

Morfologische gevolgen aanleg en gebruik Nieuwe Spuimiddelen Afsluitdijk

Achtergrondrapport bij de Passende Beoordeling
Levvel & Rijkswaterstaat

5 april 2022

[Redacted text block]

[Redacted text block]

[Redacted text block]

Arcadis Nederland B.V.
Postbus 137
8000 AC Zwolle
Nederland

Inhoudsopgave

1	Inleiding	6
1.1	Aanleiding	6
1.2	Doel van dit achtergrondrapport en samenhang met de Passende beoordeling	6
1.3	Leeswijzer	6
2	Beschrijving aanlegwerkzaamheden en gebruik	8
2.1	Algemeen	8
2.2	Bouw van pompgroepen en renovatie spuigroepen	9
2.3	Bouw van nieuwe spuigroepen	9
2.4	Fasering en buiten gebruik stellen van spuigroepen	9
2.5	Gebruik van de spuicapaciteit	11
2.5.1	Capaciteit na afronding van de werkzaamheden	11
2.5.2	Spuien in de toekomst	12
3	Huidige situatie waterbeweging en morfologie	13
3.1	Inleiding	13
3.2	Spuien van het IJsselmeer naar de Waddenzee	13
3.2.1	Verdeling over Den Oever en Kornwerderzand	14
3.2.2	Verdeling over het jaar	16
3.2.3	Pulsen in de afvoer	17
3.3	Stroming in de Waddenzee en in het IJsselmeer	19
3.4	Reeds opgetreden morfologische veranderingen in de Waddenzee nabij Den Oever	20
3.4.1	Initiële veranderingen rondom de spuicomplexen na realisatie Afsluitdijk	20
3.4.2	Langetermijn veranderingen in de Waddenzee	22
3.4.3	Variatie in de bodemligging van het Visjagersgaatje	28
3.4.4	‘Ademen van de ontgrondingskuilen’: Tijdelijke slibsedimentatie	33
3.4.5	Samenvatting morfologische veranderingen in de Waddenzee nabij Den Oever	34
4	Overzicht van morfologische gevolgen van aanleg en gebruik nieuwe spuinmiddelen	35
4.1	Inleiding	35

4.2	Vrijkomen slib en zand: Sediment uit de ontgrondingskuilen en erosie in het IJsselmeer	35
4.2.1	Wat gebeurt er?	35
4.2.2	Wanneer gebeurt dit?	36
4.2.3	Wat is de relatie met de andere morfologische gevolgen	36
4.3	Ademen nieuwe ontgrondingskuilen	37
4.3.1	Wat gebeurt er?	37
4.3.2	Wanneer gebeurt dit?	37
4.3.3	Wat is de relatie met de andere morfologische gevolgen	37
4.4	Verbreiding/verdieping geulen Waddenzee	37
4.4.1	Wat gebeurt er?	37
4.4.2	Wanneer gebeurt dit?	38
4.4.3	Wat is de relatie met de andere morfologische gevolgen	38
4.5	Aanpak bepalen morfologische gevolgen	38
5	Vrijkomen slib en zand - aanpak	39
5.1	Inleiding	39
5.2	Delft3D model opzet	39
5.2.1	Randvoorwaarden	40
5.2.2	Rekenroosters en modelbathymetrie	41
5.3	Schematiseren van de bronterm	45
5.3.1	Bronterm 'bouwfase'	45
5.3.2	Bronterm 'gebruiksfase'	46
5.3.3	Cumulatieve bronterm	46
5.4	Sedimenteigenschappen in het model	48
5.5	Gevoeligheidsanalyse	49
5.5.1	Onzekerheden in fysieke en/of hydrodynamische omstandigheden	49
5.5.2	Onzekerheden en/of variaties in fysieke schematisatie bronterm	51
5.5.3	Onzekerheden en/of variaties in modelparameter bronterm	51
6	Vrijkomen slib en zand – resultaten modelberekeningen	52
6.1	Modelscenario's en beschouwing	52
6.2	Additionele slibconcentratie	52
6.2.1	Ruimtelijke variatie in slibconcentratie	52
6.2.2	Slibconcentratie over de tijd	55
6.3	Additionele bedekking	57
6.3.1	Ruimtelijke variatie in de bedekking slib	58
6.3.2	Bedekking met slib door de de tijd	59
6.3.3	Bedekking met zand in ruimte en tijd	61

5 Onze referentie: D10042961:78 - Datum: 5 april 2022

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

In opdracht van Rijkswaterstaat realiseert aannemersconsortium Levvel werkzaamheden aan de Afsluitdijk in de periode van 2019 tot en met 2025. De Afsluitdijk wordt versterkt en er moet meer water kunnen worden afgevoerd van het IJsselmeer naar de Waddenzee. Voor uitvoering van de werkzaamheden is in 2015 een Passende Beoordeling (PB 2015) opgesteld (Rijkswaterstaat, 2015), op basis waarvan het Ministerie van Economische Zaken in 2016 een vergunning Natuurbeschermingswet 1998 (DGAN-NB/15050604,) voor de periode van 1 januari 2017 tot en met 31 december 2023 heeft verleend.

In het spuicomplex bij Den Oever worden maatregelen genomen om de waterafvoer vanuit het IJsselmeer te vergroten. In het oorspronkelijk referentieontwerp van Rijkswaterstaat is uitgegaan van het afvoeren van water met pompen, die in de vergunningsaanvraag in 2016 ((DGAN-NB/15050604) zijn meegenomen en dus ook zijn vergund. In de aanbesteding van de werkzaamheden is ruimte geboden om naast een minimaal vereiste pompcapaciteit (235 m³/s) ook op andere manieren water af te voeren, mits daarmee aantoonbaar de doelstelling voor het afvoeren van water wordt gehaald.

In het ontwerp van het aannemersconsortium Levvel wordt uitgegaan van de minimaal vereiste capaciteit aan pompen. Daarnaast zijn twee extra spuisluizen voorzien. Met de extra spuisluizen wordt de totale spuicapaciteit vergroot, zodat er tot ver in toekomst water kan worden afgevoerd onder vrij verval. De combinatie van pompen en spuisluizen levert een duurzame en betrouwbare optie voor afvoer die relatief weinig energie kost door het principe spuien als het kan, pompen als het moet. De extra spuisluizen zijn nog niet vergund in de vergunning Natuurbeschermingswet (DGAN-NB/15050604) en vormen het onderwerp van de Passende Beoordeling (Witteveen+Bos, 2022) waar het voorliggende rapport onderdeel van uitmaakt.

1.2 Doel van dit achtergrondrapport en samenhang met de Passende beoordeling

Uit de eerder opgestelde PB 2015 en afgegeven Natuurbeschermingswetvergunning (2016) blijkt dat alleen de bouw van pompen en het gebruik van de nieuwe pompen in combinatie met de bestaande spuisluizen is vergund. In een nieuwe Passende beoordeling¹ worden de effecten op Natura 2000-gebieden onderzocht van de bouw en het gebruik van de nieuwe spuisluizen op de tusseneilanden. Daarbij komt ook de relatie met de (effecten van de) reeds ingeplande en vergunde werkzaamheden aan bod. Effecten van de nieuwe spuisluizen kunnen mogelijk optreden in de Natura 2000-gebieden Waddenzee en IJsselmeer.

Een belangrijk deel van de effecten van de aanleg en het gebruik van de nieuwe spuisluizen treden op door het vrijkomen van zand en slib en veranderingen in de bodemligging, oftewel de morfologie, in de Waddenzee. In het voorliggende achtergrondrapport wordt nader ingegaan op de verschillende morfologische effecten van de aanleg en het gebruik van de spuisluizen. De inhoud van dit voorliggende rapport is een onderbouwing bij de nieuwe Passende beoordeling.

1.3 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 is een beschrijving van de werkzaamheden. Deze komt volledig overeen met de beschrijving in de Passende beoordeling.

¹ [REDACTED] - Concept, Versterking Afsluitdijk; Passende beoordeling aanleg en gebruik.

Hoofdstuk 3 is bedoeld als een introductie in de huidige situatie, met inbegrip van de autonomen trends in de morfologie en variatie die optreedt in de bodemligging in de nabijheid van de spuisluisen bij Den Oever.

De beschrijving op hoofdlijnen van de morfologische gevolgen van de nieuwe spuisluisen staan in Hoofdstuk 4.

Vervolgens wordt in verschillende hoofdstukken uitgewerkt wat de gevolgen zijn en of deze samenvallen met andere gevolgen.

Hoofdstuk 5 en 6 laten de gevolgen zien van het vrijkomen van zand en slib uit de ontgrondingskuilen en uit het IJsselmeer. Hiervoor worden simulaties met een computermodel gebruikt, waarvan de aanpak is beschreven in hoofdstuk 5. De daadwerkelijke gevolgen staan in hoofdstuk 6.

Hoofdstuk 7 laat de gevolgen zien van het “ademen” van de ontgrondingskuilen

Hoofdstuk 8 bevat de gevolgen voor de omvang van de getijdegeulen in de Waddenzee.

Ten slotte worden in hoofdstuk 9 de conclusies gepresenteerd.

2 Beschrijving aanlegwerkzaamheden en gebruik

Dit hoofdstuk komt overeen met Hoofdstuk 2 in de *Passende beoordeling aanleg en gebruik*.

2.1 Algemeen

Op dit moment zijn in de Afsluitdijk twee spuicomplexen in gebruik: één bij Den Oever en één bij Kornwerderzand. In combinatie met de versterking van de Afsluitdijk worden nieuwe pompen geplaatst (beide reeds vergund via PB 2015) en twee nieuwe spui groepen aangelegd. De werkzaamheden aan de nieuwe pompen en de nieuwe spui groepen worden in aanlegfase goed op elkaar afgestemd, zodat enerzijds aan de voorwaarden uit de vigerende vergunning kan worden voldaan, de waterveiligheid niet in gevaar komt en anderzijds voldoende spuicapaciteit door de Afsluitdijk beschikbaar blijft. De werkzaamheden aan de spuicomplexen Den Oever en Kornwerderzand zijn gericht op het uitbreiden van de afvoercapaciteit door de bouw van nieuwe spui groepen en het toevoegen van pompen.

Aan het spuicomplex bij Den Oever zijn twee groepen van werkzaamheden voorzien (Figuur 2-1):

1. bouw van twee pompgroepen (pompgroep 1 en 2);
2. bouw van twee extra spui groepen (nummers 1.6 en 1.7), met inbegrip van het baggeren van de ontgrondingskuil en het aanbrengen van bodembescherming;

Na het afronden van de werkzaamheden is ten opzichte van de huidige situatie extra spuicapaciteit beschikbaar en kunnen pompen worden ingezet voor het afvoeren van het IJsselmeerwater naar de Waddenzee.

De voorliggende PB 2021 heeft betrekking op de bouw en het gebruik van de twee nieuwe spui groepen, aangeduid als 1.6 en 1.7 in Figuur 2-1.



Figuur 2-1 Plangebied Spuicomplex Den Oever met nieuw te bouwen spui- en pompgroepen. Spui groepen 1.1 tot en met 1.3 zijn bestaand. Spui groepen 1.6 en 1.7 zijn nieuw

2.2 Bouw van pompgroepen en renovatie spuigroepen

Aan weerszijden van het bestaande spuicomplex komen pompgroepen, met ieder drie pompen. De pompgroepen worden op de uiteinden (landhoofden) van de kazematteneilanden aan weerszijden van het spuicomplex aangelegd.

2.3 Bouw van nieuwe spuigroepen

De nieuwe spuisluizen of spuigroepen komen in de twee bestaande tusseneilanden, de stukjes land tussen de bestaande spuigroepen (dijkvak 4). Elke nieuwe spuigroep bestaat uit vier spuikokers. De spuigroepen worden gefaseerd aangelegd in stalen bouwkuipen waarin betonwerk wordt gerealiseerd. Na realisatie van het betonwerk worden schuiven en installaties geplaatst. Voor en achter iedere spuigroep, respectievelijk in het IJsselmeer en in de Waddenzee, wordt een bodembescherming aangebracht. Hiervoor wordt de bodem deels ontgraven, waarna zinkstukken worden aangebracht. Aan de Waddenzeezijde wordt circa 210.000 m³ ontgraven ten behoeve van de aanleg van de bodembescherming en garanderen van de stabiliteit van het spuicomplex. Dit wordt in de erosiekuilen van de bestaande spuigroepen gedeponneerd. Daarnaast zal er bodemmateriaal aan de Waddenzeezijde, circa 100.000 m³, door natuurlijke erosie over enkele jaren verspreid verdwijnen. Aan de IJsselmeerzijde zal de bodem in het aanstroomgebied in enkele jaren erosie vertonen en op natuurlijke wijze naar een nieuw evenwicht groeien.

2.4 Fasering en buiten gebruik stellen van spuigroepen

De aanlegwerkzaamheden aan het totale spuicomplex Den Oever vinden in een aantal stappen plaats. In de eerste jaren betreft het de voorbereidingen voor de aanleg van de pompen en nieuwe spuigroepen bij Den Oever. Deze werkzaamheden vinden niet in het IJsselmeer en de Waddenzee plaats, maar op land, en er zullen ook geen gevolgen optreden door externe werking² van deze werkzaamheden, anders dan effecten die al beoordeeld en vergund zijn via de PB 2015 en de vigerende vergunning (DGAN-NB/15050604)>. Vervolgens vinden de bouwwerkzaamheden aan de pompgroepen plaats en wordt gewerkt aan de nieuwe spuigroepen. Een van de onderdelen van die werkzaamheden betreft het aanbrengen van de bodembescherming in Waddenzee en IJsselmeer (Figuur 2-1). Vervolgens kunnen de nieuwe kunstwerken in gebruik worden genomen.

In een periode van twee jaar komt de eerste nieuwe spuigroep in oktober van het eerste jaar beschikbaar, samen met de twee pompgroepen. De andere nieuwe spuigroep komt in januari van het tweede jaar beschikbaar. Tijdens de bouwwerkzaamheden moet af en toe een spuigroep worden gesloten om het werk uit te kunnen voeren (tabel 2.1). Er zijn altijd minimaal drie spuigroepen in Den Oever en Kornwerderzand operationeel om te kunnen voldoen aan het Rijksinpassingsplan (RIP. 2016):

'In de maanden mei tot en met augustus (tijdens de realisatiefase) moet minimaal 60 % van de totale afvoercapaciteit beschikbaar blijven. In april moet 80 % van de spuicapaciteit beschikbaar zijn. De beide spuigroepen bij Kornwerderzand kunnen vanwege de waterkwaliteit van het IJsselmeer niet tegelijkertijd worden afgesloten. De spuicomplexen dienen gedurende het stormseizoen 100 % van hun kerende functie te behouden.'

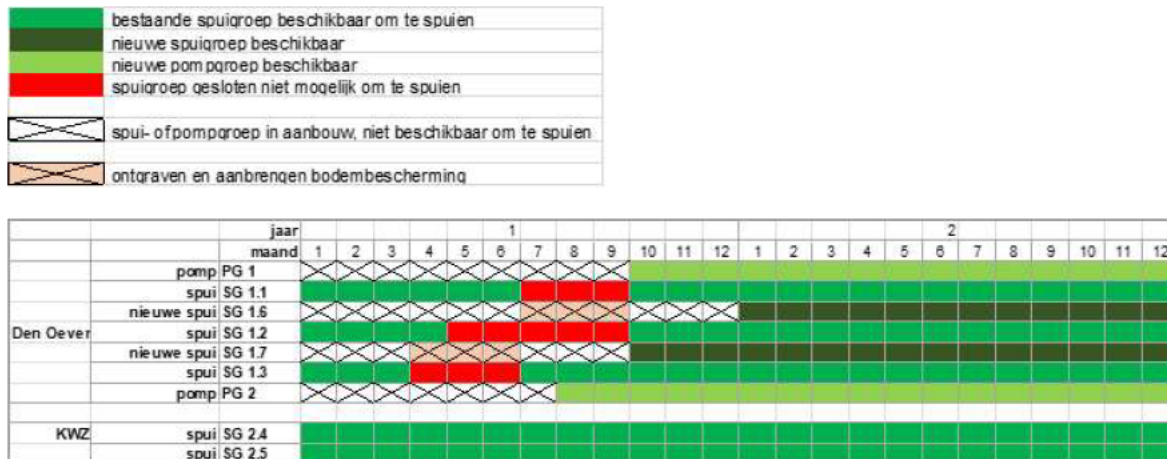
Een consequentie van de vereiste beschikbaarheid van spuigroepen is dat de werkzaamheden niet zonder meer in de tijd kunnen opschuiven indien onverhoopt vertragingen optreden. Indien de werkzaamheden aan beide nieuwe spuigroepen niet binnen het eerste jaar kunnen worden uitgevoerd en afgerond, zullen de werkzaamheden aan de nieuwe spuigroep SG 1.7 worden verplaatst naar het tweede jaar. Deze alternatieve planning is weergegeven in tabel 2.2.

In de beoordeling van de effecten zullen we uitgaan van de eerste planning (zoals tabel 2.1), omdat daarvan de grootste effecten worden verwacht.

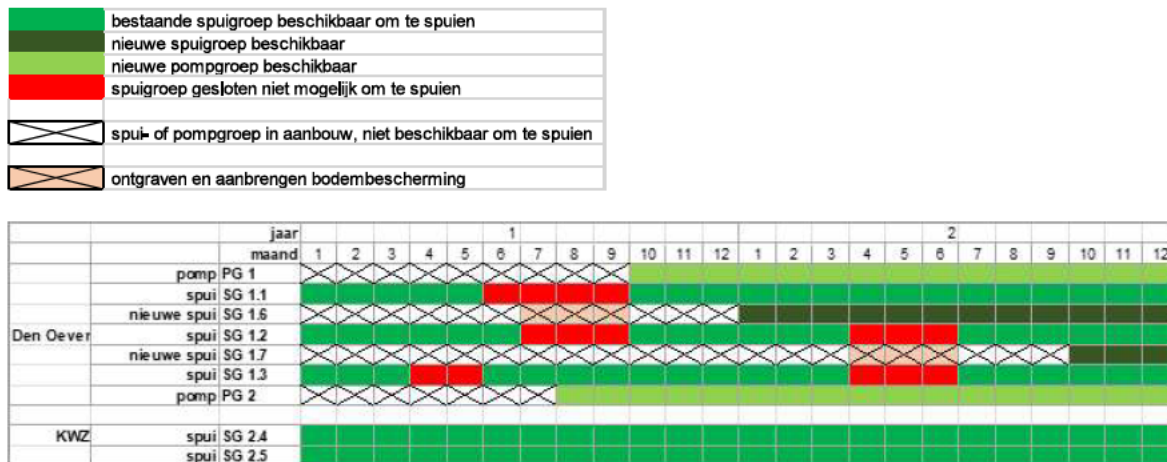
² Externe werking zijn effecten op soorten uit nabijgelegen Natura 2000-gebieden buiten het eigenlijke Natura 2000-gebieden. Dus effecten op broedvogels in Natura 2000-gebieden, die vlakbij buiten het Natura 2000-gebied foerageren en daar negatieve effecten ondervinden.

In december van het tweede jaar zijn alle werkzaamheden aan de spuicomplexen van Den Oever en Kornwerderzand afgerond. Op 1 januari van het derde jaar begint de gebruiksfase. Er is dan 140 % spuicapaciteit beschikbaar. De inzet van de pompen levert nog 5 % extra aan afvoercapaciteit.

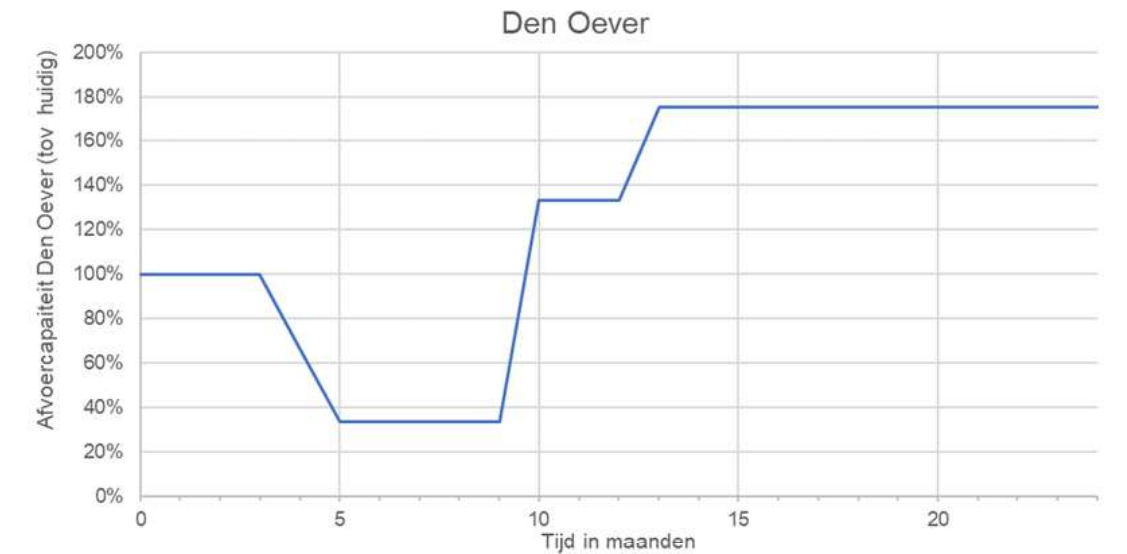
Tabel 2.1 Schema aanlegfase Beschikbaarheid spui groepen en pompen.



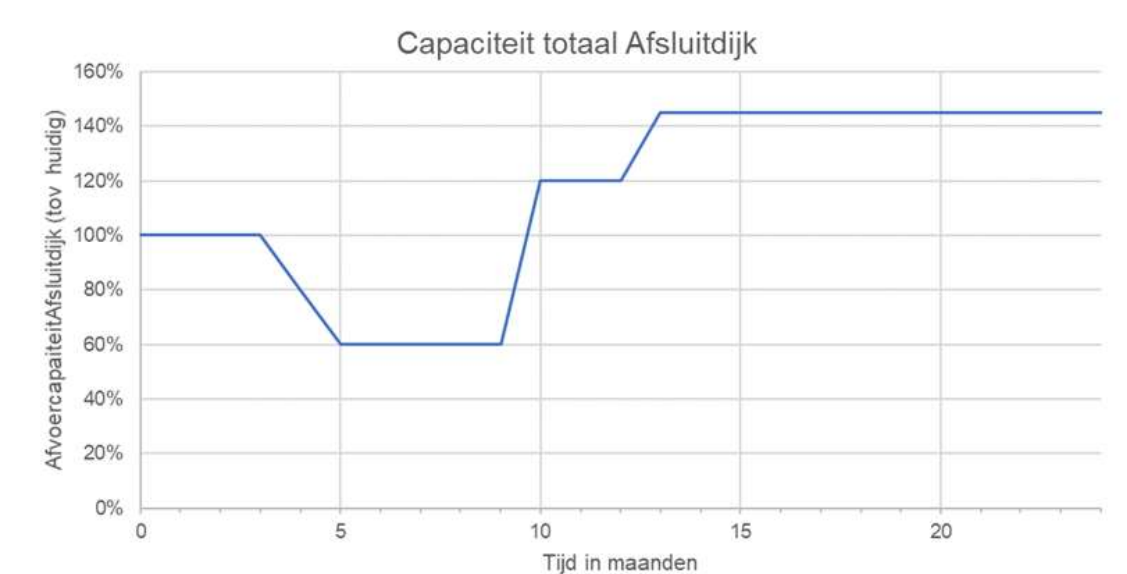
Tabel 2.2 Alternatieve planning voor het tweede deel van aanleg: Beschikbaarheid spui groepen en pompen bij Den Oever.



De relatieve spuicapaciteit die beschikbaar is tijdens de aanleg en het gebruik, is weergegeven in Figuur 2-2 en Figuur 2-3. De huidige spuicapaciteit is 100 %. De beschikbare totale spuicapaciteit van de beide spuicomplexen in de Afsluitdijk is weergegeven en de spuicapaciteit bij Den Oever. Vanwege de buitengebruikstelling van de bestaande spui groepen neemt de capaciteit bij Den Oever in eerste instantie af gedurende de aanleg. Omdat bij Den Oever tijdens de aanleg de pompgroepen en de nieuwe spui groepen beschikbaar komen neemt de capaciteit daarna stapsgewijs toe.



Figuur 2-2 Relatieve spuicapaciteit ten opzichte van huidige situatie beschikbaar gedurende aanleg en gebruik bij Den Oever.



Figuur 2-3 Relatieve spuicapaciteit ten opzichte van huidige situatie beschikbaar gedurende aanleg en gebruik bij afvoermiddel Afsluitdijk (Kornwerderzand plus Den Oever).

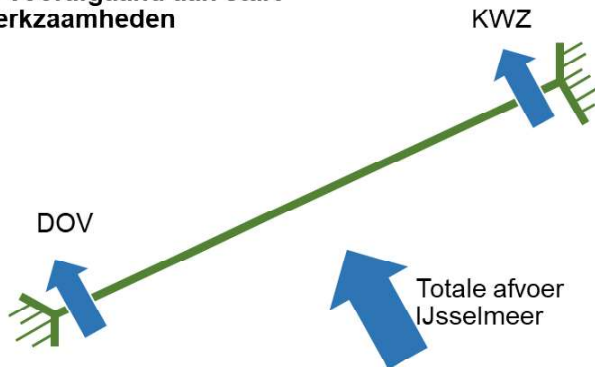
2.5 Gebruik van de spuicapaciteit

2.5.1 Capaciteit na afronding van de werkzaamheden

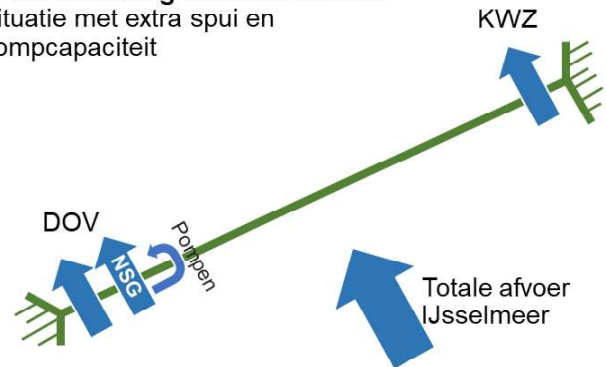
Na het afronden van alle werkzaamheden is de totale afvoercapaciteit via de spuisystemen en pompen met 45 % toegenomen ten opzichte van de situatie voorafgaand aan het project (zie Figuur 2-3). De extra afvoercapaciteit is beschikbaar bij Den Oever. Bij Kornwerderzand is de afvoercapaciteit ongewijzigd (schematisch weergegeven in Figuur 2-4). Dat deze capaciteit beschikbaar is, betekent niet dat deze direct wordt ingezet. De gemiddelde hoeveelheid water die vanuit het IJsselmeer moet worden afgevoerd naar de Waddenzee voor het peilbeheer van het

IJsselmeer is in deze periode (vanaf de start tot het afronden van de werkzaamheden) niet wezenlijk veranderd. Als gevolg van de uit te voeren werkzaamheden zal de totaal af te voeren hoeveelheid water niet veranderen.

