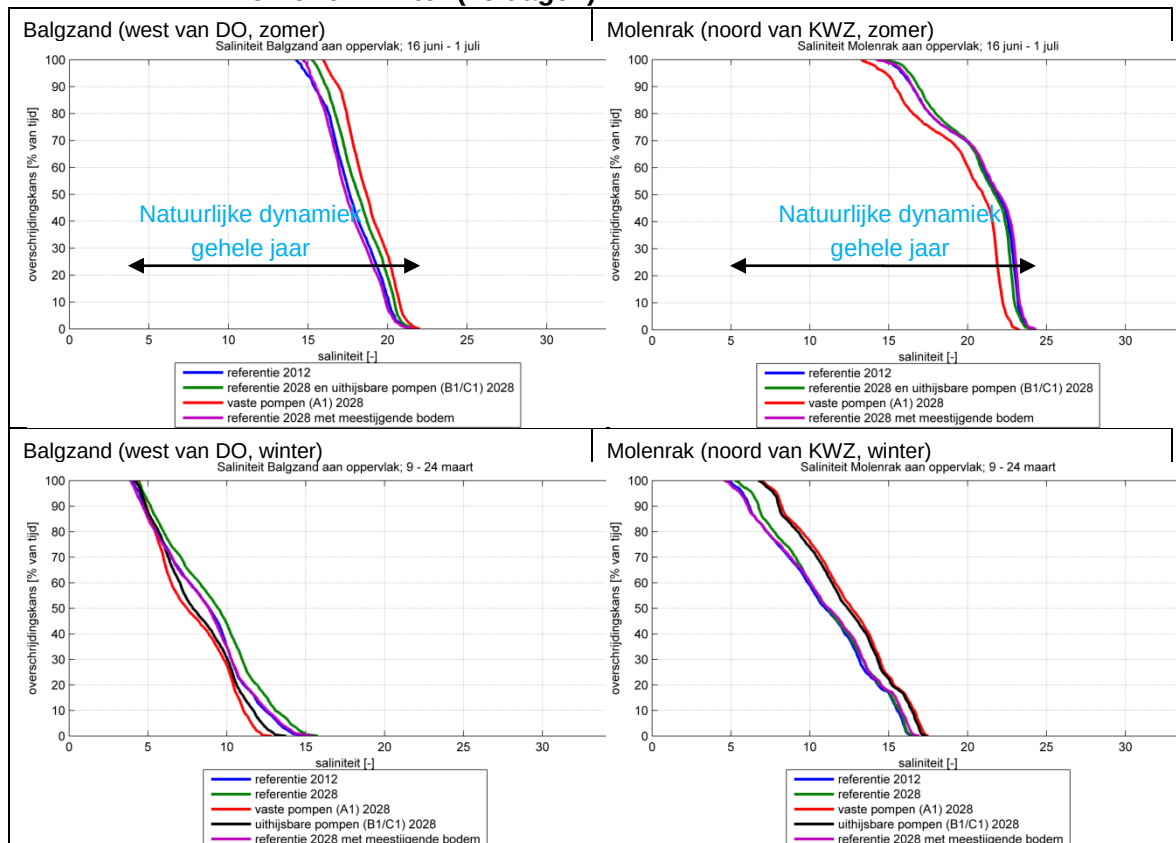
De beschreven effecten op de saliniteit zijn ook te zien in de overschrijdingskansen voor de saliniteit bij beide pompvarianten in afbeelding 7.3. Vaste en uithijsbare pompen leiden tot een verschuiving van de saliniteit van maximaal 2 ppt:

- de dynamiek over het jaar heen is groter (5 tot 25 ppt) dan de effecten van pompen op de saliniteit (orde 2 tot 3 ppt);
- bij vaste pompen neemt de dynamiek bij Balgzand voor vaste pompen iets toe (zomer zouter, winter zoeter);
- bij het Molenrak (~ 10 km ten noorden van Kornwerderzand) neemt de dynamiek bij vaste pompen juist af -zomer zoeter, winter zouter ten opzichte van de autonome ontwikkeling;
- bij uithijsbare pompen zijn de effecten alleen in de winter waarneembaar en zijn dan vergelijkbaar met vaste pompen.

De conclusie is dat de verandering van de saliniteit ten gevolge van pompen klein is ten opzichte van de dynamiek van de saliniteit gedurende het gehele jaar.

De conclusie is dat de autonome ontwikkeling van de saliniteit in de Waddenzee en de verandering van de saliniteit ten gevolge van pompen klein zijn ten opzichte van de natuurlijke dynamiek gedurende het jaar.

Afbeelding 7.3. Overschrijdingskansen saliniteit voor locaties Balgzand en Molenrak, zomer en winter (15 dagen)



7.3. Nutriëntenhuishouding

De samenstelling van het IJsselmeerwater dat naar de Waddenzee wordt gespuid en gepompt is anders dan die van het water op de Waddenzee - bijvoorbeeld wat betreft de aanwezige nutriënten en de troebelheid. Om te kunnen beoordelen in hoeverre dit doorwerkt op de autonome ontwikkeling van het natuurlijk systeem van de Waddenzee, is de concentratie IJsselmeerwater in de Waddenzee in de tijd berekend in het model. Het alleen analyseren van saliniteit is ontoereikend, omdat de saliniteit in de Waddenzee niet alleen beïnvloed wordt door de debieten bij Den Oever en Kornwerderzand, maar ook door de zoetwaterpluim van de Rijndelta die via de Noordzee aangevoerd wordt [ref. 1.] en [ref. 4.]. Net als voor de saliniteit wordt de autonome ontwikkeling beoordeeld aan de hand van de volgende twee indicatoren:

- gemiddeld gehalte IJsselmeerwater bij het wateroppervlak (ruimtelijk);
- overschrijdingskans van het gehalte IJsselmeerwater bij het wateroppervlak.

Reden om de gehalten IJsselmeerwater bij het wateroppervlak te beschouwen is omdat hier (in de verticale verdeling van de watersamenstelling) de grootste veranderingen plaatsvinden.

Gemiddelde concentratie IJsselmeerwater bij het wateroppervlak

Net als voor de saliniteit is de invloed van de spuicomplexen bij Den Oever en Kornwerderzand duidelijk te zien in de concentratie IJsselmeerwater op de Waddenzee in de referentiesituatie (afbeelding 7.4, boven). De concentraties zijn weergegeven van 0 tot 1, met concentratie 0 als er geen IJsselmeerwater aanwezig is en concentratie 1 als het water in de Waddenzee volledig uit IJsselmeerwater bestaat. In de zomer is het gehalte IJsselmeerwater een stuk lager dan in de winter, omdat er dan veel minder wordt gespuid.

Verder toont afbeelding 7.4 de autonome ontwikkeling van de gemiddelde concentratie IJsselmeerwater (2^e rij), de effecten van vaste pompen (3^e rij) en de effecten van uithijsbare pompen (onderste rij) ten opzichte van de autonome ontwikkeling in 2028.

De conclusies uit deze afbeeldingen (voor de situatie met vaste bodem) zijn vergelijkbaar met die voor de autonome ontwikkeling van de saliniteit:

- in de winter neemt de concentratie IJsselmeerwater vrijwel overal in de Waddenzee af met een maximum van ongeveer 0,1 (absolute afname van 10 %). Dit heeft te maken met de toegenomen getij-indringing door de zeespiegelstijging, waardoor er meer zout water de Waddenzee instroomt en de verblijftijd van het zoete IJsselmeerwater wordt verkort;
- in de zomer neemt de concentratie IJsselmeerwater nabij Den Oever en nabij Kornwerderzand licht af. Het feit dat de veranderingen kleiner zijn in de zomer is te verklaren doordat er in de zomer minder gespuid wordt.

De effecten op de concentratie IJsselmeerwater zijn vergelijkbaar met de effecten op de saliniteit:

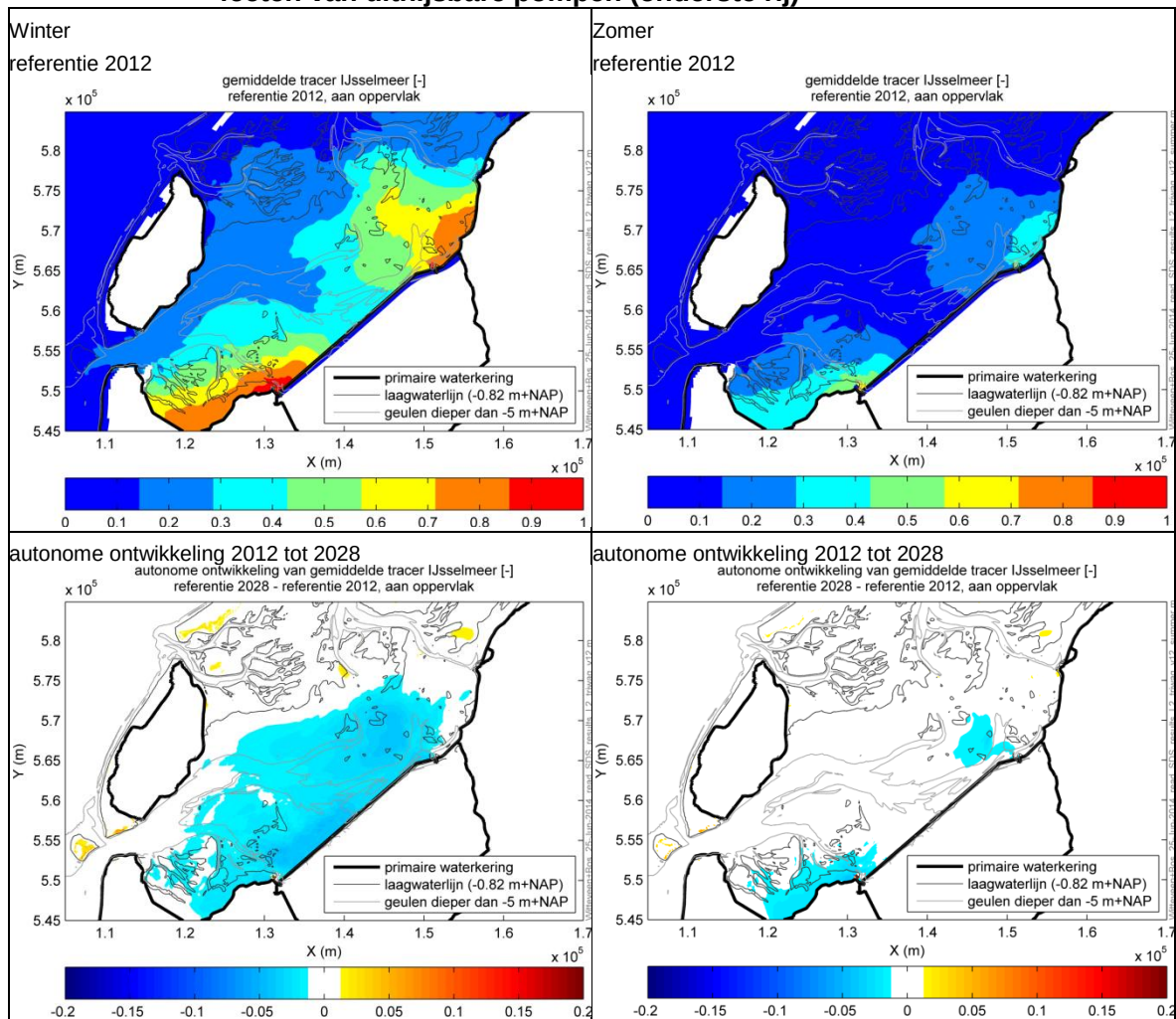
- de effecten van de varianten zijn groter dan voor de autonome ontwikkeling. Vooral rond Kornwerderzand neemt de concentratie IJsselmeerwater af in de winter (voor beide varianten en neemt toe in de zomer voor variant A1;
- een herverdeling van de concentratie IJsselmeerwater rond Den Oever en Kornwerderzand voor vaste pompen en uithijsbare pompen in de zomer en winter (behalve variant B1/C1 (uithijsbare pompen) in de zomer);
- in de winterperiode neemt de concentratie rond en ten noorden van Kornwerderzand af met maximaal 0,15 (15 %). Tegelijkertijd neemt de concentratie IJsselmeerwater toe met maximaal 0,15 ten westen van Den Oever ten opzichte van de autonome ontwikke-

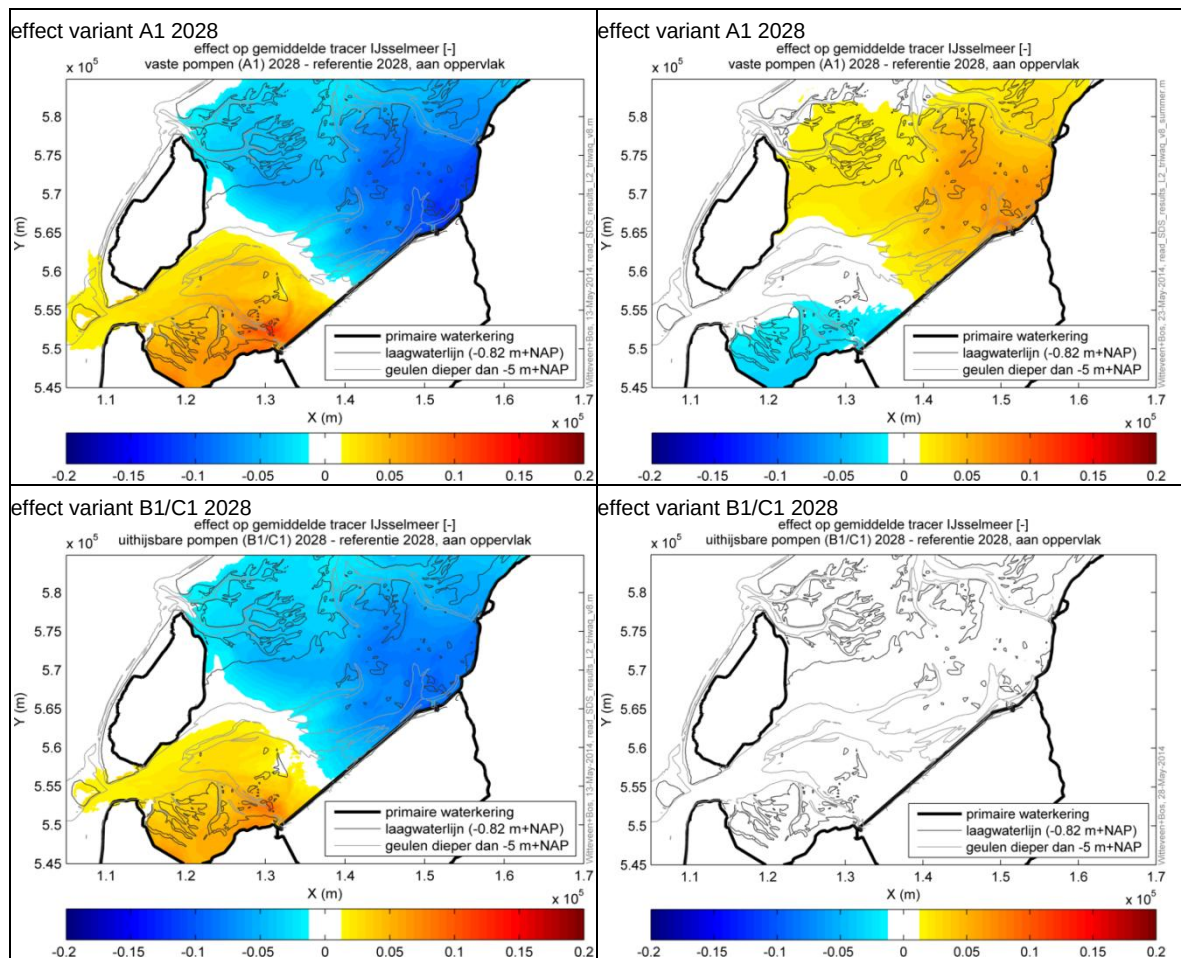
ling. Dit is te verklaren doordat er bij Den Oever meer zoet water de Waddenzee in wordt gepompt en doordat er minder wordt gespuid bij Kornwerderzand;

- in de zomerperiode is het omgekeerde effect te zien en neemt de concentratie IJsselmeerwater rond Kornwerderzand licht toe en rond Den Oever licht af voor variant A1 met vaste pompen. Dit komt doordat er in de zomer voornamelijk wordt gespuid en de spui capaciteit bij Den Oever is afgenomen.

De effecten van de variant met vaste pompen (A1) zijn over het algemeen sterker dan die van de variant met uithijsbare pompen (B1/C1).

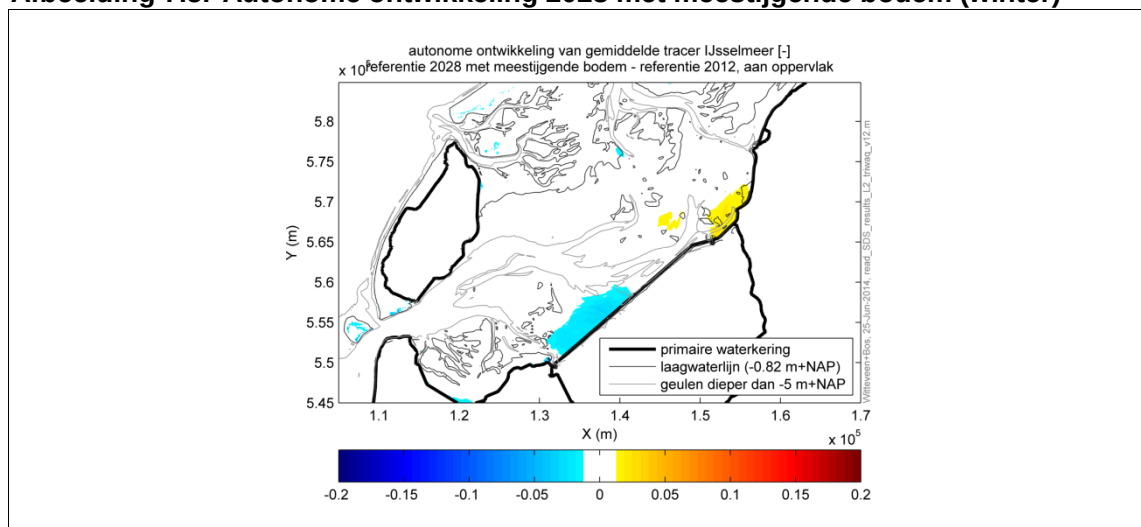
Afbeelding 7.4. Concentratie IJsselmeerwater in de referentiesituatie in 2012 (bovenste rij); de autonome ontwikkeling in 2028 ten opzichte van referentiesituatie (2^e rij) in winter en zomer, de effecten van vaste pompen (3^e rij) ten opzichte van de autonome ontwikkeling in 2028 en de effecten van uithijsbare pompen (onderste rij)





De autonome ontwikkeling met een meestijgende bodem laat zeer weinig veranderingen zien in de concentratie IJsselmeerwater ten opzichte van de referentiesituatie, net als voor de saliniteit, zie afbeelding 7.5. Dit geldt zowel voor de zomer als voor de winter. De ondergrens van de te verwachten verandering van de (gemiddelde) concentratie IJsselmeerwater is dan ook vrijwel gelijk aan de referentiesituatie van 2012.

Afbeelding 7.5. Autonome ontwikkeling 2028 met meestijgende bodem (winter)



Overschrijdingskans van concentratie IJsselmeerwater bij het wateroppervlak

De ruimtelijke afbeeldingen laten zien dat de gemiddelde concentratie IJsselmeerwater op vrijwel de gehele Waddenzee zal veranderen onder invloed van de autonome ontwikkeling. Om ook veranderingen van de dynamiek te kunnen waarnemen is net als voor de saliniteit de overschrijdingskans uitgezet tegen de concentratie op basis van een periode van 15 dagen, zie afbeelding 7.6. Ook hier is te zien dat voor alle simulaties de concentratie IJsselmeerwater in de winter flink lager is dan in de zomer. De pijl geeft de dynamiek over een geheel jaar aan (winter en zomer), waarbij met de dynamiek het verschil tussen de maximum en de minimum concentratie over een geheel jaar wordt bedoeld.

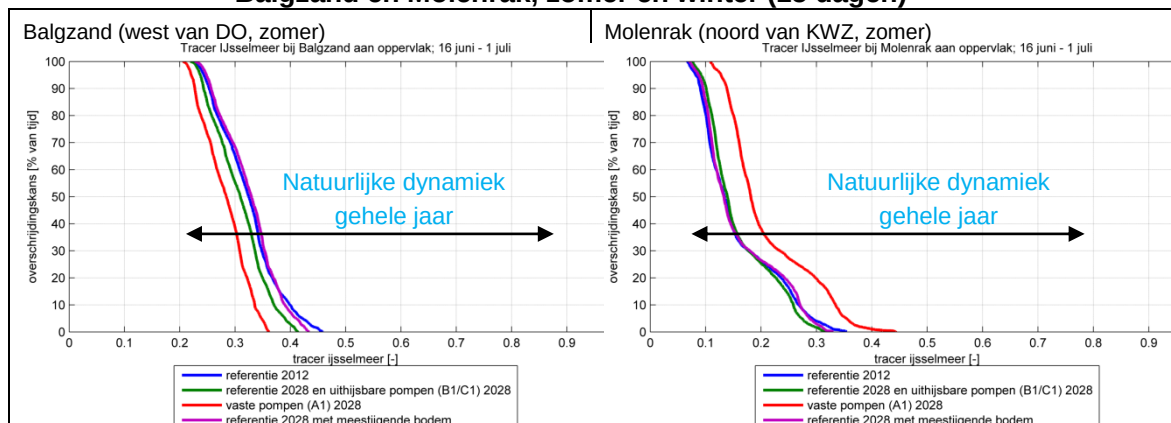
Op meerdere locaties is een verschuiving zichtbaar in de autonome ontwikkeling ten opzichte van de referentiesituatie. Wanneer echter naar de spreiding van de concentratie over het gehele jaar wordt gekeken, is te zien dat de veranderingen daarin klein zijn.

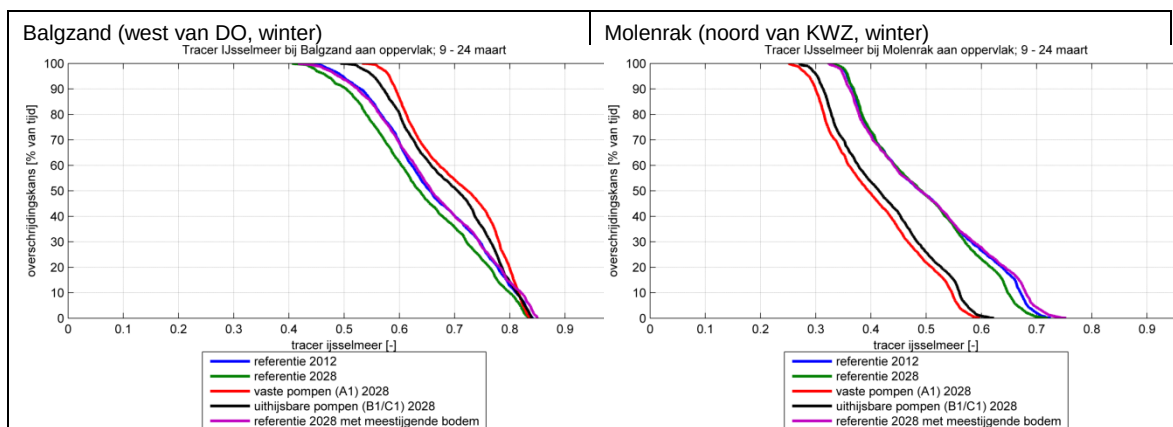
De conclusie is dat de autonome ontwikkeling van het gehalte IJsselmeerwater in de Waddenzee klein is ten opzichte van de natuurlijke dynamiek gedurende het jaar.

De beschreven effecten op de concentratie IJsselmeerwater zijn ook te zien in de overschrijdingskans van de concentratie voor beide pompvarianten in afbeelding 7.6. De conclusie daaruit is dat de dynamiek van de concentraties IJsselmeerwater in de Waddenzee toeneemt bij Balgzand en afneemt bij Molenrak.

Vaste en uithijsbare pompen leiden tot een verschuiving van de concentratie IJsselmeerwater van maximaal 0,1. Over het algemeen neemt het aandeel IJsselmeerwater toe in de zomer bij Molenrak voor variant A1 en voor varianten A1 en B1/C1 in de winter bij Balgzand. De conclusie is dat de verandering van de concentratie IJsselmeerwater ten gevolge van pompen klein is ten opzichte van de dynamiek van de concentratie IJsselmeerwater gedurende het gehele jaar.

Afbeelding 7.6. Overschrijdingskans concentratie IJsselmeerwater voor locaties Balgzand en Molenrak, zomer en winter (15 dagen)





7.4. vertroebeling

De mate van troebelheid van het water in de Waddenzee is van belang voor de aanwezige flora en fauna. De troebelheid wordt vooral bepaald door de hoeveelheid sediment, algen en andere zwevende stof die aanwezig is in het water. Sediment wordt opgewoeld bij bepaalde, relatief hoge stroomsnelheden met vertroebeling van het water als resultaat. Hoge stroomsnelheden treden met name op in de geulen. Op de ondiepere platen wordt sediment voornamelijk opgewoeld door golven. De opwoeling door golven is afhankelijk van de waterdiepte en is sterker bij kleinere waterdiepte. De waterdiepte zal door zeespiegelstijging eerder toe- dan afnemen, zodat er geen extra opwoeling door golven zal optreden. Dit wordt verder onderbouwd en geïllustreerd in het hoofdstuk over morfologie.

Om te beoordelen hoe de vertroebeling verandert in de autonome ontwikkeling van de Waddenzee, worden daarom de volgende twee indicatoren gebruikt:

- maximale stroomsnelheid bij bodem (ruimtelijk);
- overschrijdingskans bodemschuifspanning.

De ruimtelijke ontwikkeling van de maximale stroomsnelheid bij de bodem geeft een indicatie van gebieden waar veranderingen optreden ten gevolge van de autonome ontwikkeling. Een toename van de maximale stroomsnelheid kan leiden tot meer opwoeling van sediment en vertroebeling van het water. De mate van troebelheid is ook afhankelijk van de sedimentsamenstelling [ref. 19.], het moment in het getij, bioactiviteiten, enzovoort. Wij gaan ervan uit dat deze parameters niet veranderen als gevolg van de autonome ontwikkeling.

De bodemschuifspanning is een maat voor de kracht die door de stroming wordt uitgeoefend op de bodem en waardoor sediment opgewoeld kan worden. De overschrijdingskans van de bodemschuifspanning toont in hoeverre de verdeling van de bodemschuifspanning over de tijd verandert in de autonome ontwikkeling.

Maximale stroomsnelheid bij bodem

De ruimtelijke figuren van de maximaal optredende stroomsnelheid bij de bodem in de Waddenzee worden weergegeven in afbeelding 7.7, voor de situatie met vaste bodem. Het gaat om de maximale stroomsnelheid bij de bodem die optreedt gedurende de 15 dagen die zijn gemodelleerd in de winter- en zomerperiode. De twee bovenste figuren geven de referentiesituatie in 2012 weer en de ligging van de geulen is eenvoudig vast te stellen, omdat daar veruit de hoogste stroomsnelheden optreden. Opwoeling van sediment door stroming zal daarom voornamelijk in de geulen plaatsvinden.

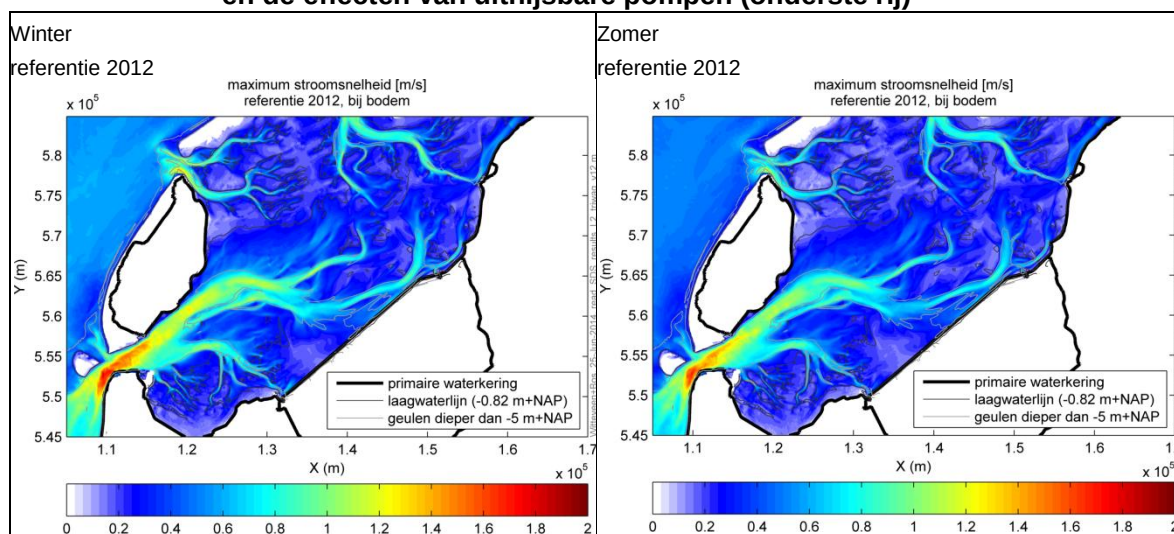
In de autonome ontwikkeling (afbeelding 7.7, 2^e rij) is over het algemeen een lichte toename te zien van de maximum stroomsnelheid. In de geul Doove Balg neemt deze echter licht af. De veranderingen in maximum stroomsnelheid hangen samen met de grotere getij-indringing door zeespiegelstijging.