A. Voorafgaand aan start werkzaamheden



B. Na afronding werkzaamheden
Situatie met extra spui en pompcapaciteit



Figuur 2-4 Schematische weergave van de beschikbare afvoercapaciteit voorafgaand (A) en na afronding (B) van de werkzaamheden (NSG = Nieuwe SpuiGroep).

De extra afvoercapaciteit zal vooral worden benut wanneer dat nodig is voor het handhaven van het peil op het IJsselmeer. Bij hoge afvoeren vanuit de IJssel en vanaf de gebieden rondom het IJsselmeer wordt dan de volledige spuicapaciteit gebruikt. Hierdoor verandert de totale (jaarlijkse) afvoer via de Afsluitdijk niet. Wel kan in vergelijking met de huidige situatie een bepaalde hoeveelheid water in een korter tijdsbestek afgevoerd.

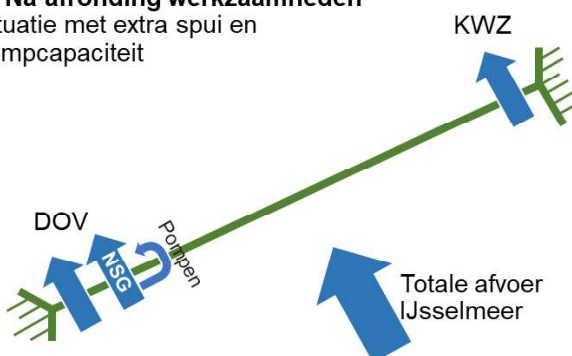
2.5.2 Spuien in de toekomst

De vergroting van de afvoercapaciteit en de inzet van pompen voor de afvoer vindt plaats vanwege zeespiegelstijging en veranderingen in de zoetwaterafvoer, zoals schematisch weergegeven in Figuur 2-5. Beide zijn gerelateerd aan de wereldwijde veranderingen in het klimaat. Voor het bepalen van de gevolgen voor het IJsselmeer is gerekend met Klimaatscenario G (Witteveen+Bos, 2015). Bij dit klimaatscenario is sprake van stijging van de zeespiegel met 15-25 cm in 2050 (ten opzichte van het basisjaar 1990) en is sprake van een toename van de IJsselaafvoer van 6,8%.

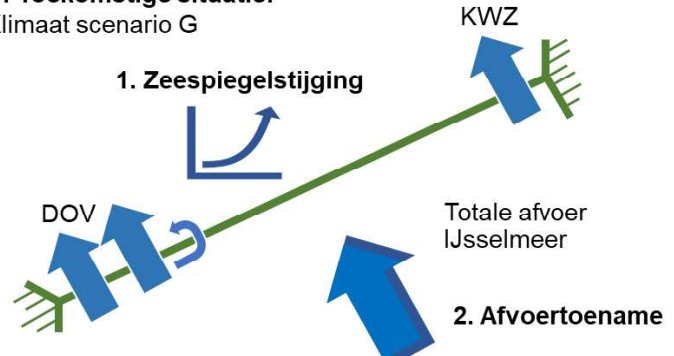
Zeespiegelstijging heeft als gevolg dat de periodes dat onder vrij verval kan worden gespuid vanaf het IJsselmeer naar de Waddenzee (het spuienvenster) en het verval afnemen: de afvoercapaciteit door spuien neemt daardoor af. De mogelijkheid om met pompen water af te voeren van het IJsselmeer naar de Waddenzee neemt dan juist toe, omdat dit gebeurt wanneer niet wordt gespuid en die periodes langer duren. Bij zeespiegelstijging zal daarom steeds meer afvoer plaatsvinden door pompen en steeds minder door spuien.

De toename van de afvoer vanuit het IJsselmeer, door veranderingen in de neerslag, betekent dat de beschikbare afvoercapaciteit vaker wordt benut.

B. Na afronding werkzaamheden
Situatie met extra spui en pompcapaciteit



C. Toekomstige situatie:
Klimaat scenario G



Figuur 2-5 Schematische weergave van de veranderingen in de randvoorwaarden voor de afvoer via de Afsluitdijk.

3 Huidige situatie waterbeweging en morfologie

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de waterbeweging en de morfologie in de situatie voorafgaand aan de werkzaamheden. Hierbij wordt ook teruggekeken naar de morfologische ontwikkelingen na het realiseren van de Afsluitdijk, omdat dit de basis vormt voor de huidige situatie. Omdat deze rapportage draait om het spuien wordt begonnen met een beschouwing daarvan.

3.2 Spuien van het IJsselmeer naar de Waddenzee

Het huidige spuiregime is samengevat in de Passende Beoordeling (in bijlage VII; Witteveen + Bos, 2022). Vanuit het IJsselmeer wordt zoetwater gespuid op de Waddenzee door de spuicomplexen bij Den Oever en Kornwerderzand. Het spuien vindt plaats wanneer het peil op het IJsselmeer hoger is, of hoger dreigt te worden dan de bandbreedte van het peil in het IJsselmeer toelaat. De bandbreedte voor het peil in het IJsselmeer is seizoensgebonden. Vanaf 2019 is het nieuwe peilbesluit (Rijkswaterstaat, 2018) van toepassing en worden voor de peilen de volgende bandbreedtes gehanteerd:

- winterperiode november tot en met februari: NAP -0,40 tot -0,05 m;
- winterperiode oktober en maart NAP -0,40 tot -0,10 m;
- zomerperiode april tot en met september NAP -0,30 m tot -0,10 m.

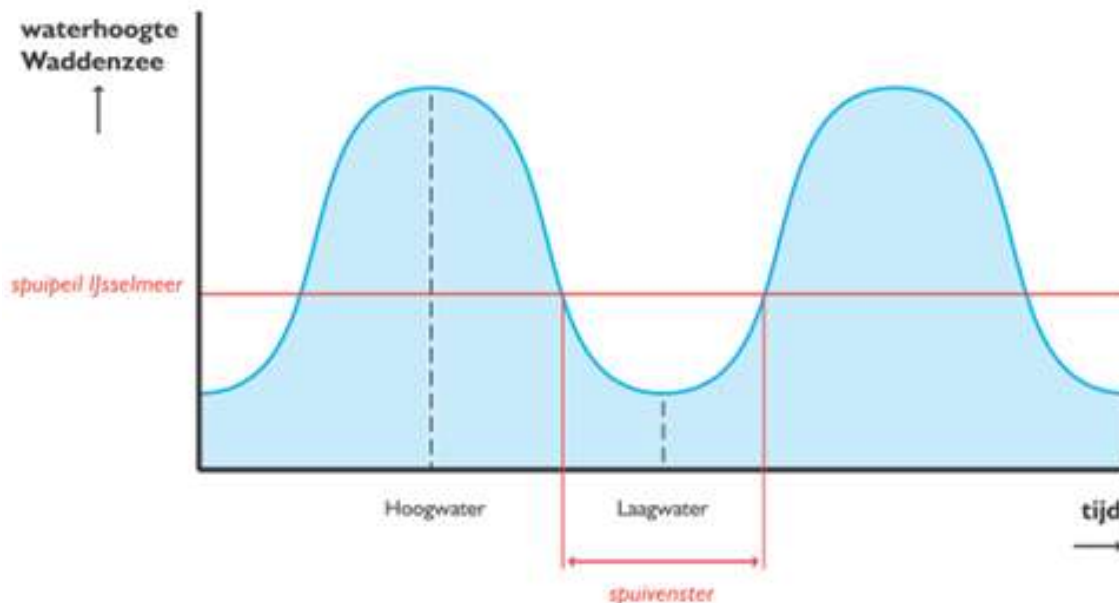
Op deze bandbreedtes zijn variaties mogelijk, zoals die zijn vastgelegd in het peilbesluit. Deze variaties hangen bijvoorbeeld samen met verwachte droge of natte periodes. De variaties in het peil zijn sterk gestuurd door ecologische doelen voor het IJsselmeergebied. Voorafgaand aan het ingaan van het nieuwe peilbesluit 2019 werden streefpeilen gehanteerd van NAP -0,40 m voor de winter (oktober tot en met maart) en NAP -0,20 m voor de zomer (april tot en met september). Deze peilen zijn vastgelegd in de peilbesluiten 1992/1999.

Hoeveel water vanaf het IJsselmeer naar de Waddenzee moet worden gespuid om binnen de bandbreedte van de peilen te blijven is afhankelijk van de wateraanvoer naar het IJsselmeer. Het voert te ver om in detail in te gaan op de waterhuishouding van het IJsselmeer, het is hier voldoende om op te merken dat deze afhankelijk is van de regionale waterbalans en -via de aanvoer van water via de IJssel- van de waterbalans in een veel groter gebied. Voor het spuien is van belang dat er grote variaties optreden rond de gemiddelde waterafvoer, zowel per jaar als per maand. Er kan zowel sprake zijn van (extreem) droge, gemiddelde en (extreem) natte jaren en maanden. In natte perioden is sprake van grotere afvoeren van zoetwater naar de Waddenzee, terwijl in de droge periode in het geheel geen afvoer plaatsvindt.

Het spuien via de spuicomplexen vindt plaats onder vrij verval, als de waterstand in het IJsselmeer hoger is dan in de Waddenzee. In de Waddenzee zorgt het optreden van het getij er voor dat tweemaal per dag hoog- en laagwater optreedt. Alleen tijdens een deel van de laagwaterperiode is de waterstand op de Waddenzee lager dan de waterstand op het IJsselmeer, zodat onder vrij verval kan worden gespuid. Deze periode wordt het spuivenster genoemd (zie Figuur 3-1).

Bij harde wind uit noordelijk of zuidelijke richtingen wordt het spuivenster en het verval beïnvloed door opwaaiing en afwaaiing. Bij zuidelijke winden stuwt het water aan de IJsselmeerszijde op tegen de Afsluitdijk waardoor daar de waterstanden toenemen, aan de Waddenzeezijde nemen de waterstanden juist af. Het spuivenster wordt hierdoor langer en het verval waarmee gespuid kan worden neemt toe.

Bij noordelijke winden neemt aan de Waddenzee de waterstand door opstuwing toe en aan de IJsselmeerszijde af. Het spuivenster wordt korter en het verval neemt af. Door dit effect zijn er perioden waarin helemaal niet kan worden gespuid.



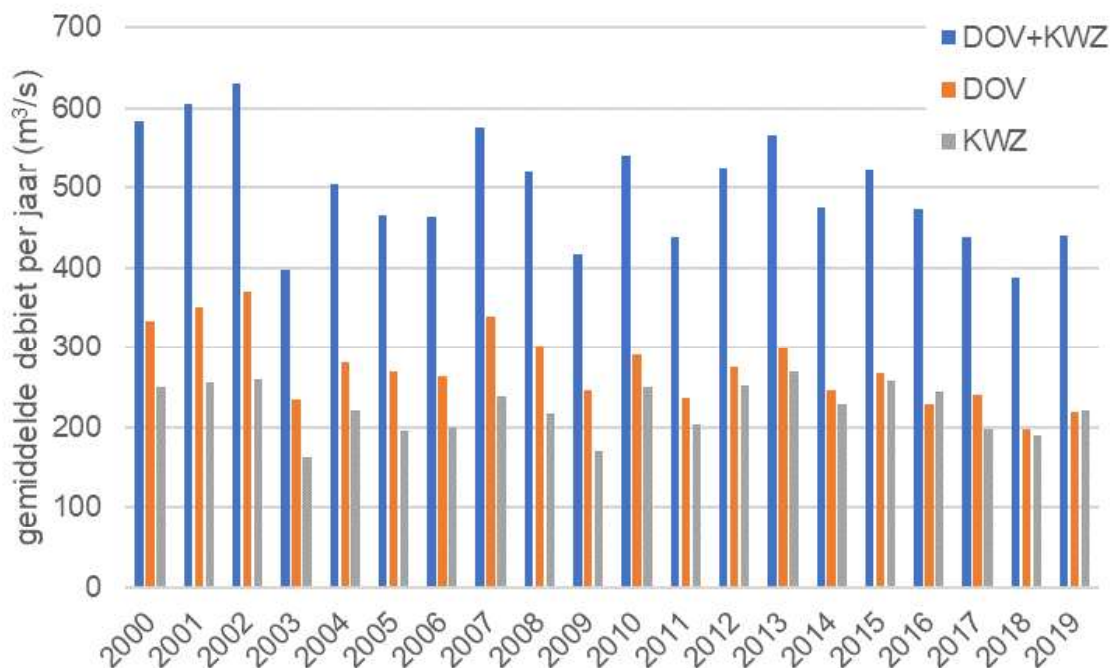
Figuur 3-1 Het spuivenster is de periode van het getij waarin de waterstand in de Waddenzee lager is dan in het IJsselmeer, waardoor er onder vrij verval water kan worden afgevoerd van het IJsselmeer naar de Waddenzee.

Het spuien van het zoete water vanuit het IJsselmeer naar de Waddenzee is het primaire middel om waterpeil in het IJsselmeer te beheren. Of het spuien voldoende is om het peil binnen de afgesproken bandbreedte te houden, is afhankelijk van het verschil tussen de aanvoer van zoetwater naar het IJsselmeer en de afvoer door het spuien. In periodes dat de aanvoer groter is dan de afvoer kan, afhankelijk van de waterstand waarmee is gestart, het peil oplopen tot boven de bandbreedte. De beschikbare spuicapaciteit is daarom belangrijk voor het beheer: bij een lagere capaciteit neemt de kans toe dat de afvoer kleiner is dan de aanvoer en dat daardoor de waterstand toeneemt tot boven de bandbreedte.

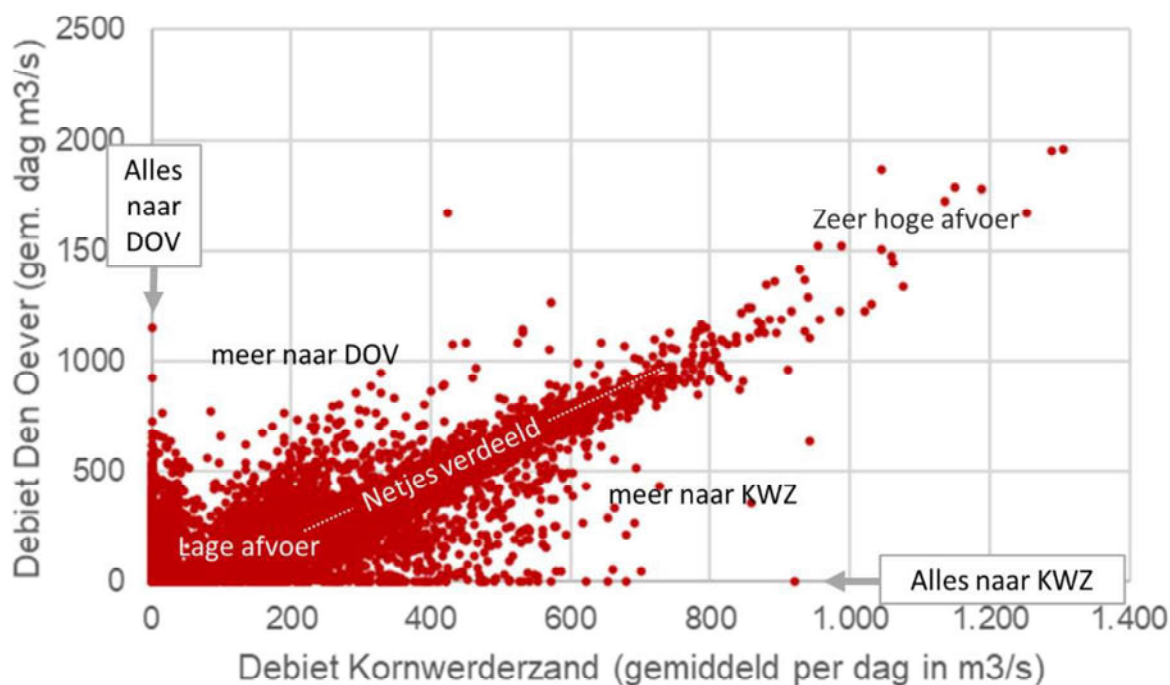
3.2.1 Verdeling over Den Oever en Kornwerderzand

De spuicapaciteit van het complex bij Den Oever (3 keer 5 kokers) is groter dan die van het complex bij Kornwerderzand (2 keer 5 kokers). Daar staat tegenover dat de getijamplitude (verschil tussen hoog en laag water) bij Kornwerderzand groter is waardoor daar efficiënter kan worden gespuid. In Figuur 3-2 is te zien dat in Den Oever meer water wordt afgevoerd dan in Kornwerderzand. Vanaf 2010 zijn de verschillen kleiner dan tot 2010.

De verdeling over de twee sluiscomplexen per dag staat in de grafiek in Figuur 3-3. In deze grafiek is zichtbaar dat de verdeling voor een deel naar rato van de capaciteit plaatsvindt, maar dat er ook dagen zijn dat veel, of alle afvoer via het spuicomplex Den Oever dan wel het spuicomplex Kornwerderzand plaatsvindt. Dit treedt incidenteel ook op bij hoge afvoeren. Dat kan verschillende oorzaken hebben, zoals onderhoud van de spuikekers en aangepaste spuiregimes vanwege visintrek.



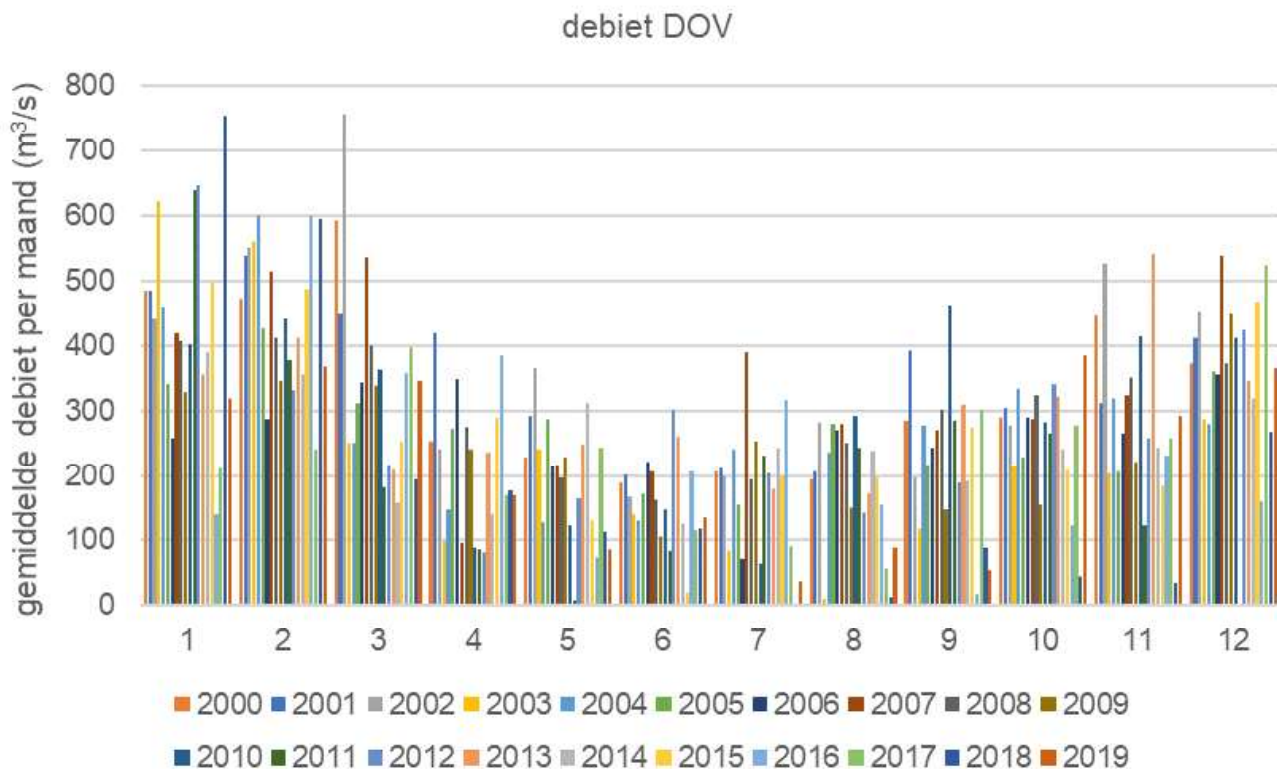
Figuur 3-2 Grafiek met het jaargemiddelde van het gemiddelde debiet per dag voor de periode 2000-2019 (bron Rijkswaterstaat – waterinfo).



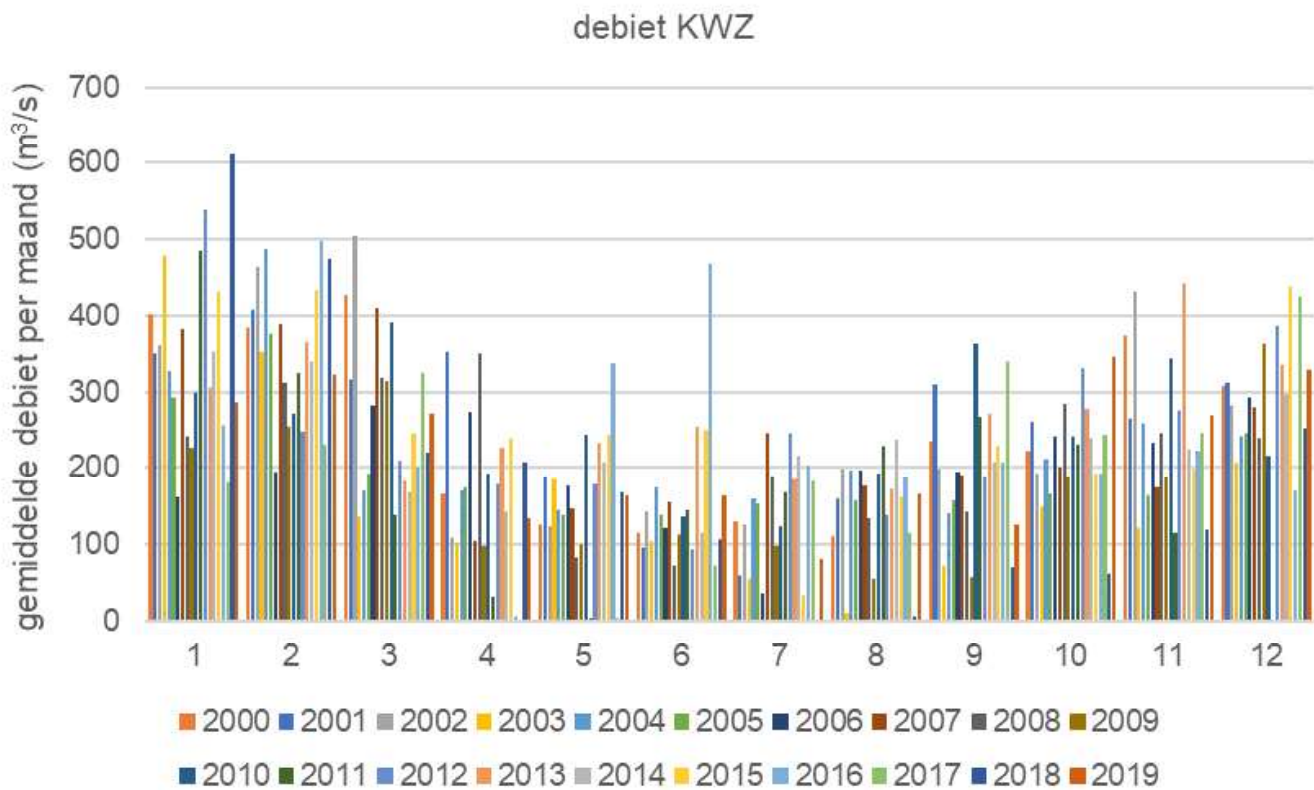
Figuur 3-3 Grafiek met de gemiddelde debieten per dag voor de spuicomples Kornwerderzand en Den Oever voor de periode 2000-2019 (bron Rijkswaterstaat – waterinfo).

3.2.2 Verdeling over het jaar

De verdeling per maand is weergegeven in Figuur 3-4 voor het spuicomplex Den Oever en in Figuur 3-5 voor het spuicomplex Kornwerderzand. In de grafiek zijn de maandgemiddelden voor 20 jaar weergegeven. Het patroon met overwegend hogere afvoer in herfst en winter en lagere afvoeren in voorjaar en zomer is duidelijk zichtbaar in de grafiek. Als in detail wordt gekeken blijkt dat er ook jaren zijn waarin bepaalde wintermaanden lage waarden hebben, zelfs overeenkomend met waarden die in de zomer optreden. Omgekeerd zijn er ook jaren met zomermaanden die net zo hoog zijn als de winterwaarden. De spreiding in de afvoeren rond de gemiddelde waarden is groot.



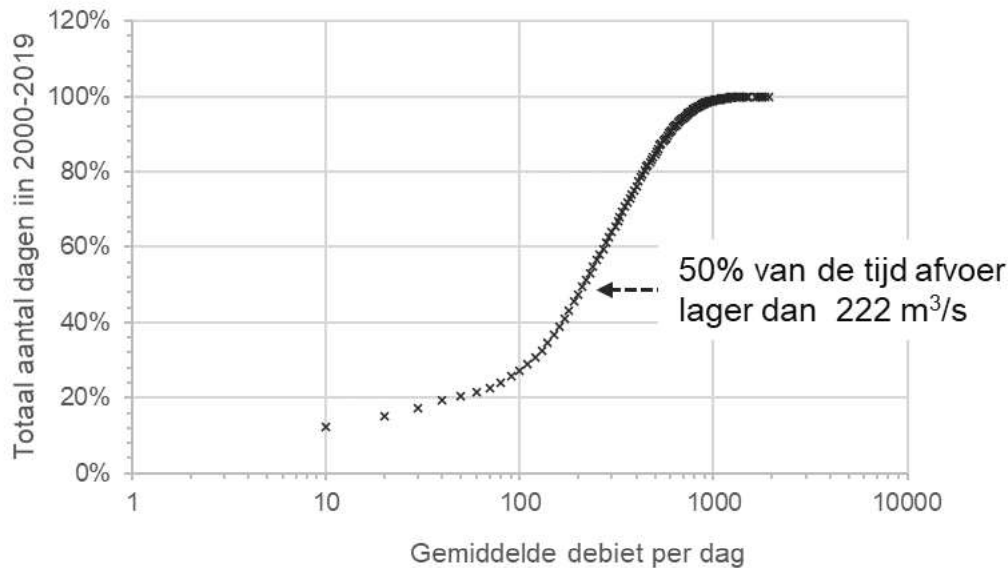
Figuur 3-4 Grafiek met het maandgemiddelde van het gemiddelde debiet per dag van het spuicomplex Den Oever voor de periode 2000-2019 (bron RWS – waterinfo).



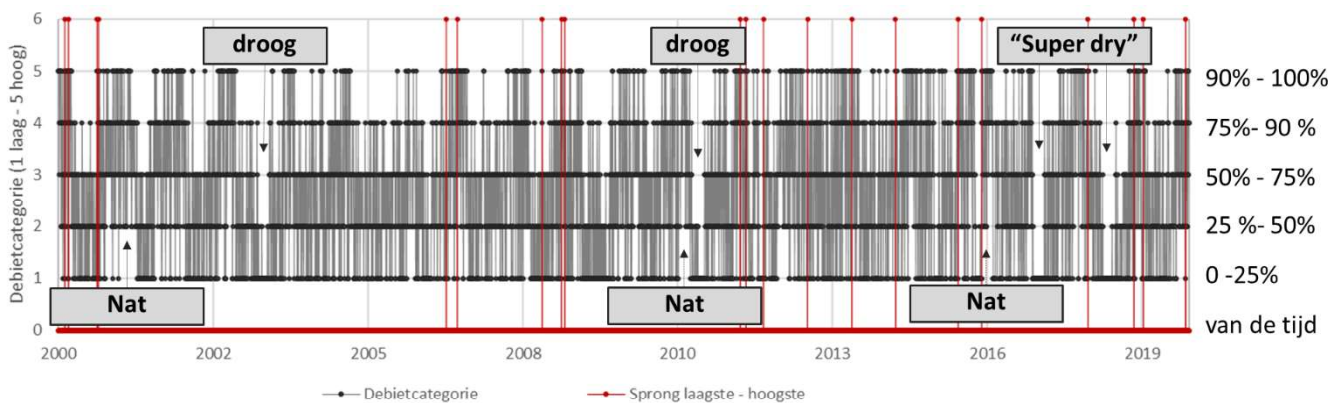
Figuur 3-5 Grafiek met het maandgemiddelde van het gemiddelde debiet per dag van het spuicomplex Kornwerderzand voor de periode 2000-2019 (bron RWS – waterinfo).

3.2.3 Pulsen in de afvoer

Voor de variaties in de saliniteit in de Waddenzee als gevolg van de afvoer van zoetwater vanuit het IJsselmeer zijn niet alleen de gemiddelde waarden van belang, maar juist de overgangen waarbij na een periode met lage afvoeren of geen afvoeren opeens veel zoetwater wordt afgevoerd. Omdat het bijzonder lastig is om deze overgang te herkennen in de grafieken met de daggemiddelden waarden, is een indeling gemaakt in vijf categorieën van lage afvoeren tot hoge afvoeren. De grenswaarden hiervoor zijn ontleend aan de cumulatieve verdeling van de afvoeren, zoals getoond in Figuur 3-6. In deze grafiek is de waarde van het gemiddelde debiet van 222 m³/voor 50 % van de tijd aangegeven. Op vergelijkbare wijze zijn debieten behorende bij 25 %, 75 % en 90 % van de tijd vastgesteld. Figuur 3-7 geeft de debieten in de vijf categorieën weer in de periode 2000-2019, waarbij is gemarkeerd wanneer er een sprong van de laagste debietcategorie naar de hoogste debietcategorie heeft plaatsgevonden. Dit zijn pulsen, waarbij ineens veel zoetwater in de Waddenzee terechtkomt, terwijl daarvoor veel minder zoetwater werd gespuid. In de grafiek is zichtbaar dat er enkele perioden zijn waarin gedurende langere tijd veel water naar de Waddenzee is afgevoerd en dat er ook enkele periode zijn waarin juist heel weinig is afgevoerd. De sterke toenames in de zoetwater aanvoer treden in de hele periode op, maar daarbij is geen sprake van een patroon. De grafiek van het spuicomplex bij Kornwerderzand is niet opgenomen, omdat deze een vergelijkbaar beeld laat zien, waarbij veel van de sprongen van zeer lage naar zeer hoge afvoeren overeenkomen. Een aantal van de sprongen is voorbehouden aan hetzij het spuicomplex Den Oever, hetzij het spuicomplex Kornwerderzand. Dat betekent dat op dat moment alleen een zoetwaterpuls optreedt bij het betreffende spuicomplex en niet bij het andere spuicomplex.



Figuur 3-6 Cumulatieve grafiek van de verdeling in daggemiddelde afvoeren in de periode 2000-2019 voor het spuicomplex Den Oever.



Figuur 3-7 Opgetreden daggemiddelde debieten in vijf categorieën (grijze punten met lijnen) en de overgang van de laagste naar de hoogste categorie met rode lijn en punten voor het spuicomplex Den Oever. De perioden met gedurende meerdere dagen alleen grotere afvoeren zijn gemarkeerd met 'Nat'. De perioden met gedurende meerdere dagen alleen de laagste afvoeren zijn gemarkeerd met 'Droog' en 'Super dry'.

De beschrijving van het spuien laat zien dat onder het huidige beheer alle mogelijke varianten zich voordoen. Dat is het logische gevolg van:

- variaties in de zoetwater afvoer vanuit het IJsselmeer, die noodzakelijke zijn om het peil binnen de afgesproken bandbreedte te handhaven;
- variaties in de waterstanden op de Waddenzee, waardoor de omvang van het getijvenster varieert van nul bij sterk verhoogde waterstanden in de Waddenzee tot maximaal bij verlaagde waterstanden op de Waddenzee en hogere waterstanden in het IJsselmeer.

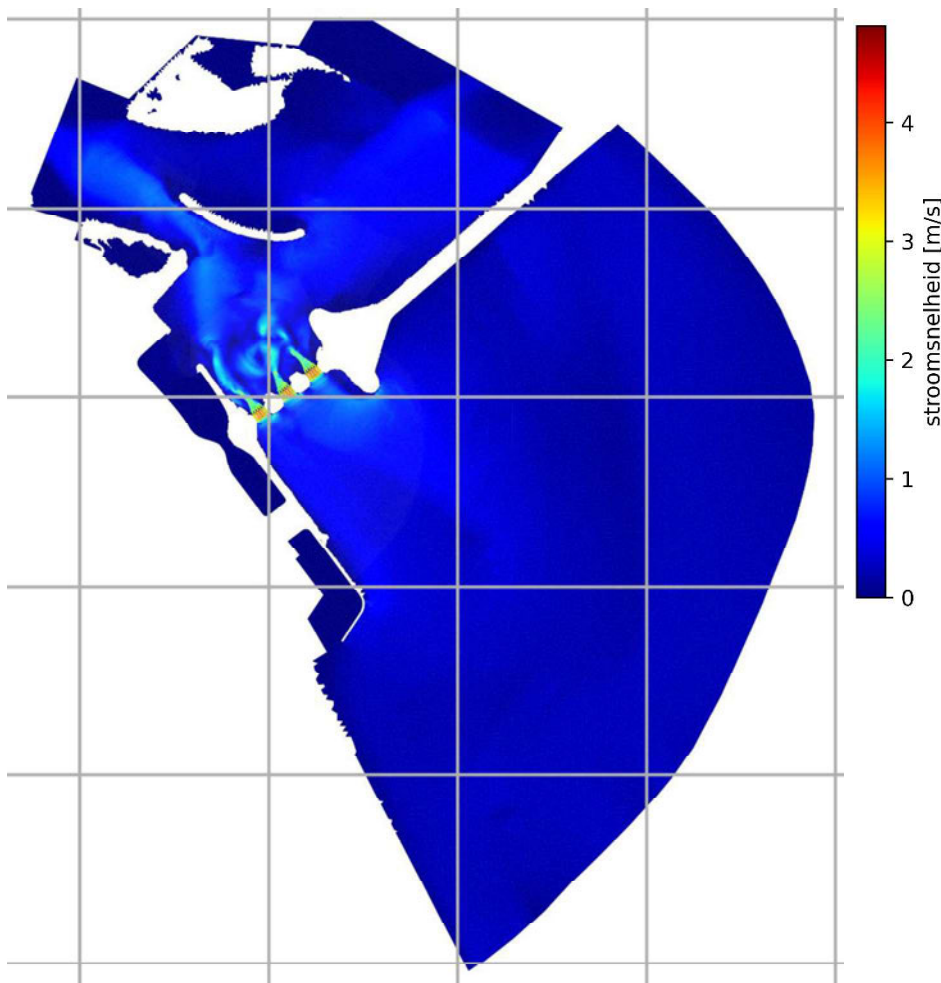
3.3 Stroming in de Waddenzee en in het IJsselmeer

In de Waddenzee wordt de stroming gedomineerd door het getij. Tijdens de vloed stroomt het water vanuit de Noordzee door de zeegat de Waddenzee in, zodat de waterstanden toenemen. Tijdens de eb stroomt het water via de zeegaten uit de Waddenzee naar de Noordzee, zodat de waterstanden afnemen. De stroomrichting is dan omgekeerd ten opzichte van de vloed. De hoogste stroomsnelheden treden op in de getijdegeulen en de laagste stroomsnelheden worden gemeten op de wadplaten. De stroming in en naar de Waddenzee wordt daarbij beïnvloedt door de wind. Afhankelijk van de windsterkte en windrichting stroomt er meer water de Waddenzee in dan wel uit en wordt ook de stroming in de geulen en op de wadplaten beïnvloedt.

Tijdens het spuien wordt direct nabij de spuicomplexen (de eerste tientallen tot honderden meters) de stroming volledig gedomineerd door de turbulente uitstroom uit de spuikokers. Verder weg van de spuicomplexen vindt interferentie plaats van de stroming vanuit de spuicomplexen en de stroming in de Waddenzee. Spuien vindt plaats tijdens het getijvenster (zie het voorbeeld in Figuur 3-1), als de waterstand in de Waddenzee lager is dan op het IJsselmeer ter plaatse van het spuicomplex. Het eerste deel van het spuijenster valt in de eb fase van het getij, als de stroming vanuit de Waddenzee naar de Waddenzee is gericht. De stroomrichting vanuit de spui in de Waddenzee komt tijdens die fase overeen met de stroomrichting door het getij. Het tweede deel van het getijvenster valt in de vloed fase van het getij en dan zijn de stroomrichtingen van het spuien en het getij tegengesteld.

Het water dat wordt gespuid is zoet, terwijl het water in Waddenzee zout is. Omdat de dichtheid van het gespuide zoete water lager is dan dat van het zoute Waddenzeewater, blijft het zoete water boven in de waterkolom, op het zoute water 'drijven'. Er vindt wel enige menging plaats van het zoete en het zoute water, maar deze menging is relatief beperkt. Het gespuide zoetwater vormt een laag aan het oppervlakte, die met de getijdestroming wordt verspreid door de Waddenzee. Het gespuide zoete water kan worden gemeten in het Marsdiep (zie bijvoorbeeld Elias & Stive, 2006, Buijsman & Ridderinkhof, 2007 en de Vries, 2015). Deze verdeling van zoet- en zoutwater over de verticaal brengt een 3-dimensionale stroming op gang, die bekend staat als estuariene circulatie. Aan het wateroppervlakte stroomt het zoetere water in zeewaartse richting en aan de bodem stroomt zoutwater in tegengestelde richting landwaarts.

De voor dit voornemen relevante stroming in het IJsselmeer is gekoppeld aan het spuien. Tijdens het spuien stroomt het water vanuit het IJsselmeer naar de spui groepen die in gebruik zijn. In de nabijheid van de spuimiddelen is sprake van convergerende stroomlijnen, waarbij het patroon wordt beïnvloed door de aanwezigheid van ondieptes en geulen in het IJsselmeer. Figuur 3-8 laat zien welke stroomsnelheden optreden in het IJsselmeer tijdens het spuien bij Den Oever.



Figuur 3-8 Stroomsnelheden in het IJsselmeer en de Waddenzee in de huidige situatie met een waterstandsverschil van 50 cm tussen de IJsselmeerzijde en de Waddenzee (uit Levvel, 2020).

3.4 Reeds opgetreden morfologische veranderingen in de Waddenzee nabij Den Oever

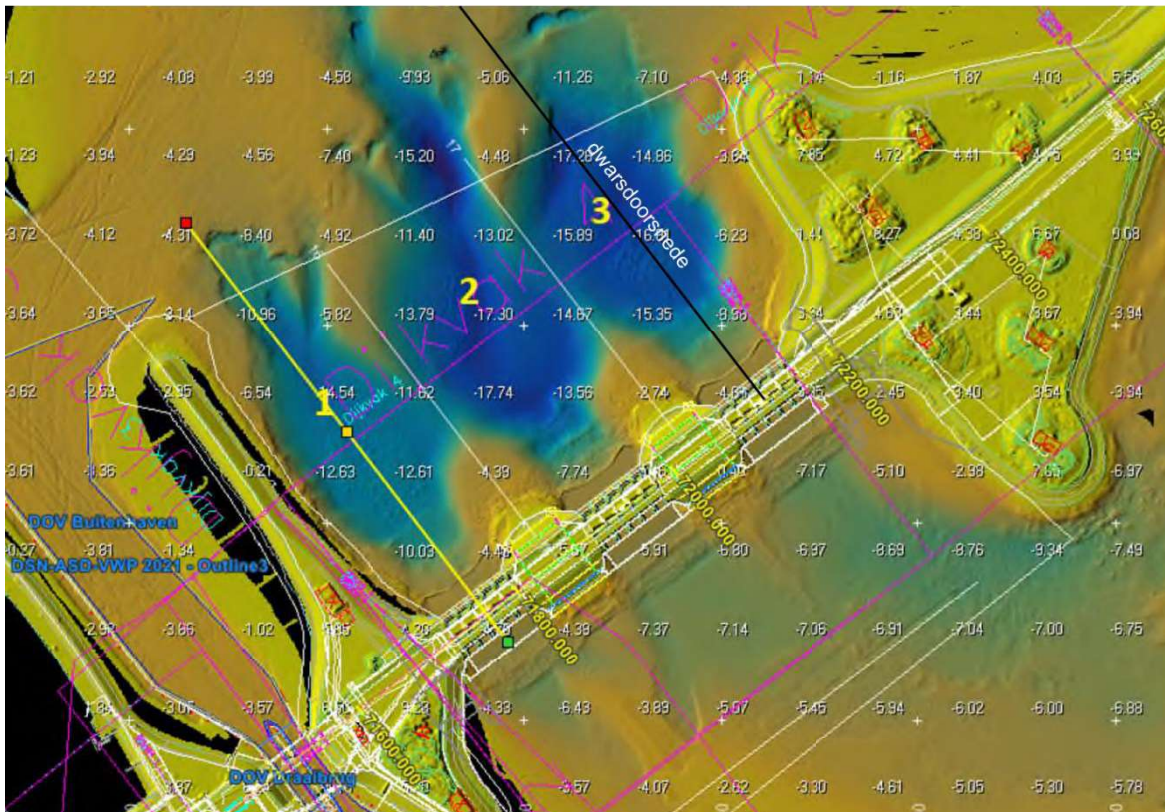
Het is plausibel dat de aanleg en ingebruikname van de nieuwe spuisystemen en de pompen alleen gevolgen oplevert voor de bodemligging nabij Den Oever, omdat de grotere spuicapaciteit en de pompen daar worden gerealiseerd. Vandaar dat deze paragraaf alleen in gaat op de morfologische veranderingen die in de Waddenzee zijn opgetreden nabij Den oever.

3.4.1 Initiële veranderingen rondom de spuicomplexen na realisatie Afsluitdijk

Het ontstaan van de ontgrondingskuilen

Ontgrondingskuilen ontstaan bij de spuien als gevolg van de sterke turbulente stroming die optreedt in de Waddenzee bij het uitstromen vanuit de spuikokers. Deze stroming heeft een sterke eroderende werking. Initieel verloopt dit proces snel. Naarmate de omvang van de ontgrondingskuilen de evenwichtsligging bereikt, neemt de snelheid af. In de periode na de ingebruikname van de spuien bij Den Kornwerderzand in 1932 is de vorming van de ontgrondingskuilen gestart. Het sediment (zand en slib) dat vrijkomt bij het ontstaan van de ontgrondingskuilen is verdere weg in de Waddenzee terechtgekomen. Gaandeweg zijn de ontgrondingskuilen voorzien van bestorting, om uitbreiding in de richting van de constructies te beperken. Het gevolg van deze processen is dat aan de Waddenzeezijde bij elk van de drie spuigroepen een diepe ontgrondingskuil aanwezig is, zoals zichtbaar is in Figuur 3-9. Het diepste punt van elke

ontgrondingskuil ligt rond de NAP -25 m. Aan de zeezijde van de twee tusseneilanden tussen de spuigroepen is geen ontgrondingskuil aanwezig. Verder zeewaarts raken de drie ontgrondingskuilen elkaar. Daar is nog wel sprake van een verondieping in het verlengde van de tusseneilanden uit, zodat de drie ontgrondingskuilen niet helemaal in elkaar overlopen.



Figuur 3-9 Detailkaart van de diepteligging bij het spuicomplex bij Den Oever, met als diepste (donkerblauwe) gebieden de ontgrondingskuilen.

Aanvoer van zand vanuit het IJsselmeer naar de Waddenzee

Na de aanleg van de Afsluitdijk en de ingebruikname van de spuicomplexen treedt in het IJsselmeer tijdens het spuien de aanstroming op zoals die tegenwoordig ook plaatsvindt. Initieel betekende dit dat op een aantal plaatsen in het aanstroomgebied de stroomsnelheden dermate zijn toegenomen dat hierdoor de bodem in het IJsselmeer ging eroderen. Het sediment tijdens het spuien is geërodeerd is met stroming naar de Waddenzee getransporteerd. Dit proces is doorgegaan totdat de stromingscondities tijdens het spuien in evenwicht waren met de waterdiepte en de korrelgrootte van het bodemsediment.

De gevolgen voor de Waddenzee van deze initiële aanvoer van sediment naar de Waddenzee is bij ons weten niet gedocumenteerd³. De morfologische gevolgen voor de Waddenzee van deze initiële veranderingen zijn klein in vergelijking met de grootschalige veranderingen in de waterbeweging (getijvoortplanting, waterstanden, stroomsnelheden) die het gevolg waren van de afsluiting van de Zuiderzee (zie de volgende paragraaf). De gevolgen van de veranderingen zelf, zijnde de ontgrondingskuilen en het aanstroomgebied in het IJsselmeer zijn relevant voor de voorliggende analyse, omdat deze het vertrekpunt vormen voor het beschouwen van de gevolgen van de nieuwe spuismiddelen en de pompen.

³ Men was tijdens de aanleg van de Afsluitdijk bewust van deze zandaanvoer, getuige deze notitie: "Nota betreffende het onderzoek naar de mogelijkheid van opheffing der bezwaren voor de beweging der deuren in de Uitwateringssluizen te Den Oever, tengevolge van zandneerslag achter den drempel". 1931. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Dienst der Zuiderzeewerken P.Ph. Jansen.

3.4.2 Langetermijn veranderingen in de Waddenzee

De lang-termijn veranderingen in de omgeving van het spuicomplex bij Den Oever worden gedomineerd door de grootschalige veranderingen die zijn opgetreden na de afsluiting van de Zuiderzee. Deze omgeving met de gebruikte namen van de geulen en platen wordt getoond in Figuur 3-10. Basis voor de voorliggende beschrijving is het kombergingsrapport Marsdiep en Vlie (Deltares, 2019), dat een uitgebreide beschrijving geeft van de morfologische kenmerken en veranderingen in het Marsdiep en het Vlie.

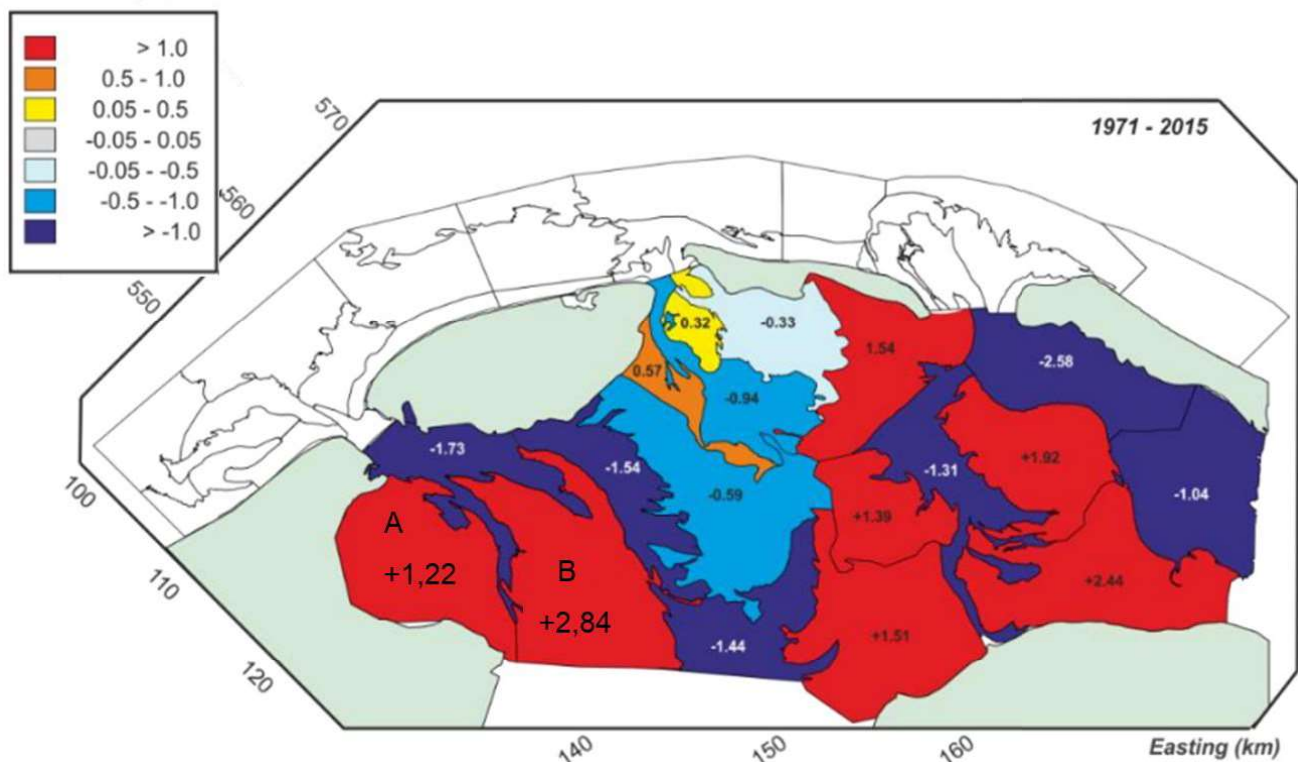
De recente sedimentbalans van Elias (2019) geeft een beschouwing van de netto sedimentatie en erosie in deze kombergingsgebieden. Figuur 3-11 toont de kaart uit Elias (2019), waarin de gebieden zijn aangegeven waarvan de trends in de netto sedimentatie of erosie zijn berekend. Voor de omgeving van de spuisluizen zijn gebied A (Balgzand) ten zuidwesten van Den Oever en gebied B (Lutjeswaard) ten noordoosten van Den Oever van belang. Beide gebieden laten een duidelijke trend van sedimentatie zien. Voor gebied A bedroeg de trend in de netto sedimentatie $1,22 \times 10^6 \text{ m}^3$ per jaar voor de periode 1971-2015. Voor de periode 1933-2015 was de netto sedimentatie $1,38 \times 10^6 \text{ m}^3$ per jaar en voor de periode 1991-2015 was de netto sedimentatie $0,98 \times 10^6 \text{ m}^3$ per jaar. Voor gebied B was de trend in de netto sedimentatie $2,84 \times 10^6 \text{ m}^3$ per jaar voor de periode 1971-2015. Voor de periode 1933-2015 was de netto sedimentatie $3,24 \times 10^6 \text{ m}^3$ per jaar en voor de periode 1991-2015 was de netto sedimentatie $2,16 \times 10^6 \text{ m}^3$ per jaar. In de ruime omgeving van Den Oever heeft in de Waddenzee sinds de afsluiting van de Zuiderzee de sedimentatie de overhand.

De sedimentatie in de omgeving van Den Oever heeft specifieke gevolgen voor de verschillende geulen en platen in het gebied. In deze paragraaf wordt kort ingegaan op de onderstaande ontwikkelingen:

3. Afname van de omvang van het Visjagersgaatje
4. Toename van de omvang van de Boerenplaat
5. Afname van de omvang van de Wierbalg
6. Sedimentatie voor de Afsluitdijk



Figuur 3-10 Kaart met de bodemligging in de Waddenzee nabij Den Oever (situatie 2015).



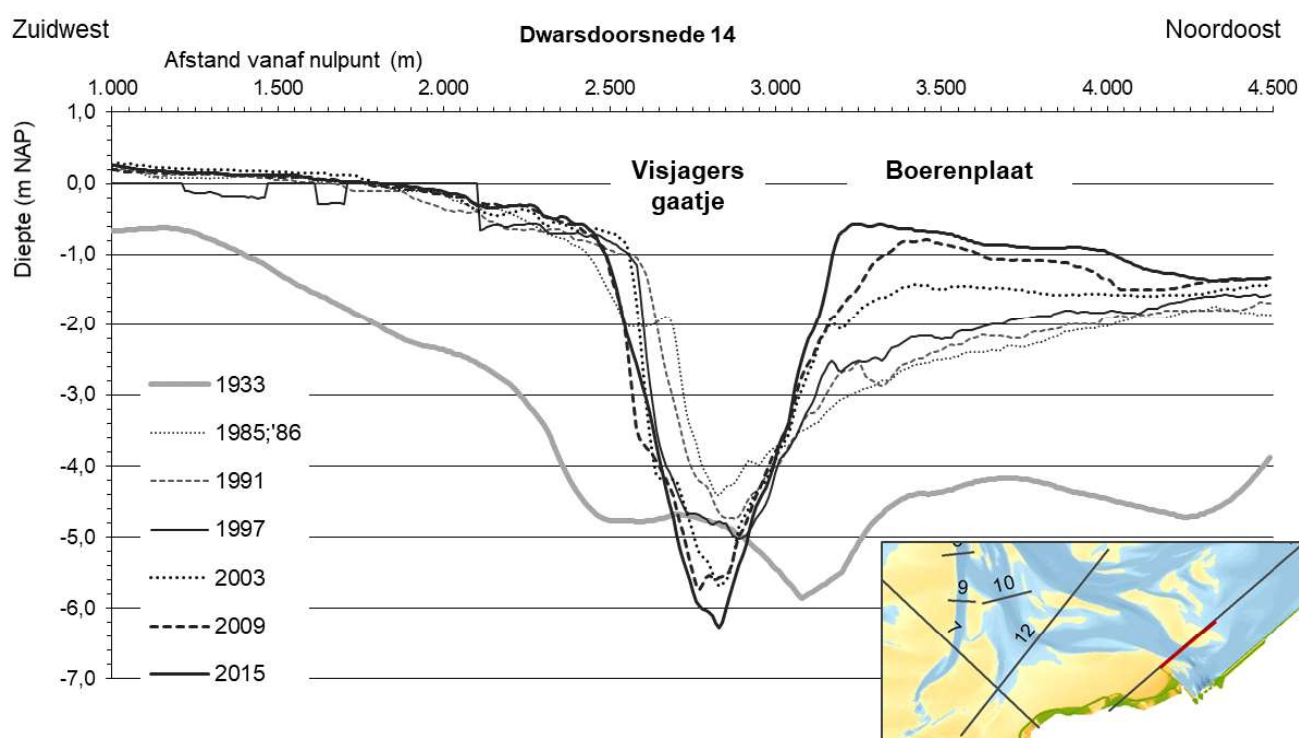
Figuur 3-11 Kaart met een overzicht van de trends in de ontwikkeling van de sedimentvolumes (in Mm³/jaar) in de Westelijke Waddenzee voor de 1971-2015 (uit Elias, 2019).