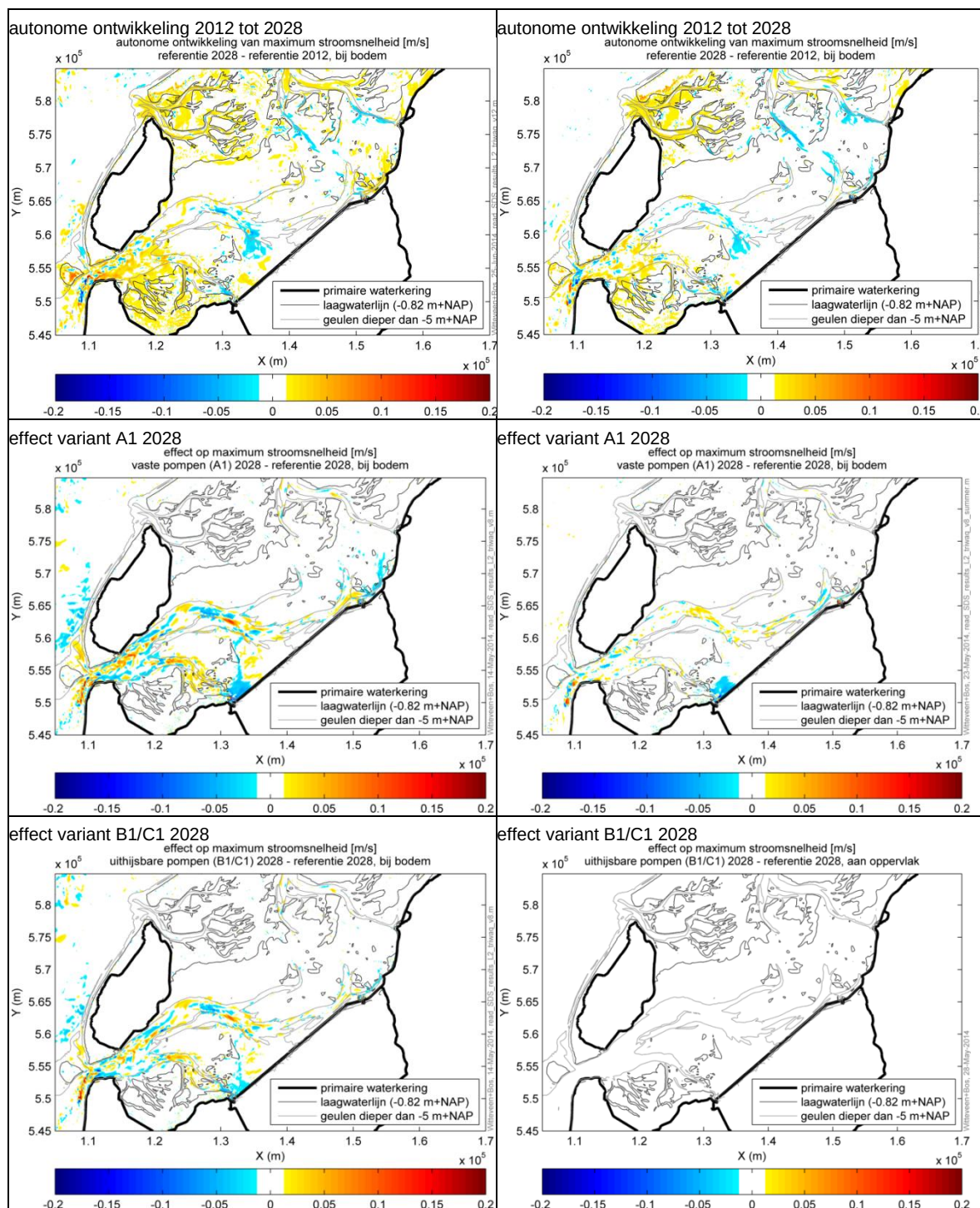
De grootste effecten (afbeelding 7.7, 3^e en 4^e rij) treden op in de geulen van Den Oever naar de Noordzee en rond de geul Doove Balg. Rond Kornwerderzand treden ook effecten in de geulen op, maar deze zijn kleinschaliger dan de effecten rond Den Oever. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de eventuele effecten van de inzet van pompen op vertroebeling zich zullen beperken tot de geulen in de Waddenzee.

Er wordt benadrukt dat de weergegeven maximum stroomsnelheden een momentopname zijn en dat er geen directe conclusies over vertroebeling aan verbonden kunnen worden. Wel geeft het een goed beeld van het invloedsgebied van de inzet van pompen en gewijzigd spui-beheer zodat gericht gekeken kan worden naar locaties waar veranderingen kunnen optreden.

Of veranderingen in de maximum stroomsnelheid daadwerkelijk de troebelheid beïnvloeden, zal beoordeeld worden aan de hand van de grafieken van de overschrijdingskans van de bodemschuifspanning.

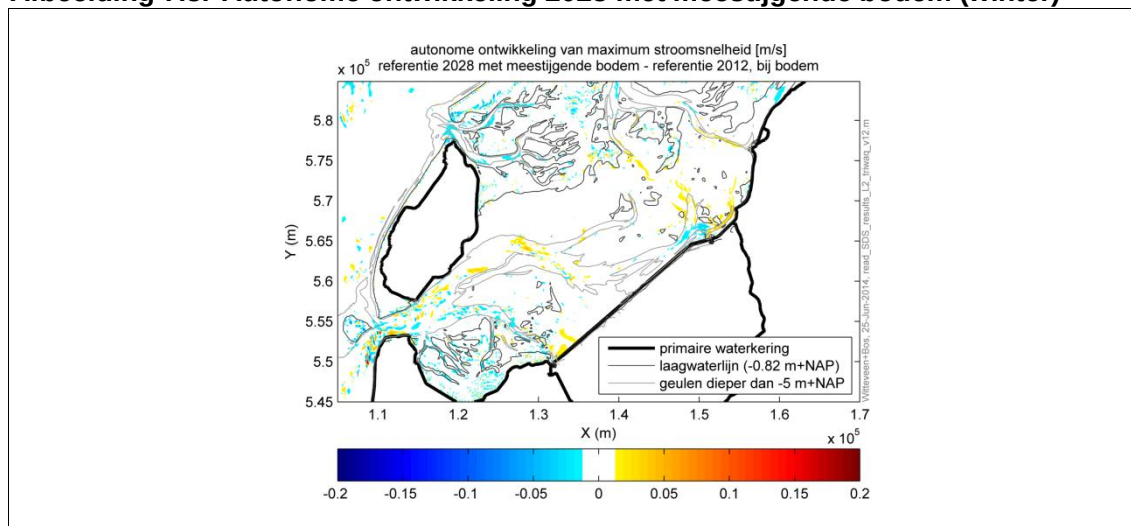
Afbeelding 7.7. Maximum stroomsnelheid bij de bodem in de referentiesituatie in 2012 (bovenste rij); de autonome ontwikkeling in 2028 ten opzichte van referentiesituatie (2^e rij) in winter en zomer, de effecten van vaste pompen (3^e rij) ten opzichte van de autonome ontwikkeling in 2028 en de effecten van uithijsbare pompen (onderste rij)





In de autonome ontwikkeling met meestijgende bodem, veranderen de stroomsnelheden nauwelijks, zie afbeelding 7.8.

Afbeelding 7.8. Autonome ontwikkeling 2028 met meestijgende bodem (winter)



Overschrijdingskans bodemschuifspanning

De overschrijdingskans van de bodemschuifspanning geeft weer hoe vaak een bepaalde waarde van de bodemschuifspanning voorkomt gedurende de zomer- en winterperiode van 15 dagen. In tegenstelling tot de maximum stroomsnelheid volgt hieruit een integraal beeld van mogelijke verandering van de mate van vertroebeling over de gehele periode.

De absolute waarde van de bodemschuifspanning is evenredig met de stroomsnelheid in het kwadraat (u^2) en daarom wordt u^2 gebruikt als maat voor de bodemschuifspanning in afbeelding 7.9. Daarnaast is de bodemschuifspanning ook afhankelijk van de dichtheid en de bodemwrijving. De relatieve veranderingen van dichtheid en bodemwrijving worden verwaarloosbaar geacht, omdat ze klein zijn ten opzichte van veranderingen in de stroomsnelheid.

Er is gebruik gemaakt van twee locaties; één dichtbij Den Oever (DO, links) en één dichtbij Kornwerderzand (KWZ, rechts), omdat op basis van de resultaten is vastgesteld dat hier de grootste toename van de bodemschuifspanning (en vertroebeling) optreden.

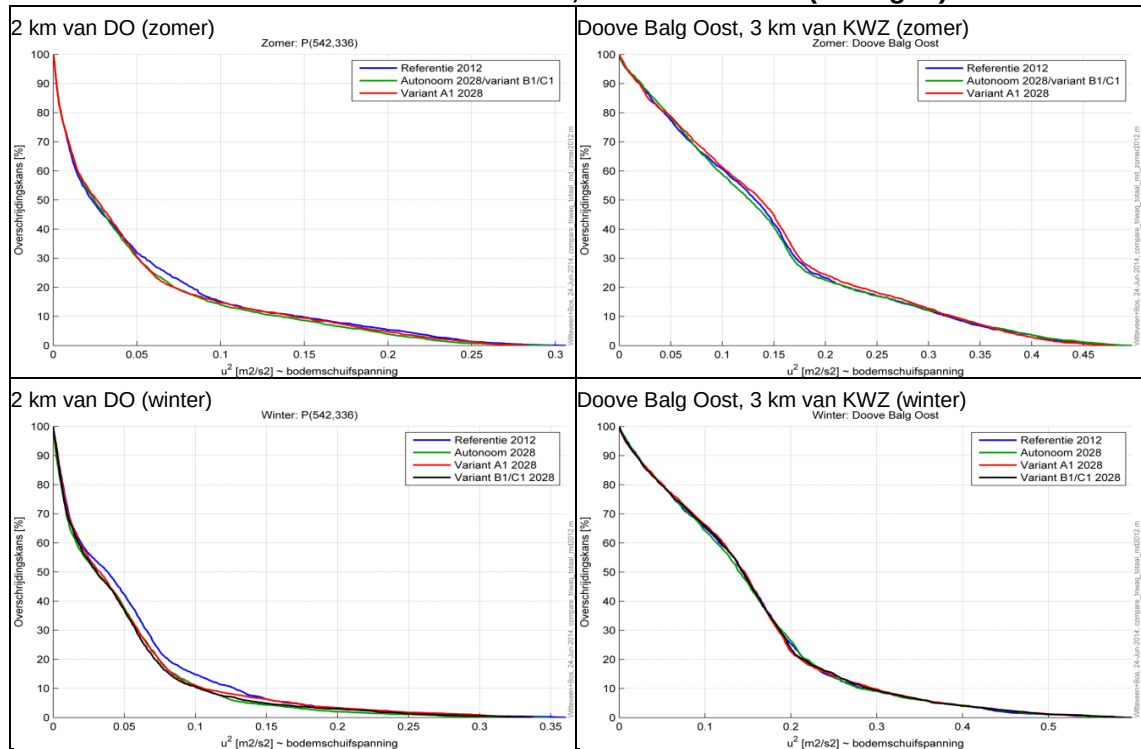
Over het algemeen zijn de verschillen tussen de autonome ontwikkeling en de referentiesituatie klein en er is een lichte afname van de bodemschuifspanning in de autonome ontwikkeling. De afname is het sterkst 2 km van Den Oever in de winter (van -3 % bij hoge stroomsnelheden tot -15 % bij lage stroomsnelheden, afbeelding 7.9 linksonder). De afname van de bodemschuifspanning is te verklaren door de toename van de waterdiepte, waardoor de snelheden bij de bodem lager zijn.

Op basis van afbeelding 7.9 zal er vrijwel geen extra vertroebeling optreden rond de geulen in de autonome ontwikkeling.

De overschrijdingskans voor de bodemschuifspanning voor beide pompvarianten wordt weergegeven in afbeelding 7.9. Daarin is te zien dat er weinig veranderingen in de bodemschuifspanning optreden. Alleen bij variant A1 is nabij Kornwerderzand in de zomer een lichte toename van de bodemschuifspanning te zien (van -1 % bij hoge stroomsnelheden tot +10 % bij lage stroomsnelheden) ten opzichte van de autonome ontwikkeling. Dit komt doordat de spuicapaciteit bij Den Oever afneemt bij variant A1 en er daarom meer wordt gespuid bij Kornwerderzand in de zomerperiode.

Conclusie hieruit is dat de vertroebeling alleen bij vaste pompen (variant A1) beïnvloed wordt in de zomerperiode. In die situatie zou de vertroebeling kunnen toenemen nabij Kornwerderzand.

Afbeelding 7.9. Overschrijdingskans bodemschuifspanning (u^2) voor locatie bij Den Oever en Kornwerderzand, zomer en winter (15 dagen)



7.5. Conclusies waterkwaliteit

7.5.1. Conclusies autonome ontwikkeling

Onderstaande conclusies van de autonome ontwikkeling van de waterkwaliteit van de Waddenzee zijn opgesteld voor een situatie met vaste bodem.

Saliniteit

- in de winter neemt de saliniteit vrijwel in de gehele westelijke Waddenzee toe met maximaal 2-3 ppt (tot +20 %) door toegenomen getij-indringing;
- in de zomer neemt de saliniteit ten westen van Kornwerderzand licht toe, terwijl de saliniteit ten noorden van Kornwerderzand juist licht afneemt. Het feit dat de veranderingen kleiner zijn in de zomer is te verklaren doordat er in de zomer minder gespuid wordt. Hierdoor is het saliniteitsverschil tussen de Waddenzee en de Noordzee in deze periode lager dan in periodes waarin meer gespuid wordt;
- de effecten van de autonome ontwikkeling op de dynamiek van de saliniteit in de Waddenzee zijn verwaarloosbaar.

Nutriëntenhuishouding

De ontwikkeling van de nutriëntenhuishouding wordt beoordeeld aan de hand van de concentratie van IJsselmeerwater in de Waddenzee en de ruimtelijke verdeling daarvan.

De autonome ontwikkeling van de nutriëntenhuishouding (concentratie IJsselmeerwater) heeft grote overeenkomst met de autonome ontwikkeling van de saliniteit:

- in de winter neemt de concentratie IJsselmeerwater vrijwel overal in de Waddenzee af met een maximum van ongeveer 0,1 (absolute afname). Dit heeft te maken met de toegenomen getij-indringing door de zeespiegelstijging, waardoor er meer zout water de Waddenzee instroomt en de verblijftijd van het zoete IJsselmeerwater wordt verkort;
- in de zomer neemt de concentratie IJsselmeerwater nabij Den Oever en nabij Kornwerderzand licht af. Het feit dat de veranderingen kleiner zijn in de zomer is te verklaren doordat er in de zomer minder gespuid wordt;
- de effecten van de autonome ontwikkeling op de dynamiek van de concentratie IJsselmeerwater in de Waddenzee zijn klein.

Wat deze veranderingen van de concentratie IJsselmeerwater concreet betekenen voor de nutriëntenhuishouding van de Waddenzee, zal beschreven worden in de effectbeschrijving natuur.

Vertroebeling

- de hoogste stroomsnelheden treden op in de geulen. De opwoeling door golven op de platen zal eerder afnemen dan toenemen. Dit wordt verder toegelicht in het hoofdstuk morfologie;
- in de autonome ontwikkeling is over het algemeen een lichte toename te zien van de maximum stroomsnelheid. In de geul Doove Balg neemt deze echter licht af;
- de bodemschuifspanning (berekend over een periode van 15 dagen in de winter en zomer) neemt licht af (grootste afname bij Den Oever van -3 % bij hoge stroomsnelheden tot -15 % bij lage stroomsnelheden). Daarom zal er geen extra vertroebeling optreden rond de geulen in de berekende autonome ontwikkeling.

Algemeen

De autonome ontwikkeling in het geval de bodem van de Waddenzee meestijgt met zeespiegelstijging laat weinig veranderingen zien in de saliniteit, nutriëntenhuishouding en stroomsnelheden ten opzichte van de referentiesituatie. De autonome ontwikkeling met vaste bodem is duidelijk groter dan die met meestijgende bodem.

7.5.2. Conclusies effecten pompen

De hierboven beschreven effecten zijn over het algemeen groter voor de variant met vaste pompen (A1) dan voor de variant met uithijsbare pompen (B1/C1).

De effecten van de pompen zijn bepaald voor de situatie met een vaste bodem van de Waddenzee die niet meestijgt met zeespiegelstijging. Berekeningen met een meestijgende bodem hebben aangetoond dat de relatieve effecten van de resultaten van de varianten met meestijgende bodem niet anders zullen zijn.

Saliniteit

- een herverdeling van de gemiddelde saliniteit rond Den Oever en Kornwerderzand voor varianten A1 en B1/C1 in de winter en voor variant A1 ook in de zomer;
- in de winterperiode neemt de saliniteit rond en ten noorden van Kornwerderzand toe met maximaal 2-3 ppt en neemt af met maximaal 2-3 ppt ten westen van Den Oever ten opzichte van de autonome ontwikkeling. De dynamiek neemt het sterkst af bij vaste pompen;
- in de zomerperiode is het omgekeerde effect te zien bij variant A1. De saliniteit rond Kornwerderzand neemt af met 1 ppt en rond Den Oever toe met 0,5 tot 1 ppt. Dit komt doordat er in de zomer voornamelijk wordt gespuid en de spuicapaciteit (onder vrij ver-

val) bij Den Oever is afgenomen doordat vaste pompen zijn ingebouwd in een aantal spuikokers. Spuicomplex Kornwerderzand moet dan vaker ingezet worden wat leidt tot een afname van de saliniteit bij Kornwerderzand;

- de verandering van de saliniteit ten gevolge van pompen is klein ten opzichte van de dynamiek van de saliniteit gedurende het gehele jaar.

Nutriëntenhuishouding

- een herverdeling van de concentratie IJsselmeerwater rond Den Oever en Kornwerderzand voor varianten A1 en B1/C1 in de winter en voor variant A1 ook in de zomer;
- in de winterperiode neemt de concentratie IJsselmeerwater rond en ten noorden van Kornwerderzand af met maximaal 0,15 en neemt toe met maximaal 0,15 ten westen van Den Oever ten opzichte van de autonome ontwikkeling;
- in de zomerperiode is het omgekeerde effect te zien en neemt de concentratie IJsselmeerwater rond Kornwerderzand licht toe en rond Den Oever licht af voor variant A1;
- de dynamiek van de concentraties IJsselmeerwater in de Waddenzee neemt toe bij Balgzand en neemt af bij Molenrak;
- de verandering van de concentratie IJsselmeerwater ten gevolge van pompen is klein ten opzichte van de dynamiek van de concentratie IJsselmeerwater gedurende het gehele jaar.

Wat deze veranderingen van de concentratie IJsselmeerwater concreet betekenen voor de nutriëntenhuishouding en vertroebeling (door verschil in samenstelling) van de Waddenzee, zal beschreven worden in de effectbeschrijving natuur.

Vertroebeling

- de maximum stroomsnelheid wordt alleen beïnvloed in de geulen bij Den Oever, Doove Balg en Kornwerderzand. Er zal geen effect optreden op de platen (voor wat betreft vertroebeling) op basis van de bevinding dat de stroming niet veranderd bij de platen. De vertroebeling op de platen wordt gedomineerd door de lokale windgolven en golfgedreven stromingen, die beide niet veranderen door de inzet van pompen;
- er treden vrijwel geen effecten op de stromingsgeïnduceerde bodemschuifspanning op. Alleen nabij Kornwerderzand is in de zomer een lichte toename van de bodemschuifspanning bij variant A1 ten opzichte van de autonome ontwikkeling (van -1 % bij hoge stroomsnelheden tot +10 % bij lage stroomsnelheden). In die situatie zou de vertroebeling kunnen toenemen nabij Kornwerderzand;
- troebelheid verandert niet of nauwelijks als gevolg van pompen.

7.6. Doorkijk tot 2050

De autonome ontwikkeling en de effecten die voor zichtjaar 2028 gekwantificeerd en beschreven zijn, zullen in de periode tot 2050 in versterkte mate optreden, omdat de spuicapaciteit zal afnemen en de pompcapaciteit zal toenemen (door de inbouw van extra pompen).

De autonome ontwikkeling van de waterkwaliteit in de Waddenzee is gevoelig voor de mate waarin de bodem van de Waddenzee meestijgt met zeespiegelstijging.

Op basis van de berekeningen van 2028 zullen de effecten van de inzet van pompen en gewijzigd spuibeheer ook in de periode tot 2050 kleiner zijn dan de autonome ontwikkeling en dan de natuurlijke dynamiek van de Waddenzee.

7.7. Gevoeligheid voor uitgangspunten

Klimaatsscenario

De autonome ontwikkeling van de waterkwaliteit van de Waddenzee is gevoelig voor de mate van zeespiegelstijging. Initiële respons van de Waddenzee op zeespiegelstijging is een toename van de getij-indringing. Dit zal leiden tot een snellere verversing van de Waddenzee. Dit heeft tot gevolg dat de Waddenzee zouter wordt en dat nutriënten uit het IJsselmeer sneller uit de Waddenzee zijn.

Het gehanteerde klimaatsscenario is een bovengrens van scenario G van het KNMI uit 2006. Een overzicht van de zeespiegelstijging en verandering van de IJsselafoer bij verschillende klimaatscenario's is te vinden in tabel 5.2. De bijbehorende zeespiegelstijging van 0,25 m tot 2050 valt binnen de bandbreedte van klimaatscenario's W en W+, maar de bovengrens voor zeespiegelstijging is bij klimaatscenario's W en W+ hoger (0,35 m) dan bij klimaatscenario G (0,25 m). Volgens klimaatscenario G neemt de IJsselafoer in alle maanden toe. Bij klimaatscenario W en W+ is er in de maanden juni tot en met november een afname van de IJsselafoer terwijl volgens klimaatscenario G dan een toename van de IJsselafoer verwacht wordt. De toename van de IJsselafoer is in januari tot en met april hoger bij klimaatscenario's W en W+ dan bij klimaatscenario G [ref. 6.].

Een ander klimaatscenario zal merkbaar zijn op de relatieve effecten van de inzet van pompen doordat een ander klimaatscenario zal leiden tot mogelijke toe- of afname van spui- en pompdebieten.

Op basis van berekeningen van de autonome ontwikkeling bij klimaatscenario G zullen de effecten van de inzet van pompen en gewijzigd spuibeheer op waterkwaliteit ook bij een ander klimaatscenario kleiner zijn dan autonome ontwikkeling en de natuurlijke dynamiek van de Waddenzee.

Verdieping Boontjes

De conclusies uit deze effectbepaling van de inzet van pompen en gewijzigd spuibeheer zullen naar alle waarschijnlijkheid niet wijzigen door het wel of niet meenemen van de verdieping van de Boontjes in de referentiesituatie om verschillende redenen:

- het wel of niet meenemen van de verdieping van de Boontjes heeft geen invloed op de berekende spui- en pompdebieten door de kunstwerken in de Afsluitdijk. De reden hiervan is dat de waterstand op de Waddenzee niet beïnvloed zal worden door de drempelverwijdering in de vaargeul van de Boontjes volgens [ref. 12.]. Hierdoor veranderen de hydraulische randvoorwaarden van de gebruikte modellering niet;
- de verdieping van de Boontjes zal leiden tot een lokale verhoging van de saliniteit met ongeveer 1 % [ref. 12.]. Dit effect is klein vergeleken met de autonome ontwikkeling van de saliniteit. De conclusies van deze effectbeschrijving zullen daarom nauwelijks wijzigen door het wel meenemen van de verdieping van de Boontjes in de modelschematisatie;
- de conclusies in deze rapportage zijn gebaseerd op relatieve verschillen ten opzichte van de autonome ontwikkeling en niet zozeer op absolute waarden van parameters. Kleine wijzigingen in zowel de referentiesituatie als de variant zullen daarom nauwelijks doorwerken in de relatieve verschillen.

8. EFFECTEN OP MORFOLOGIE WADDENZEE

8.1. Introductie

Met morfologie wordt in het algemeen de ontwikkeling van de bodemligging bedoeld. De Waddenzee kan worden verdeeld in de volgende morfologische elementen: geulen, diepergelegen platen en intergetijdengebieden. De ontwikkeling van de bodemligging is met name van belang voor het natuurlijke systeem van de Waddenzee en voor de bevaarbaarheid. Daarnaast kunnen ook bijvoorbeeld: kabels en leidingen, archeologische resten of explosieven te voorschijn komen als erosie optreedt.

Het inzetten van pompen in de uitwateringscomplexen van de Afsluitdijk kan gevolgen hebben voor de morfologie van de Waddenzee. Dit komt doordat het IJsselmeerwater volgens een ander regime en in andere hoeveelheden de Waddenzee instroomt dan wanneer er alleen onder vrij verval gespuid wordt. De resulterende veranderingen van de stroomsnelheden, stroomrichtingen en waterstanden kunnen effecten hebben op de morfologie op bepaalde locaties in de Waddenzee.

Effecten kunnen optreden met betrekking tot:

- het kombergingsgebied en getijprisma;
- de oppervlakte van het intergetijdengebied en diepergelegen platen;
- verandering van erosie (of sedimentatie);
- het baggeronderhoud van de (vaar-)geulen;
- het baggeronderhoud van de havens.

De beoordeling van de effecten op de morfologie van de Waddenzee zal zich richten op bovenstaande aspecten. Om de effecten van het inzetten van pompen te beoordelen wordt eerst de autonome morfologische ontwikkeling van de Waddenzee in de periode tot 2028 beschouwd. Het inzetten van pompen zal (mogelijk) leiden tot extra effecten naast de effecten op de autonome ontwikkeling tot 2028. De effecten van de inzet van pompen worden beoordeeld door de situatie met pompen in 2028 te vergelijken met de autonome ontwikkeling in 2028.

De bovenstaande effecten op morfologie zijn niet de directe uitvoer van de 3D TRIWAQ modellering, maar worden bepaald op basis van nabewerking van de hydrodynamische resultaten aan de hand van een aantal indicatoren. Het gaat om:

- tijdreeksen van waterstanden;
- getijslag;
- getijvolume;
- sedimentatie/erosie in geulen (met transportformulering van Van Rijn [ref. 29.] en [ref. 30.]);
- sedimentatie in havens (methode Eysink [ref. 9.] en Van Rijn [ref. 29.]).

Deze indicatoren worden in de paragraaf 8.2 nader toegelicht. Vervolgens worden deze indicatoren gebruikt om de effecten te beoordelen in paragraaf 8.3.

Gevoeligheid van autonome ontwikkeling

Morfologische ontwikkelingen zullen de stromingen en golven beïnvloeden. Dit wordt beoordeeld door de autonome ontwikkeling te modelleren met en zonder meestijgende bodem tot 2028. Hiermee wordt een bandbreedte bepaald voor de effecten van de morfologie op de hydrodynamica.

Zowel voor de autonome ontwikkeling als voor de effecten van de inzet van pompen wordt een periode van 15 dagen (een springtij-doodtij cyclus) in de zomer en een 15-daagse periode aan het einde van de winter beschouwd. In de winter zal er meer gespuid en gepompt worden zodat de effecten in de winter wellicht groter zijn dan in de zomer. Door twee representatieve periodes te beschouwen, kan door het samenstellen van de resultaten voor winter en zomer er een bandbreedte worden aangegeven voor de morfologische ontwikkelingen gedurende het gehele jaar.

Voor de beoordeling van de autonome ontwikkeling is een zeespiegelstijging meegenomen van 13,2 cm in 2028. Dit heeft gevolgen voor de lengte van het spuivenster en daarmee voor het spuiregime en -hoeveelheden. Dit is eerder reeds berekend met SOBEK [ref. 35.] en de uitvoer van deze simulaties is gebruikt als invoer voor de huidige 3D-modellering met TRIWAQ.

Toelichting op effectbepaling

Door het inzetten van pompen verandert het regime waarmee water naar de Waddenzee wordt geloosd. In de huidige situatie kan alleen worden gespuid met laagwater op de Waddenzee en treden er dus periodiek hoge debieten op. Pompen worden juist ingezet met hoogwater op de Waddenzee: wanneer een deel van de spuikokers wordt vervangen door pompen zal het debiet meer verspreid worden over de tijd en de piekdebieten zullen lager zijn.

Daarnaast worden de pompen alleen ingezet bij Den Oever, waardoor er een herverdeling zal zijn van de debieten over de complexen bij Den Oever en Kornwerderzand. De gemiddelde debieten bij Den Oever zullen toenemen en de debieten en spui frequentie bij Kornwerderzand zullen afnemen.

Voor de effectbepaling van de inzet van pompen in de Afsluitdijk zijn modelsimulaties uitgevoerd voor de variant met vaste pompen (A1) en de variant met uithijsbare pompen (B1/C1). De pompen worden ingezet als er niet kan worden gespuid. De effecten van de pompen worden vergeleken met de autonome ontwikkeling tot 2028.

Er zijn simulaties uitgevoerd voor een zomer- en een winterperiode voor beide varianten. Omdat er in de zomer bijna niet wordt gepompt, zullen er bij variant B1/C1 met uithijsbare pompen in de zomer nauwelijks effecten optreden ten opzichte van de autonome ontwikkeling. De spuicapaciteit blijft ongewijzigd omdat de pompen uithijsbaar zijn, dus er verandert 's zomers bij variant B1/C1 feitelijk niets ten opzichte van de autonome ontwikkeling.

De simulaties voor de effectbepaling van de varianten zijn uitgevoerd met een vaste bodem. De hieronder beschreven effecten zijn daarom bepaald ten opzichte van de referentiesituatie in 2028 met vaste bodem.

Variant D1 - uithijsbare pompen in een nieuwe constructie bij Den Oever aan de IJsselmeerzijde

De effecten van variant D1 op de waterkwaliteit zullen niet of nauwelijks verschillen van de variant B1/C1, omdat de pomp- en spuidebieten nauwelijks verschillen van variant B1/C1. De effectbeschrijving van variant B1/C1 is daarom ook representatief voor variant D1.

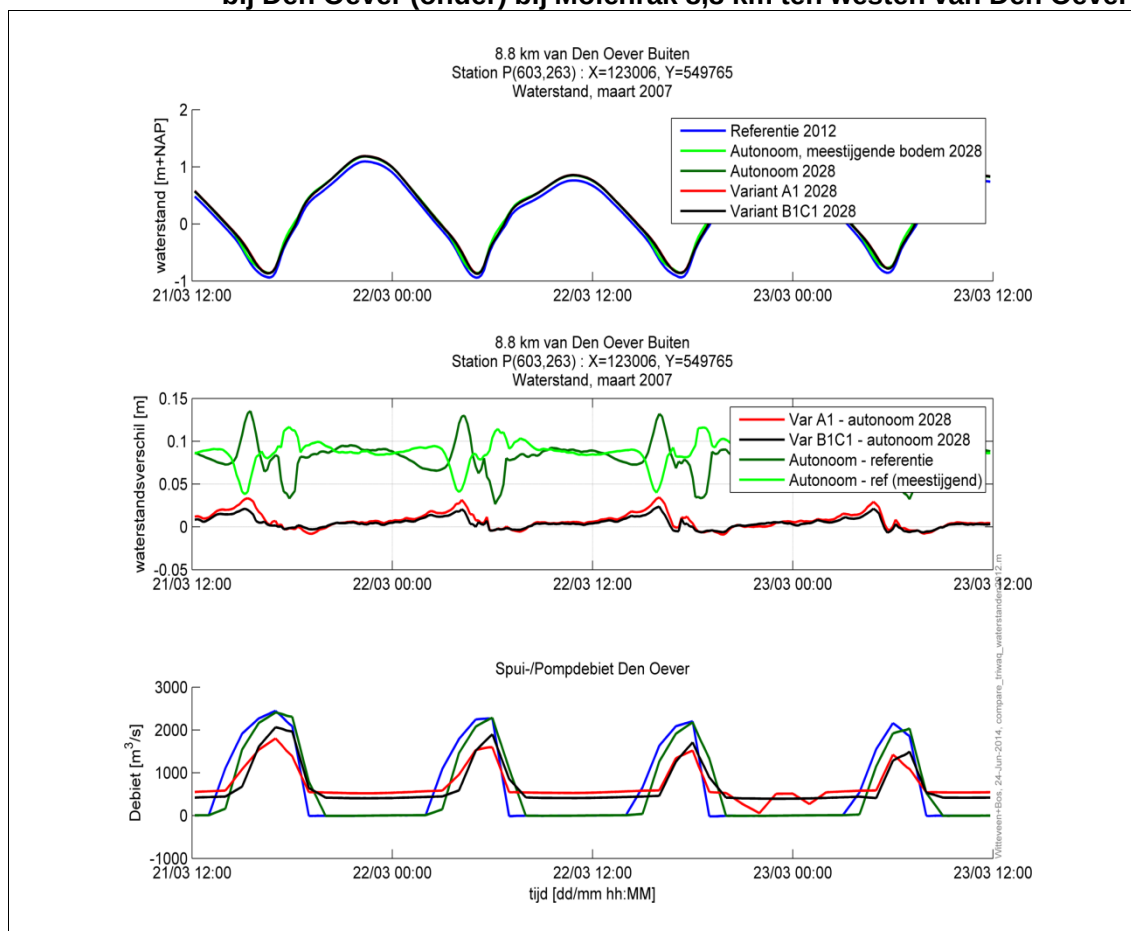
8.2. Modelresultaten

8.2.1. Waterstand

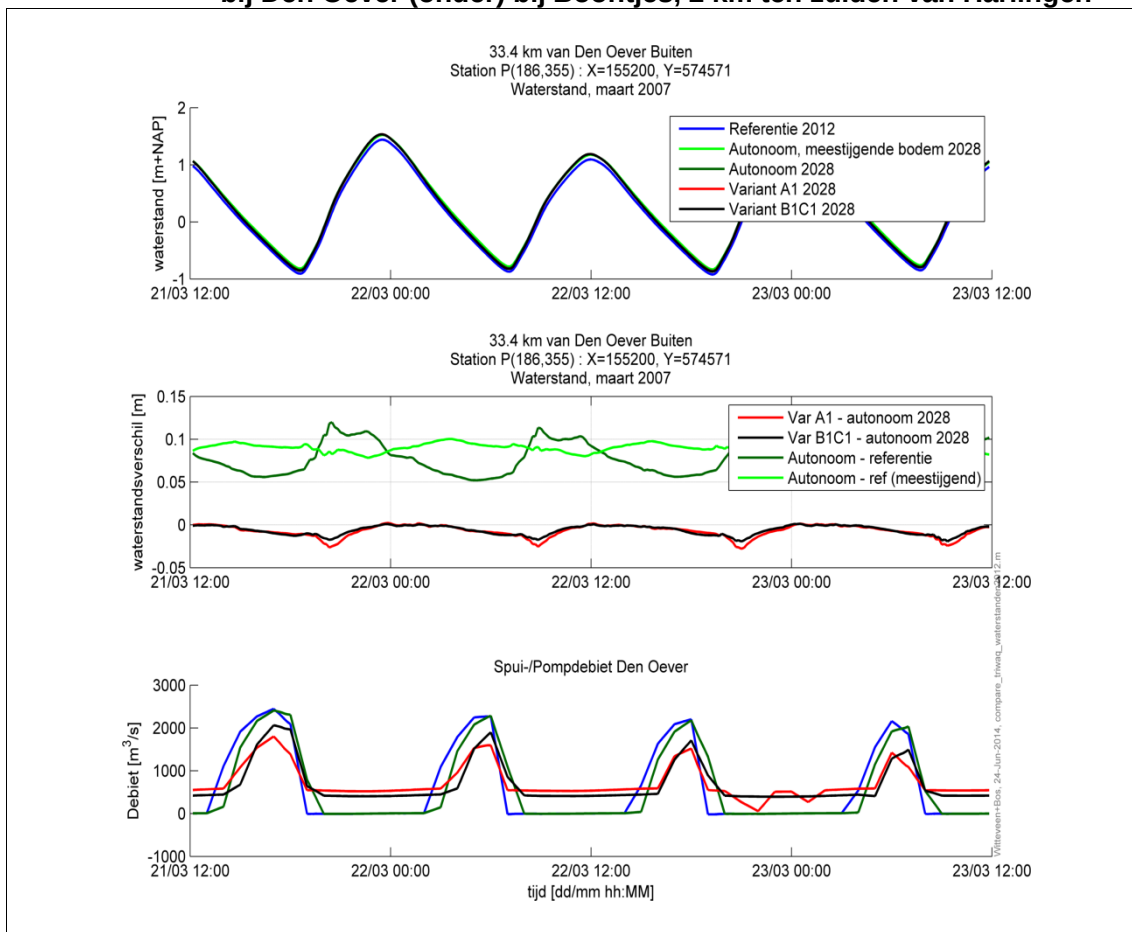
De waterstand (vertikaal getij) is van belang voor de oppervlakte van het intergetijdengebied en diepergelegen platen door zijn directe invloed daarop. Wanneer de gemiddelde waterstand bijvoorbeeld stijgt, neemt de oppervlakte van het intergetijdengebied af, aangenomen dat de bodem niet meestijgt. Daarnaast beïnvloedt de waterstand de effecten van golven op de bodem. Bij een kleinere waterdiepte zullen golven meer sediment opwoelen en kan er erosie optreden.

De autonome ontwikkeling van de waterstanden en de effecten van de pompvarianten op de waterstanden voor de winterperiode worden getoond in afbeelding 8.1 en afbeelding 8.2. De bovenste figuren tonen de waterstanden tijdens een springtij in de winterperiode op locaties in de Waddenzee waar de grootste veranderingen optreden, ten westen van Den Oever (afbeelding 8.1) en ten noorden van Kornwerderzand (afbeelding 8.2). Vergelijking van de resultaten in verschillende locaties in de westelijke Waddenzee laat zien dat op deze locaties vlakbij de uitwateringscomplexen de waterstandsveranderingen het grootste zijn. De middelste figuren laten het waterstandsverschil zien ten opzichte van een referentiesituatie. In de onderste figuren is het totale debiet (pompen+spuien) bij Den Oever weer gegeven, zodat waterstandsverschillen daaraan kunnen worden gerelateerd.

Afbeelding 8.1. Waterstanden tijdens een springtij van 21 maart 12.00 uur - 23 maart 12.00 uur (boven), waterstandsverschillen autonoom-referentie en varianten-autonoom (midden) en het totale debiet (pompen+spuien) bij Den Oever (onder) bij Molenrak 8,8 km ten westen van Den Oever



Afbeelding 8.2. Waterstanden tijdens een springtij van 21 maart 12.00 uur - 23 maart 12.00 uur (boven), waterstandsverschillen autonoom-referentie en varianten-autonoom (midden) en het totale debiet (pompen+spuien) bij Den Oever (onder) bij Boontjes, 2 km ten zuiden van Harlingen



De bovenste afbeeldingen laten de waterstanden zien voor de referentiesituatie, de autonome ontwikkeling en de pompvarianten. Uiteraard nemen in alle gevallen de waterstanden toe als gevolg van de beschouwde zeespiegelstijging tot 2028.

De veranderingen in de waterstanden zijn duidelijker te zien wanneer naar de verschillen tussen de cases wordt gekeken (middelste rij afbeeldingen). Deze afbeeldingen geven enerzijds de verschillen weer tussen de autonome ontwikkeling (met meestijgende bodem en met vaste bodem) en de referentiesituatie, en anderzijds tussen de beide pompvarianten en de autonome ontwikkeling tot 2028. De toename van de waterstand in de autonome ontwikkeling is ook hier op beide locaties te zien. Daarnaast is te zien dat de vorm van de getijkromme (licht) verandert voor de autonome ontwikkeling met een vaste bodem. De getijslag wordt dan iets groter. De getijkromme bij Molenrak verandert ook van vorm voor een autonome ontwikkeling met meestijgende bodem en in mindere mate bij Boontjes.

De effecten van de pompen in de winterperiode zijn voor beide varianten een lichte toename van de waterstand juist ten westen van Den Oever en een zeer lichte afname van de waterstand juist ten noorden van Kornwerderzand. Dit is te verklaren door de inzet van pompen bij Den Oever, waardoor het waterniveau periodiek licht stijgt. Er wordt minder water gespuid bij Kornwerderzand, dus daar daalt het waterniveau licht.

Ten westen van Den Oever wordt de toename van de waterstand ten opzichte van de autonome situatie opgebouwd gedurende de periode, dat er alleen gepompt wordt. Wanneer er gespuid kan worden, neemt het verschil in waterstand weer af tot nul. Deze kleine waterstandverschillen zijn dus het gevolg van een andere verdeling van de debieten in de tijd en ruimte. De maximum spuidebieten nemen af en ook de duur van spuien wordt korter. In de figuren is ook te zien dat het pompdebiet voor variant A1 iets groter is dan bij variant B1/C1.

De effecten van pompen op de waterstanden zijn veel kleiner dan de effecten ten gevolge van de autonome ontwikkeling.

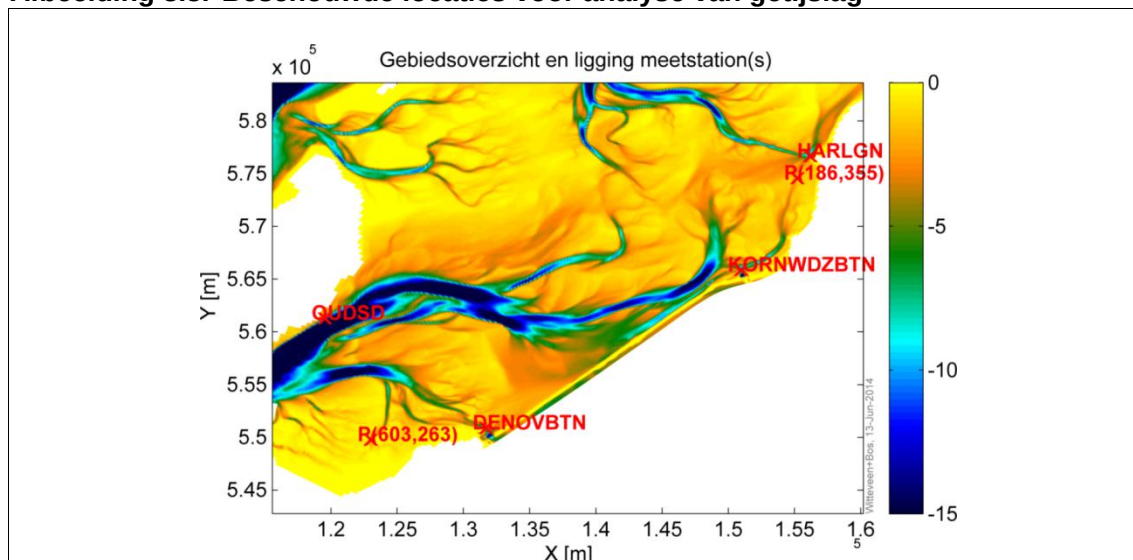
De effecten van de pompen op de waterstandsverschillen voor de zomerperiode (niet getoond) zijn verwaarloosbaar.

8.2.2. Getijslag

De getijslag is gedefinieerd als het verschil tussen een gemiddeld hoogwater (GHW) en een gemiddeld laagwater (GLW). Veranderingen in de getijslag duiden op een verandering van het getijprisma. Grote veranderingen in het getijprisma kunnen leiden tot morfologische veranderingen in de Waddenzee zoals sedimentatie of erosie van geulen en platen.

GHW en GLW zijn bepaald uit de waterstanden op verschillende locaties (afbeelding 8.3) in de Waddenzee voor twee periodes van 15 dagen (spring-doodtij cyclus) in de zomer en in de winter. De autonome ontwikkeling van de getijslag worden getoond in tabel 8.1 voor de winterperiode en in tabel 8.2 voor de zomerperiode. In de autonome ontwikkeling (met een vaste bodem) neemt de getijslag op vrijwel alle uitvoerpunten toe met maximaal 0,04 m (maximaal 3 %). Deze verandering wordt voornamelijk gedreven door zeespiegelstijging. De toename van de getijslag betekent dat het getijprisma overal toeneemt in de autonome ontwikkeling.

Afbeelding 8.3. Beschouwde locaties voor analyse van getijslag



Tabel 8.1. Autonome ontwikkeling van getijslag gedurende winterperiode (15 dagen)

locatie	referentie 2012	autonome ontwikkeling van 2012 tot 2028	
	[m]	absoluut verschil [m]	relatief verschil [%]
Oudeschild	1,37	0,00	0,3
Den Oever buiten	1,35	0,04	3,0
Kornwerderzand buiten	1,66	0,03	1,6
Harlingen	1,78	0,02	1,2
Molenrak 8,8 km ten westen van Den Oever (naam uitvoerpunt: 603,263)	1,45	0,02	1,1
Boontjes, 2 km ten zuiden van Harlingen (naam uitvoerpunt: 186,355)	1,78	0,02	1,2

Tabel 8.2. Autonome ontwikkeling van getijslag gedurende zomerperiode (15 dagen)

locatie	referentie 2012	autonome ontwikkeling van 2012 tot 2028	
	[m]	absoluut verschil [m]	relatief verschil [%]
Oudeschild	1,30	0,01	0,5
Den Oever buiten	1,42	-0,01	-0,6
Kornwerderzand buiten	1,61	0,03	2,1
Harlingen	1,76	0,02	1,0
Molenrak 8,8 km ten westen van Den Oever (naam uitvoerpunt: 603,263)	1,38	0,01	0,7
Boontjes, 2 km ten zuiden van Harlingen (naam uitvoerpunt: 186,355)	1,76	0,02	0,9

De effecten van de pompvarianten op de getijslag zijn weergegeven in tabel 8.3 voor de winterperiode en in tabel 8.4 voor de zomerperiode. De effecten van de inzet van pompen zijn op vijf van de zes beschouwde locaties zeer klein ten opzichte van de autonome ontwikkeling: een toename van maximaal 0,01 m of 0,5 % van de getijslag. Alleen in het uitvoerpunt bij Den Oever is een relatief grote toename te zien van de getijslag: +0,05 m (+3,6 %) voor variant A1 in de winterperiode. Een verklaring voor de toename van de getijslag bij Den Oever in de winterperiode is dat het uitvoerpunt vlakbij de pompen ligt en de waterstand daar tijdens een hoogwater wordt verhoogd door de inzet van pompen en doordat er minder gespuid wordt bij laagwater.

Reden voor de toename van de getijslag in de zomerperiode bij variant A1 vaste pompen is dat het laagwater bij Den Oever lager is dan in de situatie zonder pompen. Met vaste pompen (en gereduceerde spuicapaciteit) wordt er bij Den Oever minder gespuid tijdens laagwater dan in de situatie zonder pompen. Uit de vergelijking met andere uitvoerpunten blijkt dat dit effect alleen lokaal optreedt.

Tabel 8.3. Effecten op getijslag gedurende winterperiode (15 dagen)

locatie	autonome ontwikkeling van 2012 tot 2028		effect variant A1		effect variant B1/C1	
	absoluut verschil [m]	relatief verschil [%]	absoluut verschil [m]	relatief verschil [%]	absoluut verschil [m]	relatief verschil [%]
Oudeschild	0,00	0,3	0,00	-0,1	0,00	0,1
Den Oever buiten	0,04	3,0	0,05	3,6	0,03	2,5
Kornwerderzand buiten	0,03	1,6	0,00	-0,3	-0,01	-0,5
Harlingen	0,02	1,2	0,01	0,5	0,01	0,5
Molenrak 8,8 km ten wes-	0,02	1,1	0,00	-0,2	0,00	-0,2

locatie	autonome ontwikkeling van 2012 tot 2028		effect variant A1		effect variant B1/C1	
ten van Den Oever (603,263)						
Boontjes, 2 km ten zuiden van Harlingen (186,355)	0,02	1,2	0,01	0,5	0,01	0,5

Tabel 8.4. Effecten op getijslag gedurende zomerperiode (15 dagen)

locatie	autonome ontwikkeling van 2012 tot 2028		effect variant A1		effect variant B1/C1	
	absoluut verschil [m]	relatief verschil [%]	absoluut verschil [m]	relatief verschil [%]	absoluut verschil [m]	relatief verschil [%]
Oudeschild	0,01	0,5	0,00	-0,1	0,00	0,0
Den Oever buiten	-0,01	-0,6	0,02	1,5	0,00	0,0
Kornwerderzand buiten	0,03	2,1	-0,01	-0,6	0,00	0,0
Harlingen	0,02	1,0	0,00	-0,2	0,00	0,0
Molenrak 8,8 km ten wes- ten van Den Oever (603,263)	0,01	0,7	0,00	0,2	0,00	0,0
Boontjes, 2 km ten zuiden van Harlingen (186,355)	0,02	0,9	0,00	-0,2	0,00	0,0

8.2.3. Getijprisma en geulafmetingen

Het getijprisma door de geulen geeft informatie over mogelijke veranderingen van geulafmetingen. Volgens Stive en Rakhorst [ref. 32.] zijn de geulafmetingen bij dynamisch evenwicht namelijk lineair evenredig met het getijprisma. Veranderingen van het getijprisma leiden tot aanpassingen van de geulafmetingen. Geulafmetingen zijn hierbij gedefinieerd als het natte oppervlak van een dwarsdoorsnede van een geul.

De getijvolume door een geuldwarsdoorsnede is recht evenredig met het getijprisma van het stroomgebied achter de beschouwde geuldoorsnede. Het lokale getijprisma is in beeld gebracht met het getijvolume per eenheid van breedte (som van ebvolume en vloedvolume). Het getijvolume is ongeveer twee keer het getijprisma.

Afbeelding 8.4 geeft een ruimtelijk beeld van het getijprisma en de autonome ontwikkeling van het getijprisma. Duidelijk zichtbaar is dat het debiet in een groot deel van de westelijke Waddenzee toeneemt. Dit is te verklaren door de autonome toename van de getijindringing in de westelijke Waddenzee ten gevolge van zeespiegelstijging.

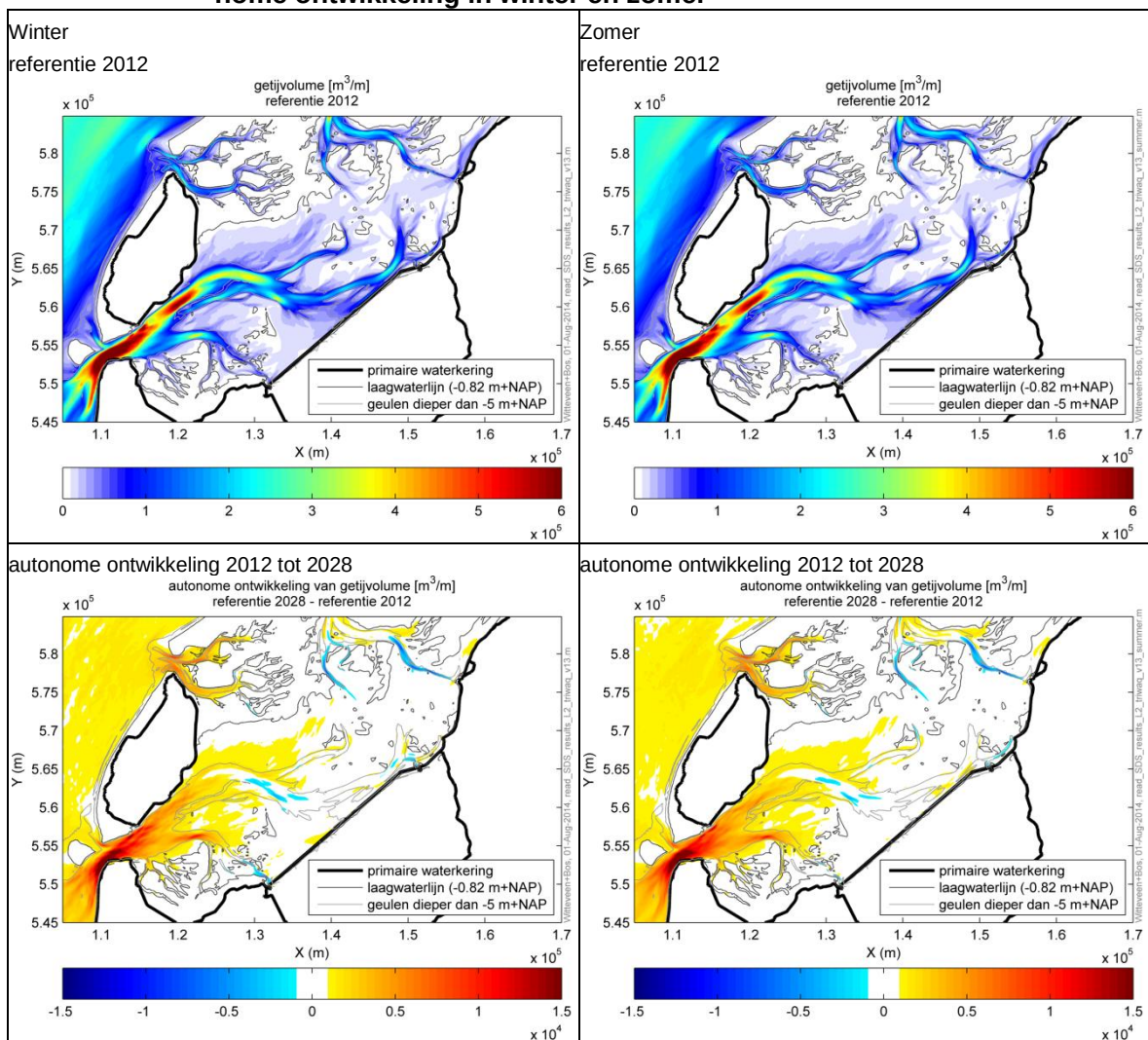
Er zijn alleen effecten van de pompvarianten op het getijprisma in de geulen. Dat blijkt uit afbeelding 8.4. Deze effecten zijn klein ten opzichte van de autonome ontwikkeling. Ook is zichtbaar dat de effecten van de varianten met uithijsbare pompen (B1/C1) kleiner zijn dan van de variant (A1) met vaste pompen.

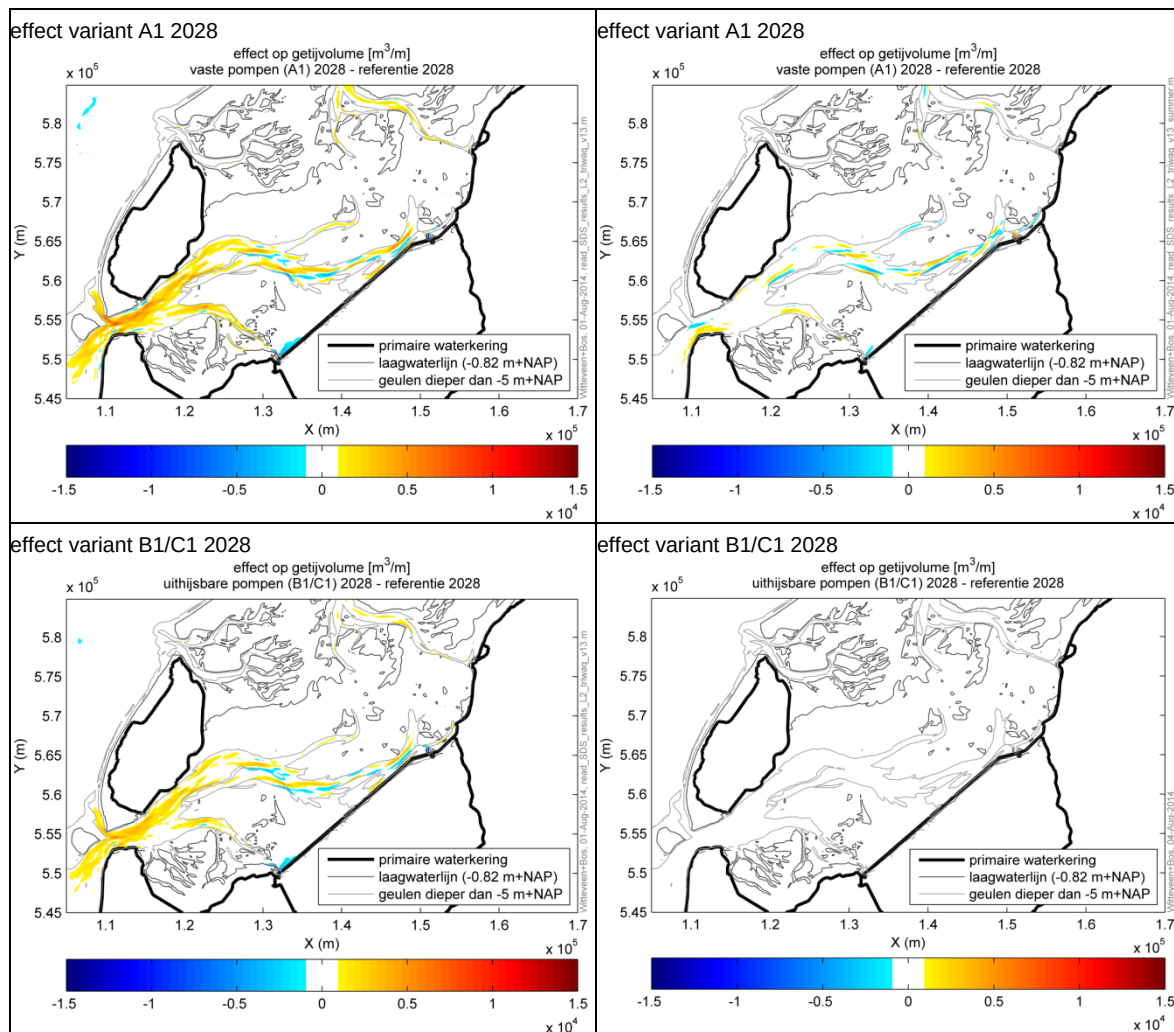
Het effect van de pompvarianten is vooral een toename van het getijvolume in de geulen tussen Den Oever en het Marsdiep. De toename van deze volumeflux is te verklaren vanuit massabehoud: de saliniteit neemt af ten noorden en ten westen van Den Oever (afbeelding 7.1), hierdoor neemt de dichtheid af. De massaflux door een geuldoorsnede (het product van volumeflux en dichtheid) blijft echter gelijk.