1. Afname van de omvang van het Visjagersgaatje

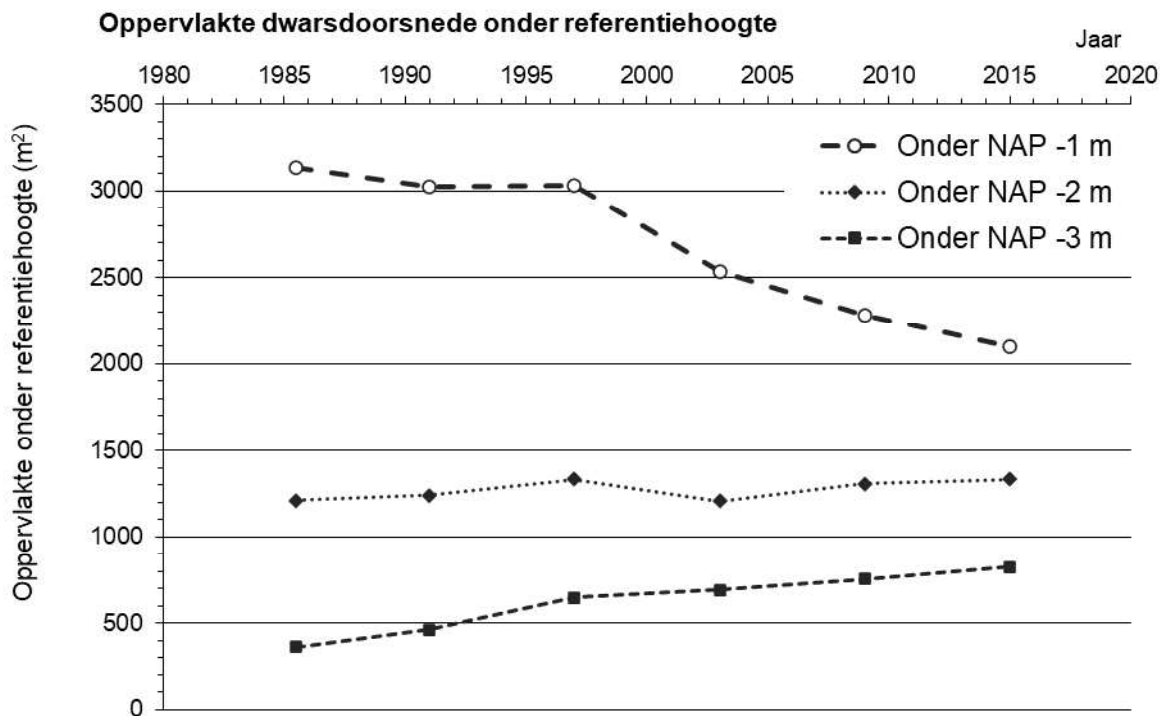
Het Visjagersgaatje is tegenwoordig de belangrijkste getijdegeul die het spuicomplex bij Den Oever met de rest van de Waddenzee verbindt. Dat is een situatie die gaandeweg is ontstaan na de afsluiting van de Zuiderzee. Ten tijde van de afsluiting was het Visjagersgaatje een relatief kleine getijdegeul ten opzichte van de Wierbalg en het Zuiderzwin, zoals zichtbaar is in de historische kaart in Figuur 3-12. De omvang van alle deze geulen in deze omgeving is afgenomen, omdat er geen stroming meer naar en van de Zuiderzee plaatsvond. Deze afname was het minst groot voor het Visjagersgaatje. Figuur 3-13 laat de dwarsdoorsnede zien door het Visjagersgaatje voor de vaklodingen vanaf 1985 tot en met 2015 en toont ook de situatie na de afsluiting in 1933. Zichtbaar is dat ten opzichte van 1933 in 1985 sprake is van een duidelijke geul die wordt begrensd door een wadplaat aan de zuidwestzijde en een ondiepte aan de noordoostzijde. Na 1985/86 is de hoogte van de ondiepte toegenomen, zodat tegenwoordig hier de Boerenplaat ligt. Het Visjagersgaatje zelf is smaller en dieper geworden. Figuur 3-14 laat de afname van de totale omvang van het Visjagersgaatje zien in het doorstroomoppervlakte onder NAP -1 m. De omvang van de geul is op de locatie van de dwarsdoorsnede met bijna 1/3 afgenomen. In deze grafiek is ook zichtbaar dat de omvang van het diepe deel van de geul toeneemt in de doorstroomoppervlaktes onder NAP -2 m en NAP -3 m. Deze toename van de diepe delen in niet groot genoeg om de afname van de ondiepe delen teniet te doen.



Figuur 3-12 Historische topografische kaart van de situatie in de jaren '30 voorafgaand aan de aanleg van de Afsluitdijk.



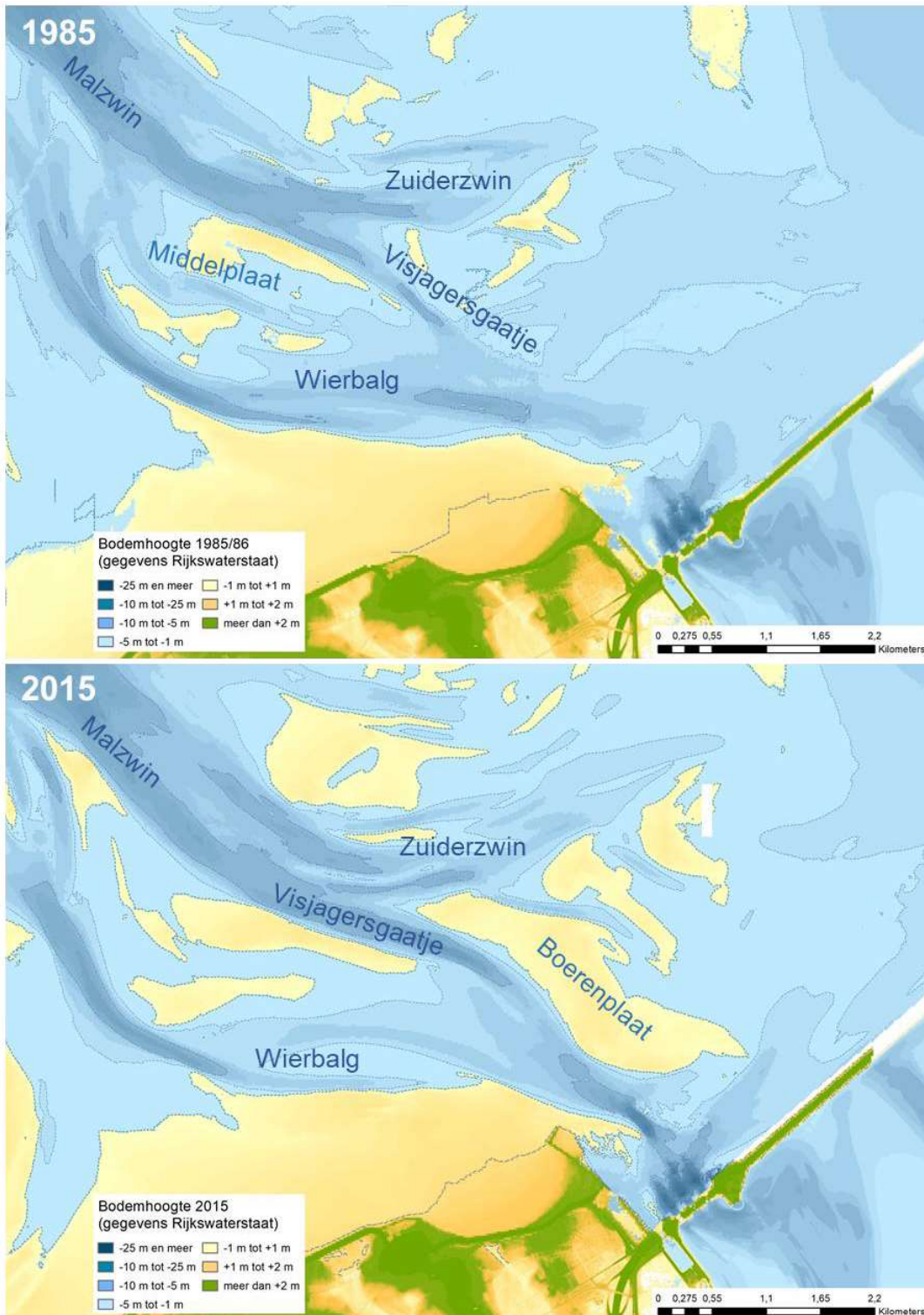
Figuur 3-13 Dwarsdoorsnede door het Visjagersgaatje nabij Den Oever (locatie in inzet, figuur gemaakt voor het Rijkswaterstaat KPP Morfologie Waddenzee programma).



Figuur 3-14 Oppervlakte van de dwarsdoorsnede door het Visjagersgaatje, zoals getoond in Figuur 3-13 (dwarsdoorsnede gemaakt voor het Rijkswaterstaat KPP Morfologie Waddenzee programma).

2. Toename van de omvang van de Boerenplaat

De aanwezigheid van de Boerenplaat ten noorden van het spuisluizencomplex bij Den Oever, zoals zichtbaar in Figuur 3-10 is een relatief recente ontwikkeling. In Figuur 3-15 is een bodemkaart van 1985 opgenomen waarin geen sprake is van een wadplaat op die locatie, zoals die tegenwoordig aanwezig is. Ook in de dwarsdoorsnede in Figuur 3-13 is het omhoogkomen van de Boerenplaat zichtbaar. Naast de Boerenplaat zijn ook de andere wadplaten in de omgeving in omvang toegenomen.

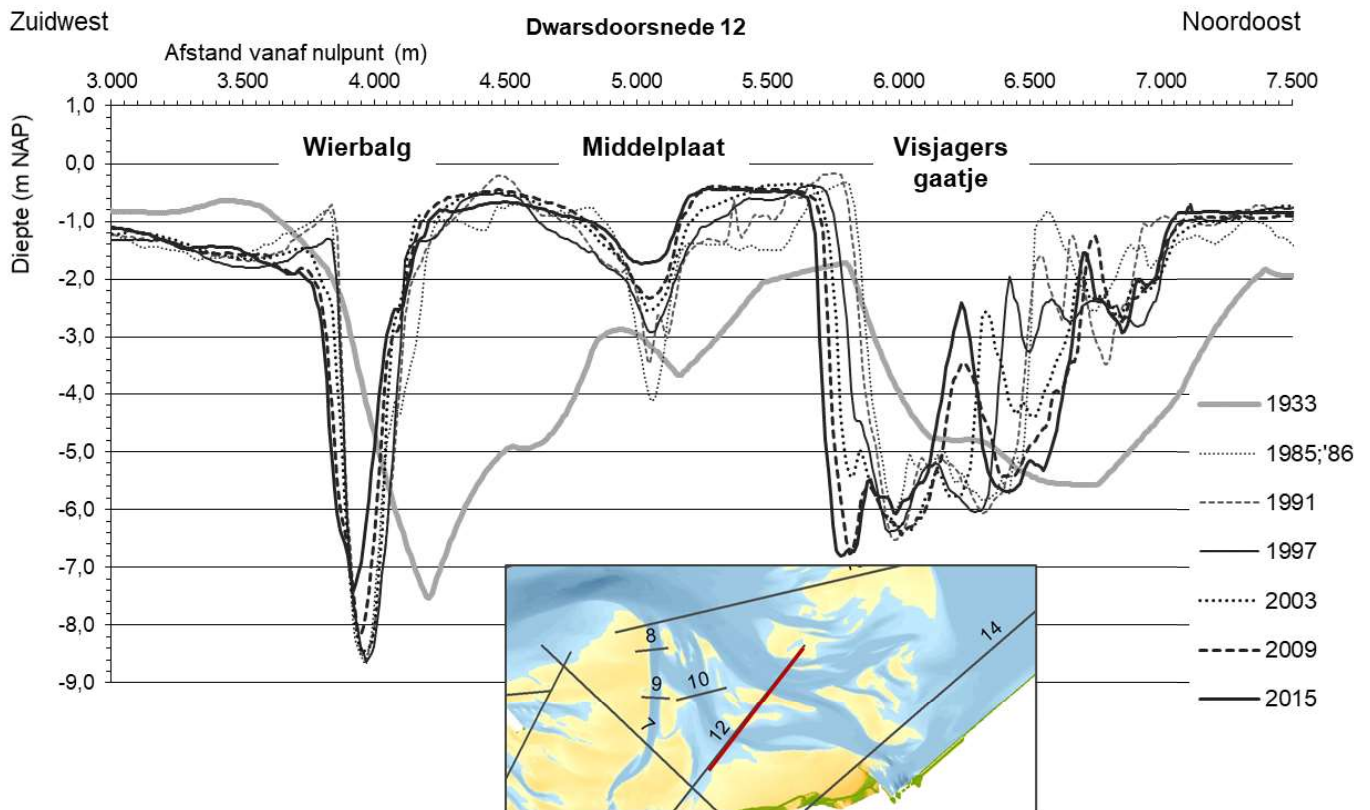


Figuur 3-15 Kaarten met de bodemligging rondom Den Oever in 1985 (boven) en 2015 (onder) (op basis van de vaklodingsgegevens van Rijkswaterstaat).

3. Afname van de omvang van de Wierbalg

Ten tijde van de afsluiting van de Zuiderzee waren de Wierbalg en het Zuiderzwin de twee belangrijke getijdegeulen nabij de Den Oever, die vanuit de Waddenzee doorliepen in de Zuiderzee (Figuur 3-12). Voor de tegenwoordige situatie bij Den Oever is het Zuiderzwin minder van belang, omdat deze geul geen aan- en afvoer van water naar Den Oever verzorgt. De Wierbalg doet dat wel, deze geul komt ten noorden het sluisencomplex samen bij het Visjagersgaatje. In de kaarten in Figuur 3-15 is zichtbaar dat in 1985 de Wierbalg een grotere omvang had dan het Visjagersgaatje. In 2015 was de situatie omgekeerd, toen vormde het Visjagersgaatje de belangrijkste verbinding

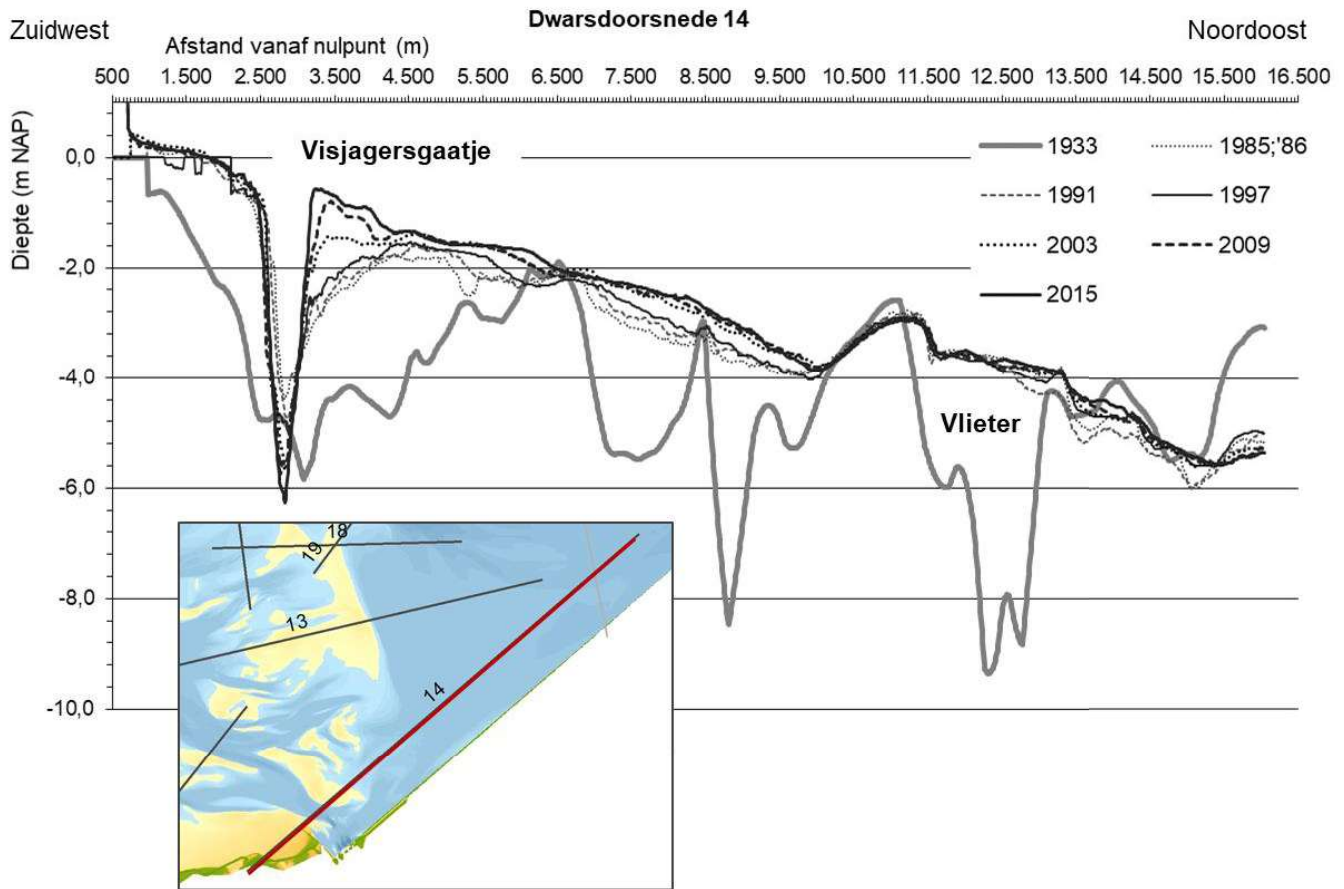
tussen het Malzwin en Den Oever. De afname van de omvang van de Wierbalg is ook zichtbaar in de dwarsdoorsnede in Figuur 3-16. De diepte van de Wierbalg is met meer dan één meter afgenomen. In deze dwarsdoorsnede is ook zichtbaar dat het geultje dat tussen de twee delen van de Middelplaat ligt sterk in omvang is afgenomen.



Figuur 3-16 Dwarsdoorsnede door de geulen Wierbalg en Visjagersgaatje, met daartussen de Middelplaat (locatie in inzet, figuur gemaakt voor het Rijkswaterstaat KPP Morfologie Waddenzee programma).

4. Sedimentatie voor de Afsluitdijk ten noordoosten van Den Oever

In het gebied ten noordoosten van de spuien bij Den Oever vindt na de afsluiting van de Zuiderzee snelle sedimentatie plaats waardoor de diepere delen worden opgevuld. De hogere delen worden afgevlakt, zodat de oorspronkelijk zeer reliëfrijke bodem waar de geul de Vlieter en de Jaap-Vaars (JaVa) ruggen lagen, veel vlakker is geworden. Dit is heel duidelijk als de dwarsdoorsnede uit 1933 in wordt vergeleken met meer recente dwarsdoorsneden. Tegenwoordig vindt nog steeds sedimentatie plaats in dit hele gebied, maar deze gaat langzamer dan in de periode direct na de afsluiting. Het gebied heeft niet de kenmerken van een getijdegeul, met duidelijke geulwanden, maar ligt wel in het verlengde van de uitstroomeul die bij het spuilsuizencomplex van Den Oever parallel langs de Afsluitdijk naar het noordoosten is gericht.



Figuur 3-17 Dwarsdoorsnede parallel aan de Afsluitdijk door het Visjagersgaatje en de Vlieter (zie inzet voor locatie, figuur afkomstig uit Oost et al., 2019).

Optelsom van de veranderingen

In deze paragraaf zijn vier ontwikkelingen beschreven, die zich als volgt laten samenvatten:

1. Het Visjagersgaatje wordt steeds smaller en dieper en het doorstroomoppervlakte neemt geleidelijk af;
2. De Boerenplaat groeit: er ontstaat steeds meer intergetijdeplaat ten noorden van de spuilsuizen bij Den Oever;
3. De omvang van de Wierbalg neemt af;
4. Snelle opvulling en vereffening van het reliëf gevolgd door geleidelijke sedimentatie in het gebied van de voormalige Vlieter en de JaVa-ruggen.

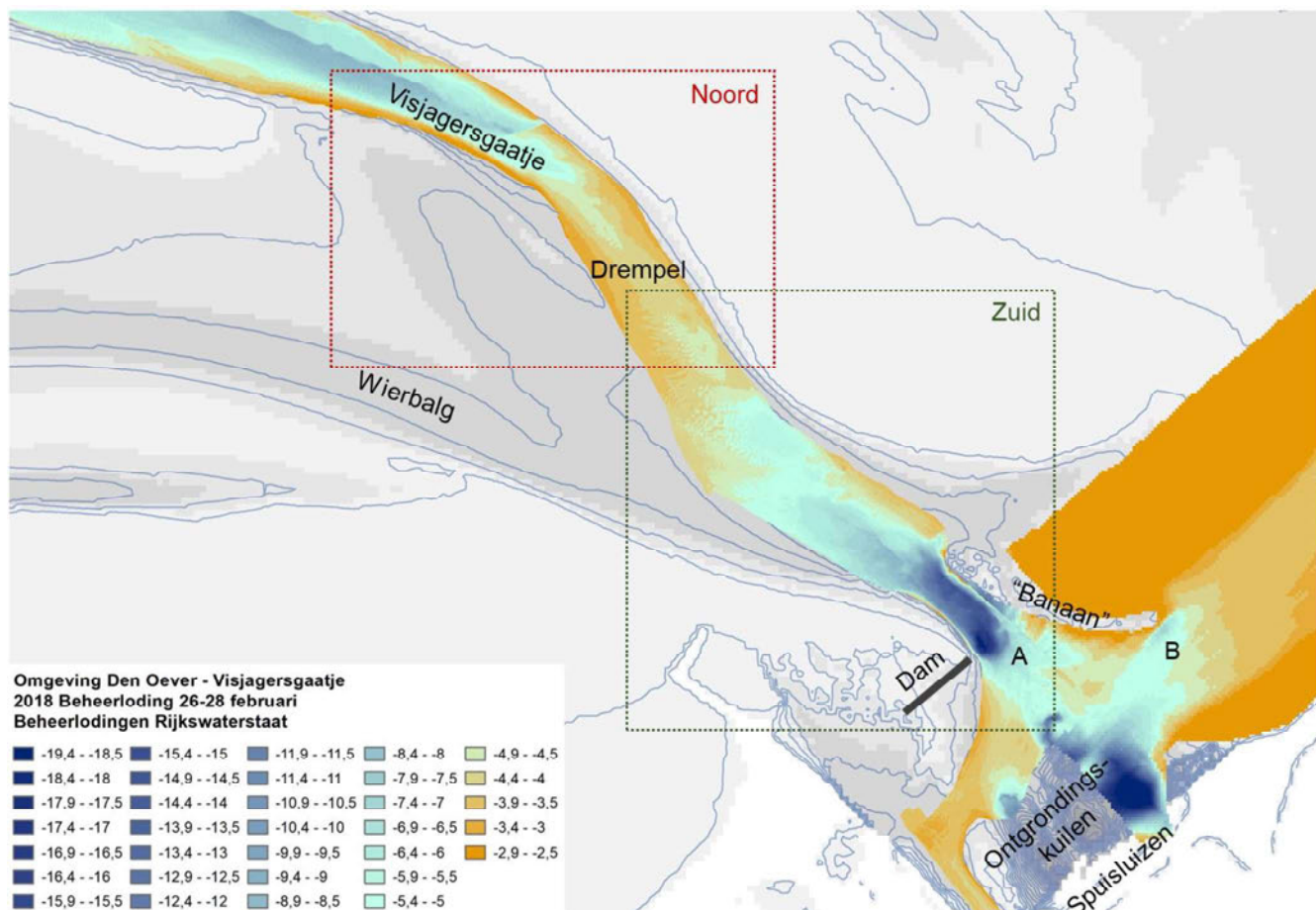
De combinatie van de ontwikkelingen 1, 2 en 3 betekent dat het Visjagersgaatje gaandeweg de rol van de Wierbalg heeft overgenomen. Ook vindt de stroming steeds meer in de geulen plaatsvindt, omdat het sublitorale areaal verandert in droogvallende wadplaten. Ondanks het toenemende belang van het Visjagersgaatje, neemt de omvang er van af. Voor de stroming door het visjagersgaatje betekent deze afname van de omvang dat de relatieve bijdrage van het spuien aan de stroming door het Visjagersgaatje is toegenomen.

De ontwikkeling bij 4 betekent dat het doorstroomprofiel van het sublitoraal langs de Afsluitdijk geleidelijk afneemt. Ook voor dit gebied geldt dat het relatieve belang van het spuien aan de stroming hier toeneemt.