Deze toename van het getijprisma kan leiden tot een uit evenwicht zijn van de geulafmetingen vergeleken met het achterliggende getijprisma. Een relatief te groot getijprisma zal leiden tot initiële erosie in de geulen bij Den Oever.

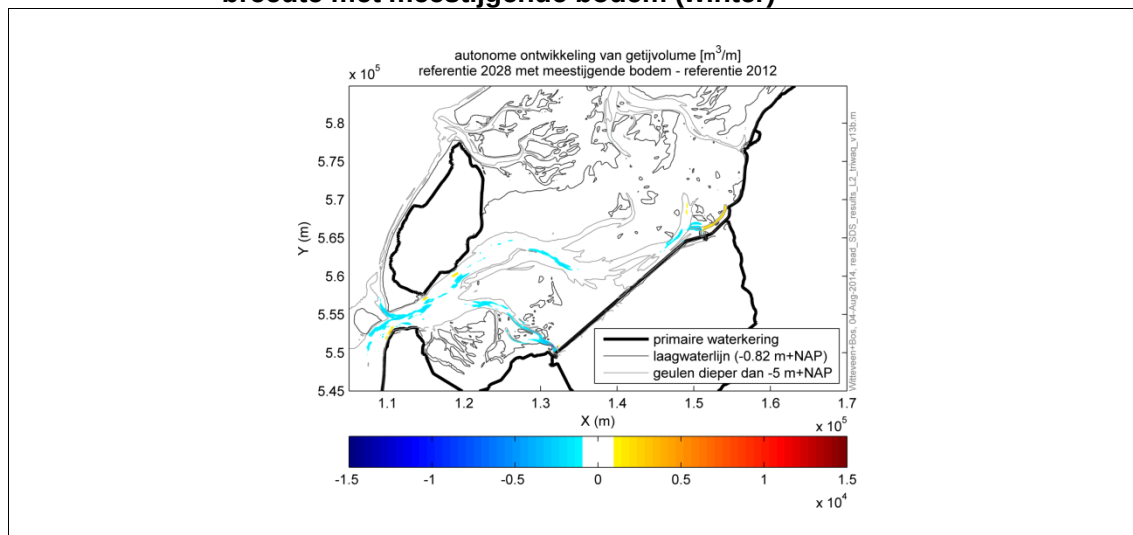
In de Doove Balg (tussen Marsdiep en Kornwerderzand) zien wij als effect van de pompvarianten zowel lokale afnames als lokale toenames van het getijvolume. Dit houdt in dat het debiet zich verplaatst over het dwarsprofiel. Dit zou kunnen leiden tot uitschuring (erosie) van geulwanden op locaties in de dwarsdoorsnede waar het getijvolume toeneemt en tot sedimentatie op locaties waar het getijvolume afneemt.

Afbeelding 8.4. Getijvolume - per eenheid van breedte - in de referentiesituatie in 2012 (bovenste rij) en de autonome ontwikkeling in 2028 ten opzichte van referentiesituatie (2^e rij) in winter en zomer en de effecten de pompvarianten A1 (3^e rij) en B1/C1 (4^e rij) ten opzichte van de autonome ontwikkeling in winter en zomer





Afbeelding 8.5. Autonome ontwikkeling 2028 van het getijvolume per eenheid van breedte met meestijgende bodem (winter)



In de autonome ontwikkeling met meestijgende bodem, verandert het getijvolume nauwelijks, zie afbeelding 8.5.

Wat deze bevindingen betekenen voor erosie, sedimentatie en baggeronderhoud, wordt beschreven in paragraaf 8.3.

8.2.4. Sedimentbalans

Hier wordt een methode gebruikt om de morfologische ontwikkelingen ten gevolge van gradiënten in de sedimenttransportcapaciteit in de geulen te schatten.

De geulen waar effecten van de inzet van pompen zichtbaar zijn op stroomsnelheden en getijprisma zijn de geulen rond Den Oever (Visjagersgaatje, Malzwin, Marsdiep en Texelstroom) en Kornwerderzand (Doove Balg). Zie afbeelding 7.7 en afbeelding 8.4.

Of deze effecten zouden kunnen leiden tot erosie of sedimentatie is bepaald door de geulen op te delen in een aantal secties en per sectie de in- en uitstroom van sediment te bepalen gedurende de zomer- en winterperiode (afbeelding 8.6 en afbeelding 8.8). De sedimenttransporten zijn berekend met de transportformulering van Van Rijn (2007) [ref. 29.] en [ref. 30.] op basis van de tijdreeksen van de stroomsnelheden bij de bodem, voor een aantal uitvoerpunten. Deze zijn vervolgens geïntegreerd over de gehele tijdsperiode en over de breedte van de geul¹. Met de in- en uitstroom van sediment per sectie kan de bodemverandering over de beschouwde periode en over een heel jaar worden bepaald. Een positieve bodemverandering duidt op sedimentatie, een negatieve verandering duidt op erosie.

Er dient te worden opgemerkt dat de beschreven methode slechts wordt toegepast om **relatieve verschillen** tussen de verschillende varianten te kunnen beoordelen en niet om de absolute waarden van sedimentatie of erosie juist te voorspellen.

Wanneer naar de **verschillen** tussen de varianten wordt gekeken, duidt een positief verschil op een toename van de sedimentatie óf een afname van de erosie. Een negatief verschil duidt op een afname van de sedimentatie óf een toename van de erosie.

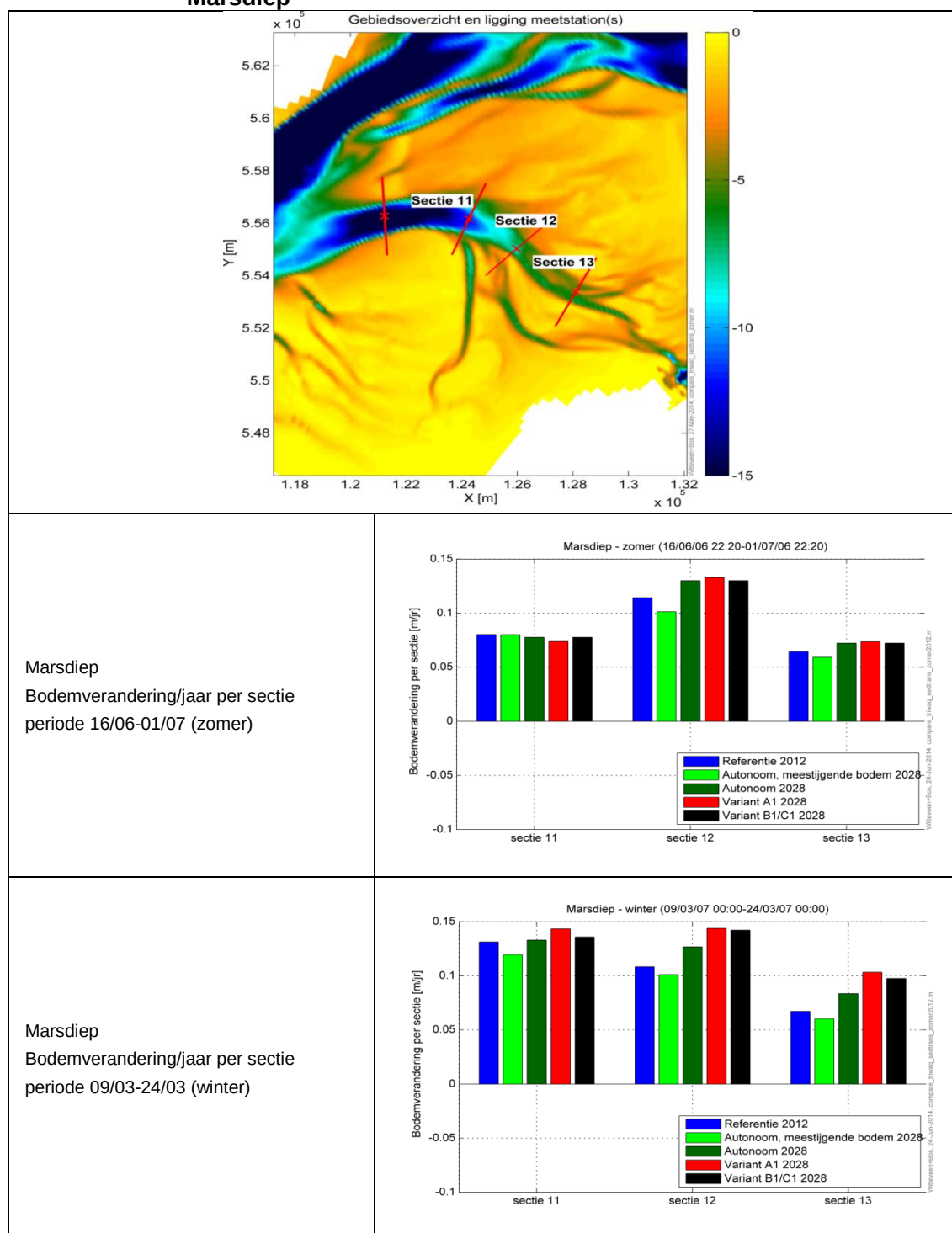
De bodemverandering bij de varianten kan alleen vergeleken worden met de referentiesituatie 2012 en de autonome ontwikkeling in 2028 met vaste bodem, omdat in de varianten gerekend is met een vaste bodem (die niet-meestijgt met zeespiegelstijging).

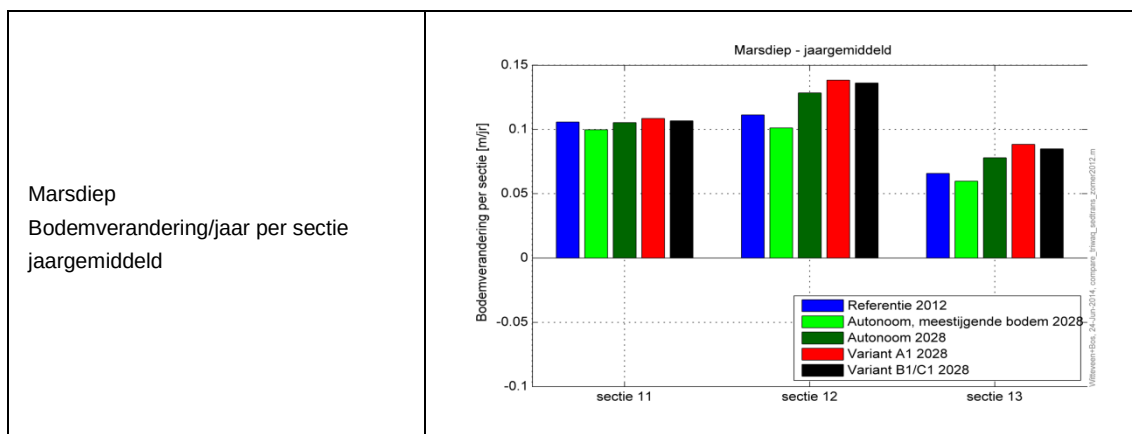
Geul tussen Den Oever en Marsdiep

Afbeelding 8.6 toont de resultaten van een sedimentbalans voor de geul tussen Den Oever en het Marsdiep. Hierbij is de sedimentbalans alleen gericht op het Malzwin en het Visjagersgaatje en niet op het Marsdiep en de Texelstroom, omdat de effecten van de pompvarianten in het Marsdiep en de Texelstroom klein zijn vergeleken met de getijdynamiek.

¹ Voor de breedte van de geul is in de Doove Balg de -5 m+NAP bodemcontour aangehouden. Voor de breedte van de (ondiepere) geulen tussen het Marsdiep en Den Oever is de -3 m+NAP bodemcontour aangehouden.

Afbeelding 8.6. Sedimentatie/erosie in geul van Den Oever-Visjagersgaatje-Malzwin-Marsdiep



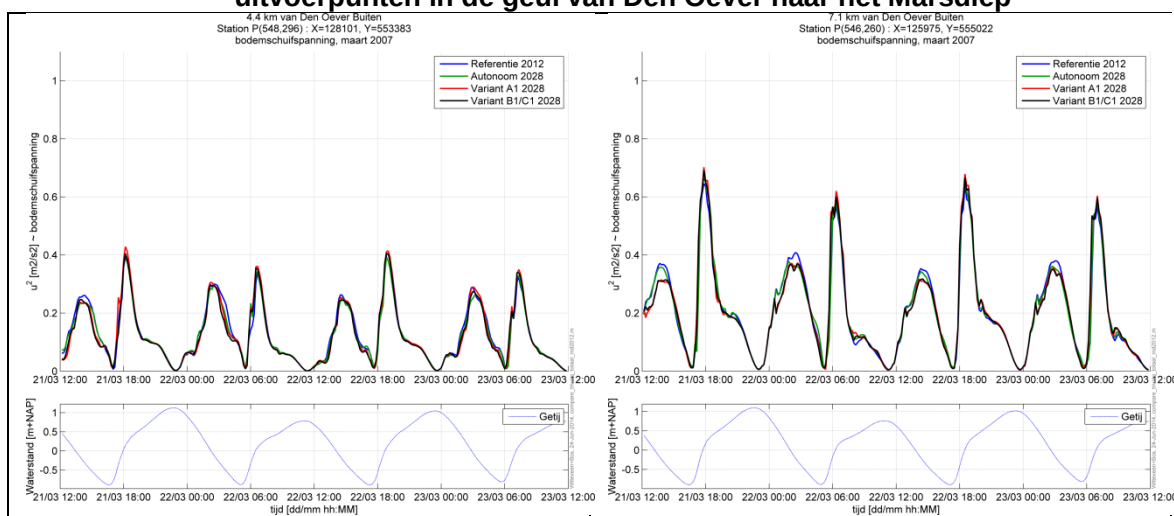


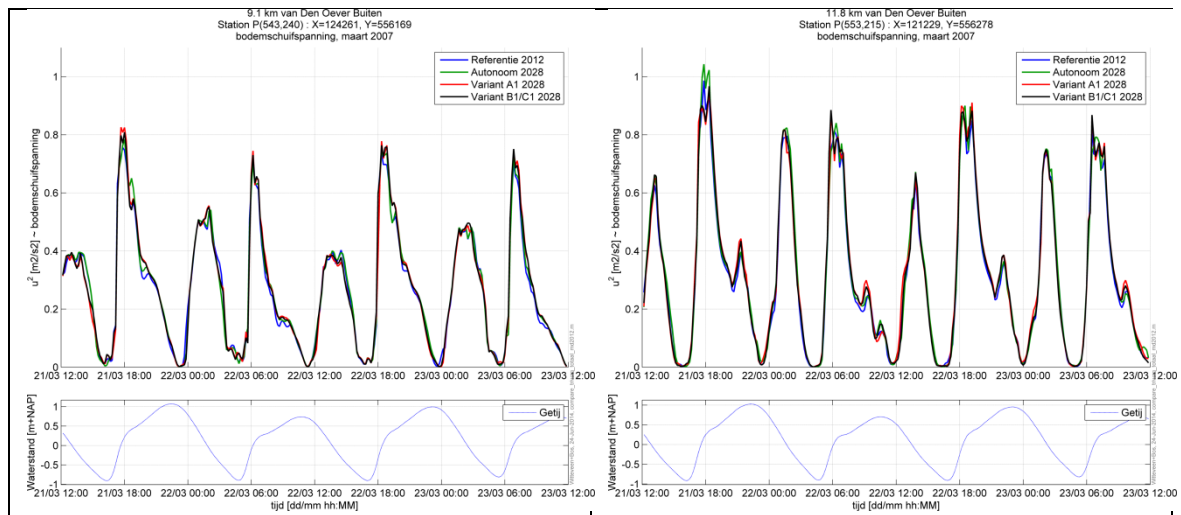
De autonome ontwikkeling laat zowel in de zomer als in de winter voor alle secties op het traject Den Oever-Visjagersgaatje-Malzwin-Marsdiep een toename van de bodemverandering zien. Dit betekent dat er in deze geulen sedimentatie kan gaan optreden gedurende de autonome ontwikkeling tot 2028. Op basis van de autonome toename van het getijprisma in de geulen zal het sediment initieel niet in de geul sedimenteren, maar op de platen bezinken, zie ook paragraaf 8.3.3.

Voor de geulen van Den Oever naar het Marsdiep zijn de effecten als gevolg van pompen kleiner dan de autonome ontwikkeling. Daarnaast is het effect van variant A1 (vaste pompen) groter dan het effect van variant B1/C1 (uithijsbare pompen). Er is zowel in het Malzwin (sectie 11 en deel sectie 12) als in het Visjagersgaatje (deel sectie 12 en sectie 13) een kleine toename van de sedimentatie te zien door de inzet van pompen.

Het feit dat de sedimentatie in deze geulen toeneemt, is te verklaren door een afname van de bodemschuifspanning tijdens laagwater zoals te zien in afbeelding 8.7. Hierin wordt bodemschuifspanning over een springtij getoond voor een aantal uitvoerpunten in deze geul. Met name in het uitvoerpunt op 7,1 km van Den Oever treedt voor beide pompvarianten een sterke afname van de bodemschuifspanning op tijdens de piek van de eb-stroming, doordat er minder gespuid wordt. Dit kan een afname van het zeewaarts gerichte transport verklaren, waardoor er netto meer sediment de geul instroomt dan dat er uitstroomt. Het gevolg is dat er sedimentatie optreedt.

Afbeelding 8.7. Bodemschuifspanning tijdens een springtij op een aantal uitvoerpunten in de geul van Den Oever naar het Marsdiep



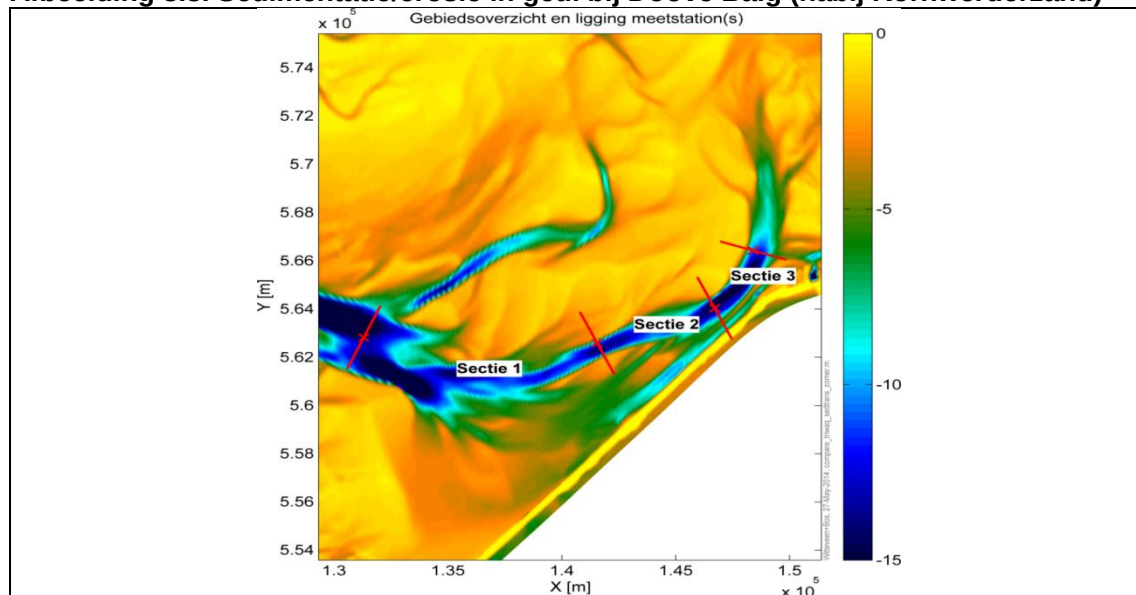


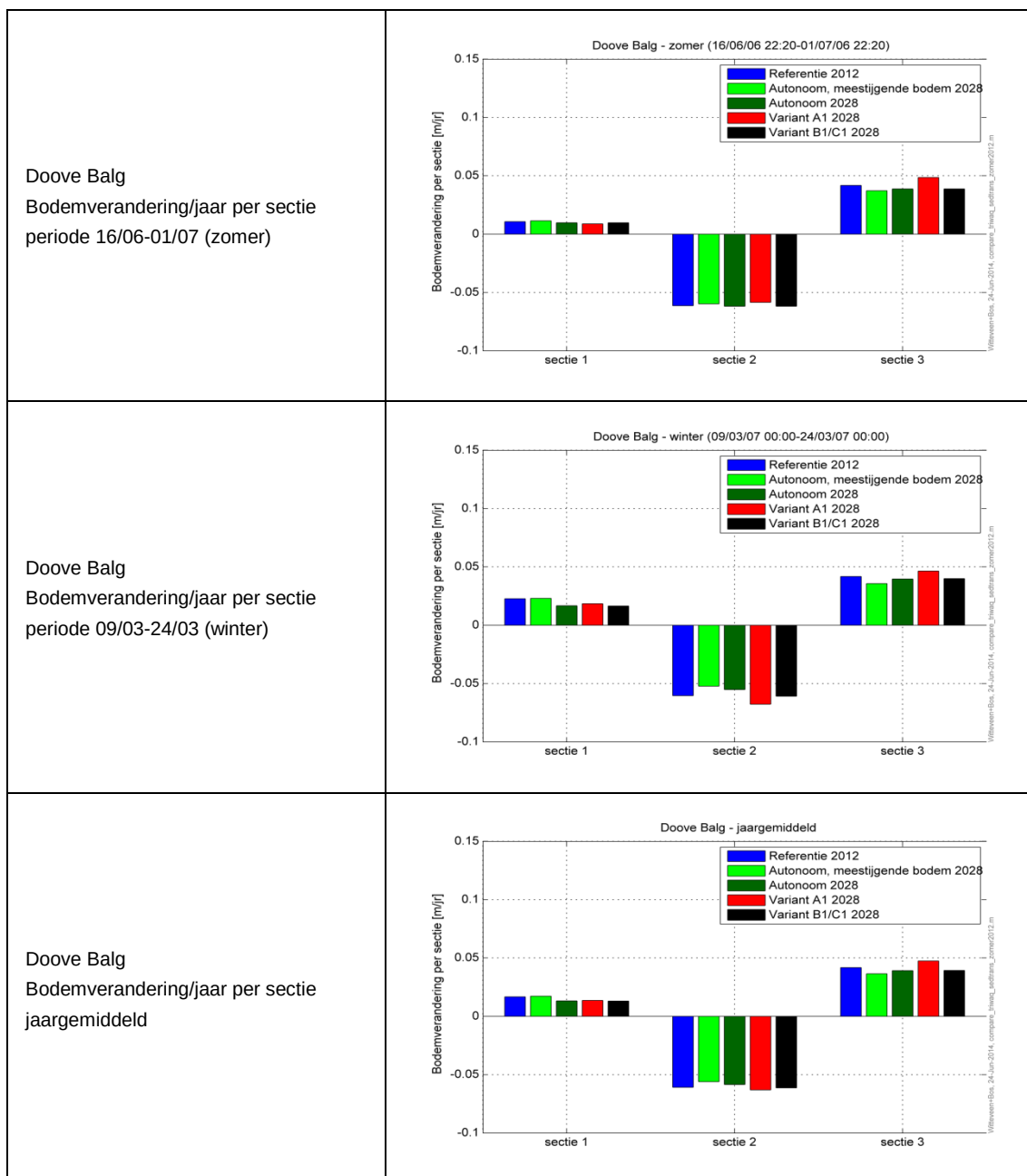
In de geulen tussen Den Oever en het Marsdiep zou extra sedimentatie op kunnen treden, zodat het baggeronderhoud zou kunnen toenemen. De toename van sedimentatie is het grootst in het Visjagersgaatje en aangezien deze geul relatief ondiep is, zal hier de grootste toename van het baggeronderhoud optreden. De huidige baggerhoeveelheid in het Visjagersgaatje bedraagt 108.000 m³/jaar [ref. 28].

Geul Doove Balg - Kornwerderzand

Ook de erosie en sedimentatie in de geul bij Doove Balg en Kornwerderzand is op deze wijze berekend, zie afbeelding 8.8. De veranderingen in de autonome ontwikkeling met en zonder meestijgende bodem zijn klein. Voor alle secties is een lichte afname van de bodemverandering te zien wat duidt op een lichte toename van erosie of een lichte afname van sedimentatie. De ontwikkeling (autonom met een vaste bodem) is het sterkst bij sectie 1.

Afbeelding 8.8. Sedimentatie/erosie in geul bij Doove Balg (nabij Kornwerderzand)





In de geul bij Doove Balg en Kornwerderzand (afbeelding 8.8) verschilt het effect van de inzet van pompen per sectie. In sectie 1 is geen effect waarneembaar, in sectie 2 is een geringe toename van de erosie te zien en in sectie 3 een toename van de sedimentatie.

In de geul bij Kornwerderzand (sectie 3) is ook een toename van sedimentatie te zien. Deze geul is relatief diep, zodat dit niet zal leiden tot extra baggeronderhoud. Ook in de huidige situatie vindt geen baggeronderhoud plaats in deze geul [ref. 28.].

8.2.5. Baggeronderhoud havens

Het gemiddelde baggervolume per jaar, voor verschillende havens rond de westelijke Waddenzee, is weergegeven in tabel 8.5, voor de huidige situatie. Het baggeronderhoud is het grootst voor de grote havens in het gebied, Den Helder en Harlingen. Voor de havens

nabij de uitwateringscomplexen is de uitwatering van zoet IJsselmeerwater van groot belang op het baggeronderhoud, omdat de grote zout-zoet variaties zorgen voor dichtheidsstromingen die een grotere uitwisseling veroorzaken van slibrijk buitenwater met de haven.

De belangrijkste parameters die van belang zijn voor de aanslibbing in de havens zijn:

- oppervlakte van de haven;
- getijslag bij de havenmond;
- breedte (en vorm) van de havenmond;
- diepte van de haven en haveningang;
- getijgeïnduceerde stroomsnelheid (en oscillaties daarvan);
- dichtheidsvariaties bij de havenmond gedurende de getijcyclus;
- slibconcentratie bij de haveningang.

Tabel 8.5. Gemiddeld jaarlijks baggeronderhoud voor havens rond de westelijke Waddenzee, in de huidige situatie

haven	volume (in m ³ /jr)	periode	bron
Den Helder (marinehaven)	780.000	(1994-1999)	Eysink (2003) [ref. 11.]
Harlingen	1.400.000	(1997-2000)	Eysink (2003) [ref. 11.]
Kornwerderzand	200.000	(1996-2000)	Eysink (2003) [ref. 11.]
Kornwerderzand	240.000	(2003-2012)	Rijkswaterstaat Noord-Nederland (2013) [ref. 28.]
Den Oever	100.000	(1996-2000)	Eysink (2003) [ref. 11.]
Den Oever	152.000	(2003-2012)	Rijkswaterstaat Noord-Nederland (2013) [ref. 28.]
Oudeschild	11.000	(1981-1990)	Svasek, (1991) [ref. 33.]

Volgens de methode van Eysink [ref. 9.], in combinatie met vereenvoudigingen van Van Rijn [ref. 29.], zijn de baggervolumes voor de verschillende havens in de huidige situatie gemodelleerd. De modelinstellingen en berekende baggervolumes zijn conform [ref. 11.].

De autonome ontwikkeling (met vaste bodem) en de effecten van de varianten A1 en B1/C1 zijn onderzocht door de veranderingen in de hydrodynamische condities - getijslag, stroomsnelheden en dichtheidsvariaties - toe te passen op de modelinvoer van de methode Eysink. Merk op dat de uitgevoerde TRIWAQ modellering voor de westelijke Waddenzee een zogenaamd -farfield model- is waar het de stroming in en rond de havens betreft. De grove schematisatie van en nabij de havens resulteert zodoende in een grove indicatie van de invloed op de onderzochte effecten op het baggeronderhoud. Voor een betere hydrodynamische beschrijving van de stroming in en rond de havens is een zogenaamd nearfield model nodig, wat buiten het kader van dit onderzoek valt.

De eindresultaten van de modelberekeningen voor de veranderingen van het baggerbezwaaar van de verschillende havens staan weergegeven in tabel 8.6. De veranderingen ten gevolge van de autonome ontwikkeling (met vastgehouden bodem) zijn de procentuele toenames of afnames van de baggerhoeveelheden in 2028 ten opzichte van de huidige situatie.

Tabel 8.6. Berekende veranderingen van het jaarlijks baggeronderhoud van de havens, in procenten

haven	autonome ontwikkeling 2012 tot 2028			variant A1 (t.o.v. autonome ontwikkeling 2028)			variant B1/C1 (t.o.v. autonome ontwikkeling 2028)		
	winter	zomer	jaar	winter	zomer	jaar	winter	zomer	jaar
Den Helder	-1	0	-1	+2	0	+1	+2	0	+1
Den Oever	+3	-3	0	-8	0	-4	-7	0	-4
Harlingen	0	+1	+1	-2	0	-1	-2	0	-1
Kornwerderzand	+4	-3	+1	+5	+4	+4	+3	0	+2
Oudeschild	-1	0	-1	+1	0	0	0	0	0

De autonome ontwikkeling is klein: 1 % of minder. Bij Den Oever en Kornwerderzand zijn er wel tegenovergestelde effecten in zomer en winter, die elkaar gemiddeld grotendeels opheffen. Bij een autonome ontwikkeling (met vaste bodem) is de waterdiepte in 2028 groter, en zijn daardoor stroomsnelheden kleiner (bij weinig veranderende debieten). De indringing van zout water in de Waddenzee wordt relatief groter door de grotere waterdiepte.

In de zomer, wanneer er minder gespuid wordt, leidt dit tot kleinere dichtheidsvariëaties gedurende de getijcyclus bij Den Oever en Kornwerderzand. Dit heeft als gevolg dat de uitwisseling door de havenmond ten gevolge van dichtheidseffecten afneemt - en daarmee ook de aanslibbing afneemt voor de autonome ontwikkeling.

In de winter daarentegen, treden bij het spuien juist grotere dichtheidsfluctuaties gedurende de getijcyclus bij de havenmond op, met een grotere dichtheidsgeïnduceerde wateruitwisseling door de havenmond. Dientengevolge neemt de aanslibbing voor de autonome ontwikkeling in de winter toe in de twee havens langs de Afsluitdijk.

De effecten van het gewijzigde uitwateringsregime ten gevolge van de inzet van pompen op het baggerbezwaar in de havens rond de westelijke Waddenzee staan samengevat in tabel 8.6. De veranderingen zijn in procenten ten opzichte van de autonome ontwikkeling in 2028. Voor de zomerperiode is er bij variant B1/C1 er geen invloed, omdat de uithijsbare pompen niet of nauwelijks zullen worden ingezet bij de verminderde uitslaghoeveelheden in de zomer.

De grootste effecten op het baggeronderhoud zijn in de havens direct bij de uitwateringsmiddelen: Den Oever (-4 % bij alle varianten) en Kornwerderzand (+4 % bij variant A1 en +2 % bij variant B1/C1). De relatieve effecten bij de haven van Harlingen zijn -1 % bij alle varianten en bij de haven van Den Helder +1 % bij alle varianten. De effecten bij Harlingen en Den Helder zijn even groot, maar tegengesteld aan de autonome ontwikkeling (1 %), zodat er ten opzichte van 2012 gemiddeld geen verandering zal zijn.

8.3. Beoordeling morfologie

Door de verschillende bevindingen van de modelresultaten te combineren, wordt in deze paragraaf gekomen tot een beoordeling van de effecten van de inzet van pompen en gewijzigd spui-beheer. Eerst wordt per beoordelingsaspect de autonome ontwikkeling beknopt beschreven. Vervolgens worden de effecten beschreven en vergeleken met de autonome ontwikkeling.

De beoordeling van de volgende aspecten is beschreven:

1. het kombergingsgebied en getijprisma;
2. de oppervlakte van het intergetijdengebied en de diepergelegen platen;
3. verandering van erosie (of sedimentatie);
4. het baggeronderhoud van de (vaar-)geulen;
5. het baggeronderhoud van de havens.

De beoordeling van deze aspecten is relevant voor de volgende thema's.

Tabel 8.7. Relevantie voor andere effectbeoordelingen

beoordelingsaspect	relevant voor thema
het kombergingsgebied en getijprisma	- natuur.
de oppervlakte van het intergetijdengebied en de diepergelegen platen	- natuur.
verandering van erosie (of sedimentatie)	- natuur; - archeologie; - kabels, leidingen en niet-gesprongen explosieven.
het baggeronderhoud van de (vaar-)geulen	- life cycle cost; - hinder scheepvaart.
het baggeronderhoud van de havens	- life cycle cost; - hinder scheepvaart.

De 'intrinsieke' kwaliteit van de Waddenzee met specifieke hydrodynamische en morfologische kenmerken van het systeem zal worden beoordeeld in de natuurtoets, passende beoordeling en het MER.

8.3.1. Kombergingsgebied en getijprisma

Autonome ontwikkeling

De waterstanden nemen toe in de autonome ontwikkeling door zeespiegelstijging bij een vaste bodem. Uit de analyse van de getijslag blijkt dat hierdoor de getij-indringing toeneemt en dat daarmee het getijprisma in de gehele westelijke Waddenzee ook autonoom toeneemt met 0,01 tot 0,05 m (0,4 tot 4 %) in de periode tot 2028 (zie tabel 8.1 en tabel 8.2).

Bij een (direct) meestijgende bodem zullen getijprisma en kombergingsgebied niet beïnvloed worden.

Effecten van de varianten

Lokaal bij Den Oever neemt de getijslag toe in de winterperiode bij alle pompvarianten: +0,05 m (+3,6 %) bij variant A1 en +0,03 m (+2,5 %) bij variant B1/C1. In de zomerperiode neemt bij Den Oever de getijslag alleen toe bij de variant met vaste pompen (A1): +0,02 m (+1,5 %). Zie tabel 8.3 en tabel 8.4. De getijslag neemt vooral toe vlak bij spuicomples Den Oever. In de rest van de westelijke Waddenzee zijn de verschillen met de autonome ontwikkeling een stuk kleiner.

Deze toename van de getijslag bij Den Oever door de inzet van pompen zal leiden tot een toename van het getijprisma in het Marsdiep, Malzwin en noordelijk deel van het Visjagersgaatje. Nabij Den Oever zijn de veranderingen van het achterliggende getijprisma gering.

Vanwege de kleine verschillen van de waterstanden in een groot gedeelte van de Waddenzee vergeleken met de autonome ontwikkeling voor beide pompvarianten, in absolute zin en vergeleken met de autonome ontwikkeling zelf zullen er op andere locaties in de Wad-

denzee geen of slechts kleine effecten optreden voor het kombergingsgebied en voor het getijprisma door de inzet van pompen.

8.3.2. Oppervlakte intergetijdengebied en diepergelegen platen

Autonome ontwikkeling

De oppervlakte van het intergetijdengebied en de diepergelegen platen in de Waddenzee kan veranderen door erosie of sedimentatie alsmede door veranderingen in de waterstanden. De indicatoren die naast de waterstanden van belang kan zijn, zijn de maximaal optredende stroomsnelheid en getijprisma.

In de autonome ontwikkeling met vaste bodem neemt de getijslag toe in de Waddenzee. Dit heeft tot direct gevolg dat het oppervlakte intergetijdengebied toeneemt.

De initiële respons van de Waddenzee op zeespiegelstijging is lichte erosie van de geulen en sedimentatie van de platen. De autonome toename van de getijslag en het getijprisma zullen namelijk initieel erosie in de geulen tot gevolg hebben, omdat de geulafmetingen (met name de waterdiepte +0,5 % tot 1 %) minder hard toenemen door zeespiegelstijging dan het getijprisma (+2 tot 5 % tot 2028). Het sediment dat uit de geulen erodeert zal grotendeels sedimenteren op de platen. Dit zal leiden tot versteiling van de plaatranden en afname van het oppervlakte intergetijdengebied.

Op lange termijn zullen de geulen ook meestijgen met zeespiegelstijging, omdat sedimentatie op de platen zal leiden tot afname van het getijprisma, zodat de geulafmetingen kleiner kunnen zijn (bij dynamisch evenwicht tussen geuldoorsnede en achterliggend getijprisma). Verder is gebleken dat op de platen opwoeling en erosie door golven dominant zullen zijn. Deze zijn vooral afhankelijk van de waterdiepte, die initieel toeneemt, waardoor de opwoeling op de platen zal afnemen. Ook dit zal leiden tot sedimentatie en een tendens tot meestijgende platen.

Effecten van de varianten

Het effect van de pompvarianten is vooral een toename van het getijprisma in de geulen tussen Den Oever en het Marsdiep. Deze toename van het getijprisma kan leiden tot een uit evenwicht zijn van de geulafmetingen vergeleken met het achterliggende getijprisma. Een relatief te groot getijprisma kan leiden tot erosie in de geulen bij Den Oever.

Deze toename van het getijprisma is kleiner dan 1 % en veel kleiner dan de toename in de autonome ontwikkeling (+2 tot 5 %).

In de Doove Balg (tussen Marsdiep en Kornwerderzand) zien we als effect van de pompvarianten zowel lokale afnames als lokale toenames van het getijvolume. Dit houdt in dat het debiet zich verplaatst over het dwarsprofiel. Dit zou kunnen leiden tot uitschuring (erosie) van geulwanden op locaties waar het debiet toeneemt en tot sedimentatie op locaties waar het debiet afneemt. Het netto effect op het getijprisma zal echter gering zijn.

8.3.3. Verandering van erosie

Autonome ontwikkeling

Autonome veranderingen van de getijslag en het getijprisma in de westelijke Waddenzee wijzen op het risico van (extra) erosie van de geulen als initiële respons op zeespiegelstijging.

De gebruikte sedimentbalans laat echter een sedimentimport zien in de meeste secties van de geulen bij Den Oever en Kornwerderzand. Dit is als volgt te verklaren. Door de toename van het getijprisma nemen de stroomsnelheden in de geulen toe. Dit leidt tot vergroting van de sedimenttransportcapaciteit. Hierdoor nemen de ruimtelijke gradiënten in de sedimenttransportcapaciteit toe, waardoor zowel import als export van sediment in de secties toeneemt. Dit sediment zal niet bezinken in de geulen maar terechtkomen op de naastgelegen platen. Met vloed gaat namelijk het water van de geulen naar de platen. Omdat de stroomsnelheden op de platen daar minder groot zijn dan in de geulen zal het sediment daar (tijdens kentering) bezinken.

Op de lange termijn zullen de geulen ook (vertraagd) meestijgen met zeespiegelstijging, omdat het getijprisma weer zal afnemen door de extra sedimentatie op de platen.

Effecten van de varianten

Op basis van het getijprisma en de sedimentbalans zijn de volgende conclusies getrokken over de effecten van de inzet van pompen en gewijzigd spuibeheer op de verandering van erosie/sedimentatie in de geulen:

- effecten van de autonome ontwikkeling zijn groter dan de effecten van de pompvarianten;
- in het Malzwin en het Visjagersgaatje zal de erosie initieel toenemen (minder dan 1 % toename van getijprisma). Op lange termijn zal echter sedimentatie optreden;
- effecten in de Doove Balg zijn zowel toename van sedimentatie en toename van erosie. Dit zou kunnen leiden tot uitschuring (erosie) van geulwanden op locaties waar het debiet toeneemt en tot sedimentatie op locaties waar het debiet afneemt. Het netto effect zal echter gering zijn.

8.3.4. Baggeronderhoud geulen

Autonome ontwikkeling

In de huidige situatie worden er regelmatig baggerwerkzaamheden uitgevoerd aan het Visjagersgaatje. De huidige baggerhoeveelheid in het Visjagersgaatje bedraagt 108.000 m³/jaar. Het is niet duidelijk of baggeronderhoud zal toenemen, omdat zeespiegelstijging als initiële morfologische respons zal leiden tot afname van sedimentatie (relatieve erosie) in de geulen (vanwege de toename van het getijprisma) en op langere termijn tot toename van sedimentatie.

Voor de geul bij Doove Balg en Kornwerderzand is een lichte afname te zien van de sedimentatie of een lichte toename van de erosie. In de huidige situatie vindt geen baggeronderhoud plaats in deze geul [ref. 28].

Effecten van de varianten

De effecten van de pompvarianten op de geulen zijn klein ten opzichte van de autonome ontwikkeling. Daarom is ook het effect van de pompvarianten op het baggeronderhoud klein.

Verder zijn de effecten van uithijsbare pompen op de geulen kleiner dan de effecten van vaste pompen.

8.3.5. Baggeronderhoud havens

Autonome ontwikkeling

De autonome ontwikkeling van het baggeronderhoud van de havens langs de Waddenzee is klein: één procent of minder. Bij Den Oever en Kornwerderzand zijn er wel tegenoverge-

stelde effecten in zomer en winter, die elkaar gemiddeld grotendeels opheffen. Bij een autonome ontwikkeling (met vaste bodem) is de waterdiepte in 2028 groter, en zijn daardoor stroomsnelheden kleiner (bij weinig veranderende debieten).

De indringing van zout water in de Waddenzee wordt relatief groter door de grotere waterdiepte. In de zomer, wanneer er minder gespuid wordt, leidt dit tot kleinere dichtheidsvariaties gedurende de getijcyclus bij Den Oever en Kornwerderzand. Dit heeft als gevolg dat de uitwisseling door de havenmond ten gevolge van dichtheidseffecten afneemt - en daarmee ook de aanslibbing afneemt voor de autonome ontwikkeling.

In de winter daarentegen, treden bij het spuien juist grotere dichtheidsfluctuaties gedurende de getijcyclus bij de havenmond op, met een grotere dichtheidsgeïnduceerde wateruitwisseling door de havenmond. Dientengevolge neemt de aanslibbing voor de autonome ontwikkeling in de winter toe in de havens van Den Oever en Kornwerderzand.

Effecten van de varianten

De effecten van het gewijzigde uitwateringsregime - ten gevolge van de inzet van pompen - op het baggerbezwaar in de havens rond de westelijke Waddenzee staat samengevat in tabel 8.6. De veranderingen zijn in procenten ten opzichte van de autonome ontwikkeling in 2028. Voor de zomerperiode is er bij variant B1/C1 er geen invloed, omdat de uithijsbare pompen niet of nauwelijks zullen worden ingezet bij de verminderde uitslaghoeveelheden in de zomer.

De grootste effecten op de baggerhoeveelheden zijn in de havens direct bij de uitwateringsmiddelen: Den Oever (-4 % bij alle varianten) en Kornwerderzand (+4 % bij variant A1 en +2 % bij variant B1/C1). De relatieve effecten bij de haven van Harlingen zijn -1 % bij alle varianten en bij de haven van Den Helder +1 % bij alle varianten. De effecten bij Harlingen en Den Helder zijn even groot, maar tegengesteld aan de autonome ontwikkeling (1 %), zodat er ten opzichte van 2012 gemiddeld geen verandering zal zijn.

8.4. Samenvatting morfologie

De beoordeling van de effecten van de inzet van pompen bij Den Oever en van gewijzigd spui-beheer op morfologie is samengevat in de onderstaande tabel.

Tabel 8.8. Beoordeling van pompvarianten op beoordelingscriteria voor morfologie

beoordelingscriteria	autonome ontwikkeling 2012 tot 2028 (met vaste bodem)	effecten vaste pompen (variant A1) in 2028	effecten uithijsbare pompen (variant B1/C1) in 2028
invloed op het kombergingsgebied en getijprisma	- toename van getijprisma in groot deel van westelijke Waddenzee met 0,4 tot 4 %.	- lokale toename van getijprisma bij Den Oever (winter: +3,6 %, zomer +1,5 %); - beoordeling: positief (+) vanwege lokale toename.	- lokale toename van getijprisma bij Den Oever bij inzet van pompen: +2,5 %; - beoordeling: positief (+) vanwege lokale toename.
oppervlakte intergetijdengebied en diepergelegen platen	- toename door grotere getijslag; - afname door versteiling van plaatranden.	- kleine veranderingen ten opzichte van autonome ontwikkeling; - beoordeling: neutraal (0).	- kleine veranderingen ten opzichte van autonome ontwikkeling; - beoordeling: neutraal (0).
verandering van erosie	- initiële erosie van geulen door toename van getijprisma;	- initieel lokale toename van erosie in Malzwin en Visjagersgaatje;	- initieel lokale toename van erosie in Malzwin, Visjagersgaatje en Doove

beoordelingscriteriën	autonome ontwikkeling 2012 tot 2028 (met vaste bodem)	effecten vaste pompen (variant A1) in 2028	effecten uithijsbare pompen (variant B1/C1) in 2028
	- op lange termijn zullen de geulen vertraagd meestijgen met zeespiegelstijging door afname van het getijprisma ten gevolge van sedimentatie op de platen.	- mogelijke verplaatsing van geul Doove Balg; - in grote delen van de westelijke Waddenzee verwaarloosbare effecten; - beoordeling: negatief (-)¹.	- Balg; - mogelijke verplaatsing van geul Doove Balg; - 0 in grote delen van de westelijke Waddenzee verwaarloosbare effecten; - beoordeling: negatief (-)¹.
baggeronderhoud geulen	- initieel afname van baggeronderhoud geulen door toename van getijprisma.	- kleine veranderingen ten opzichte van autonome ontwikkeling.	- kleine veranderingen ten opzichte van autonome ontwikkeling.
baggeronderhoud havens	- autonome ontwikkeling in winter en zomer is tegengesteld en heffen elkaar grotendeels op; - toename baggeronderhoud Kornwerderzand (+1 %); - afname baggeronderhoud Den Helder (-1 %); - verwaarloosbare verandering van baggeronderhoud Den Oever (0 %); - toename van baggeronderhoud Harlingen (+1 %).	- toename baggeronderhoud Kornwerderzand (+4 %); - toename baggeronderhoud Den Helder (+1 %); - afname van baggeronderhoud Den Oever (-4%); - afname van baggeronderhoud Harlingen (-1 %).	- toename baggeronderhoud Kornwerderzand (+2 %); - toename baggeronderhoud Den Helder (+1 %); - afname van baggeronderhoud Den Oever (-4 %); - afname van baggeronderhoud Harlingen (-1 %).

8.5. Doorkijk tot 2050

De autonome ontwikkeling en de effecten die voor zichtjaar 2028 gekwantificeerd en beschreven zijn, zullen in de periode tot 2050 in versterkte mate optreden, omdat de spuicapaciteit zal afnemen en de pompcapaciteit zal toenemen (door de inbouw van extra pompen).

De autonome ontwikkeling van de morfologie in de Waddenzee is gevoelig voor de mate waarin de bodem van de Waddenzee meestijgt met zeespiegelstijging. Het is de verwachting dat bodem van de Waddenzee op lange termijn vertraagt mee zal stijgen met zeespiegelstijging.

Op basis van de berekeningen van 2028 zullen de effecten van de inzet van pompen en gewijzigd spui-beheer op de morfologie van de Waddenzee ook in de periode tot 2050 kleiner zijn dan de autonome ontwikkeling en de natuurlijke dynamiek van de Waddenzee.

¹ Negatieve beoordeling bij verandering van erosie is puur gebaseerd op de erosie zelf, en niet op het effect van deze erosie op bijvoorbeeld archeologie, kabels, leidingen, niet-gesprongen explosieven.

8.6. Gevoeligheid voor uitgangspunten

Klimaatsscenario

De autonome ontwikkeling van de morfologie van de Waddenzee is gevoelig voor de mate van zeespiegelstijging. Initiële respons van de Waddenzee op zeespiegelstijging is een toename van de getij-indringing. Dit zal initieel leiden tot een autonome toename van het getijprisma, het oppervlakte intergetijdengebied en zal initieel leiden tot erosie van geulen en sedimentatie van platen. Op langere termijn zal ook sedimentatie van de geulen optreden door de afname van het getijprisma ten gevolge van sedimentatie op de platen.

Het gehanteerde klimaatsscenario is een bovengrens van scenario G van het KNMI uit 2006. Een overzicht van de zeespiegelstijging en verandering van de IJsselafvoer bij verschillende klimaatscenario's is te vinden in tabel 5.2. De bijbehorende zeespiegelstijging van 0,25 m tot 2050 valt binnen de bandbreedte van klimaatscenario's W en W+, maar de bovengrens voor zeespiegelstijging is bij klimaatscenario's W en W+ hoger (0,35 m) dan bij klimaatscenario G (0,25 m). Volgens klimaatscenario G neemt de IJsselafvoer in alle maanden toe. Bij klimaatscenario W en W+ is er in de maanden juni tot en met november een afname van de IJsselafvoer terwijl volgens klimaatscenario G dan een toename van de IJsselafvoer verwacht wordt. De toename van de IJsselafvoer is in januari tot en met april hoger bij klimaatscenario's W en W+ dan bij klimaatscenario G [ref. 6].

Een ander klimaatsscenario zal merkbaar zijn op de relatieve effecten van de inzet van pompen doordat een ander klimaatsscenario zal leiden tot mogelijke toe- of afname van spui- en pompdebieten.

Op basis van berekeningen van de autonome ontwikkeling bij klimaatscenario G zullen de effecten van de inzet van pompen en gewijzigd spuibeheer op de morfologie van de Waddenzee ook bij een ander klimaatsscenario kleiner zijn dan autonome ontwikkeling en de natuurlijke dynamiek van de Waddenzee.

Verdieping Boontjes

De conclusies uit deze effectbepaling van de inzet van pompen en gewijzigd spuibeheer zullen naar alle waarschijnlijkheid niet wijzigen door het wel of niet meenemen van de verdieping van de Boontjes in de referentiesituatie om verschillende redenen:

- het wel of niet meenemen van de verdieping van de Boontjes heeft geen invloed op de berekende spui- en pompdebieten. De reden hiervan is dat de waterstand op de Waddenzee niet beïnvloed zal worden door de drempelverwijdering in de vaargeul van de Boontjes volgens [ref. 12.]. Hierdoor veranderen de hydraulische randvoorwaarden van de gebruikte modellering niet;
- volgens [ref. 12.] is het vrijwel uit te sluiten dat verdieping van de vaargeul de Boontjes zou kunnen leiden tot een verandering van de grootschalige morfologie van de Waddenzee. Het verdiepen van de Boontjes zal waarschijnlijk kunnen leiden tot een lokale toename van plaataangroei nabij deze verdieping;
- de conclusies in deze rapportage zijn gebaseerd op relatieve verschillen ten opzichte van de autonome ontwikkeling en niet zozeer op absolute waarden van parameters. Kleine wijzigingen in zowel de referentiesituatie als de variant zullen daarom nauwelijks doorwerken in de relatieve verschillen.

9. CONCLUSIES

9.1. Algemeen

Door inzet van pompen voor de waterhuishouding van het IJsselmeer, wordt de waterkwaliteit en morfologie op de Waddenzee beïnvloed. De effecten van de inzet van pompen, voor de onderzochte varianten A1 (vaste pompen bij Den Oever) en B1/C1 (uithijsbare pompen bij Den Oever), op de waterkwaliteit en morfologie zijn overwegend (zeer) klein. Dit geldt zeker wanneer deze effecten vergeleken worden met de effecten van de autonome ontwikkeling ten gevolge van de beschouwde zeespiegelrijzing in 2028.

De morfologische ontwikkelingen in de Westelijke Waddenzee worden beïnvloed door de hydrodynamica en de wisselwerking met het ecosysteem (met name voor de slibfractie). Enerzijds wordt de morfologie in de ondiepe delen gedomineerd door de lokale windgolven en golfgedreven stromingen - die niet veranderen door de inzet van pompen, doordat de waterstanden alleen veranderen dichtbij (tot enkele kilometers van) de Afsluitdijk. Anderzijds is er wel een kleine invloed van de pompvarianten op de debieten door de geulen; met name de geulen naar de uitwateringscomplexen.

9.2. Effecten op spui- en pompdebieten

Voor het effect op spui en pompdebieten wordt gekeken naar de autonome ontwikkeling en het effect van varianten.

In de autonome ontwikkeling moet er in 2028 vaker gespuid worden dan in de referentiesituatie (2012). Door inzet van pompen wordt er meer afgevoerd via Den Oever en minder via Kornwerderzand. Bij vaste pompen (variant A1) worden pompen vaker ingezet dan bij uithijsbare pompen (variant B1/C1). Een beschrijving van autonome ontwikkeling en de effecten op de spui- en pompdebieten is opgenomen in paragraaf 6.3.

9.3. Effecten op waterkwaliteit Waddenzee

Bij de autonome ontwikkeling van waterkwaliteit en morfologie is de situatie beschouwd dat de bodem meebeweegt met de zeespiegelstijging en de situatie dat deze niet meestijgt en gelijk blijft.

De autonome ontwikkeling 2012 tot 2028 in het geval dat de bodem van de Waddenzee meestijgt met zeespiegelstijging laat weinig veranderingen zien in de saliniteit, nutriëntenhuishouding en stroomsnelheden ten opzichte van de referentiesituatie. De autonome ontwikkeling met vaste bodem is duidelijk groter dan die met meestijgende bodem:

- door toename van de getij-indringing neemt de saliniteit toe en de neemt de hoeveelheid nutriënten afkomstig uit het IJsselmeer af;
- er zal geen extra vertroebeling optreden rond de geulen in de autonome ontwikkeling.

De **effecten van de pompvarianten op waterkwaliteit** (saliniteit en hoeveelheid nutriënten) zijn **klein ten opzichte van de variatie van de waterkwaliteit gedurende het jaar**. De effecten zijn merkbaar over de gehele westelijke Waddenzee door de relatief lange verblijftijd van het geloosde water. De effecten zijn over het algemeen groter voor de variant met vaste pompen (A1) dan voor de variant met uithijsbare pompen (B1/C1). De vertroebeling verandert niet of nauwelijks als gevolg van de inzet van pompen.

De uitkomsten van dit verdiepend effectonderzoek waterkwaliteit en morfologie van de Waddenzee zullen worden gebruikt voor de beoordeling van de effecten van de natuur in onder andere de passende beoordeling en de natuurtoets.

De autonome ontwikkeling en de effecten van varianten op waterkwaliteit zijn in meer detail beschreven in paragraaf 7.5.

9.4. Effecten op morfologie Waddenzee

De beoordeling van de effecten van de inzet van pompen bij Den Oever en van gewijzigd spui-beheer op de morfologie is samengevat in de onderstaande tabel.