3.4.3 Variatie in de bodemligging van het Visjagersgaatje

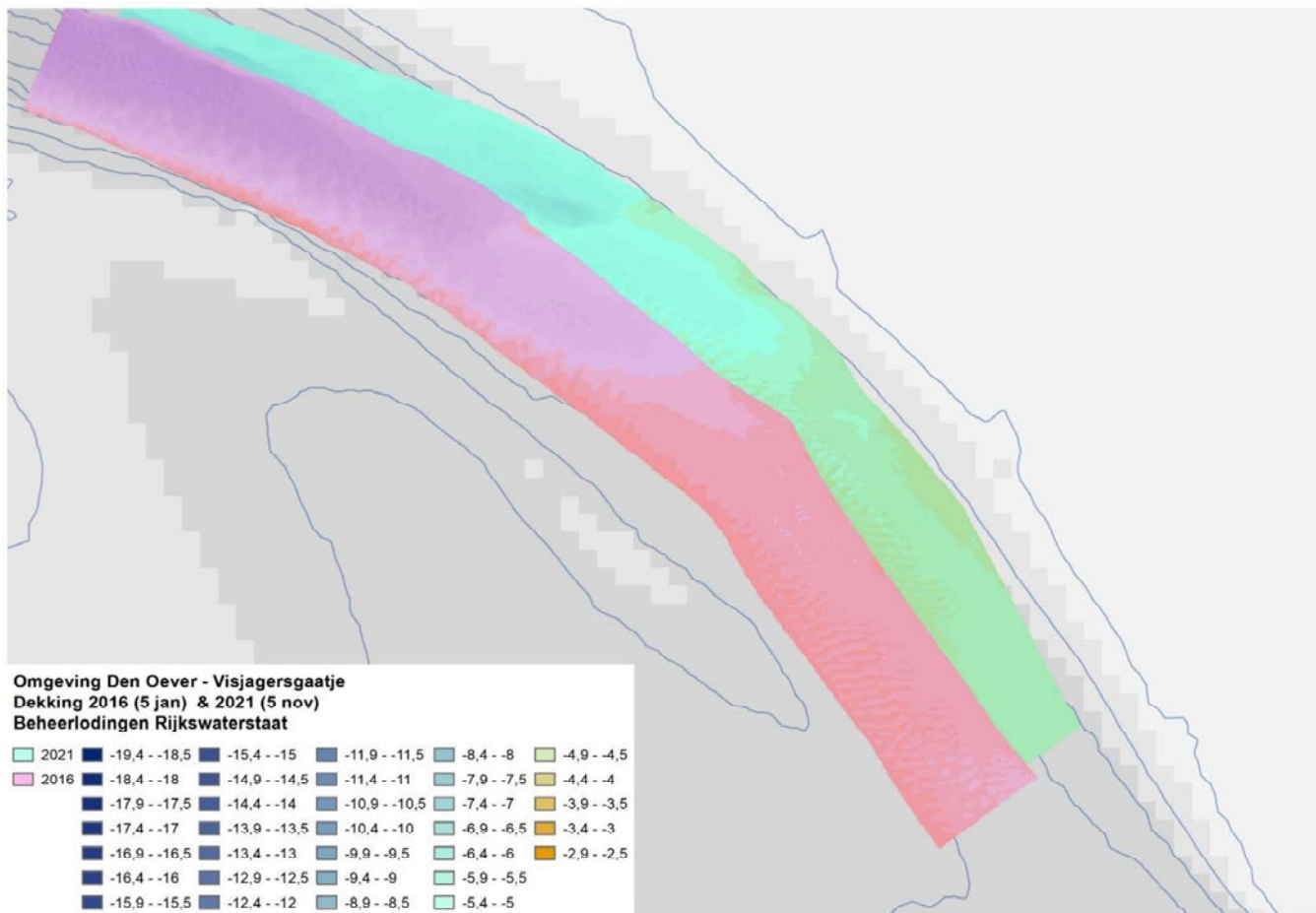
De voorgaande paragraaf geeft inzicht in de lange termijn ontwikkelingen die plaatsvinden in de nabijheid van het sluisencomplex bij Den Oever, waaronder het Visjagersgaatje. De omvang van het Visjagersgaatje is in tientallen jaren in omvang afgenomen. Naast deze lange termijn ontwikkelingen is ook sprake van variatie in de bodemligging van het

Visjagersgaatje in perioden van jaren en zelfs binnen jaren. De sedimentatie die op de drempel van het Visjagersgaatje plaatsvindt is aanleiding voor het frequent uitvoeren van baggerwerkzaamheden, om de geul op voldoende diepte te houden. Rijkswaterstaat voert meerdere keren per jaar beheerlodingen uit van het Visjagersgaatje, die het mogelijk maken om de dynamiek binnen en tussen jaren te beschouwen. Figuur 3-18 laat een voorbeeld zien van de bodemdiepte, zoals wordt gemeten tijdens de beheerlodingen. Duidelijk zichtbaar zijn de variaties die optreden in de diepte van het Visjagersgaatje. Vlak bij de spuisluizen, nog voor dat de geul splitst in de Wierbalg en het Visjagersgaatje, is sprake van een diep ingesneden geul met een ontgrondingskuil, tussen de dam die vanaf de haven loopt en de "banaan". Het diepste punt is hier ruim 19 m. Daarna splits de geul in de Wierbalg en het Visjagersgaatje. De diepte van het Visjagersgaatje neemt dan snel af, zodat in het drempelgebied de diepte tussen de NAP -4 en -3,5 m ligt. Daarna verdiept de geul weer.



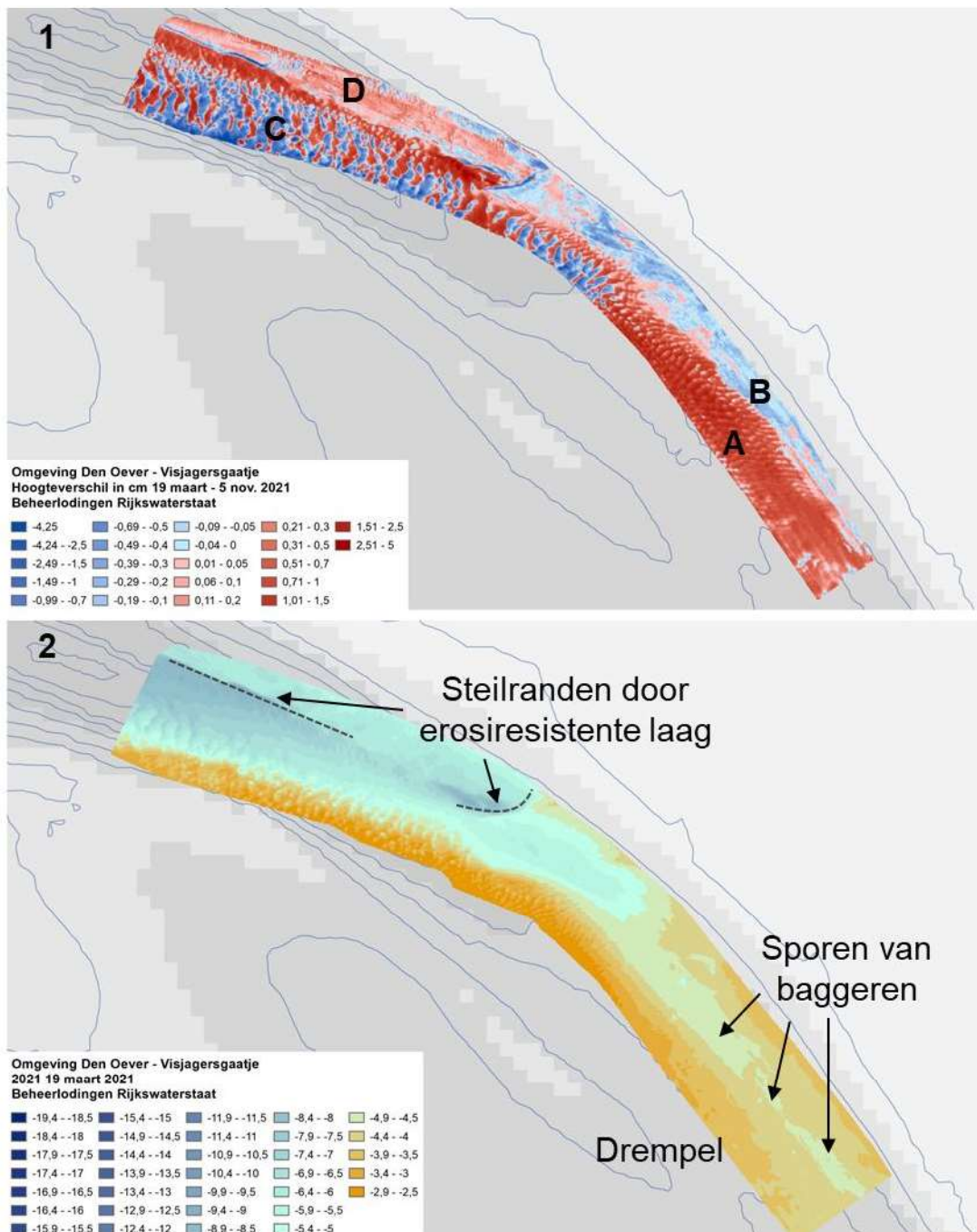
Figuur 3-18 Kaart van het Visjagersgaatje op basis van de beheerlodingen (situatie feb 2018) met de gebruikte namen. Achtergrond en contouren op basis van de vakloding 2015. De kaders met 'Noord' en 'Zuid' geven deelgebieden aan.

Het beschreven diepteverloop is in alle beschikbare beheerlodingen (vanaf begin 2016 tot met november 2021) zichtbaar en heel vergelijkbaar. Het weergeven van alle dieptekaarten op basis van de beheerloding levert daardoor weinig inzicht in de variatie in de bodemligging. De verschillen worden daarom op een andere wijze inzichtelijk gemaakt. Figuur 3-19 is een kaart met de ruimtelijke dekking van de eerste en laatste beheerloding van het noordelijke deelgebied uit de beheerlodingen. Hieruit wordt duidelijk dat het noordelijke deel van het Visjagersgaatje met ongeveer 100 m naar het noordoosten opgeschoven. Vanwege deze verschuiving is het niet zo zinvol om een kaart met de hoogteverschillen tussen deze beheerlodingen te tonen, omdat hierin alleen de gevolgen van het opschuiven (verdieping aan de noordoostzijde, verondieping aan de zuidwestzijde) zichtbaar zijn. Het is wel mogelijk om kaarten met de verschillen binnen periode van een jaar te beschouwen, omdat daarin de gevolgen van de verschuiving beperkt zijn.



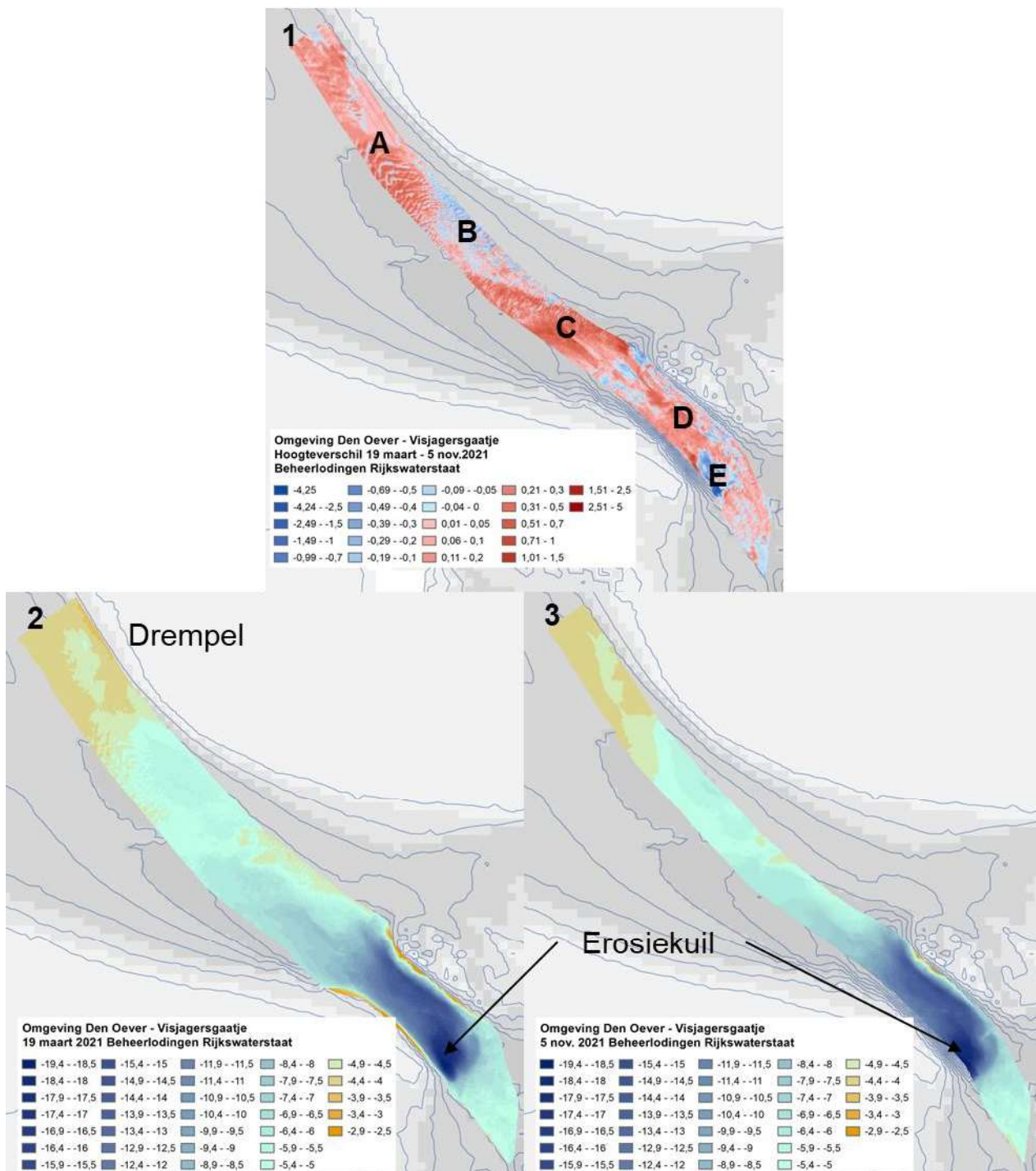
Figuur 3-19 Kaart van het noordelijke deel van het Visjagersgaatje (aangegeven met het rode kader in Figuur 3-18) met de ruimtelijke dekking van de eerste (jan 2016) en de laatste (nov 2021) beheerloding.

De kaart met het hoogteverschil in een periode van ruim 7 maanden (periode van 19 maart tot 5 november 2021) in Figuur 3-20 laat een uitgebreid sedimentatiegebied zien ter plaatse van de drempel (A Figuur 3-20). Het hoogteverschil bedraagt hier op sommige plekken iets meer dan 1 meter. Dat betekent dat de sedimentatiesnelheid tenminste 1 meter in ruim 7 maanden is (want in de tussentijd kan nog bodemverlaging door erosie of baggeren zijn opgetreden). Aan de noordoostzijde van de drempel (bij B in Figuur 3-20) heeft enige verlaging van de bodem plaatsgevonden, waarvan niet is vast te stellen of dit onderdeel van het autonomen opschuiven van de geul of van baggeren. Bij gebied C is een patroon zichtbaar, dat ontstaat doordat grote bodemvormen (megaribbels) aanwezig zijn, die in de loop van de tijd verplaatsen en vervormen en waarvan de hoogte van de toppen en de dalen verandert. Het gebied dat is aangegeven bij is een klein beetje ondieper geworden. Dit hogere deel van de geul ligt bovenop een erosieresistente laag, die in de bodem een steilranden geeft op de overgang van het ondiepe gebied waar de laag nog wel aanwezig is en het diepe gebied waar de laag niet meer aanwezig is.



Figuur 3-20 Kaart met het hoogteverschil (bovenste, 1) tussen de hoogte op 19 maart 2021 (onderste, 2) en op 5 november 2021 van het noordelijke deel van het Visjagersgaatje (aangegeven met het rode kader in Figuur 3-18).

Figuur 3-21 laat in kaartje 1 het hoogteverschil zien tussen de bodem in maart 2021 (in kaartje 2) en in november 2021 (in kaartje 3). Ook in dit gebied treden veranderingen op in de bodemhoogte, waarbij de meeste gebieden sedimentatie laten zien in deze periode. Gebied A is de aanloop van de drempel, waar sedimentatie heeft plaatsgevonden met maximale waarden van bijna 60 cm. De variatie in de bodemhoogteverandering in dit gebied hangt samen met de veranderingen in de vorm, ligging en hoogte van megaribbels. In gebied B vindt enige verlaging van de bodem plaats, door erosie. De erosie in gebied C heeft een grotere maximale waarde, die 90 cm bereikt. Ook hier wijzen de patronen op veranderingen van de megaribbels. De sedimentatie bij D treedt op in het diepere deel van de geul, vlak naast het gebied waar de erosie plaatsvindt in ontgrondingskuil.



Figuur 3-21 Kaart met het hoogteverschil (bovenste, 1) tussen de hoogte op 19 maart 2021 (onderste, 2) en op 5 november 2021 van het zuidelijke deel van het Visjagersgaatje (aangegeven met het groene kader in Figuur 3-18).

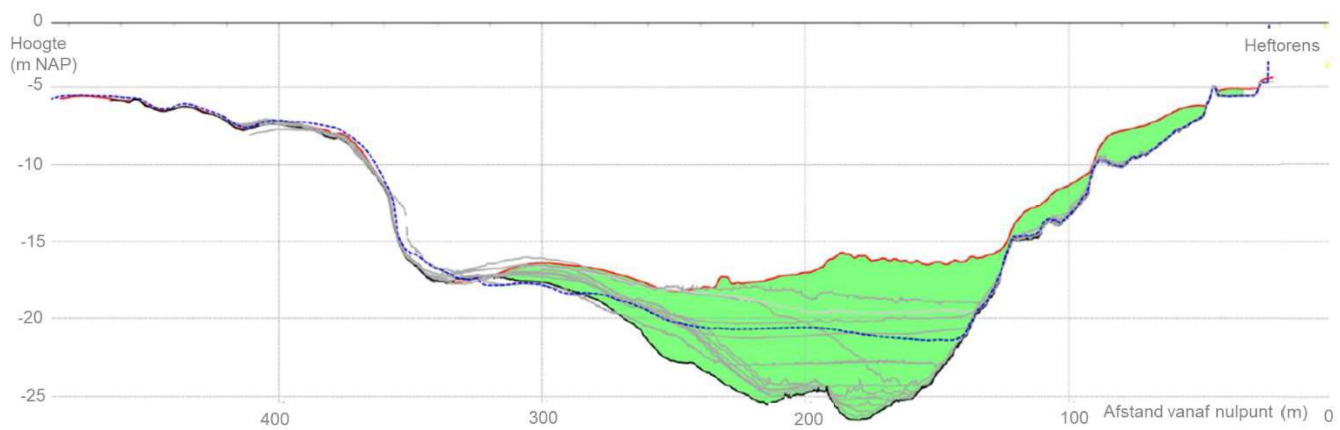
In de dieptekaarten op basis van de beheerlodingen en in de verschilkaarten op basis daarvan, zijn in grote delen van het Visjagersgaatje bodemvormen zichtbaar. Deze bodemvormen zijn megaribbels, met een golflengte van meters tot een tiental meters en een hoogte van dal tot top van enkele decimeters tot bijna een meter. Zonder in detail in te gaan op de dynamiek van deze bodemvormen, is het wel zinvol om stil te staan bij de inzichten die deze megaribbels opleveren. De aanwezigheid van de megaribbels geeft namelijk aan dat de bodem van het Visjagersgaatje

voornamelijk uit zand (ruwweg grover dan 175 μm) bestaat. In fijner sediment worden geen megaribbels gevormd. De aanwezigheid wijst ook op het optreden van hoge stroomsnelheden, want bij lage stroomsnelheden worden geen megaribbels gevormd. Die stroomsnelheden treden niet incidenteel op, want dat zou niet voldoende zijn voor het ontstaan en het verplaatsen en vervormen van de megaribbels. En dat betekent dat de stroomcondities bij de bodem van het Visjagersgaatje worden bepaald door het getij en niet door de incidentele hoge spuidebieten.

3.4.4 'Ademen van de ontgrondingskuilen': Tijdelijke slibsedimentatie

Gedurende een deel van de tijd wordt er slechts beperkt of niet gespuid van het IJsselmeer naar de Waddenzee. In dat soort perioden zijn de stroomsnelheden ter plaatse van de ontgrondingskuilen bij de spuien zeer laag. En in dat soort perioden is ook geen sprake van turbulente stroming die tot aan de bodem reikt. De omvang en diepte van de ontgrondingskuilen wordt namelijk bepaald door de sterke turbulente stroming die optreedt bij grote spuidebieten. Het betekent dat de ontgrondingskuilen gedurende een deel van de tijd fungeren als bezinkbekkens, waar slib vanuit de waterkolom naar de bodem zakt en daar blijft liggen. Ieder getij wordt er met het water slib aangevoerd naar de ontgrondingskuilen, waarvan een deel op de bodem terechtkomt. Zolang niet veel wordt gespuid blijft het slib dat naar de bodem is gezakt daar liggen. Bij het afvoeren van beperkte volumes zoetwater kan de aanvoer van slib naar de ontgrondingskuilen nog worden vergroot, omdat er dan een estuariene circulatie optreedt waarbij de stroming aan de bodem, die rijker is aan slib, naar spuisluizen en daarmee naar de ontgrondingskuilen is gericht. Het betekent dat gedurende periode dat niet of weinig wordt gespuid een dikke sliblaag in de ontgrondingskuilen kan opbouwen. De omvang van die laag wordt bepaald door de duur van de betreffende periode en de snelheid waarmee het slib wordt aangevoerd. Het slib blijft in de ontgrondingskuilen liggen totdat de spuiokers bij de betreffende ontgrondingskuil worden gebruikt voor het afvoeren van grote volume zoetwater, zodat de turbulente stroming met hoge stroomsnelheden het slib kan eroderen. Dit proces van het opbouwen van dikke slibpakketten in de ontgrondingskuilen, gevolgd door momenten waarop het slib wordt naar de Waddenzee wordt 'geblazen', wordt het 'ademen van de ontgrondingskuilen' genoemd.

De omvang van het ademen is vastgesteld door het uitvoeren van meerdere metingen van de ligging van de bodem in de perioden van oktober 2018 tot september 2019. Figuur 3-22 geeft inzicht in de ligging van de bodem in de ontgrondingskuil van de meest noordoostelijke spuiokom. Het maximale diepteverschil bedraagt in deze dwarsdoorsnede meer dan 10 meter. Het maximale volume dat tijdelijk in de ontgrondingskuilen is gesedimenteerd bedraagt 333.000 m^3 . Dit gemeten volume geeft een indicatie van de omvang van het 'ademen'. Omdat andere gegevens over de omvang van het ademen niet bekend zijn, is het niet mogelijk om een gemiddelde of maximum omvang van het 'ademen' vast te stellen.



Figuur 3-22 Dwarsdoorsnede door de meest noordoostelijke spuiokom bij Den Oever, waarin met groen het verschil is aangegeven tussen de diepste en de ondiepste peiling in periode oktober 2018-september 2021. Elke grijze is een uitgevoerde peiling. Locatie van de dwarsdoorsneden in Figuur 3-9.

Het gevolg van het ademen is tweeledig. Tijdens de opbouw van de sliblaag in de ontgrondingskuilen nemen de slibconcentraties in het water van de Waddenzee iets af. Dit is hetzelfde effect dat optreedt door de slibsedimentatie in

havenbekkens (van Kessel, 2015). Dit effect van verlaagde concentraties treedt niet alleen op bij de ontgrondingskuilen zelf, het effect strekt tot kilometers vanaf de ontgrondingskuilen. Wanneer het slib vervolgens weer wordt weggespoeld, dan komt leidt dit in eerste instantie tot verhoogde slibconcentraties in de waterkolom en in tweede instantie tot sedimentatie op de bodem. Tijdens daaropvolgende getijdeperioden wordt een deel van het slib opnieuw opgewerveld van de bodem en verder in de Waddenzee getransporteerd. Ook dit effect sterkt zich uit tot kilometers rond de ontgrondingskuilen.

Vanwege de verdeling van de hoge en lage spuidebieten over de seizoenen, zal over het algemeen sprake zijn van seizoenseffecten door het ademen. Dat wil zeggen dat de periodes met sedimentatie van slib en daardoor lagere concentraties in de Waddenzee samenvallen met de voorjaars- en zomerperiode met (over het algemeen) lagere afvoeren, terwijl de momenten dat het slib wordt geërodeerd, waardoor hogere slibconcentraties in de waterkolom optreden samenvallen met najaars- en winterperiode met (over het algemeen) hoger afvoeren. Hierbij staat steeds 'over het algemeen', omdat perioden met lage afvoeren en hoge afvoeren en de overgangen daartussen niet zijn voorbehouden aan de seizoenen, als beschreven in paragraaf 3.2.2.

3.4.5 Samenvatting morfologische veranderingen in de Waddenzee nabij Den Oever

In paragraaf 3.4 zijn veranderingen in de morfologie beschouwd die op verschillende tijdschalen optreden. De veranderingen in de omgeving van de Den Oever direct na de aanleg van de spuisluizen en de Afsluitdijk (paragraaf 3.4.1) zijn de basis voor de huidige situatie en geven inzicht in de toekomstige veranderingen die worden verwacht bij de aanleg van de nieuwe spui groepen. In de andere paragrafen worden de fluctuaties en trends beschouwd, die basis vormen voor het beoordelen van morfologische veranderingen die optreden door de aanleg en het gebruik van de nieuwe spui groepen. Die morfologische veranderingen treden op in een gebied dat ook in de autonome situatie al heel veranderlijk is. Nabij Den Oever treden zowel fluctuaties op in de bodemligging, op de tijdschaal van springtij-doodtij cyclus (bodemdynamiek in het Visjagersgaatje – paragraaf 3.4.3) en op de tijdschaal van lage en hoge spui afvoeren (ademen van de ontgrondingskuilen – paragraaf 3.4.4) als trendmatige veranderingen waardoor de kenmerken van de hele omgeving in de Waddenzee rond Den Oever geleidelijk veranderen (paragraaf 3.4.2).

4 Overzicht van morfologische gevolgen van aanleg en gebruik nieuwe spuumiddelen

4.1 Inleiding

De morfologische gevolgen als gevolg van de aanleg en het gebruik van de nieuwe spuumiddelen treden op als gevolg van vier verschillende processen:

1. Vrijkomen sediment ontgrondingskuilen
2. Erosie in IJsselmeer
3. Ademen ontgrondingskuilen
4. Verbreding/verdieping geulen Waddenzee

De perioden waarbij deze vier processen optreden verschillen. De processen 1 en 2 zijn gekoppeld aan de periode van uitvoering van de werkzaamheden en de ingebruikname van de bestaande en nieuwe spuigroepen. Omdat deze processen gelijktijdig optreden en omdat 2 in potentie van invloed is op de omvang van 1 worden deze processen hieronder samen toegelicht. Voor het 'ademen' is minder ruimte tijdens de aanlegwerkzaamheden, maar er komt meer ruimte beschikbaar als de werkzaamheden zijn afgerond. De verbreding/verdieping van de geulen in de Wadden is gerelateerd aan een structurele toename van de afvoer vanuit het IJsselmeer en dit zal verder in de toekomst plaatsvinden.