Tabel 9.1. Beoordeling van pompvarianten op beoordelingscriteria voor morfologie

beoordelingscriteria	autonome ontwikkeling 2012 tot 2028 (met vaste bodem)	effecten vaste pompen (variant A1) in 2028	effecten uithijsbare pompen (variant B1/C1) in 2028
invloed op het kombergingsgebied en getijprisma	- toename van getijprisma in groot deel van westelijke Waddenzee met 0,4 tot 4 %.	- lokale toename van getijprisma bij Den Oever (winter: +3,6 %, zomer +1,5 %); - beoordeling: positief (+) vanwege lokale toename.	- lokale toename van getijprisma bij Den Oever bij inzet van pompen: +2,5 %; - beoordeling: positief (+) vanwege lokale toename.
oppervlakte intergetijdengebied en diepergelegen platen	- toename door grotere getijslag; - afname door versteiling van plaatranden.	- kleine veranderingen ten opzichte van autonome ontwikkeling; - beoordeling: neutraal (0) .	- kleine veranderingen ten opzichte van autonome ontwikkeling; - beoordeling: neutraal (0) .
verandering van erosie	- initiële erosie van geulen door toename van getijprisma; - op lange termijn zullen de geulen vertraagd meestijgen met zeespiegelstijging door afname van het getijprisma ten gevolge van sedimentatie op de platen.	- initieel lokale toename van erosie in Malzwin en Visjagersgaatje; - mogelijke verplaatsing van geul Doove Balg; - in grote delen van de westelijke Waddenzee verwaarloosbare effecten; - beoordeling: negatief (-) ¹ .	- initieel lokale toename van erosie in Malzwin, Visjagersgaatje en Doove Balg; - mogelijke verplaatsing van geul Doove Balg; - 0 in grote delen van de westelijke Waddenzee verwaarloosbare effecten; - beoordeling: negatief (-) ¹ .
baggeronderhoud geulen ²	- initieel afname van baggeronderhoud geulen door toename van getijprisma.	- kleine veranderingen ten opzichte van autonome ontwikkeling.	- kleine veranderingen ten opzichte van autonome ontwikkeling.
baggeronderhoud ² havens	- autonome ontwikkeling in winter en zomer is te	- toename baggeronderhoud Kornwerderzand	- toename baggeronderhoud Kornwerderzand

¹ Negatieve beoordeling bij verandering van erosie is puur gebaseerd op de erosie zelf en niet op het effect van deze erosie op bijvoorbeeld archeologie, kabels, leidingen, niet-gesprongen explosieven.

² De effecten op het baggeronderhoud van de vaargeulen in de Waddenzee en van de Waddenzeehavens zijn beoordeeld in het thema hinder scheepvaart. Daarnaast zijn de bevindingen van dit onderzoek invoer voor de life cycle cost (LCC) van het spuicompex Den Oever.

beoordelingscriteria	autonome ontwikkeling 2012 tot 2028 (met vaste bodem)	effecten vaste pompen (va- riant A1) in 2028	effecten uithijsbare pompen (variant B1/C1) in 2028
	gengesteld en heffen elkaar grotendeels op; - toename baggeronder- houd Kornwerderzand (+1 %); - afname baggeronder- houd Den Helder (-1 %); - verwaarloosbare veran- dering van baggeron- derhoud Den Oever (0 %); - toename van baggeron- derhoud Harlingen (+1 %).	(+4 %); - toename baggeronder- houd Den Helder (+1 %); - afname van baggeron- derhoud Den Oever (-4 %); - afname van baggeron- derhoud Harlingen (-1 %).	(+2 %); - toename baggeronder- houd Den Helder (+1 %); - afname van baggeron- derhoud Den Oever (-4 %); - afname van baggeron- derhoud Harlingen (-1 %).

De autonome ontwikkeling en de effecten van de varianten op de morfologie van de Waddenzee zijn per criterium beschreven in paragraaf 8.3.

9.5. Doorkijk tot 2050

De effecten die voor zichtjaar 2028 gekwantificeerd en beschreven zijn, zullen in de periode tot 2050 in versterkte mate optreden, omdat de spuicapaciteit zal afnemen en de pomp-capaciteit zal toenemen (door inbouw van extra pompen).

De verschillen tussen variant A1 (vaste pompen) en variant B1/C1 (uithijsbare pompen) zullen kleiner worden, omdat bij variant B1/C1 kan minder worden gespuid terwijl bij variant A1 er langer (met grotere capaciteit) gepompt kan worden.

De autonome ontwikkeling van de waterkwaliteit en morfologie in de Waddenzee is gevoelig voor de mate waarin de bodem van de Waddenzee meestijgt met zeespiegelstijging. Het is de verwachting dat bodem van de Waddenzee op lange termijn vertraagt mee zal stijgen met zeespiegelstijging, net zoals de morfologische veranderingen veroorzaakt door afsluiting van de Zuiderzee gedurende decennia plaatsvinden.

Op basis van de berekeningen voor 2028 zullen de effecten van de inzet van pompen en gewijzigd spui-beheer ook in de periode tot 2050 kleiner zijn dan autonome ontwikkeling en de natuurlijke dynamiek van de Waddenzee.

9.6. Gevoeligheid voor uitgangspunten

Klimaatscenario

Het hanteren van een ander klimaatscenario dan klimaatscenario G van KNMI uit 2006 heeft de volgende effecten op de spui- en pompdebieten:

- versnelde zeespiegelstijging zal ertoe leiden dat pompen vaker zullen ingezet worden. Daarnaast zullen de spuidebieten afnemen doordat de spuicapaciteit afneemt als gevolg van afname van het verval;
- tragere zeespiegelstijging zal ertoe leiden dat pompen minder vaak zullen ingezet worden. Daarnaast zullen de spuidebieten minder hard afnemen doordat de spuicapaciteit afneemt als gevolg van kleinere afname van het verval dan in het geval van klimaat-scenario G van KNMI uit 2006;

- toename van neerslag en afvoer zal ertoe leiden dat de spui- en pompdebieten toenemen.

De autonome ontwikkeling van de waterkwaliteit en morfologie van de Waddenzee is gevoelig voor de mate van zeespiegelstijging. Initiële respons van de Waddenzee op zeespiegelstijging is een toename van de getij-indringing:

- dit zal leiden tot een snellere verversing van de Waddenzee. Dit heeft tot gevolg dat de Waddenzee zouter wordt en dat nutriënten uit het IJsselmeer sneller uit de Waddenzee zijn;
- dit zal initieel leiden tot een autonome toename van het getijprisma, het oppervlakte intergetijdengebied en zal initieel leiden tot erosie van geulen en sedimentatie van platen. Op langere termijn zal ook sedimentatie van de geulen optreden door de afname van het getijprisma ten gevolge van sedimentatie op de platen.

Het gehanteerde klimaatscenario is een bovengrens van scenario G van het KNMI uit 2006. Een overzicht van de zeespiegelstijging en verandering van de IJsselafoer bij verschillende klimaatscenario's is te vinden in tabel 5.2. De bijbehorende zeespiegelstijging van 0,25 m tot 2050 valt binnen de bandbreedte van klimaatscenario's W en W+, maar de bovengrens voor zeespiegelstijging is bij klimaatscenario's W en W+ hoger (0,35 m) dan bij klimaatscenario G (0,25 m). Volgens klimaatscenario G neemt de IJsselafoer in alle maanden toe. Bij klimaatscenario W en W+ is er in de maanden juni tot en met november een afname van de IJsselafoer terwijl volgens klimaatscenario G dan een toename van de IJsselafoer verwacht wordt. De toename van de IJsselafoer is in januari tot en met april hoger bij klimaatscenario's W en W+ dan bij klimaatscenario G [ref. 6.].

Een ander klimaatscenario zal merkbaar zijn op de relatieve effecten van de inzet van pompen doordat een ander klimaatscenario zal leiden tot mogelijke toe- of afname van spui- en pompdebieten.

Op basis van berekeningen van de autonome ontwikkeling bij klimaatscenario G zullen de effecten van de inzet van pompen en gewijzigd spuibeheer op waterkwaliteit en morfologie ook bij een ander klimaatscenario kleiner zijn dan autonome ontwikkeling en de natuurlijke dynamiek van de Waddenzee.

Verdieping Boontjes

De conclusies uit deze effectbepaling van de inzet van pompen en gewijzigd spuibeheer zullen naar alle waarschijnlijkheid niet wijzigen door het wel of niet meenemen van de verdieping van de Boontjes in de referentiesituatie.

10. REFERENTIES

1. Aken, H.M. van (2008). Variability of the salinity in the western Wadden Sea on tidal to centennial time scales. In: *Journal of Sea Research* 59 (2008) 121 - 132.
2. Alkyon (2006). 3D-modellering Lauwersmeer. Opzet 3D operationeel model voor zoutindringing en morfologie. In opdracht van Rijkswaterstaat RIKZ. Eindrapport A1618R2r3, 11 mei 2006.
3. Alkyon (2010). MER studie zoutwinning Waddenzee; hydrodynamische effecten; abiotische parameters. In opdracht van Frisia Zout bv. Kenmerk A2062R1 eindrapport 3 mei 2010.
4. de Boer, G.J., Pietrzak, J.D., & Winterwerp, J.C. (2006). On the vertical structure of the Rhine region of freshwater influence. *Ocean Dynamics*, 56(3-4), (special issue PECS 2004), 198-216. doi:10.1007/s10236-005-0042-1.
5. Collard, E.A. en P. Weidema (2008). Actualisatie van de bodemligging van Kuststrookfijn en -grof. In opdracht van Deltares. Svasek Hydraulics, ECOL/08213/1447C, 20 mei 2008.
6. Deltares (2014). Capaciteitsberekening en toetspeil Afsluitdijk. Kenmerk rapport 1208812-000, concept, januari 2014;
7. Elias, E. (2006). Morphodynamics of Texel Inlet. Proefschrift Technische Universiteit Delft. ISBN 1-58603-676-9.
8. Elias, E.P.L., A.J.F. van der Spek, Z.B. Wang en J. de Ronde (2012). Morphodynamic development and sediment budget of the Dutch Wadden Sea over the last century. In: *Netherlands Journal of Geosciences - Geologie en Mijnbouw*, 91-3, blz. 293-310.
9. Eysink, W.D. (1988). Sedimentation in harbour basins - Small density differences may cause serious effects. *Proc. 9th Int. Harbour Congress*, Antwerp, Belgium. Ook als: Delft Hydraulics, Publication No. 417, 1989.
10. Eysink, W.D. and E.J. Biegel (1992). Impact of sea level rise on the morphology of the Wadden Sea in the scope of its ecological function. Investigations on empirical morphological relations. WL|Delft Hydraulics, report H1300.
11. Eysink (2003). Extra spuisluis in de Afsluitdijk - Effect op onderhoud havens. WL|Delft Hydraulics, Rapport H4180.
12. HKV en Witteveen+Bos (2012). Drempelverwijdering Boontjes; effecten op hydrodynamica en morfologie. In opdracht van: provincie Fryslân.
13. KNMI (2011). Tijdsafhankelijke klimaatscenario's voor zeespiegelstijging aan de Nederlandse kust, Technical report; TR-318, De Bilt.
14. Kok, J. de (2002). Brakwater zones rond de Afsluitdijk; 3D modelberekeningen naar water- en zoutbeweging in diverse ontwerpvarianten. Rapport RIKZ/2002.038, september 2002.
15. Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2009). Nationaal Waterplan 2009 - 2015. Rapport 1 december 2009.
16. Oost, A.P. en P.A.H. Kleine Punte (2003). Autonome morfologische ontwikkeling wettelijke Waddenzee, Een doorkijk naar de toekomst, Rapport RIKZ/2004.021.
17. Raaphorst, W. van, V.N. de Jonge (2004). Reconstruction of the Total N and P inputs from the IJsselmeer into the western Wadden Sea between 1935 - 1998. In: *Journal of Sea Research* 51 (2004) 109-131.
18. Ridderinkhof (1990). Residual currents and mixing in the Wadden Sea. PhD thesis. University of Utrecht.
19. Rijkswaterstaat (1998). Sedimentatlas Waddenzee, Ministerie van Verkeer en Waterstaat. Rijkswaterstaat Rijksinstituut voor kust en zee; cd-rom.
20. Rijkswaterstaat Rijksinstituut voor Kust en Zee (2002). Optimale zoetwateraanvoer naar Waddenzee. Kenmerk RIKZ/AB/2002.604x.
21. Rijkswaterstaat (2008). Gebruikershandleiding IPW. Versie 1.11, september 2008.

22. Rijkswaterstaat Waterdienst en Deltares (2009). Modelbeschrijving Kuststrook-fijn model. Website: http://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/applicaties-modellen/water_en_ruimte/gebiedsschematisatie/schematisaties/.
23. Rijkswaterstaat (2011). User's guide for parallel WAQUA/TRIWAQ and for domain decomposition. Version 2.20, June 2011.
24. Rijkswaterstaat IJsselmeergebied (2011). Extra Spuicomplex Afsluitdijk; passende beoordeling; ten behoeve van SNIP 2a besluit. Uitgevoerd door: DHV, Arcadis, Imares en Deltares. Definitief concept, 31 mei 2011.
25. Rijkswaterstaat Dienst IJsselmeergebied (2012a). Nota Afweging ESA; Extra Spuicapaciteit Afsluitdijk; Besluit Pompen-spuien Afsluitdijk. Uitgevoerd door: projectteam ESA Besluit Pompen-Spuien DHV&Arcadis. Kenmerk BPSWp06_R11 versie 1.0.
26. Rijkswaterstaat Dienst IJsselmeergebied (2012b). Nota Effecten; Besluit Pompen-spuien Afsluitdijk. Uitgevoerd door: projectteam ESA Besluit Pompen-Spuien DHV&Arcadis. Kenmerk BPSWp05_R04 versie 1.0, 11 mei 2012.
27. Rijkswaterstaat Midden-Nederland (2013). Startdocument planuitwerking Afsluitdijk. Uitgevoerd door Witteveen+Bos. Referentie: definitief 4.0, 1 augustus 2013.
28. Rijkswaterstaat Noord-Nederland (2013). Rapportage baggerhoeveelheden waterdistrict Waddenzee | 2003 - 2012. Definitief 1.0, 28 maart 2013.
29. van Rijn, L.C. (2005). Chapter 6: Sedimentation of mud in harbour basins. In: Sedimentation and erosion engineering in rivers, estuaries and coastal seas. Aqua Publications, The Netherlands. Van Rijn, L. C. (2007a). Unified view of sediment transport by currents and waves. I: Initiation of motion, bed roughness, and bed-load transport. Journal of Hydraulic Engineering, 133(6), 649-667.
30. van Rijn, L. C. (2007b). Unified view of sediment transport by currents and waves. II: Suspended transport. Journal of Hydraulic Engineering, 133(6), 668-689.
31. Spee, E. en D. Vatvani (2009). Evaluatie van de nieuwe bodem V61-04 voor het Kuststrookmodel; WTI HR-Zout. In opdracht van Rijkswaterstaat Waterdienst. Deltares, 1200103-023-HYE-0001.
32. Stive, M.J.F. and R.D. Rakhorst (2008). Review of empirical relationships between inlet cross-section and tidal prisms. In: Journal of Water Resources and Environmental Engineering, no. 23, November 2008.
33. Svasek (1991). Aanslibbing in de havens rond de Waddenzee. Rapport project 865.
34. Wang, Z.B., P. Hoekstra, H. Burchard, H. Ridderinkhof, H.E. de Swart en M.J.F. Stive (2012). Morphodynamics of the Wadden Sea and its barrier island system. In: Ocean & Coastal Management 68 (2012) 39 - 57.
35. Witteveen+Bos (2014b). Verdiepend effectonderzoek waterhuishouding. Referentie RW1929-5-440/111, definitief 2.0, 1 augustus 2014. In opdracht van Rijkswaterstaat Midden-Nederland.

BIJLAGE I MODELBESCHRIJVING EN MODELVERIFICATIE

I.1. Modelbeschrijving

TRIWAQ is een numeriek waterbewegingsmodel van Rijkswaterstaat. Met dit driedimensionale model kunnen waterstanden, stroomsnelheden en concentraties verdeeld over de waterkolom berekend worden in zeeën, estuaria, meren en rivieren.

Fysische processen

De gebruikte TRIWAQ modelschematisatie van de westelijke Waddenzee is ontwikkeld met behulp van de WAQUA Kuststrook-fijn modelschematisatie ([ref. 5.] en [ref. 31.]). De volgende fysische processen zijn meegenomen in de uitgevoerde berekeningen van de waterbeweging in de westelijke Waddenzee:

- getijbeweging;
- spuien en pompen;
- saliniteitsverschillen;
- 3D-effecten;
- zeespiegelstijging.

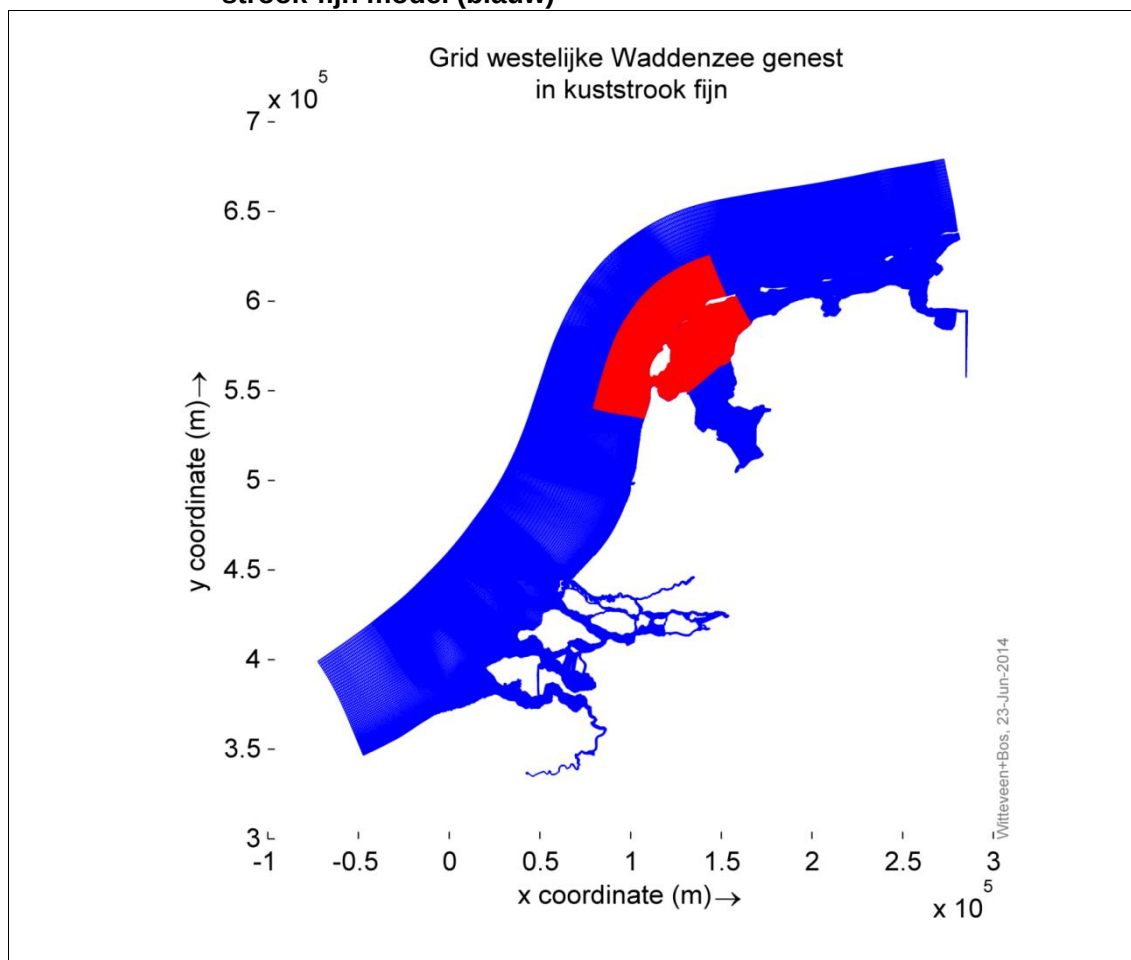
In overeenstemming met eerdere soortgelijke studies in de Waddenzee [ref. 3.], [ref. 11.] en [ref. 20.] is de bijdrage van wind op de waterbeweging van de Waddenzee verwaarloosd in deze studie. Windeffecten zijn wel meegenomen in het bepalen van de spui- en pompgebieden [ref. 35.].

Windgolven zijn niet meegenomen in de berekeningen van de waterbeweging, omdat de grootschalige stroming in de Waddenzee gedomineerd wordt door het getij. Verder zal er geen groot effect van de spuiregime op de windgolven (met name van belang op de platen) optreden.

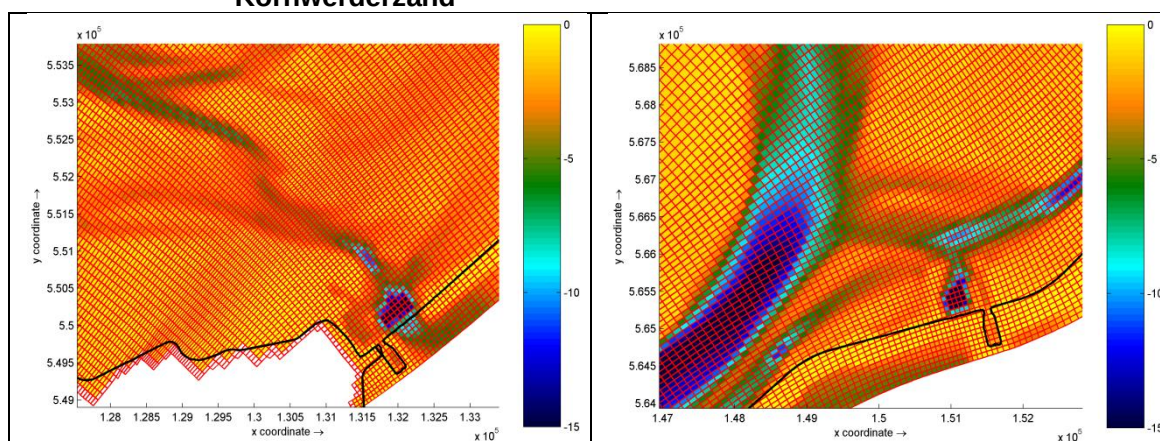
Roosterverfijning

Met de interactieve preprocessor WAQUA (IPW) [ref. 21.] is een uitsnede gemaakt van het kuststrook-fijn model ter plaatse van de westelijke Waddenzee tussen de kop van Noord Holland en het wantij van Terschelling. Het rekenrooster in de uitsnede is in beide horizontale richtingen met een factor 3 verfijnd, zodat de stroming in de belangrijkste geulen van de westelijke Waddenzee met voldoende nauwkeurigheid berekend kan worden. Deze verfijning resulteert in een horizontale roosterresolutie van ongeveer 70 m bij Den Oever en Kornwerderzand (zie afbeelding I.2) en een resolutie van 110 m in het Marsdiep. De contouren van zowel het Kuststrook-fijn model als het westelijke Waddenzee model zijn weer gegeven in afbeelding I.1.

Afbeelding I.1. Contouren van het rekenrooster van het TRIWAQ model van de westelijke Waddenzee (rood) dat met online gekoppeld is aan het kuststrook-fijn model (blauw)



Afbeelding I.2. Het rekenrooster van het TRIWAQ model van de westelijke Waddenzee (rood) nabij spuicomples Den Oever (links) en nabij spuicomples Kornwerderzand



Voor de verticale roosterverdeling is gebruik gemaakt van verticale domeindecompositie [ref. 23.]. Hierbij is gekozen voor zogenaamde sigma-lagen met uniforme laagdikte¹. Dit komt overeen met de aanpak in [ref. 4.] en [ref. 7.]. Er is gerekend met de volgende overgang in het aantal verticale lagen (gaande van het grove naar het fijne rooster):

- 1 verticale laag in het kuststrook-fijn domein;
- 3 verticale lagen over een horizontale strook van 5 km langs de zeeranden van het westelijke Waddenzee domein;
- 12 verticale lagen in het grootste deel van de westelijke Waddenzee. In dit gebied zullen de grootste effecten van de toekomstige inzet van pompen optreden. Het aantal toegepaste verticale lagen is groter dan bij [ref. 2.] en [ref. 7.] (10 lagen) en kleiner dan bij [ref. 4.] (16 lagen).

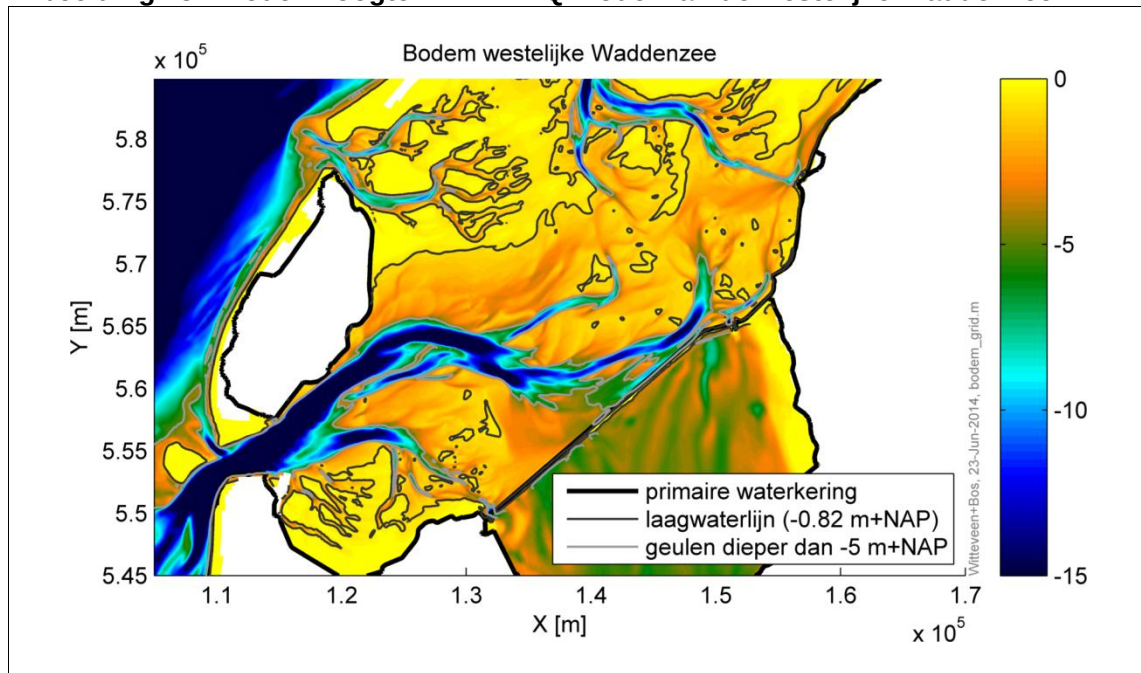
Bodem

De bodem van het verfijnde model van de westelijke Waddenzee is samengesteld uit een groot aantal bronnen:

- lokale lodingen van de havens bij Breezanddijk, Den Oever, Kornwerderzand uit 2011;
- vaklodingen uit de periode 2003 tot en met 2012;
- aangevuld met bodemgegevens uit het kuststrook-fijn model [ref. 31.];

De bodemhoogte in het TRIWAQ model van de westelijke Waddenzee is weergegeven in afbeelding I.3.

Afbeelding I.3. Bodemhoogte in TRIWAQ model van de westelijke Waddenzee



Debieten bij spuisluizen

De zoetwaterlozingen bij Den Oever en Kornwerderzand zijn in het model (in de horizontale schematisatie) uniform verdeeld over respectievelijk 9 en 6 roostercellen.

¹ Lokale laagdikte = lokale waterdiepte/aantal lagen.

I.2. Modelverificatie

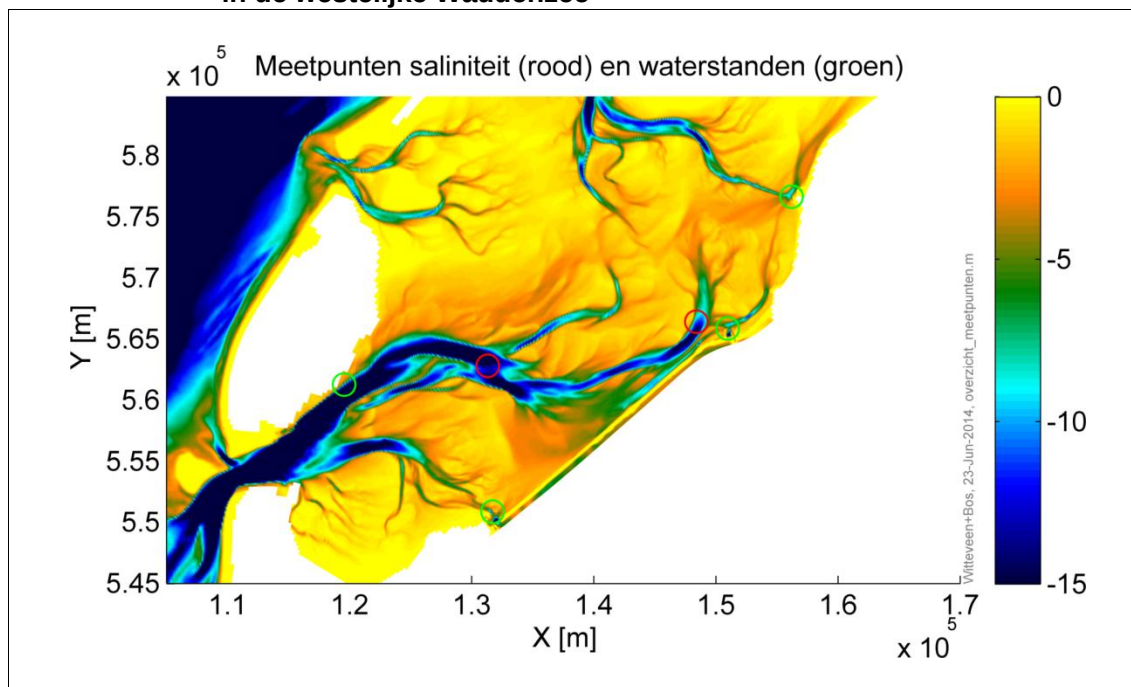
De kwaliteit van de ontwikkelde modelschematisatie is geverifieerd door de modelresultaten te vergelijken met metingen en met de resultaten van andere modelschematisaties. Deze vergelijking is uitgevoerd met de beschikbare tijdreeksen van waterstanden en saliniteit. Andere parameters, zoals stroomsnelheden, waren niet beschikbaar.