4.2 Vrijkomen slib en zand: Sediment uit de ontgrondingskuilen en erosie in het IJsselmeer

4.2.1 Wat gebeurt er?

Sediment uit de ontgrondingskuilen

De ontgrondingskuilen worden grotendeels aangelegd, door het bodemmateriaal op te baggeren en in de daarnaast gelegen bestaande ontgrondingskuilen te verspreiden. Tijdens de aanlegperiode zijn de spuigroepen naast de aan te leggen ontgrondingskuil buiten gebruik. Dat betekent dat het in de bestaande ontgrondingskuilen geplaatste sediment niet meteen kan wegspoelen. Nadat de ontgrondingskuilen zijn gegraven wordt er een bestorting aangebracht, in de vorm van stortsteen. De meest zeewaarts gelegen delen van de ontgrondingskuilen worden niet ontgraven, maar zullen in de loop van de tijd ontstaan door natuurlijke erosieprocessen tijdens het spuien. Wanneer de erosie op deze plekken voldoende ver is gevorderd, zal ook hier een steenbestorting worden aangebracht.

Tijdens het baggeren en verspreiden komt een zeer beperkte hoeveelheid slib vrij in de waterkolom. De meer omvangrijke gevolgen voor de Waddenzee treden op wanneer het gestorte sediment uit de bestaande spuikomen wordt geërodeerd. Dit proces kan starten op het moment dat de bestaande spuigroepen opnieuw in gebruik worden genomen.

Erosie in het IJsselmeer

De erosie in het IJsselmeer treedt zodra ter plaatse de stroomsnelheid toeneemt ten opzichte van de huidige stroomsnelheden. De toename moet dermate groot zijn dat het zand op de bodem hierdoor wordt geërodeerd. De eerste toename van de stroomsnelheden waarbij erosie plaatsvindt, treedt op zodra een nieuwe spuigroep in gebruik wordt genomen. Direct voor de nieuwe spuigroepen in het IJsselmeer is een gebied waar in de huidige situatie vrijwel geen aanstroming plaatsvindt. In de situatie met de nieuwe spuisluis in gebruik treden op dezelfde locatie hoge stroomsnelheden op, waardoor het zand wordt geërodeerd en met de stroming door de spuikokers wordt meegevoerd naar de Waddenzee. Deze erosie en aanvoer van zand is alleen gekoppeld aan het gebruik van de nieuwe spuigroepen en niet aan de omvang van de afvoeren bij Den Oever. Dat is anders voor de aanvoer van zand uit de wijdere omgeving van de spuisluizen bij Den Oever in het IJsselmeer. De erosie van zand vindt hier plaats wanneer de

totale afvoer bij Den Oever groter wordt dan de huidige maximale afvoer. Daarvoor moeten de bestaande spuigroepen plus tenminste één nieuwe spuigroep worden gebruikt.

De combinatie van het vrijkomen van sediment (zand plus slib) uit de ontgrondingskuilen en de aanvoer van zand uit het IJsselmeer kan optreden wanneer een nieuwe spuigroep en een bestaande spuigroep in bedrijf worden gesteld na het afronden van de aanlegwerkzaamheden. De aanvoer kan groter worden wanneer op dat moment vier of vijf spuigroepen in gebruik zijn.

4.2.2 Wanneer gebeurt dit?

Sediment uit de ontgrondingskuilen

De aanleg betreft twee ontgrondingskuilen, van de nieuwe spuigroepen met de nummers 1.6 en 1.7. Deze worden na elkaar aangelegd. De eerste ontgrondingskuil wordt in de periode april-mei-juni aangelegd. De tweede ontgrondingskuil wordt daarna aangelegd, in de periode juli-augustus-september, of in het volgende jaar, in de periode april-mei-juni. De gevolgen voor de Waddenzee treden op bij het opnieuw in gebruik nemen van de bestaande spuigroepen. Voor het optreden van gevolgen dient ook daadwerkelijk te worden gespuid via de bestaande spuigroepen bij de ontgrondingskuilen waarin het sediment is verspreid.

Erosie in het IJsselmeer

De erosie in het IJsselmeer treedt op in stappen, waarbij de eerste stap is gekoppeld aan de ingebruikname van de nieuwe spuigroepen en de tweede stap aan het benutten van de extra afvoercapaciteit bij Den Oever.

De combinatie van het vrijkomen van sediment (zand plus slib) uit de ontgrondingskuilen en de aanvoer van zand uit het IJsselmeer kan optreden wanneer een nieuwe spuigroep en een bestaande spuigroep in bedrijf worden gesteld na het afronden van de aanlegwerkzaamheden. De aanvoer kan groter worden wanneer op dat moment vier of vijf spuigroepen in gebruik zijn. Hierbij staat steeds 'kan', omdat de erosie alleen optreedt wanneer de stroming door de spuigroepen voldoende groot is. Er moet sprake zijn van een grote afvoer vanuit het IJsselmeer naar de Waddenzee via de spuigroepen bij Den Oever

Zoals hierboven is vermeld kan de combinatie van het vrijkomen van sediment (zand plus slib) uit de ontgrondingskuilen en de aanvoer van zand uit het IJsselmeer optreden wanneer een nieuwe spuigroep en een bestaande spuigroep in bedrijf worden gesteld na het afronden van de aanlegwerkzaamheden. De grootste aanvoer kan plaatsvinden wanneer vijf spuigroepen beschikbaar zijn. Hierbij staat steeds 'kan', omdat de erosie alleen optreedt wanneer de stroming door de spuigroepen voldoende groot is. De stroming is voldoende groot voor het optreden van erosie in het IJsselmeer en in de ontgrondingskuilen tijdens een situatie waarbij een grote afvoer vanuit het IJsselmeer naar de Waddenzee via de spuigroepen bij Den Oever noodzakelijk is voor het handhaven van het peil op het IJsselmeer.

4.2.3 Wat is de relatie met de andere morfologische gevolgen

Het baggeren en verspreiden van het sediment in de bestaande ontgrondingskuilen heeft een relatie met het 'ademen van de ontgrondingskuilen' van de bestaande ontgrondingskuilen. Het volume aan sediment dat in de ontgrondingskuil wordt verspreid kan niet worden ingenomen door slib dat in de ontgrondingskuilen bezinkt. Mogelijk zal hierdoor de omvang van het ademen van de bestaande ontgrondingskuilen minder omvangrijk zijn.

De erosie vanuit de ontgrondingskuilen en de aanvoer van zand vanuit het IJsselmeer kunnen in theorie samen optreden met het ademen van de nieuwe ontgrondingskuilen. Indien na het gereedkomen van de nieuwe spuigroep met de bijbehorende ontgrondingskuilen enige tijd niet wordt of slecht beperkt wordt gespuid, dan kan in de nieuwe ontgrondingskuilen slib sedimenteren. Op het moment dat veel water moet worden afgevoerd, zal zowel sediment vrijkomen dat is gestort in de bestaande ontgrondingskuilen, als zand vanuit het IJsselmeer worden aangevoerd en slib vrijkomen door het ademen vanuit de ontgrondingskuilen.

Verandering in de morfologie van de Waddenzee, in de vorm van het verbreden of verdiepen van de geulen doordat de afvoerdebieten structureel toenemen, treden in de verdere toekomst op. Dit treedt niet gelijktijdig op met vrijkomen van sediment uit de ontgrondingskuilen en de aanvoer van zand vanuit het IJsselmeer.

4.3 Ademen nieuwe ontgrondingskuilen

4.3.1 Wat gebeurt er?

In paragraaf 3.4.4 is het ademen van de bestaande ontgrondingskuilen beschreven. Tijdens periode waarin weinig wordt gespuid bouwt in de ontgrondingskuilen een laag slib op, die tijdens een periode met hoge afvoer uit de ontgrondingskuilen wordt 'geblazen'. Ook in de nieuwe ontgrondingskuilen zal dit 'ademen' gaan optreden, omdat ook deze ontgrondingskuilen bezinkputten vormen in perioden dat weinig of geen water wordt afgevoerd vanuit het IJsselmeer naar de Waddenzee.

4.3.2 Wanneer gebeurt dit?

De nieuwe ontgrondingskuilen gaan meedoen met het 'ademen' zodra de werkzaamheden voor de aanleg (in de vorm van het baggeren en het aanbrengen van bodembescherming) zijn afgerond.

4.3.3 Wat is de relatie met de andere morfologische gevolgen

Het ademen van de nieuwe ontgrondingskuilen kan in theorie samen optreden met de erosie vanuit de ontgrondingskuilen en de aanvoer van zand vanuit het IJsselmeer. Indien na het gereedkomen van de nieuwe spuigroep met de bijbehorende ontgrondingskuilen enige tijd niet wordt of slecht beperkt wordt gespuid, dan kan in de nieuwe ontgrondingskuilen slib sedimenteren. Op het moment dat veel water moet worden afgevoerd, zal zowel sediment vrijkomen dat is gestort in de bestaande ontgrondingskuilen, als zand vanuit het IJsselmeer worden aangevoerd en slib vrijkomen door het ademen vanuit de ontgrondingskuilen.

4.4 Verbreding/verdieping geulen Waddenzee

4.4.1 Wat gebeurt er?

De omvang van de getijdegeulen in de Waddenzee is gekoppeld aan de hoeveelheid water die er tijdens de vloed door naar binnen stroomt en bij eb weer naar buiten stroomt⁴. Bij de geulen in de buurt van het spuicomplex van Den Oever wordt het volume dat door de geulen stroomt niet alleen bepaald door het getij, maar ook door het debiet dat vanuit het IJsselmeer wordt afgevoerd. Wanneer dit extra watervolume dat door de geulen wordt afgevoerd een substantiële omvang heeft ten opzichte van het getijvolume, dan zal de omvang van de geul toenemen. Het zand dat daarbij vrijkomt wordt dan elders in het gebied afgezet, onder andere op de aangrenzende wadplaten.

⁴ Dit volume wordt het getijvolume of getijprisma genoemd.

4.4.2 Wanneer gebeurt dit?

De toename van de omvang van de geulen in de Waddenzee nabij Den Oever vindt plaats wanneer de afvoer vanuit het IJsselmeer naar de Waddenzee duidelijk toeneemt ten opzichte van de huidige situatie. Wanneer dit optreedt is afhankelijk van veranderingen in het klimaat. Dit betreft een periode van minimaal een tiental jaren (Witteveen+Bos, 2015).

4.4.3 Wat is de relatie met de andere morfologische gevolgen

Omdat deze morfologische veranderingen beduidend later in de tijd optreedt dan de andere morfologische gevolgen, is er geen sprake van een relatie met de andere gevolgen.

4.5 Aanpak bepalen morfologische gevolgen

De morfologische gevolgen die optreden als gevolg van de aanleg en het gebruik van de nieuwe spuumiddelen worden op verschillende wijze bepaald. In Tabel 4-1 is opgenomen op welke wijze de gevolgen worden bepaald en waar dit in het rapport staat.

Tabel 4-1 Aanpak voor het bepalen van de morfologische gevolgen.

Gevolg	Aanpak	Waar in het rapport
Vrijkomen van sediment uit de ontgrondingskuilen en het vrijkomen van zand uit het IJsselmeer	Simulatie met computermodellen	Aanpak in hoofdstuk 5 Resultaten in hoofdstuk 6
Ademen van de ontgrondingskuilen	Beredenering en berekening op basis huidige situatie	Hoofdstuk 7
Verbreiding/verdieping geulen Waddenzee	Beredenering op basis huidige situatie en trends in ontwikkeling	Hoofdstuk 8

5 Vrijkomen slib en zand - aanpak

5.1 Inleiding

In paragraaf 4.2 is de beschreven op wek zand en slib vrijkomt in de Waddenzee vanuit de ontgrondingskuilen en het IJsselmeer. Om de verspreiding van het slib en zand uit de ontgrondingskuilen en door de erosie in het IJsselmeer in de ruimte en tijd in kaart te brengen, is gebruik gemaakt van numerieke modellering met het softwarepakket Delft3D4. Het betreft het gebruik van meerdere gekoppelde rekendomeinen voor verschillende toepassing welke bepalend zijn voor het detailniveau in ruimte en tijd, als ook specifieke instelling voor erosie-sedimentatie en sedimenttransport. Hieronder is een kort overzicht gegeven van de verschillende modeldomeinen. In sectie 5.2 is de modelopzet in meer detail toegelicht.

Domein 1: Het Kuststrookmodel van de gehele Nederlandse kuststrook. Dit model berekent de hydrodynamica en voorziet de hierbinnen gelegen modeldomeinen van hydrodynamische forcering op de randen.

Domein 2: Het Westelijke Waddenzeemodel. Dit domein simuleert de waterbeweging in de westelijke Waddenzee in drie dimensies en bevat een morfologische module die het transport van zand en slib berekent. Vanwege de afmeting van het domein is dit model met name geschikt voor far-field effecten en daarmee het in kaart brengen van het gedrag van vooral de (fijne) slib fractie. Dit model is binnen Levvel reeds gebruikt voor de simulatie van de far-field effecten van de baggerwerkzaamheden voor de aanleg van de werkgeul (Arcadis, 2020).

Domein 3: Het model Den Oever (buitenzijde). Dit relatief kleine domein omvat enkel de spuikom aan de buitenzijde bij Den Oever, het Visjagersgaatje richting het noorden en de Boereplaat richting het oosten. Het model is opgezet in 3D en vanwege het relatief kleine domein is het mogelijk het gebied in hoog detail te simuleren. Dit maakt het model met name geschikt voor mid- tot far-field effecten en daarmee het in kaart brengen van het gedrag van vooral de (fijne) zand fractie.

Domein 4: Het model Den Oever (binnenzijde). Dit relatief kleine domein omvat enkel het aanstroomgebied richting Den Oever aan de binnenzijde, gelegen in het noordwestelijke deel van het IJsselmeer. Het model is opgezet in 3D en vanwege het relatief kleine domein is het mogelijk het gebied in hoog detail te simuleren. Dit domein is specifiek opgezet om de erosie aan de binnenzijde in de ruimte en tijd ten gevolge van de ingebruikname van de Nieuwe Spuimiddelen in kaart te brengen.

5.2 Delft3D model opzet

Voor het modelleren van de hydrodynamica en de slibverspreiding in het studiegebied is gebruik gemaakt van het modelleerprogramma Delft3D4. Hiermee is het mogelijk deze processen in 3D te simuleren. Bij deze studie is het modelleren in 3D van belang om de effecten van de snelheidsverdeling in de verticaal en de gelaagdheid van de saliniteit mee te kunnen nemen. Ook is het bij een dergelijk aanpak mogelijk onderscheid te maken in de vertroebeling in de verticaal.

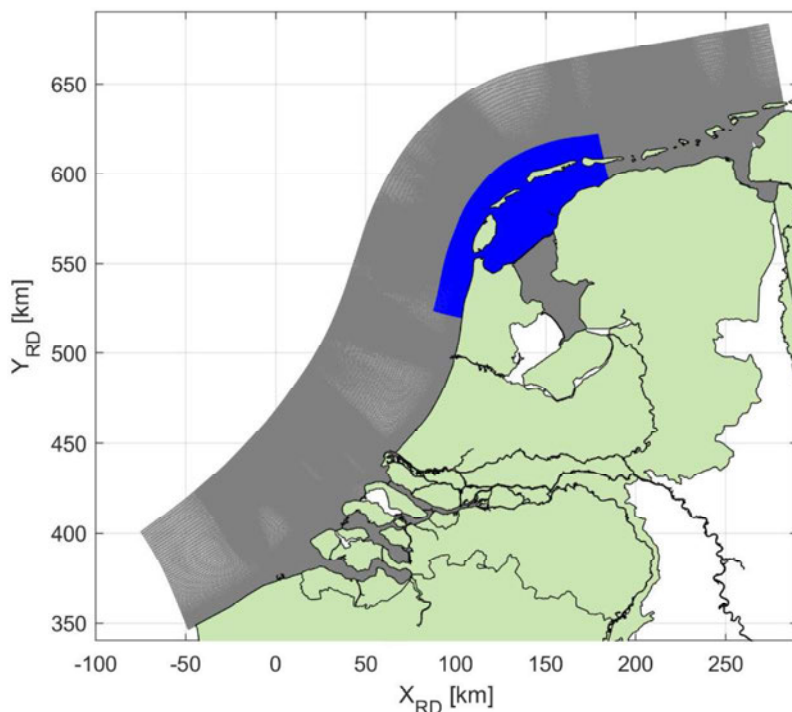
Voor de modelopzet is gebruik gemaakt van het Kuststrookmodel. Het Kuststrook model omvat de hele Nederlandse kuststrook en Waddenzeegebied en heeft een vrij fijne resolutie richting de Nederlandse kust. Omdat het interessegebied bij de Afsluitdijk ligt in de Waddenzee, is het model domein verkleint. Het model dat hiermee ontstaan is wordt voorts omschreven als het Westelijke Waddenzeemodel. Vervolgens zijn de randvoorwaarden voor het Westelijke Waddenzeemodel gegenereerd met behulp van het grotere Kuststrookmodel. Ter aanvulling zijn voor zowel de directe binnen- als de buitenzijde bij Den Oever lokale modellen opzet met een relatief hoog detail opgezet om de relevante processen daar voldoende nauwkeurig te kunnen simuleren.

In deze paragraaf is in meer detail beschreven hoe deze modellen zijn opgezet en hoe vervolgens de brontermen ten gevolge van de ontgroning zijn geschematiseerd in het Westelijke Waddenzeemodel en de detaildomeinen. Tot slot is een overzicht opgenomen van de sedimenteigenschappen zoals gebruikt in de simulaties.

5.2.1 Randvoorwaarden

Het Westelijke Waddenzeemodel wordt aangedreven met Riemann-randen in het noorden, zuiden en parallel aan de kust, welke bestaan uit een gecombineerde stromings- en waterstandscomponent. Bij de landwaartse zijde van het modeldomein zijn de relevante rivierafvoeren opgelegd. Ook de debieten bij de spuigemalen te Den Oever en Kornwerderzand zijn opgenomen in het model. Deze zijn geschematiseerd op basis van een langjarige hindcast van de afvoer bij Den Oever en Kornwerderzand. Er is gekozen voor een representatieve afvoer.

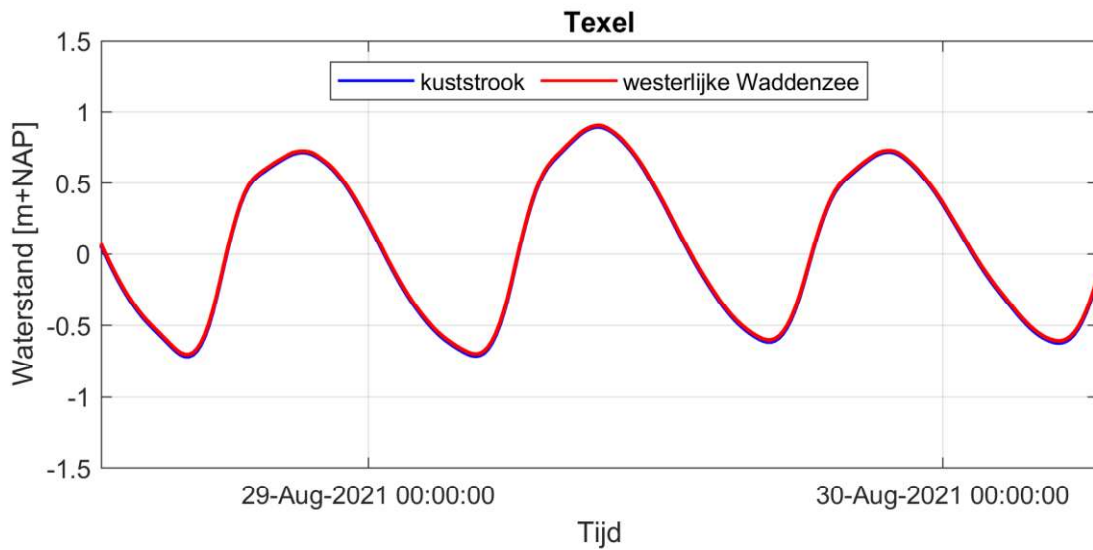
De Riemann-randen zijn bepaald door het Westelijke Waddenzeemodel te nesten in het Kuststrookmodel. Dit model omvat de Nederlandse Noordzee kust, begrensd tot net ten zuiden van de Nederlandse grens bij de Belgische kust en ten noordoosten van de Nederlandse grens in het Duitse deel van de Waddenzee (zie *Figuur 5-1*). Het model heeft een relatief grove resolutie en wordt doorgerekend in 2D. Het omvat het Westelijke Waddenzeemodel welke uitstrekt in een deel van de Waddenzee en een aansluitend deel van de Noordzee (*Figuur 5-1*). In tegenstelling tot het Kuststrookmodel, heeft dit model meerdere lagen in de verticaal.



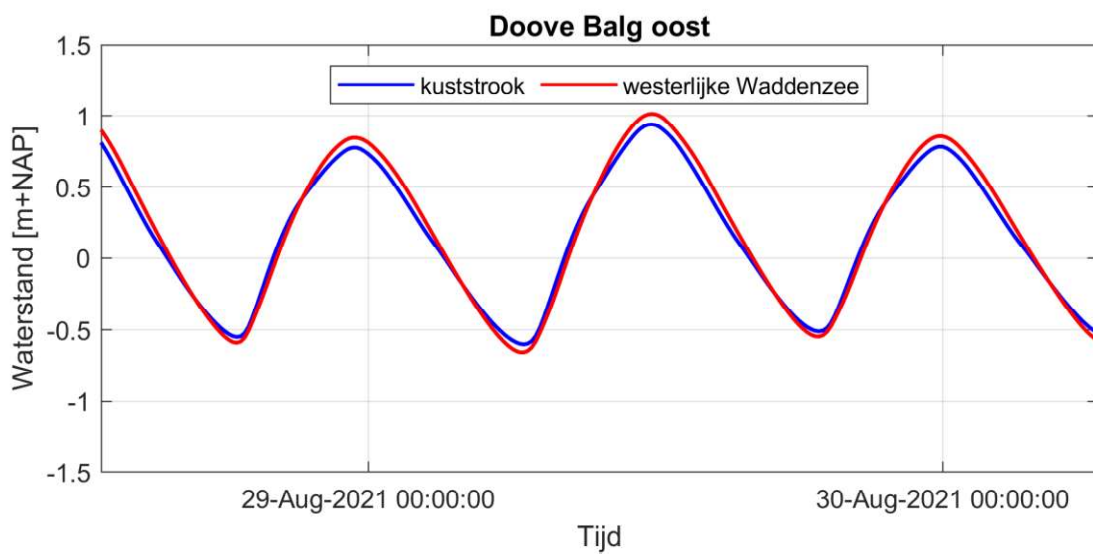
Figuur 5-1 Rekenrooster van het Kuststrookmodel (in grijs) en het Westelijke Waddenzeemodel (in blauw).

In *Figuur 5-2* is het waterstandssignaal getoond zoals gesimuleerd bij Texel, een locatie nabij de doorstroom tussen de Noordzee en de Waddenzee en centraal in het Westelijke Waddenzeemodel. De blauwe grafiek is het waterstandssignaal zoals gemodelleerd door het Kuststrookmodel, rood het Westelijke Waddenzeemodel. Zowel de fase van het getij en de waterstanden komen zeer goed overeen. *Figuur 5-3* laat het waterstandssignaal zien zoals gesimuleerd in de Doove Balg oost, ter hoogte van het studiegebied. Hoewel nog altijd zeer vergelijkbaar, is hier een verschil waarneembaar. Dit is het gevolg van het gebruik van de meest recent beschikbare vaklodging van het gebied voor de schematisatie van de bodemhoogte voor het Westelijke Waddenzeemodel ten opzichte van de verouderde bathymetrie in het Kuststrookmodel.

De detaildomeinen aan de binnen- en buitenzijde van het spuimiddel bij Den Oever worden voorzien van randvoorwaarden aan de hand van het peilbeheer op het IJsselmeer en het gesimuleerde getij in het Westelijke Waddenzeemodel, respectievelijk. Voor beide domeinen is gebruik gemaakt van recentelijke vaklodgingen. De opbouw in de verticaal is voor beide modellen identiek aan de Westelijke Waddenzee. De specifieke afmetingen van de modeldomeinen is in meer detail toegelicht in de volgende paragraaf.



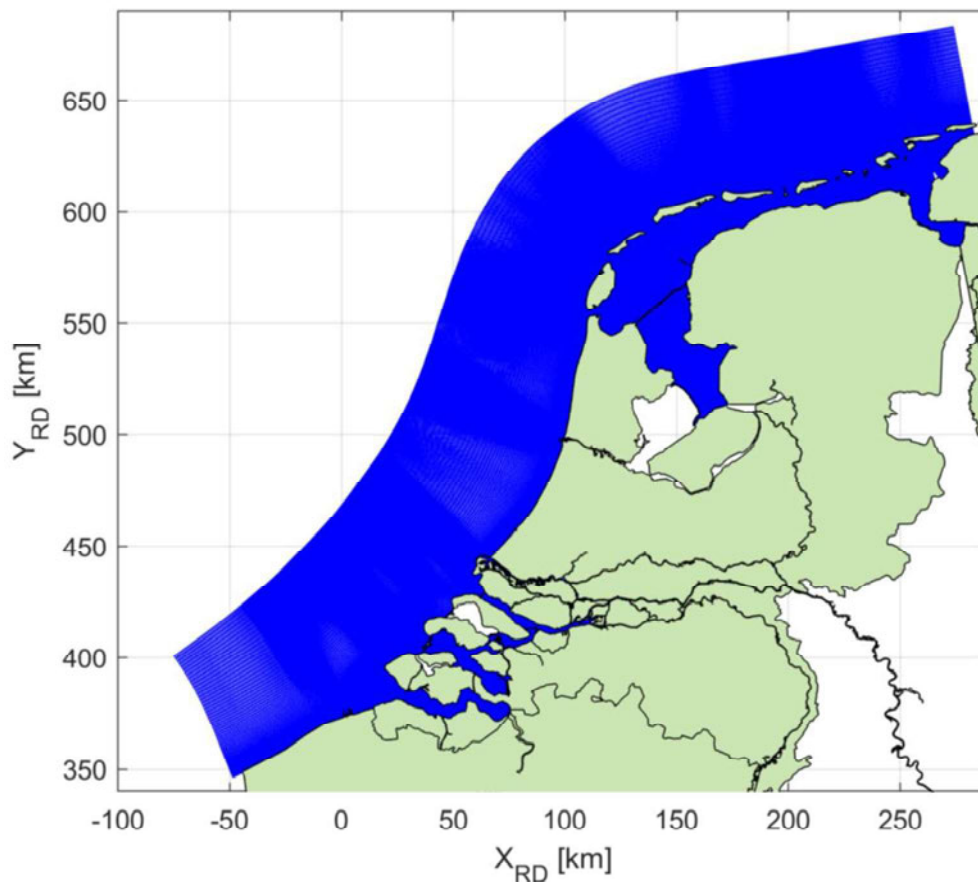
Figuur 5-2 Waterstandssignaal in de Noordzee bij Texel.



Figuur 5-3 Waterstandssignaal in de Waddenzee bij de Doove Balg oost.