Waterstandsmetingen op de volgende locaties zijn verkregen via Waterbase¹: bij Den Oever buiten, Kornwerderzand buiten, Harlingen en Oudeschild.

In aanvulling hierop zijn door Rijkswaterstaat saliniteitsmetingen ter beschikking gesteld bij Doove Balg midden, Doove Balg oost, Doove Balg west en Westkom-Scheurrak. Alleen de saliniteitsmetingen bij Doove Balg oost en Doove Balg west zijn gebruikt voor de verificatie omdat alleen van deze stations de metingen gedurende een aaneensloten periode geregistreerd zijn.

Een overzicht van de gebruikte meetlocaties in de westelijke Waddenzee is weergegeven in afbeelding I.4.

Afbeelding I.4. Overzicht van gebruikte meetpunten voor waterstanden en saliniteit in de westelijke Waddenzee



I.3. Waterstand

Berekende waterstanden zijn vergeleken met metingen voor een springtij-doodtijcyclus in de zomer en in de winter. Hierbij is ieder tijdstip in het verticale getijsignaal uit de berekeningen vergeleken met het gemeten getijsignaal². Vervolgens is de gemiddelde afwijking van het model en de root-mean-square error (RMSE) van het model bepaald.

¹ Website: <http://live.waterbase.nl>.

² Het getijsignaal is bepaald met een harmonische analyse.

De vergelijking van de waterstanden is weergegeven in afbeelding I.5 voor meetstation Den Oever buiten, in afbeelding I.6 voor Kornwerderzand buiten, in afbeelding I.7 voor Harlingen en in afbeelding I.8 voor Oudeschild (Texel).

Deze vergelijking is uitgevoerd voor zowel het door Rijkswaterstaat aangeleverde WAQUA kuststrook-fijn model¹ als voor het toegepaste TRIWAQ model van de westelijke Waddenzee. Opgemerkt wordt dat de gemeten waterstand beïnvloedt wordt door zowel getij, (IJS-selmeer)afvoer als wind. De modelresultaten worden alleen beïnvloed door getij en afvoer. Om de modelresultaten goed te kunnen vergelijken met metingen, zijn zowel de metingen als de modelresultaten gefilterd met een harmonische analyse. De gepresenteerde gefilterde waterstanden bevatten het getijsignaal.

Een overzicht van de vergelijking van de waterstanden is weergegeven in tabel I.1 voor de beschouwde zomerperiode en in tabel I.2 voor de beschouwde winterperiode. Uit deze vergelijking trekken we de volgende conclusies:

- de gemiddelde afwijking van de berekende waterstanden is voor het TRIWAQ model van de westelijke Waddenzee kleiner (in zomer orde 0,08 m tot 0,09 m) dan of gelijk aan de gemiddelde afwijking van het WAQUA kuststrook-fijn model (in zomer 0,1 m tot 0,14 m). Dit is het geval voor zowel de zomerperiode als de winterperiode;
- de RMSE van het TRIWAQ model van de westelijke Waddenzee is voor de zomerperiode kleiner (0,13 m tot 0,15 m) dan de RMSE van het WAQUA kuststrook-fijn model (0,15 m tot 0,18 m);
- de RMSE van het TRIWAQ model van de westelijke Waddenzee is voor de winterperiode (0,13 m tot 0,15 m) vergelijkbaar aan de RMSE van het WAQUA kuststrook-fijn model. Bij Den Oever buiten is er een verbetering, op twee andere locaties zijn er kleine verslechtingen.

Dit betekent dat het TRIWAQ model van de westelijke Waddenzee qua waterstanden meestal iets beter presteert dan het WAQUA kuststrook-fijn model voor de beschouwde meetstations en de beschouwde periodes. Een verklaring hiervoor is dat het TRIWAQ model van de westelijke Waddenzee (horizontaal en verticaal) gedetailleerder is en dat hierdoor de getij-indringing door de geulen nauwkeuriger berekend wordt dan in het WAQUA kuststrook-fijn model. De nauwkeurigheid van het TRIWAQ model is voldoende voor dit effectenonderzoek waar de effecten relatief ten opzichte van de autonome ontwikkeling worden beschouwd.

Tabel I.1. Verificatie van berekende waterstanden met gemeten waterstanden op 4 meetlocaties in de westelijke Waddenzee gedurende zomerperiode van 15 dagen (springtij-doodtijcyclus)

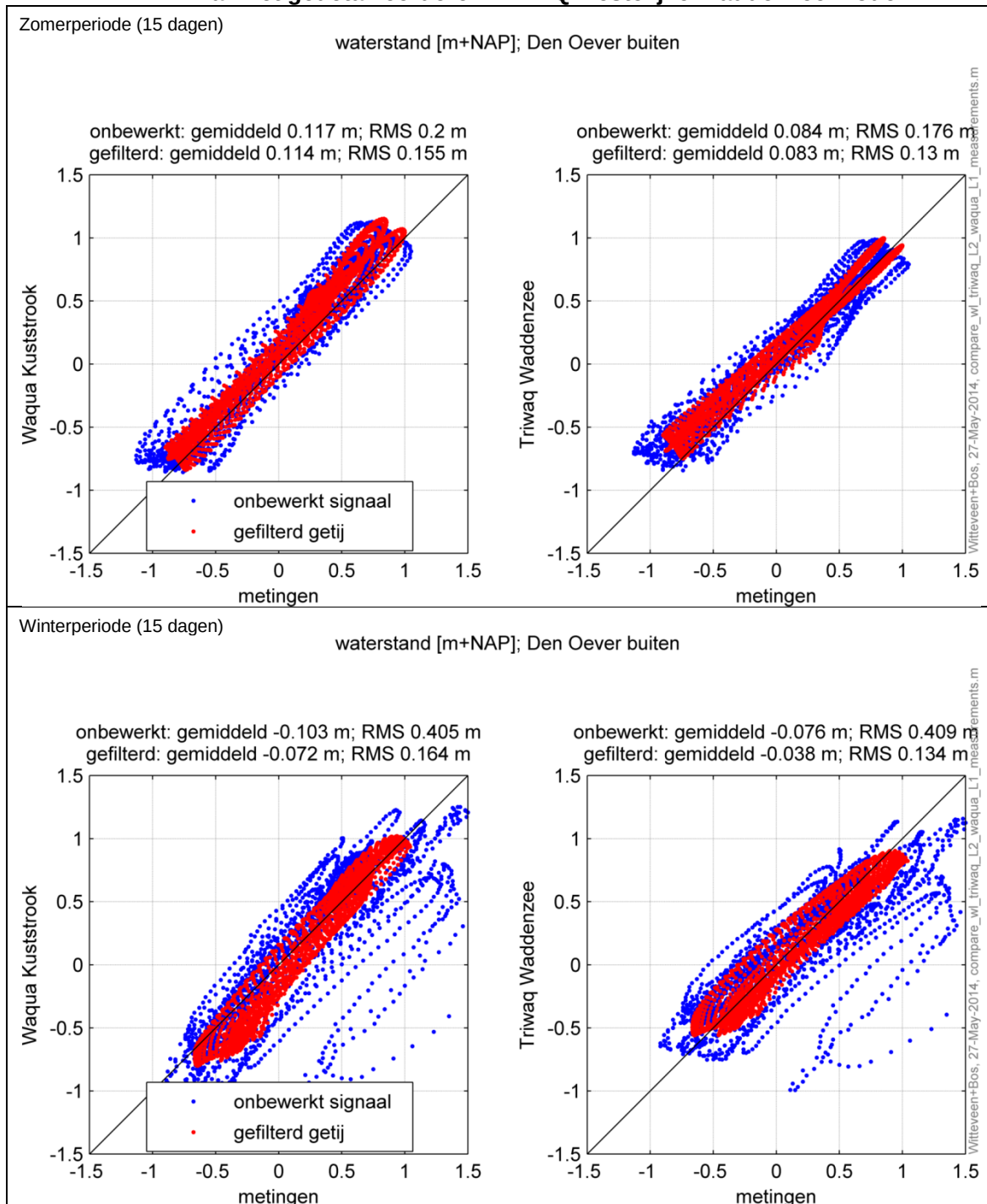
meetlocatie	gemiddelde afwijking [m]		RMSE [m]	
	WAQUA kuststrook-fijn model	TRIWAQ westelijke Waddenzee model	WAQUA kuststrook-fijn model	TRIWAQ westelijke Waddenzee model
Den Oever buiten	0,114	0,083	0,155	0,130
Kornwerderzand buiten	0,145	0,093	0,184	0,154
Harlingen	0,117	0,081	0,171	0,150
Oudeschild	0,106	0,081	0,146	0,134

¹ Een verificatie van het kuststrook-fijn model met metingen is ook te vinden in [ref. 5.].

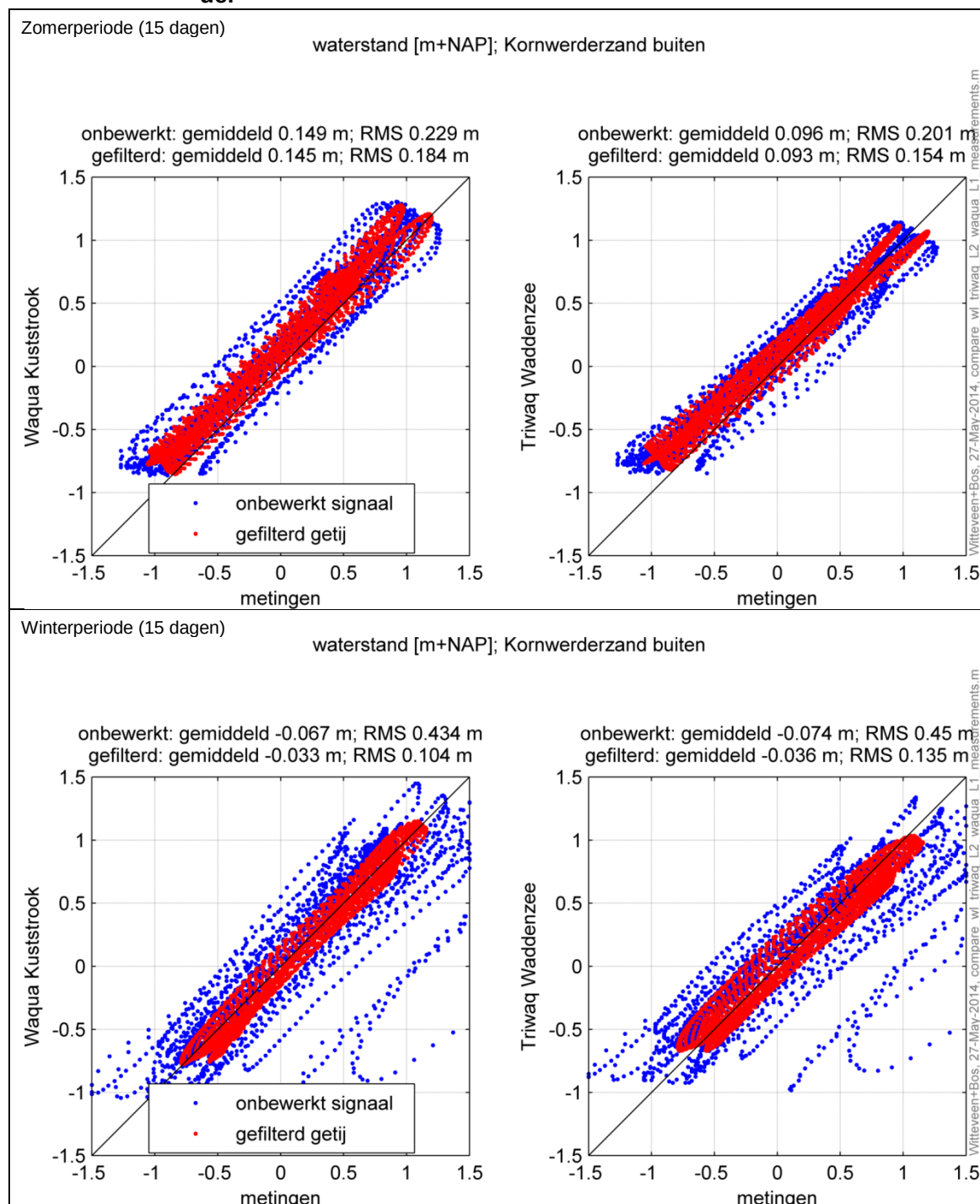
Tabel I.2. Verificatie van berekende waterstanden met gemeten waterstanden op 4 meetlocaties in de westelijke Waddenzee gedurende winterperiode van 15 dagen (springtij-doodtijcyclus)

meetlocatie	gemiddelde afwijking [m]		RMSE [m]	
	WAQUA kuststrook-fijn model	TRIWAQ westelijke Waddenzee model	WAQUA kuststrook-fijn model	TRIWAQ westelijke Waddenzee model
Den Oever buiten	-0,072	-0,038	0,164	0,134
Kornwerderzand buiten	-0,033	-0,036	0,104	0,135
Harlingen	-0,066	-0,062	0,125	0,150
Oudeschild	-0,006	-0,005	0,115	0,114

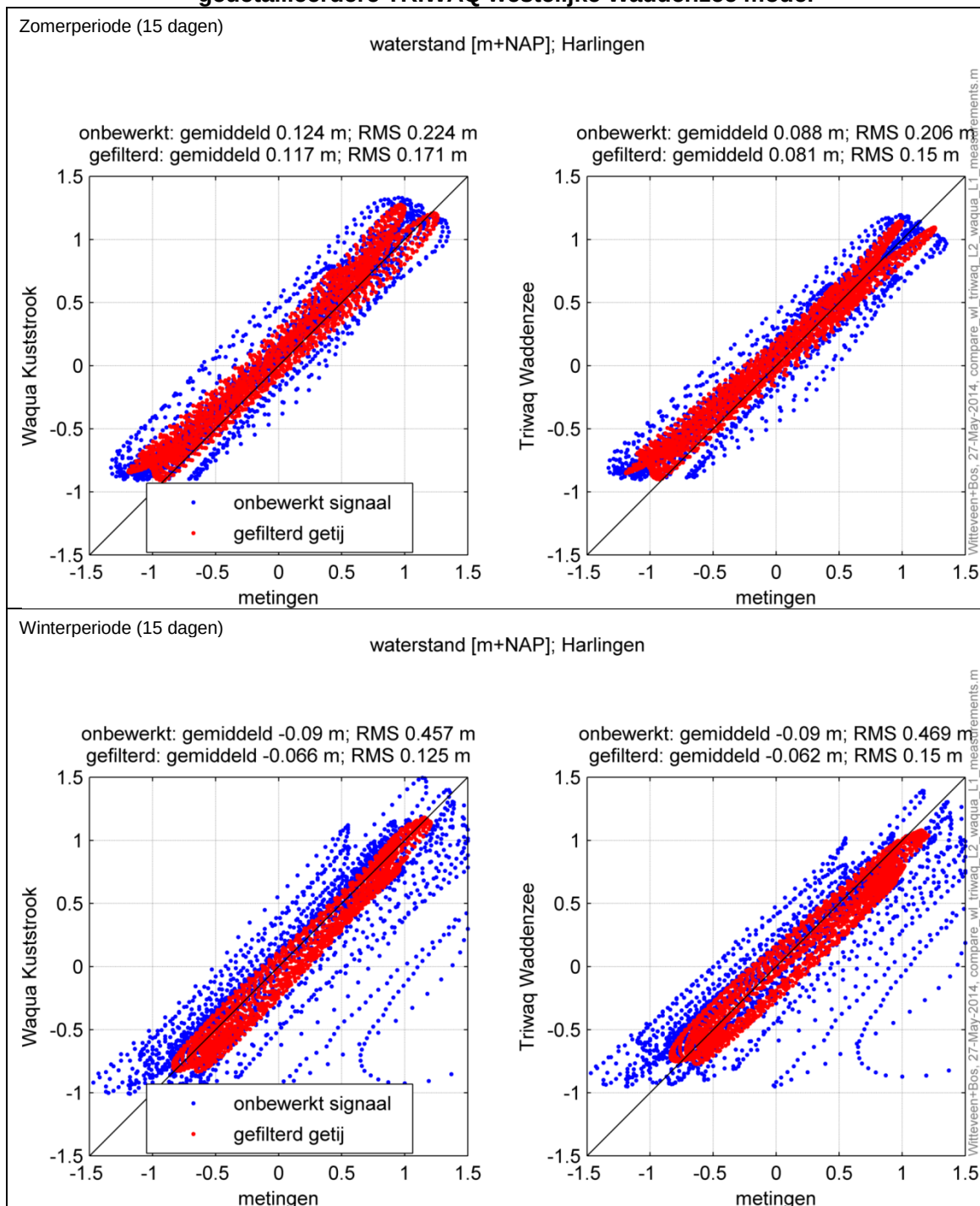
Afbeelding I.5. Vergelijking van berekende waterstanden met gemeten waterstanden bij Den Oever buiten voor een periode van 15 dagen in de zomer (boven) en in de winter (onder). De linkerafbeeldingen tonen de resultaten van het WAQUA kuststrook-fijn model, de rechter afbeeldingen van het gedetailleerdere TRIWAQ westelijke Waddenzee model



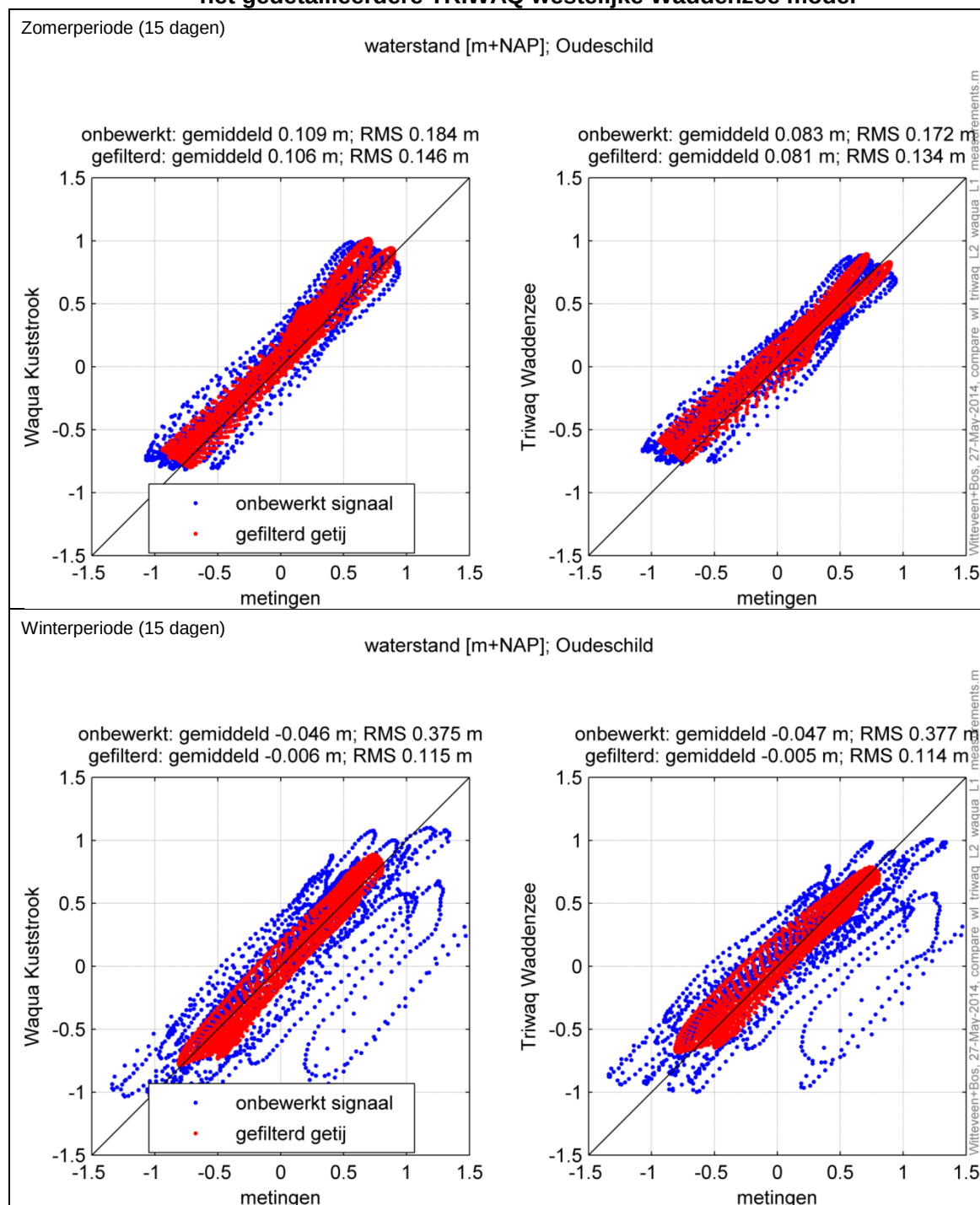
Afbeelding I.6. Vergelijking van berekende waterstanden met gemeten waterstanden bij Kornwerderzand buiten voor een periode van 15 dagen in de zomer (boven) en in de winter (onder). De linker afbeeldingen tonen de resultaten van het WAQUA kuststrook-fijn model, de rechter afbeeldingen van het gedetailleerdere TRIWAQ westelijke Waddenzee model



Afbeelding I.7. Vergelijking van berekende waterstanden met gemeten waterstanden bij Harlingen voor een periode van 15 dagen in de zomer (boven) en in de winter (onder). De linker afbeeldingen tonen de resultaten van het WAQUA kuststrook-fijn model, de rechter afbeeldingen van het gedetailleerdere TRIWAQ westelijke Waddenzee model



Afbeelding I.8. Vergelijking van berekende waterstanden met gemeten waterstanden bij Oudeschild voor een periode van 15 dagen in de zomer (boven) en in de winter (onder). De linker afbeeldingen tonen de resultaten van het WAQUA kuststrook-fijn model, de rechter afbeeldingen van het gedetailleerdere TRIWAQ westelijke Waddenzee model



I.4. Saliniteit

De saliniteitsmetingen bij Doove Balg oost en Doove Balg west zijn registraties (in de Donar database van Rijkswaterstaat) met tijdsintervallen van enkele weken tussen de saliniteitswaarden. De saliniteit is gemeten met een meetfrequentie van iedere dag [ref. 1.], maar het geregistreerde signaal is gemiddeld over een langere tijdsperiode om aliasing¹ te voorkomen. Hierdoor is het slechts mogelijk om de berekende saliniteit te vergelijken met de gemeten springtij-doodtij gemiddelde saliniteit (en niet de berekende getijvariaties in de saliniteit). Een bevestiging van het voorkomen van getijvariaties in de saliniteit in de Waddenzee is te vinden in [ref. 1.].

De metingen zijn vergeleken met resultaten van de volgende modellen:

- reeds beschikbare WAQUA kuststrook-fijn model;
- WAQUA model van de westelijke Waddenzee;
- TRIWAQ model van de westelijke Waddenzee.

2D WAQUA kuststrook-fijn model

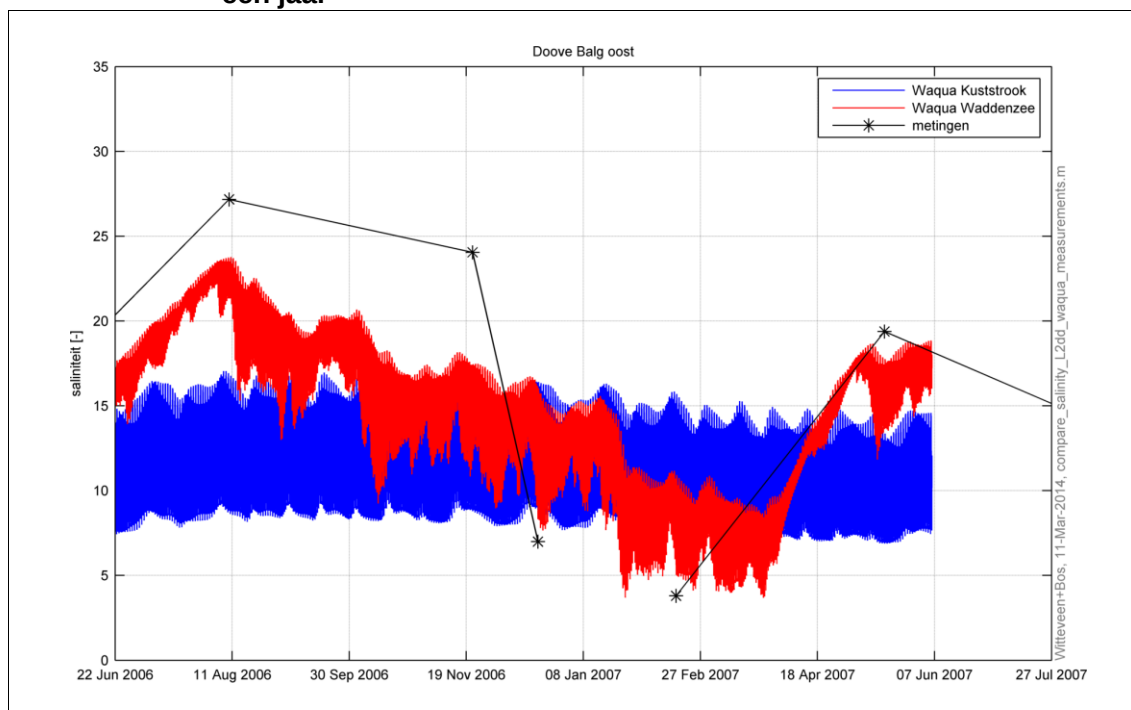
De berekende saliniteit van het reeds beschikbare WAQUA kuststrook-fijn model verschilt sterk van de gemeten saliniteit. Bijvoorbeeld in het seizoen juni 2006 tot juni 2007 was de gemeten saliniteit bij Doove Balg oost tussen 4 en 27 ppt, de berekende saliniteit varieerde tussen 7 en 17 ppt (zie afbeelding I.9). Dit komt doordat in deze modelschematisatie gerekend is met een gemiddeld debiet door de spuisluisen en niet met variaties van het debiet over de tijd (spuivensters).

2D WAQUA model van de westelijke Waddenzee

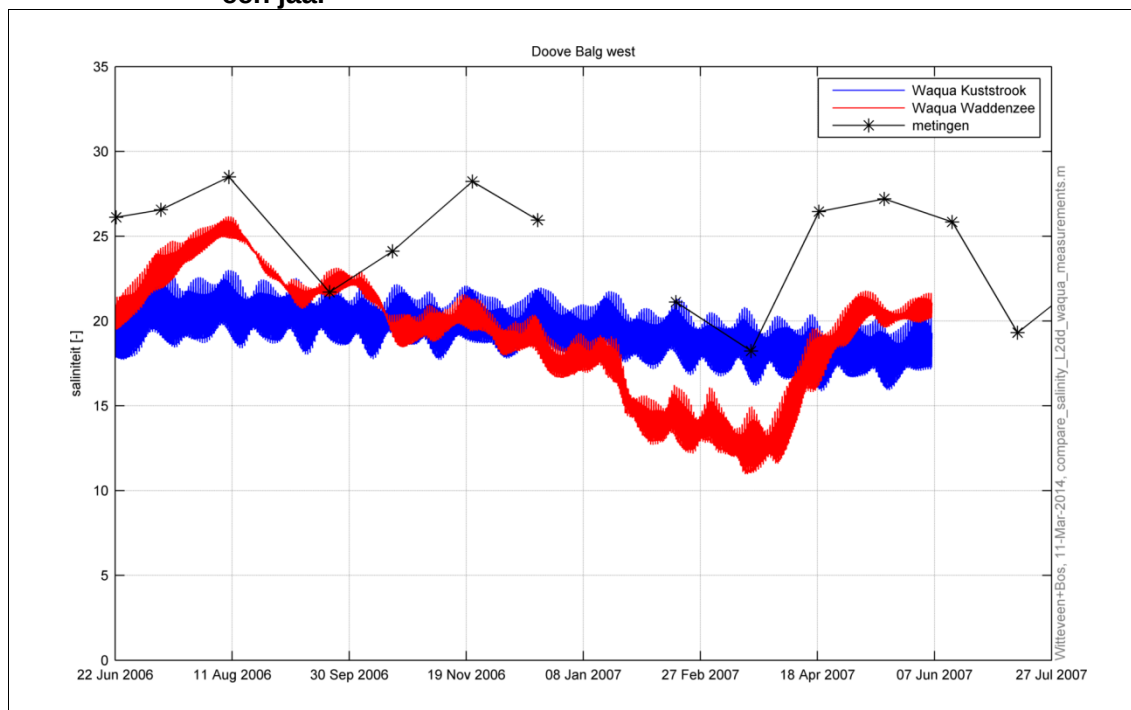
Het ontwikkelde WAQUA model van de westelijke Waddenzee wat horizontaal factor 3 fijner is dan het WAQUA kuststrook-fijn model, volgt de gemeten saliniteit bij Doove Balg oost redelijk (zie afbeelding I.9), maar onderschat de saliniteit bij Doove Balg west met ongeveer 5 ppt (zie afbeelding I.10). Het lijkt erop dat diffusie (verspreiding) door dit model overschat wordt.