5.2.2 Rekenroosters en modelbathymetrie

Het kuststrookmodel bestaat uit 942 x 402 cellen met een celgrootte van circa 200 x 400 m in de westelijke Waddenzee ter hoogte van de Afsluitdijk oplopend tot en 1500 x 600 m richting het offshore gebied. Het rooster is gepresenteerd in *Figuur 5-4*.

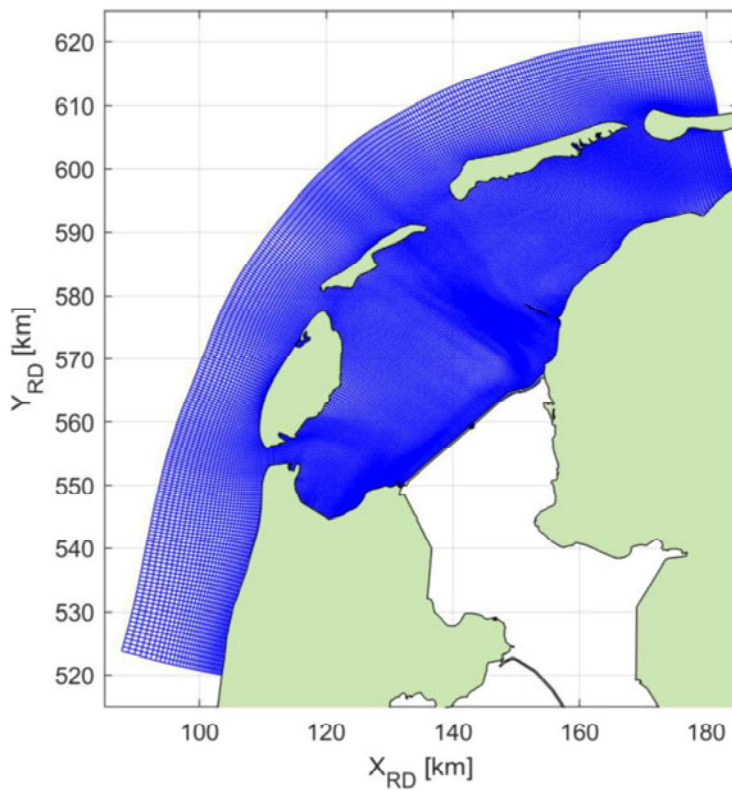


Figuur 5-4 Het rekenrooster van het kuststrookmodel.

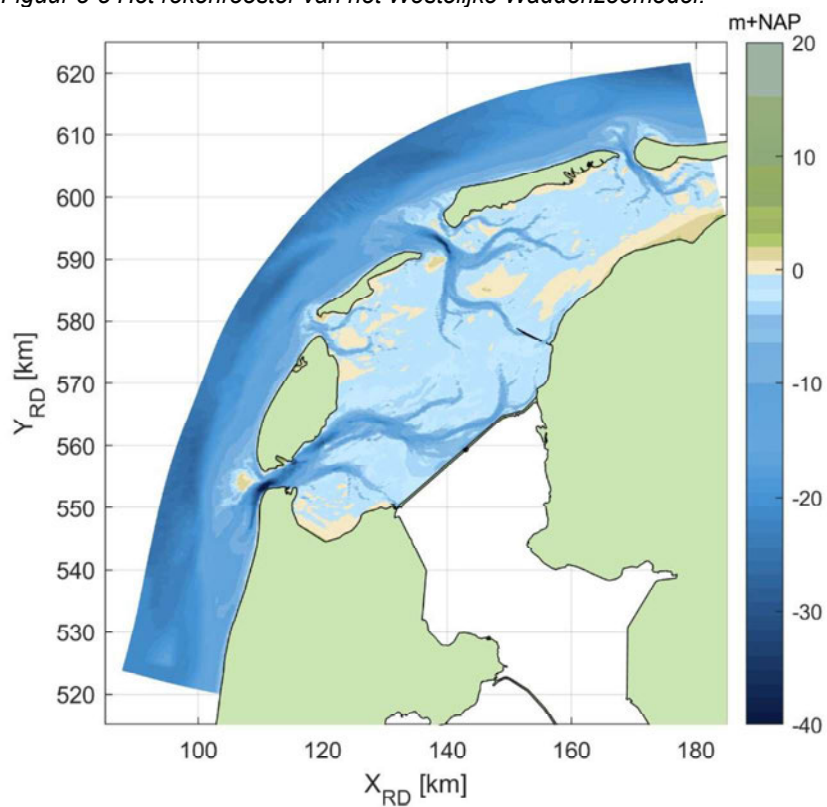
Het rooster van het westelijke Waddenzeemodel bestaat uit 308 x 124 cellen in het horizontale vlak en 9 sigma lagen in de verticaal. De cellen hebben een resolutie van 200 x 400 m in het Waddengebied, 300 x 600 m aan de kust, oplopend tot 800 x 600 m richting offshore. De laagdiktes in de verticaal zijn bepaald aan de hand van de waterdiepte en variëren van 21% van de diepte aan het oppervlak tot 5% van de diepte aan de bodem.

Een 3D model is verkozen boven een 2D model met een fijnere resolutie in het horizontale vlak. Zo is het mogelijk de effecten van het verticale snelheidsprofiel en de gelaagdheid van het zout mee te nemen in de modellering, maar ook kan de bronterm schematisatie welke de ontgraving en erosie representeert uitgevoerd worden in 3D. Tot slot kan bij de ecologische beschouwing eenvoudig onderscheid gemaakt worden tussen verschillen in vertroebeling over de verticaal (wateroppervlak, aan de bodem en diepte gemiddeld). Het grovere detail in het horizontale vlak doet geen afbreuk aan de mate van detail van de slibverspreiding in de far-field gebieden, noch aan een eventuele ecologische beschouwing. Er wordt voornamelijk gewerkt met daggemiddelde waarden van verhogingen in de slibconcentratie. Een tijdsinterval waarbij een roosterresolutie van enkele honderden meters toereikend is voor de weergave van de concentratie- en sedimentatie-arealen van het verspreide materiaal.

Figuur 5-5 en Figuur 5-6 tonen respectievelijk het rekenrooster en de modelbathymetrie van het studiegebied.



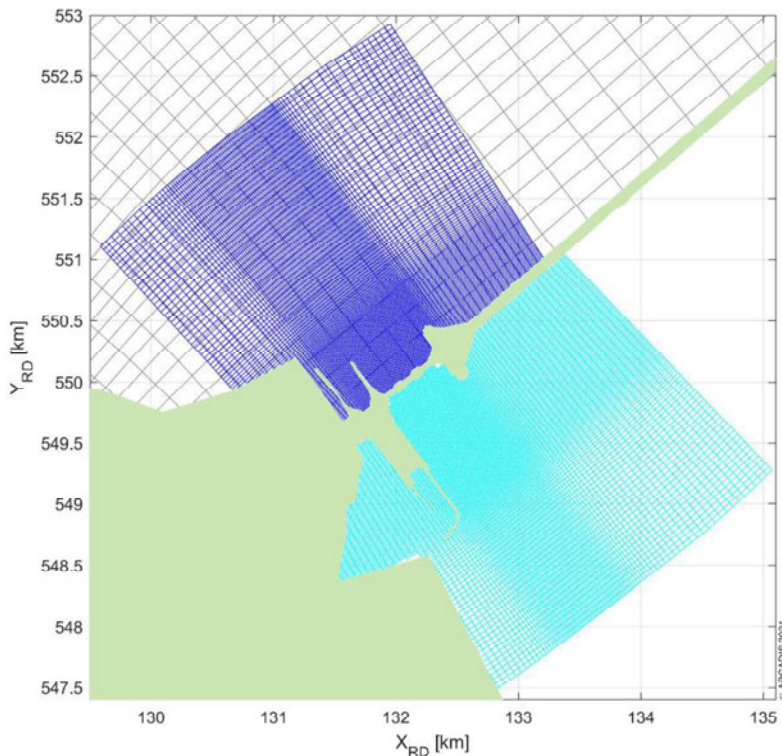
Figuur 5-5 Het rekenrooster van het Westelijke Waddenzeemodel.



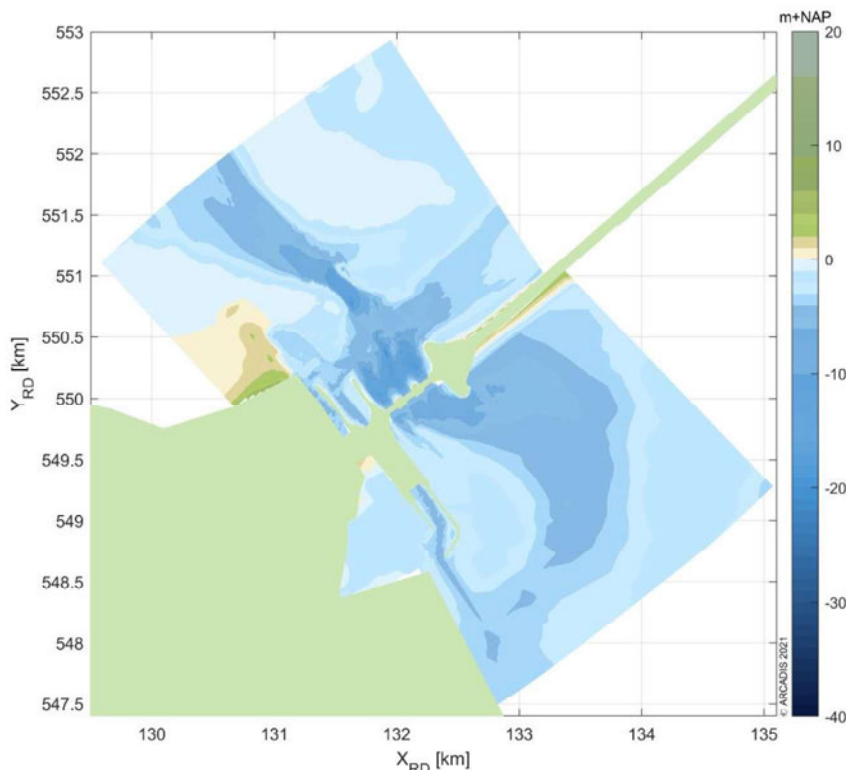
Figuur 5-6 Het bodemniveau t.o.v. NAP in de Westelijke Waddenzee.

De detaildomeinen aan de binnen- en buitenzijden van het spuimiddel bij Den Oever zijn opgebouwd uit rekencellen van 15x15 meter bij het spuimiddel tot maximaal 60x60 meter aan de open randen op 2,5 km afstand van het spuimiddel. Beide domeinen zijn in de verticaal hetzelfde opgebouwd als het Westelijke Waddenzeemodel met 9 lagen variërend van 5% van de waterdiepte aan de bodem en 21% aan het oppervlak.

Figuur 5-7 en Figuur 5-8 geven respectievelijk de rekenroosters en modelbathymetrie weer van beide detaildomeinen.



Figuur 5-7 De rekenroosters van de modeldomeinen aan de binnenzijde (lichtblauw) en buitenzijde (donkerblauw) bij Den Oever. Het rekenrooster van het Westelijke Waddenzeemodel (grijs) is ter referentie weergegeven.



Figuur 5-8 Het bodemniveau t.o.v. NAP rondom de spuimiddelen bij Den Oever.

5.3 Schematiseren van de bronterm

Zoals nader toegelicht in de hoofdstukken 2 en 4 zal er ontgroning plaatsvinden ten gevolge van de bouwfase en de gebruiksfase. Beide processen zijn in essentie verschillend en worden daarom afzonderlijk beschouwd. Uiteindelijk worden beiden geschematiseerd tot een bronterm bestaande uit het beschikbaar komen van een bepaalde hoeveelheid sediment (combinatie van zand en twee slibfracties) in de ruimte en tijd.

5.3.1 Bronterm 'bouwfase'

De bronterm tijdens de bouwfase omvat met name de ontgroning van het gebaggerde materiaal dat tijdens de werkzaamheden gestort is in de bestaande ontgrondingskuilen aan de buitenzijde van Den Oever. Om te komen tot de benodigde uitgangspunten voor het bepalen van het gedrag van dit volume bij aanvang van spuien, zijn een aantal aannames gedaan. Deze zijn hieronder opgenomen, inclusief onderbouwing.

1. Het gebaggerde volume betreft 210.000 m³. Dit is bepaald op basis van berekeningen van benodigd grondverzet aan de buitenzijde om de nieuwe spuigroepen te plaatsen, inclusief het plaatsen van bescherming tegen erosie dicht op de constructie.
2. Het gebaggerde materiaal bestaat uit een mengsel van zand, slib, keileem en een verwaarloosbare hoeveelheid veen. Op basis van zowel grondboringen en data beschikbaar uit Dinoloket, is een representatieve verdeling van 35% slib en 65% zand bepaald voor het baggervolume.

3. Het gebaggerde volume vormt een surplus op het volume dat op natuurlijke wijze zal aanslibben in de ontgrondingskuilen tijdens periode met lage spuidebieten (zie paragraaf 4.3). Dit volume⁵ ten gevolge van het 'ademen' wordt op basis van meerjaarlijkse metingen geschat op 300.000 m³. Dit volume wordt niet meegenomen in de beschouwing van de verspreiding van materiaal tijdens de ontgroning, maar draagt initieel wel bij aan de versnelling van het vrijkomen van materiaal uit de ontgrondingskuilen bij het spuien aangezien deze nu verder opgevuld zijn. Het erosievlak ligt immers initieel hoger in de verticaal en daarmee dichter op de turbulente stroming.
4. De ontgroning aan de buitenzijde wordt in hoge mate gedomineerd door de zeer turbulente stroming in de spuirom. Aangezien dit proces onvoldoende wordt opgelost in het rekenmodel, is de ontgroning in de tijd bepaald met de formule voor ontgroning achter kunstwerken uit (Van Rijn, 2018). De formule toont aan dat 90% van de ontgroning plaatsvindt in de eerste 60 dagen nadat er weer vol gespuid wordt.

5.3.2 Bronterm 'gebruiksfase'

De bronterm tijdens de gebruiksfase omvat de erosie aan de binnenzijde van Den Oever. Het grootste deel van het erosievolume zal uit de zandige drempel komen. Op deze drempel zal met name ter hoogte van de nieuwe spuiroepen initieel forse erosie plaatsvinden vanwege het veranderde stroombeeld na ingebruikname van de nieuwe groepen. Dit volume zal vrijwel volledig meegevoerd worden met het spuivolume en beschikbaar komen aan de buitenzijde van Den Oever. Om te komen tot de benodigde uitgangspunten voor het bepalen van het gedrag van dit erosievolume bij aanvang van spuien door de nieuwe spuiroepen, zijn een aantal aannames gedaan. Deze zijn hieronder opgenomen, inclusief onderbouwing.

1. Het erosieproces is gesimuleerd met Delft3D. Het stroombeeld aan de binnenzijde is niet gedomineerd door turbulente stroming wat betekent dat het model de impact van het veranderde stroombeeld op de zandige bodem correct kan simuleren. Zo is voor ten minste de eerste 60 dagen na ingebruikname van één of beide spuiroepen de erosie in de ruimte en tijd bepaald.
2. Het materiaal op de drempel bestaat volledig uit een (fijne) zand fractie. Op basis van grondboringen en data uit Dinoloket is af te leiden dat de aanwezigheid van andere sedimentfracties verwaarloosbaar klein is.
3. Op basis van dezelfde data is af te leiden dat een harde (klei)laag aanwezig is op circa -12 m NAP. Het model is daarom zo afgeregeld dat erosie beneden dit niveau niet mogelijk is.
4. De simulaties laten zien dat in de eerste 60 dagen na ingebruikname van de nieuwe spuiroepen een volume van 375.000 m³ erodeert. Hiervan gaat circa 95% direct door het spuimiddel richting de Waddenzee⁶. 70 à 80 procent daarvan gaat door de oostelijk spuigroep (SG1.7) vanwege asymmetrische aanstroming.

5.3.3 Cumulatieve bronterm

In hoeverre sprake is van cumulatie van beide hierboven beschreven brontermen is bepaald op basis van een realistisch worst-case scenario. Hierbij is aangenomen dat de eerste (significante) spui acties na de zomermaanden waarin de werkzaamheden zijn uitgevoerd samenvallen met Variant A van de ingebruikname van de nieuwe spuiroepen. Dit scenario is weergegeven in *Figuur 5-9*. Dat zou betekenen dat het eerste significante gebruik van spuiroepen 1.1, 1.2 en 1.3 na de zomermaanden samenvalt met de eerste ingebruikname van SG1.7. Hoewel dit een conservatieve aanname is, is dit niet uit te sluiten en zal hier rekening mee gehouden moeten worden. Het gevolg is dat de ontgroning aan de buitenzijde (uit de ontgrondingskuilen) overlapt met het vrijkomen van ca. 80% van het berekende erosievolume aan de binnenzijde (uit het IJsselmeer). Vanwege het hoog-turbulente karakter van de stroming in de spuirom is tot slot aangenomen dat deze cumulatie niet zal leiden tot een verzadiging van de waterkolom. Beide brontermen kunnen daarmee simultaan optreden. De eigenschappen van de cumulatieve bronterm zijn samengevat in *Tabel 5-1*. De verdeling in de tijd over de eerste 60 dagen is gevisualiseerd in *Figuur 5-10*. Deze verdeling volgt uit de sommatie van de voortgang in de tijd van de ontgroning aan de buitenzijde (analytisch benaderd met de ontgrondingsformule van Van Rijn) en het erosiegedrag van de drempel aan de binnenzijde

⁵ Het is aannemelijk dat de omvang van natuurlijke aanslibbing tijdens periode met lage afvoeren kleiner zal zijn, als een deel van de ontgrondingskuilen al gevuld wordt met baggermateriaal. Deze impact is echter moeilijk te kwantificeren. Om aan de conservatieve kant te blijven, is daarom gewerkt met het gemiddelde volume van jaarlijkse aanslibbing.

⁶ De overige 5% sedimenteert aan de binnenzijde. Met name de ondiepte direct ten oosten van SG1.3 lijkt gevoelig voor aanzanding. Dit zou relevant kunnen zijn voor de aanzuiging van de pompgroep die hier voorzien wordt, maar hier is verder niet in detail naar gekeken.

(berekend met behulp van het numerieke model). Deze cumulatieve bronterm bestaande uit de ontgronding aan de buitenzijde en erosie aan de binnenzijde, zal voorts worden aangeduid als de (initiële) sedimentpuls.

De bronterm is in de tijd gelimiteerd tot 60 dagen. Op dat moment heeft het grootste deel van de ontgronding en erosie reeds plaatsgevonden en neemt ook de impact significant af. Het effect van de ingebruikname van SG1.6 na tenminste 60 dagen (zie *Figuur 5-9*) zal significant lager zijn in relatie tot de initiële sedimentpuls vanwege een kleiner erosievolume dat dan beschikbaar komt. Deze bronterm is daarom niet beschouwd.

		Den Oever								
		pomp- groep		nieuw e spui		nieuw e spui		pomp- groep		
maand	jaar	PG 1	SG 1.1	SG 1.6	SG 1.2	SG 1.7	SG 1.3	PG 2		
januari	1									
februari	1									
maart	1									
april	1									
mei	1									
juni	1									
juli	1									
augustus	1									
september	1									
oktober	1									
november	1									
december	1									
januari	2									
februari	2									
maart	2									
april	2									
mei	2									
juni	2									
juli	2									
augustus	2									
september	2									
oktober	2									
november	2									
december	2									

bestaande spuigroep beschikbaar om te spuien

nieuwe spuigroep beschikbaar

nieuwe pompgroep beschikbaar

spuigroep gesloten niet mogelijk om te spuien

spui- of pompgroep in aanbouw, niet beschikbaar om te spuien

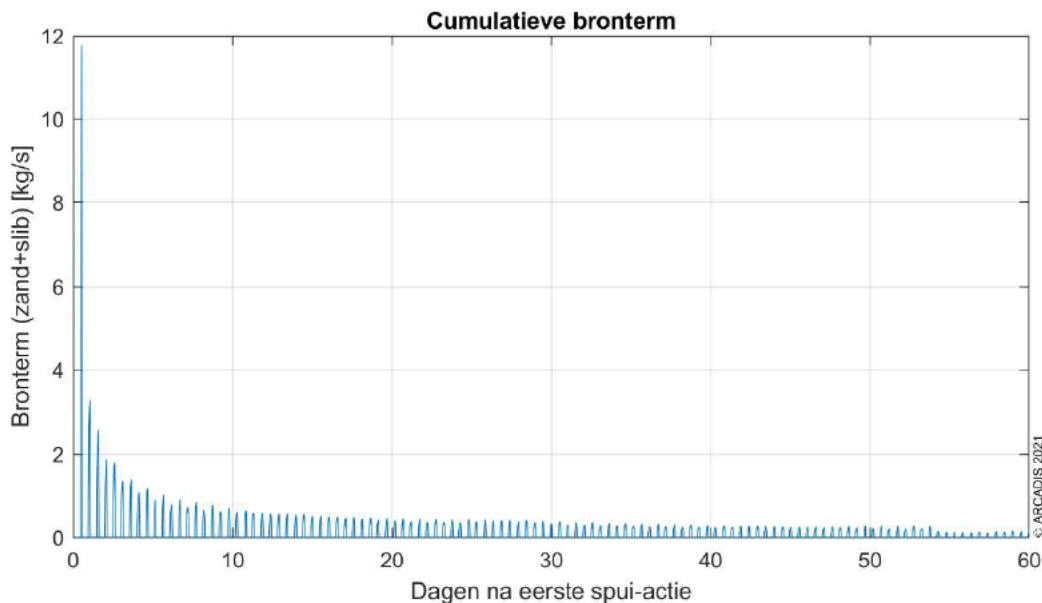
ontgraven en aanbrengen bodembescherming

Figuur 5-9 Overzicht van planningsvariant A. Het realistische worst-case scenario treedt op in de periode oktober-november.

Tabel 5-1 Overzicht totstandkoming van de cumulatieve bronterm

Bronterm	Zand [m ³]	Slib [m ³]	Totaal [m ³]
Bouwfase	136.500	73.500	210.000
Gebruiksfase	300.000*	Verwaarloosbaar	300.000
Totaal	436.500	73.500	510.000

*Volgt uit 80% van het totaal berekende erosievolume (375.000 m³) omdat initieel alleen SG1.7 in gebruik wordt genomen.



Figuur 5-10 Verdeling van de bronterm in de tijd. De grootste puls aan sediment komt vrij in de eerste dagen na de start van het spuien. Ook het spuiere regime is terug te zien in het verloop in de tijd.

5.4 Sedimenteigenschappen in het model

Het gedrag van het slib (cohesief materiaal) wordt berekend met de Partheniades-Krone formule, (Partheniades, 1965) in (Deltares, 2016). Deze formule bepaalt, middels gestelde kritische bodemschuifspanningen, het erosie/sedimentatie gedrag van het slib. Dit houdt in dat als de bodemschuifspanning boven een, voor sedimentatie gestelde, kritische waarde uitkomt, er geen sedimentatie zal plaatsvinden. Onder die gestelde waarde vindt er sedimentatie plaats volgens de Partheniades-Krone formule. Volgens eenzelfde wijze geldt ook; als de bodemschuifspanning kleiner is dan een, voor erosie gestelde, kritische waarde, vindt er geen erosie plaats. Is de lokale bodemschuifspanning groter dan de kritische waarde, dan wordt de hoeveelheid erosie berekend met de Partheniades-Krone formule. Voor de zandfractie wordt de transportformule van (Rijn, Roelvink, & Horst, 2000) in (Deltares, 2016) toegepast.

De mogelijke bandbreedtes voor de modelinstellingen die gekoppeld zijn aan de sedimenteigenschappen van het slib voor in het westelijke Waddenzeemodel zijn weergegeven in *Tabel 5-2*. Er is gewerkt met twee (cohesieve) sediment fractie en één zandfractie ($> 63 \mu\text{m}$). De grofste slibfractie is representatief voor de fractie met een korreldiameter kleiner dan $63 \mu\text{m}$ en groter dan $32 \mu\text{m}$, en de fijnste slib fractie representeert de fractie met een korreldiameter kleiner dan $32 \mu\text{m}$. De twee slibfracties vervullen verschillende functies binnen de effectenbeoordeling. Zo is de fijne slibfractie zeer mobiel door de lage valsnelheid en relatief eenvoudige (re)suspensie. Hierdoor is deze fractie grotendeels leidend voor het areaal van de pluim en daarmee de mate van vertroebeling. De grove slibfractie is minder mobiel met een hogere valsnelheid en relatief lagere mate van (re)suspensie. Deze slibfractie zal daarmee maar kort bijdragen aan het vertroebelingsmaximum en vervolgens relatief snel weer neerslaan. Daarmee zal deze fractie grotendeels leidend zijn voor de far-field bedekking. Tot slot zal de (fijne) zandfractie voornamelijk lokale effecten hebben, zoals de sedimentatiesnelheid en aanzanding dicht bij de ontgronding.

Tabel 5-2 Modelparameter ranges voor de sedimenteigenschappen van het slib.

Sediment fractie	D50 [μm]	Valsnelheid [mm/s]	Crit. erosie schuifsp. [N/m^2]
Fijn slib (cohesief)	1-32	0.10-0.50	0.10-0.50
Slib (cohesief)	33-63	1.00-2.00	0.25-1.00
Fijn zand (non-cohesief)	64-200	-	-

Voor wat betreft de keuzes van de modelinstellingen binnen de bandbreedtes is, in overleg met de slibmodelleringsexperts van Deltares, gekozen voor meerdere sets van instellingen voor afzonderlijke simulaties die verschillende extremen onderzoeken relevant voor de effectenbeoordeling. Er is daarbij gebruik gemaakt van (fysieke) gebiedskennis, kennis op het gebied van het gedrag van slib, kennis op het gebied van slibmodellering en een aantal testsimulaties (niet in dit rapport opgenomen). Zo is men gekomen tot 4 sets van modelinstellingen aangaande het erosie-sedimentatie gedrag van de slib en zand fractie(s). Er is niet gevarieerd met de instellingen van de (fijne) zandfractie aangezien deze fractie vrijwel geen far-field effecten zal hebben.

1. Representatieve modelinstellingen voor het te modelleren proces binnen het Waddensysteem.

Er is hierbij gekozen voor representatieve valsnelheden voor de slibfracties op basis van de Navier Stokes formule voor cohesief materiaal (vereenvoudigd door Van Rijn (WL | Delft Hydraulics, 2006)). Gangbare waarden voor de kritische schuifspanning voor erosie zijn toegepast op basis van vergelijkbare studies. Op basis van testsimulaties is in overleg besloten dat deze instellingen resulteren in een aannemelijk gedrag van het slib dat aanwezig is in het Waddensysteem.