¹ Aliasing is het verschijnsel dat hoogfrequente fluctuaties (in dit geval getij) met een andere frequentie te voorschijn komen in het - met een lagere frequentie bemonsterde - gemeten signaal dan dat ze in werkelijkheid optreden. Dit verschijnsel in de meetregistraties kan voorkomen worden door met een hogere frequentie te meten.

Afbeelding I.9. Vergelijking van met 2D Waqua model berekende saliniteit met gemeten saliniteit bij Doove Balg oost voor een simulatieperiode van een jaar



Afbeelding I.10. Vergelijking van met 2D Waqua model berekende saliniteit met gemeten saliniteit bij Doove Balg west voor een simulatieperiode van een jaar



3D TRIWAQ model van de westelijke Waddenzee

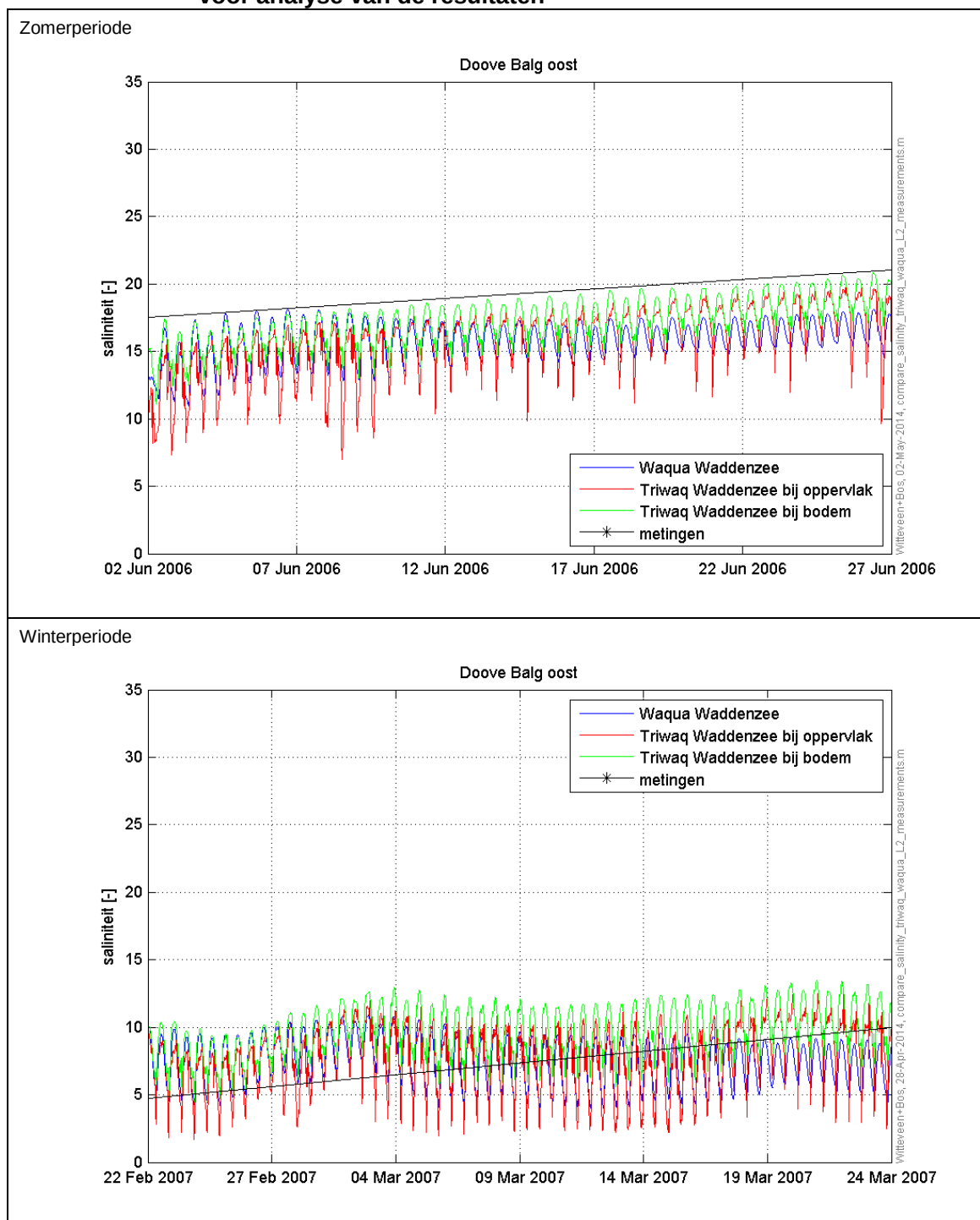
Het 3D TRIWAQ model van de westelijke Waddenzee - wat gebruikt is voor het kwantificeren van de effecten van pompen - benadert de gemeten saliniteit bij Doove Balg west beter dan het 2D WAQUA model van de westelijke Waddenzee (zie afbeelding I.12). De verschillen tussen berekeningen en metingen bij Doove Balg oost zijn van dezelfde orde van grootte als het WAQUA model van de westelijke Waddenzee (zie afbeelding I.11).

Het 3D model en het verfijnde rekenrooster leiden ertoe dat de resolutie (detailniveau) van de stromingen verhoogd is. De directe representatie van 3D advectie in het TRIWAQ model maakt de verhoogde horizontale diffusie en viscositeit, zoals gebruikt in WAQUA, overbodig (zie ook [ref. 2.]). Ook dit leidt tot een hogere resolutie in de stromingsresultaten. Daarnaast zijn in het 3D model dichtheidsgeïnduceerde effecten meegenomen.

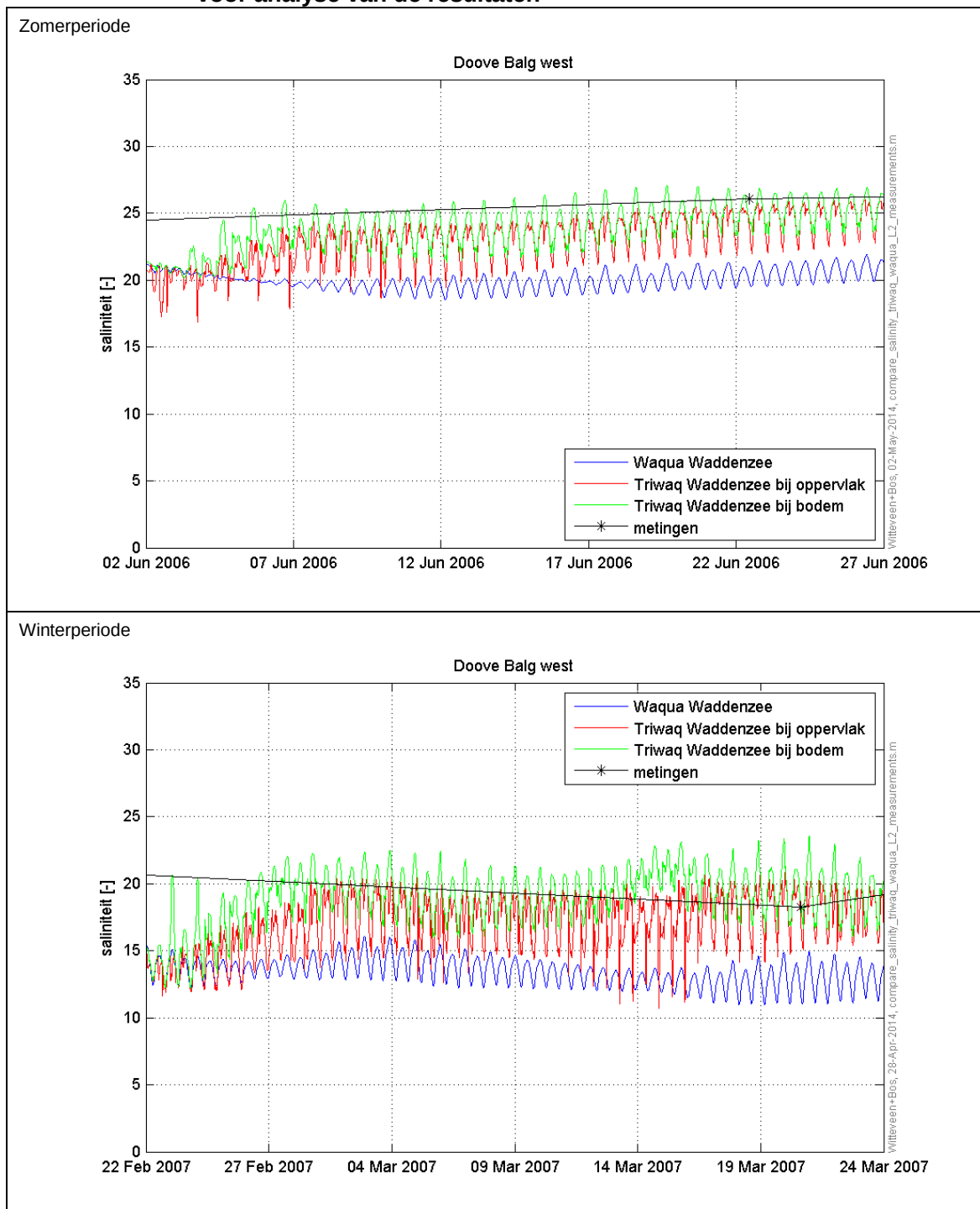
Uit de vergelijking van berekende saliniteit en gemeten saliniteit concluderen we dat het toegepaste 3D (TRIWAQ) model beter presteert dan het reeds beschikbare 2D WAQUA kuststrook-fijn model en dan het 2D WAQUA model van de westelijke Waddenzee.

Verdere verbetering van het model zou mogelijk kunnen zijn als meer metingen beschikbaar komen.

Afbeelding I.11. Vergelijking van berekende saliniteit met gemeten saliniteit bij Doove Balg oost voor een simulatieperiode in de zomer (boven) en in de winter (onder). De eerste 15 dagen van de simulaties zijn bedoeld om het model te laten inspelen, de laatste 15 dagen van de simulaties voor analyse van de resultaten



Afbeelding I.12. Vergelijking van berekende saliniteit met gemeten saliniteit bij Doove Balg west voor een simulatieperiode in de zomer (boven) en in de winter (onder). De eerste 15 dagen van de simulaties zijn bedoeld om het model te laten inspelen, de laatste 15 dagen van de simulaties voor analyse van de resultaten



I.5. Conclusies en aanbevelingen

Conclusies

Het ontwikkelde TRIWAQ modelschematisatie van de westelijke Waddenzee is in staat om de grootschalige waterbeweging met voldoende mate van nauwkeurigheid te berekenen. Dit blijkt uit de bovenstaande vergelijking van de modelresultaten met metingen van waterstanden en saliniteit. Het model wordt geschikt geacht om de effecten van de inzet van pompen en gewijzigd spuibeheer te kwantificeren voor het doel van deze studie.

Het model kan goed ingezet worden om een relatieve vergelijking te maken tussen effecten van varianten en de autonome ontwikkeling. De absolute waarden van de modeluitkomsten dienen echter met de nodige voorzichtigheid gebruikt te worden (onder andere door de onzekerheden in de toekomstige autonome morfologische ontwikkeling, en het gebruik van twee tijdvensters van 15 dagen als representatief voor zomer en winter).

Beperkingen van het model zijn dat het:

- bij Den Oever en Kornwerderzand een roosterresolutie heeft van ongeveer 70 m en;
- uitgaat van een hydrostatische drukverdeling over de verticaal waardoor de gedetailleerde hydrodynamica en de resulterende effecten op waterkwaliteit en morfologie niet kan worden weergegeven vlak bij (en in) de spuicomplexen Den Oever en Kornwerderzand. Het onderhavige verdiepend effectonderzoek richt zich echter op een grotere schaal dan de lokale effecten vlak bij de spuicomplexen.

Aanbevelingen

De toegepaste TRIWAQ modelschematisatie is afgeregeld met de toen beschikbare meetgegevens. Een verdere afregeling van de toegepaste TRIWAQ modelschematisatie is mogelijk als meer meetgegevens beschikbaar komen.

BIJLAGE II TIJDREEKSEN SPUI- EN POMPDEBIETEN

II.1. Inleiding

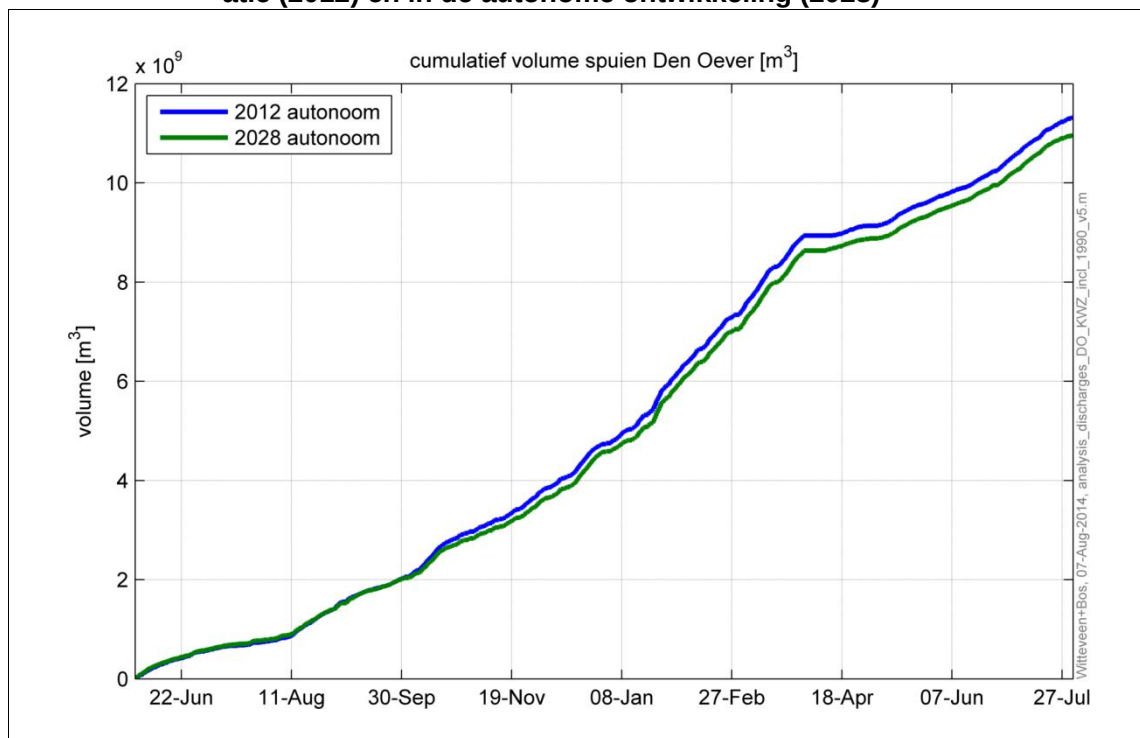
Deze bijlage bevat afbeeldingen van het cumulatieve volume door pompen en spuien voor de invloeden enerzijds van de autonome ontwikkeling (paragraaf II.2), en anderzijds de effecten van de inzet van pompen en gewijzigd spui-beheer (paragraaf II.3). Deze afbeeldingen zijn bedoeld ter ondersteuning van de effectbeschrijving in hoofdstuk 6, alsmede ter ondersteuning van de beoordeling van de effecten van de natuur in onder andere de passende beoordeling en de natuurtoets.

Toelichting bij afbeeldingen

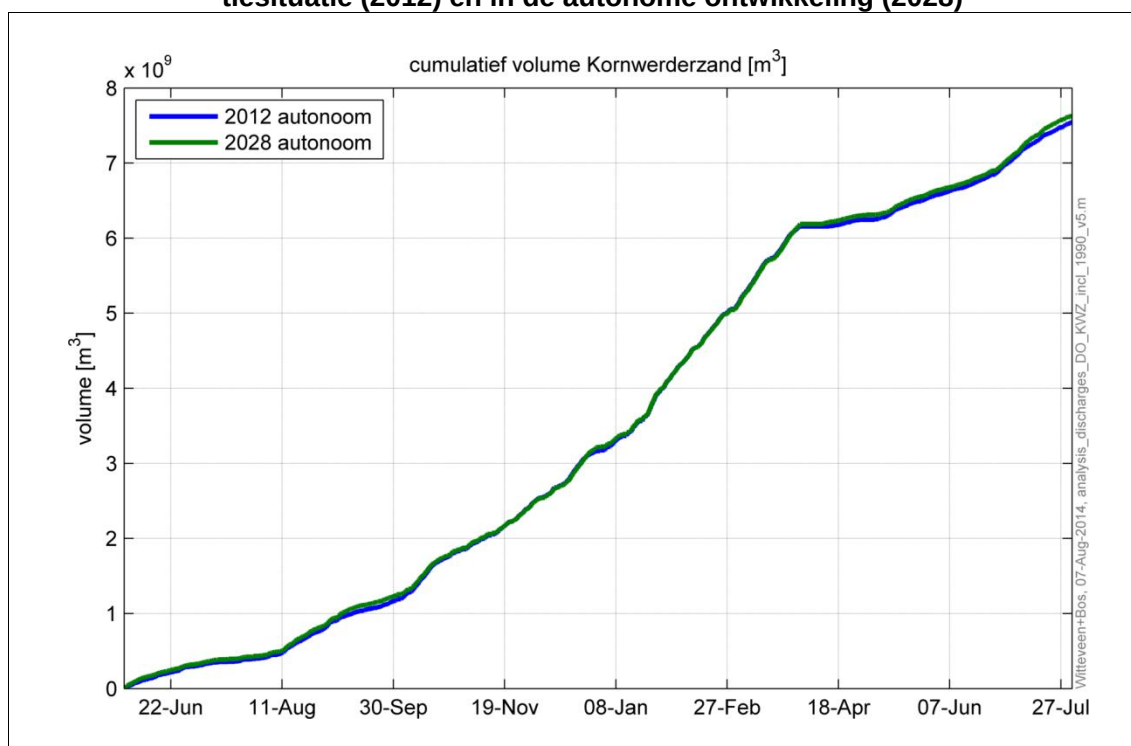
De horizontale as van de afbeeldingen is de tijdsas voor een periode van 14 maanden. De verticale as toont het cumulatieve spui-volume en/of pompvolume (eenheid: m^3) door het betreffende spui-complex. Als de lijn horizontaal loopt, is het debiet (tijdsafgeleide van volume, eenheid m^3/s) op dat moment gelijk aan nul. Als de lijn steil loopt, is het debiet in die periode hoog. Vanzelfsprekend stijgt de lijn van het cumulatieve volume, omdat het spuien en pompvolume altijd van het IJsselmeer naar de Waddenzee is.

II.2. Autonome ontwikkeling

Afbeelding II.1. Cumulatief volume door spui-complex Den Oever in de referentiesituatie (2012) en in de autonome ontwikkeling (2028)

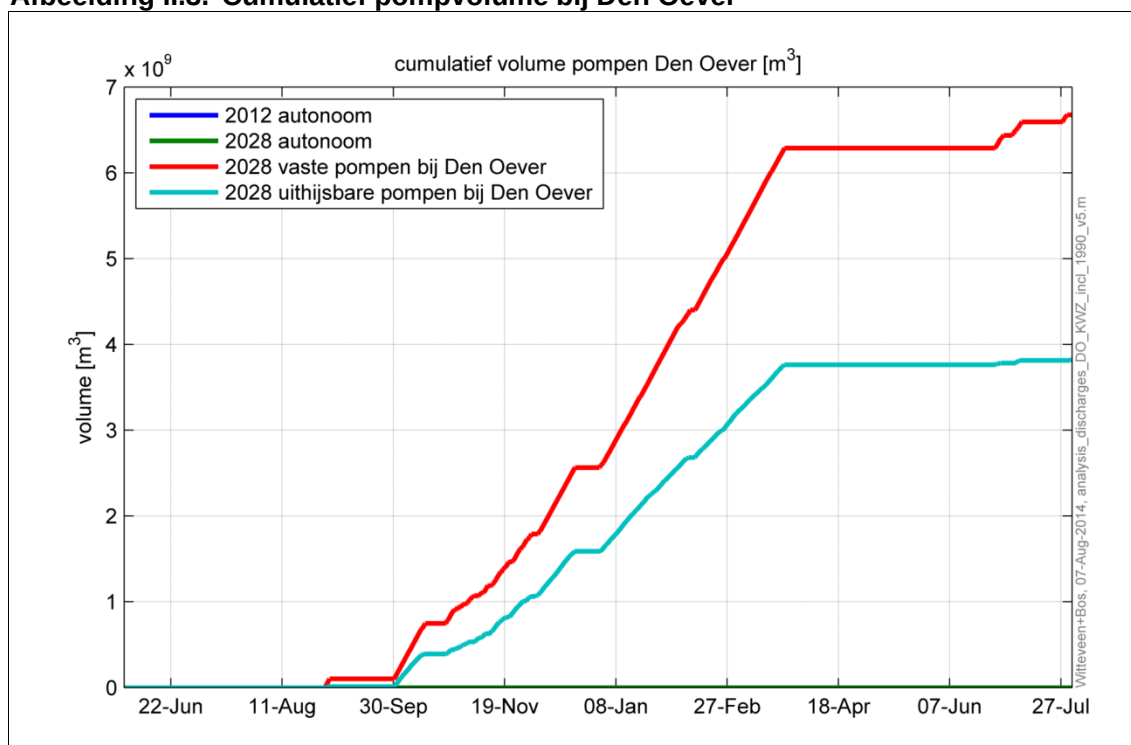


Afbeelding II.2. Cumulatief volume door spuicomplex Kornwerderzand in de referentiesituatie (2012) en in de autonome ontwikkeling (2028)

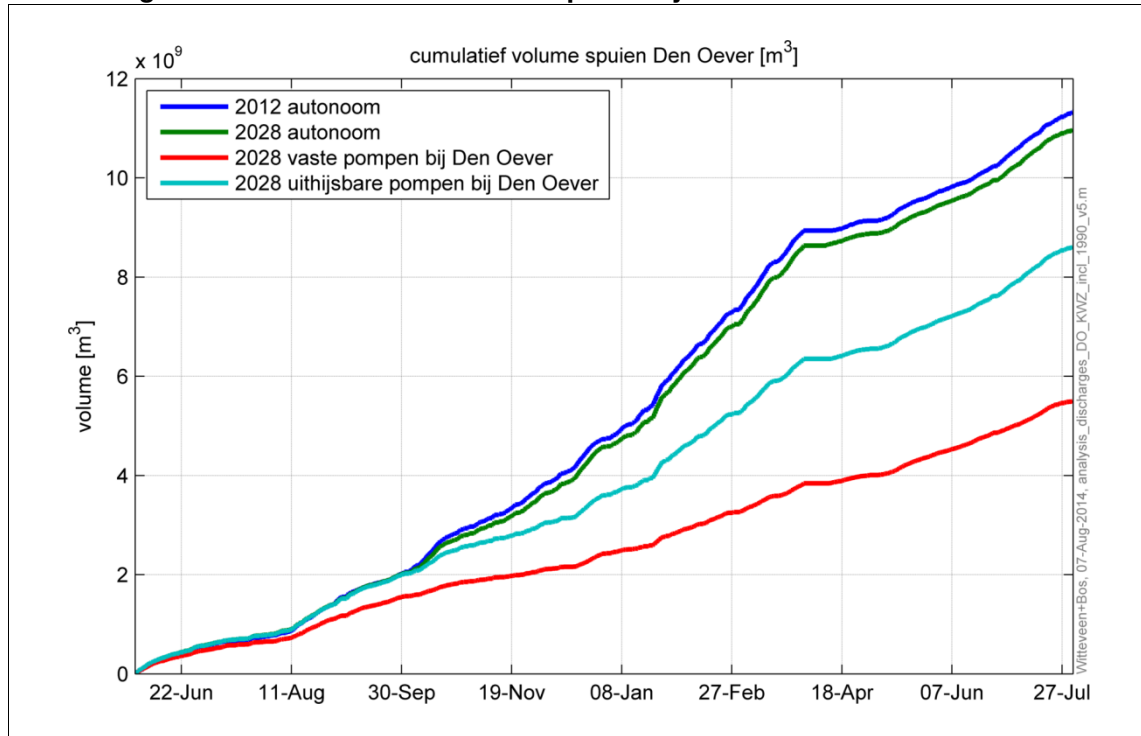


II.3. Effecten van inzet van pompen

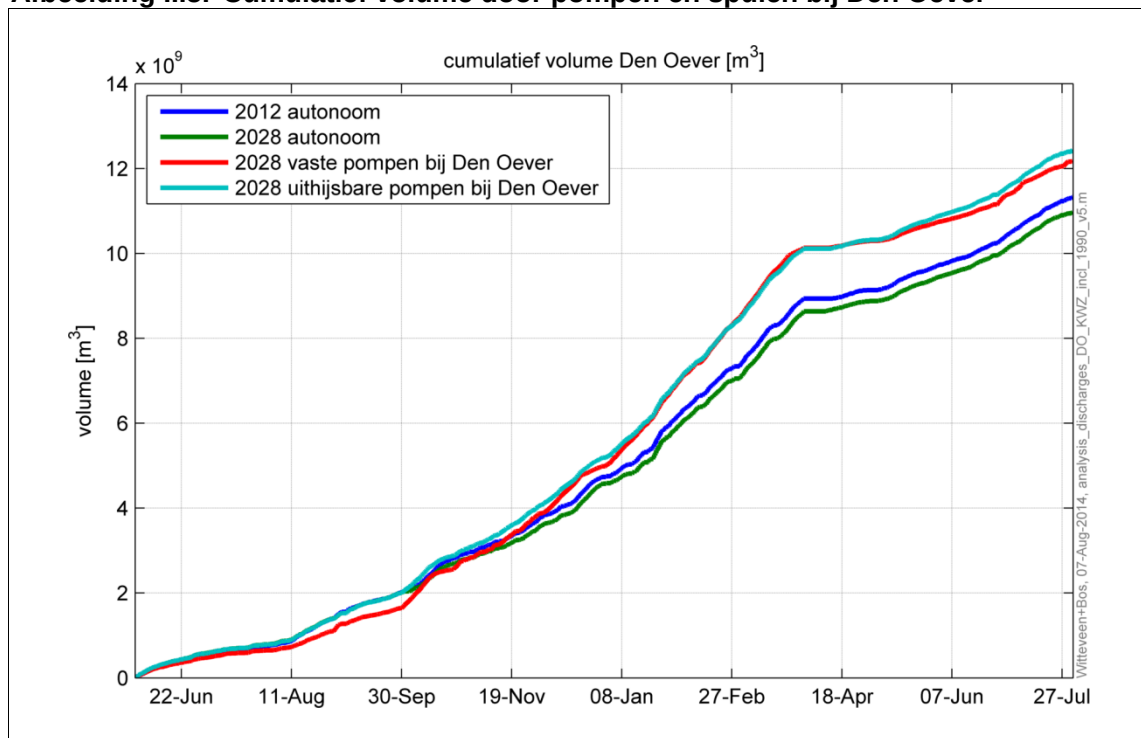
Afbeelding II.3. Cumulatief pompvolume bij Den Oever



Afbeelding II.4. Cumulatief volume door spuien bij Den Oever



Afbeelding II.5. Cumulatief volume door pompen en spuien bij Den Oever



Afbeelding II.6. Cumulatief volume door spuien bij Kornwerderzand