Daarnaast zijn nog 3 overige sets van instellingen samengesteld om zo, binnen realistische marges, de gevoeligheid van de resultaten voor deze instellingen in kaart te brengen:

2. Modelinstellingen met relatief lage valsnelheden.

Met deze instellingen zijn de fijne fracties extra mobiel doordat deze langer in suspensie blijven. Het resultaat zal een groter vertroebelingsareaal zijn, met hogere vertroebelingsmaxima. Ook zal sedimentatie plaats kunnen vinden op een grotere afstand van de ontgronding.

3. Modelinstellingen met een relatief hogere mate van (re)suspensie.

Met deze instellingen zal de fijne fractie gevoeliger zijn voor lokale hydrodynamica en golfactie. Zo zal langer sprake zijn van vertroebeling, meer (re)suspensie en hogere maxima op eventueel andere locaties.

4. Modelinstellingen met een relatief hogere valsnelheden en minder (re)suspensie.

Deze simulatie zal leiden tot snellere sedimentatie en een (tijdelijk) grotere sedimentlaagdikte. Echter zal het materiaal wel vaak dichter bij de ontgronding neerslaan, vanwege het minder mobiele karakter.

Op voorhand is niet te zeggen welke set(s) van instellingen conservatieve resultaten zal genereren voor de vertroebeling en bedekking. Daarom zullen voor het realistische worst-case scenario 4 simulaties worden uitgevoerd met elk een set van modelinstellingen. De minima en maxima van de gesimuleerde effecten zal worden gebruikt om een onzekerheidsband te generen rond de resultaten van de simulatie met de representatieve modelinstellingen. De met Deltares afgestemde en overeengekomen modelinstellingen voor de 4 sets zijn opgenomen in *Tabel 5-3*.

5.5 Gevoeligheidsanalyse

De gevoeligheid van de aannames die voor deze studie zijn gedaan, wordt in deze paragraaf beschouwd. De gevoeligheidsanalyse bestaat uit drie onderdelen, namelijk:

5. Onzekerheden in fysieke en/of hydrodynamische omstandigheden;
6. Onzekerheden en/of variaties in fysieke schematisatie bronterm;
7. Onzekerheden en/of variaties in modelparameter bronterm (los van de afwegingen zoals beschreven paragraaf 5.4).

5.5.1 Onzekerheden in fysieke en/of hydrodynamische omstandigheden

De onzekerheden in fysieke en/of hydrodynamische omstandigheden richten zich bij deze studie met name op de gevoeligheid van het wel of niet meenemen van het effect van wind op windgedreven stroming en het effect van golven.

Tabel 5-3 Afgestemde modelinstellingen, ondergebracht in 4 sets van instellingen (afwijkende instellingen **dikgedrukt**).

Sediment fractie	D50 [μ]	Valsnelheid [mm/s]	Crit. erosie schuifsp. [N/m^2]
<i>Representatief scenario</i>			
Fijn slib (cohesief)	20	0.15	0.25
Slib (cohesief)	45	1.50	0.50
Fijn zand (non-cohesief)	100	-	-
<i>Mobiel scenario (1), verlaagde valsnelheid fijn sediment</i>			
Fijn slib (cohesief)	20	0.10	0.25
Slib (cohesief)	45	1.00	0.50
Fijn zand (non-cohesief)	100	-	-
<i>Mobiel scenario (2), verlaagde minimale schuifspanning voor re-suspensie</i>			
Fijn slib (cohesief)	20	0.15	0.10
Slib (cohesief)	45	1.50	0.25
Fijn zand (non-cohesief)	100	-	-
<i>Inmobiel scenario, verhoogde valsnelheid en verhoogde minimale schuifspanning voor re-suspensie</i>			
Fijn slib (cohesief)	20	0.50	0.50
Slib (cohesief)	45	3.00	1.00
Fijn zand (non-cohesief)	100	-	-

De windgedreven stroming resulteert in een verdere verspreiding van het slib in de Waddenzee. Het effect is met name richting het noordoosten van de werkzaamheden terug te zien, doordat de dominante windrichting uit het zuidwesten is. In de uiteindelijke scenario berekeningen zal windgedreven stroming worden meegenomen. Om enige willekeur mee te nemen die wordt geïntroduceerd door de afhankelijkheid van de variatie in windsnelheid en windrichting, is gebruik gemaakt van de tijdreeks die hoort bij het kalenderjaar 2006. Uit eerdere analyse (Van Kessel, 2009) is naar voren gekomen dat de windcondities van 2006 representatief zijn voor gemiddelde, recentelijke windcondities ter hoogte van de Nederlandse randmeren. In het model zijn de windcondities opgelegd door middel van de richting en de snelheid.

Golven spelen een belangrijke rol in het verspreiden en opnieuw in suspensie brengen van het (fijne) materiaal, met name boven de ondiepe platen van de Waddenzee. Hierdoor neemt de slibconcentratie en sedimentatie toe boven deze platen wat een significante impact heeft op de far-field effecten. Het is daarom noodzakelijk golven mee te nemen in de berekeningen. Voor de simulatie van golven binnen het modeldomein is gebruik gemaakt met een *online*-koppeling met het golfmodel SWAN. SWAN berekent elke 2 uur de wind gedreven golven en geeft deze golfeigenschappen door aan het hydrodynamisch model, welke gebruik maakt van de resulterende hydrodynamica en bodemschuifspanning. De gevoeligheid in relatie tot de bodemschuifspanning ten gevolge van golfactie is ook onderzocht. Uit deze gevoeligheidsanalyse komt naar voren dat gewerkt zal moeten worden met een factor 0,5 op de gesimuleerde schuifspanning ten gevolge van golfactie. Dit omdat bij modelinstellingen geënt op de correcte simulatie van het erosie-sedimentatie gedrag van (fijn) sediment, de bijdrage van golven overschat dreigt te worden.

5.5.2 Onzekerheden en/of variaties in fysieke schematisatie bronterm

De onzekerheden bij de schematisatie van de brontermen zijn terug te leiden tot twee type aannames:

1. De verdeling van de bronterm in de tijd.

Deze verdeling volgt uit de aannames zoals besproken in paragraaf 5.3. Aangezien het lastig is om voor alle parameters binnen de gebruikte analytische benaderingen en alle instelling van de gebruikte numerieke modellen de gevoeligheid af te tasten, is uniform gekozen voor een conservatieve aanpak bij beide methodes. Zo zal de berekende bronterm ook aan de conservatieve kant zitten. Mocht dit leiden tot te ingrijpende effecten, kan opnieuw gekeken worden welke instellingen beter afgeregeld kunnen worden zonder de bronterm te onderschatten.

2. De horizontale en verticale plaatsing van de bronterm in het model.

De modelstudie is primair bedoeld om de far-field effecten van de ontgroning en erosie te kwantificeren. Het gaat dus om het gedrag van het materiaal nadat het de spuikom bij Den Oever heeft verlaten. De ontgroning vindt plaats direct in de ontgrondingskuilen in de spuikom en het relevante deel van het erosievolume wat oorspronkelijk van de drempel aan de binnenzijde komt ook beschikbaar in de Waddenzee via de spuikom. In de spuikom is sprake van zeer hoog turbulente stroming. Het is dan ook aannemelijk dat volledige menging optreedt van materiaal dat lokaal erodeert of al in het spuiwater aanwezig is. De bronterm wordt daarom dieptegemiddeld opgelegd in de spuikom om dit hoog turbulente karakter te representeren. De onzekerheden die deze schematisatie introduceert zijn relatief beperkt. Nadat het sediment de spuikom verlaat, simuleert het model vervolgens hoe het sediment zich verspreid en uitzakt in de tijd en ruimte.

5.5.3 Onzekerheden en/of variaties in modelparameter bronterm

Het gedrag van het slib (cohesief materiaal) wordt berekend met de Partheniades-Krone formule, (Partheniades, 1965) in (Deltares, 2016). Deze formule bepaalt, middels gestelde kritische bodemschuifspanningen, het erosie/sedimentatie gedrag van het slib. De instellingen van deze parameters zijn reeds besproken in paragraaf 5.4. De valsnelheid en kritische schuifspanning (zie waardes in *Tabel 5-3*) zijn verder meegenomen in de berekeningen van de uiteindelijke variant, waarbij de minimale en maximale waardes een onzekerheidsmarge geven voor de slibconcentratie in de omgeving van de werkzaamheden (resultaten in Hoofdstuk 6).

In het model is het mogelijk om de erosie flux verder af te stemmen, door de erosie parameter (in $\text{kg/m}^2/\text{s}$) te kalibreren. In een voorgaande studie (Arcadis, 2020) waarbij hetzelfde model is toegepast voor het simuleren van de far-field effecten van de verspreiding van een (fijne) slib-fractie, is de gevoeligheid van deze parameter reeds bekeken. Er is toen geconcludeerd dat de erosieparameter een grote impact heeft op de far-field effecten. Zo nemen bij een hogere waarde de maximale concentraties toe en breidt het 2 mg/l areaal zich ook uit, met name richting het noordoosten vanwege de dominante windrichting. Echter, het vertroebelingspatroon wordt ook onrealistisch met vertroebelingsmaxima in de geulen en lagere concentraties op de platen. Voor de vervolgstappen werd daarom de erosieparameter op de standaardwaarde van 0,0001 $\text{kg/m}^2/\text{s}$ ingesteld. Deze instelling wordt in deze modelstudie overgenomen.

6 Vrijkomen slib en zand – resultaten modelberekeningen

6.1 Modelscenario's en beschouwing

In het voorgaande hoofdstuk 5 is de aanpak beschreven voor het modelleren van het vrijkomen slib en zand uit de ontgrondingskuilen en het IJsselmeer. De far-field effecten ten gevolge van het realistische worst-case scenario, zoals beschreven in paragraaf 5.3, is berekend met behulp van de gekoppelde modelschematiaties (paragraaf 5.2).

Voor dit scenario is ook de gevoeligheid van de modelresultaten voor een selectie van modelinstelling onderzocht, door naast de simulatie met de representatieve instellingen ook nog 3 simulaties door te rekenen met aangepaste instellingen (zie ook paragraaf 5.5.3). Dit levert een totaal van 4 modelscenario's. Een overzicht van deze modelscenario's is opgenomen in Tabel 6-1.

Tabel 6-1 Overzicht modelscenario's

Nr.	Naam	Modelinstelling sedimentatie/erosie	Opmerking
1	Variant 1a	Representatief	-
2	Variant 1b	Verlaagde valsnelheid fijn sediment	Conservatief voor vertroebeling
3	Variant 1c	Verlaagde minimale schuifspanning voor re-suspensie	Conservatief voor vertroebeling
4	Variant 1d	Verhoogde valsnelheid en verhoogde minimale schuifspanning voor re-suspensie	Conservatief voor bedekking (laagdikte en sedimentatiesnelheid)

In de volgende paragrafen worden de gesimuleerde vertroebeling en bedekking ruimtelijk gepresenteerd voor het beschouwde scenario met de representatieve modelinstellingen. Om een beeld te krijgen van de vertroebeling wordt gekeken naar zowel de maximale additionele slibconcentraties als ook de overschrijdingsduur van de 10 mg/l waarde. Voor de bedekking wordt gekeken naar de maximale sliblaagdikte en de maximale sedimentatiesnelheid. Door de ruimtelijke weergave van deze parameters, wordt de verwachte impact van dit scenario inzichtelijk gemaakt.

Vervolgens zijn tijdseries opgenomen voor de slibconcentratie, sliblaagdikte en sedimentatiesnelheid op een aantal representatieve locaties. Zo kan worden beschouwd wat de variatie is in de tijd, maar ook wat de onzekerheid in de gesimuleerde waarden is ten gevolge van de modelinstellingen aangaande het erosie-sedimentatie gedrag van de 3 sedimentfracties.

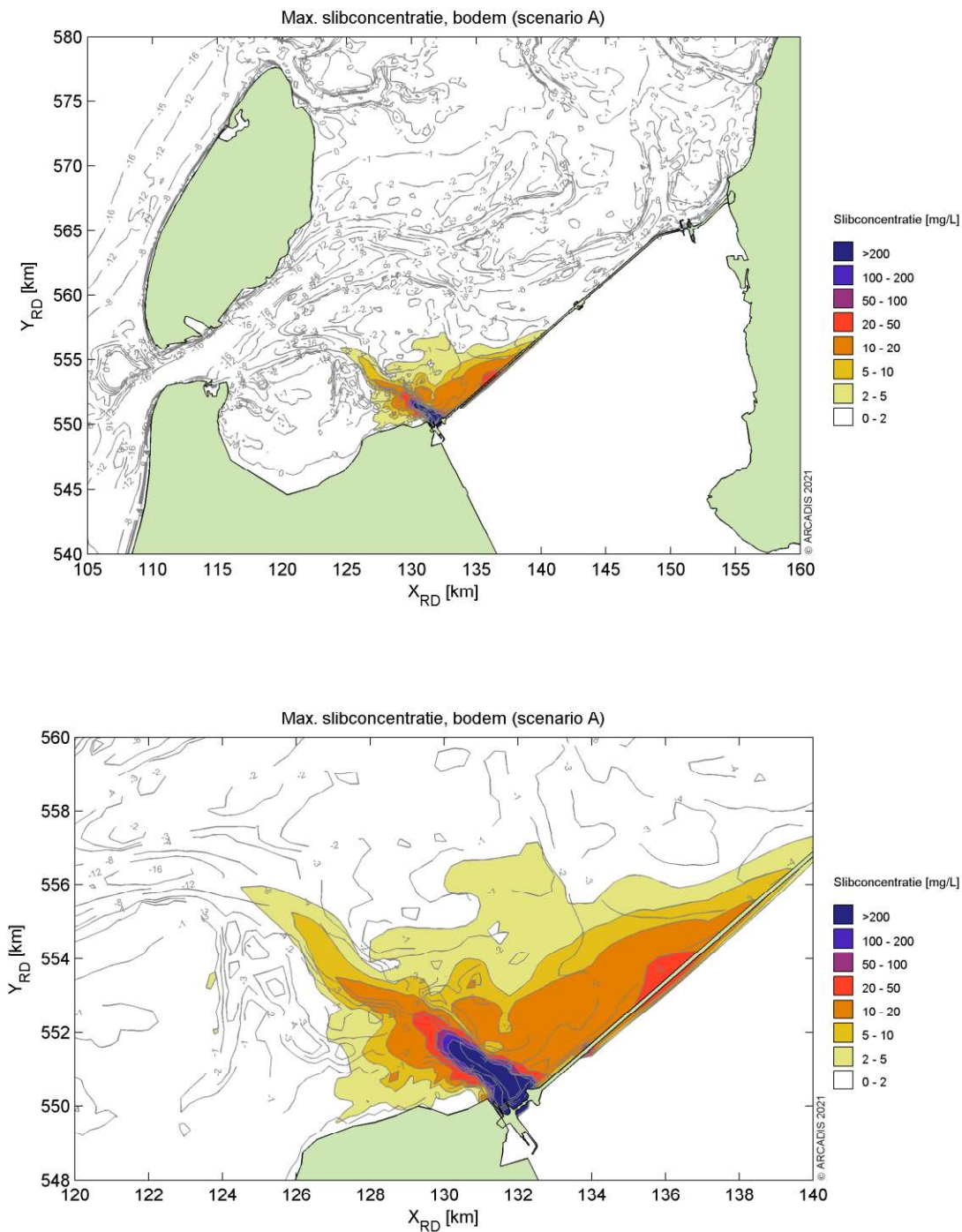
6.2 Additionele slibconcentratie

6.2.1 Ruimtelijke variatie in slibconcentratie

Figuur 6-1 toont het ruimtelijke beeld van de maximale verhoging van de slibconcentratie tijdens het beschouwde scenario. De kleurschaal loopt op van 2 mg/l (geel) tot 200 mg/l (paars). Opgemerkt moet worden dat het hier gaat om de behaalde maxima op elk afzonderlijk punt binnen het gebied. Deze waarden zullen niet simultaan optreden, maar verspreid in de tijd over de beschouwde periode van 60 dagen. Vanwege de eigenschappen van het proces, is het wel aannemelijk dat de maxima optreden in de eerste 2 weken nadat gestart wordt met spuien. In de figuren is ook een indicatie van de dieptecontouren opgenomen en is het vasteland weergegeven met de groen gearceerde vlakken.

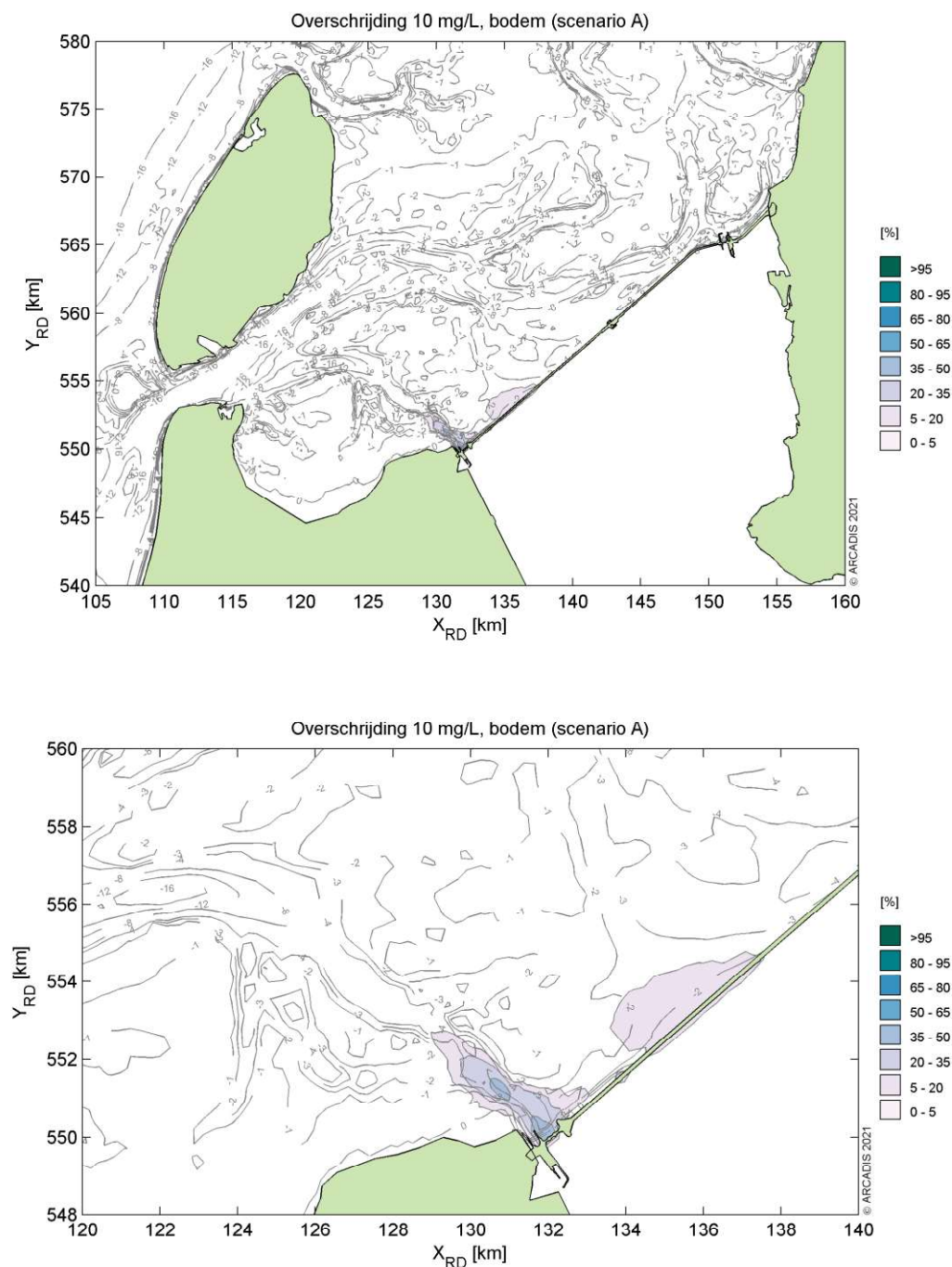
Concentraties van meer dan 50 mg/l blijven beperkt tot 2,5 km vanaf de spuikom gezien en volgen de getijgeul. Lagere concentraties volgen de getijgeul richting het noordwesten en langs de Afsluitdijk tot voorbij de Boereplaat.

Figuur 6-2 toont het areaal van de overschrijding van de 10 mg/l⁷ verhogingswaarde aan de bodem als percentage van de gesimuleerde duur van de ontgronding. Enkel langs de getijgeul tot 2,5 km buiten Den Oever en ter hoogte van de Boereplaat tegen de Afsluitdijk aan is een overschrijding van meer dan 5% van de beschouwde duur van 60 dagen waarneembaar. Dit laat zien dat de pluim, hoewel heftig qua piekconcentratie, vrij kortstondig is in de tijd en ook snel weer uitdempt.



⁷ Deze waarde is arbitrair gekozen teneinde een kwantitatieve beoordeling van de resultaten uit te kunnen voeren en vervult geen specifieke ecologische waarde in de hier beschreven beoordeling.

Figuur 6-1 Maximale slibconcentratie aan de bodem gedurende het beschouwde scenario in de westelijke Waddenzee (boven) en bij Den Oever (onder).



Figuur 6-2 Overschrijdingsduur (in percentage van de duur van de initiële sedimentpuls) van de 10 mg/l waarde aan de bodem in de westelijke Waddenzee (boven) en bij Den Oever (onder).

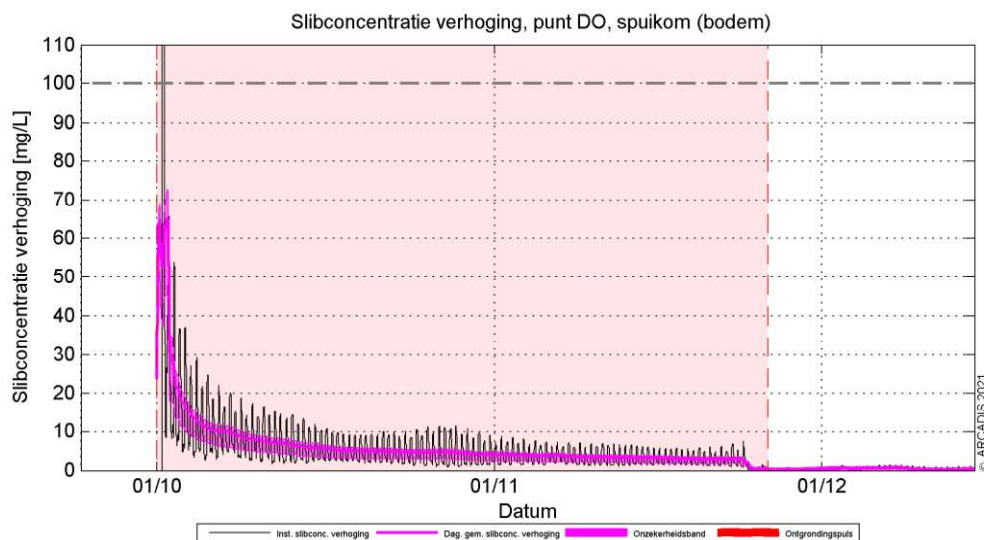
6.2.2 Slibconcentratie over de tijd

Op een aantal representatieve locaties is de slibconcentratie in de tijd getoond. Zo is naast de maximale toename in vertroebeling ook iets te zeggen over het gedrag in de tijd. Er is gekozen voor een weergave van een select aantal punten om het rapport bondig te houden.

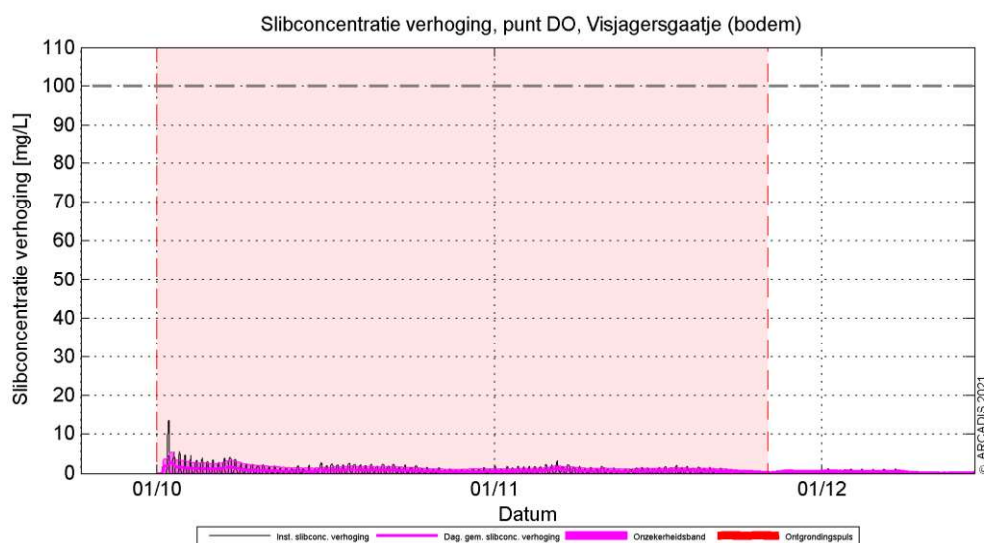
In Figuur 6-3 tot en met Figuur 6-6 is het verloop van de concentratieverhoging aan de bodem in de tijd getoond. Hierin is de zwarte grafiek de instantane concentratieverhoging (10 minuten waarde) en magenta beschrijft de daggemiddelde waarde (24 uren waarde). De magenta band die deze lijn omvat is de onzekerheidsband op basis van de uitkomsten van de simulaties 1a tot en met 1d. De verticale begrenzing van de onzekerheidsband is samengesteld door op elk punt in de tijd het minimum en maximum te selecteren van de 4 modelresultaten. Tot slot is het transparant rood gearceerde vlak de periode waarin de initiële sediment puls (ontgroning + erosie) plaatsvindt. Nota bene: de ontgroning en erosie is dan nog niet voltooid, maar zwakt qua intensiteit wel af. Er is daarom gekozen om hier de bronterm te stoppen en nog 3 weken te simuleren om ook de uitdamping in de tijd te kunnen beschouwen. Voor de verticale as is gekozen om deze gelijk te houden in alle figuren (0 tot 110 mg/l). Dit bevordert de mogelijkheid tot vergelijking van het gedrag van de slibverhoging op de locaties, maar betekent tegelijkertijd dat op sommige locaties waar de slibconcentratie verhoging laag is, het effect beperkt zichtbaar is.

Figuur 6-3 tot en met Figuur 6-6 tonen de slibconcentratieverhoging op representatieve plekken binnen en rondom de spuikom bij Den Oever, te weten het Visjagersgaatje, de Wierbalg en de Boerenplaat (specifiek de locatie tegen de Afsluitdijk). Het gedrag van het slib op deze locaties hangt met name af van de afstand tot de spuikom en de lokale hydrodynamica.

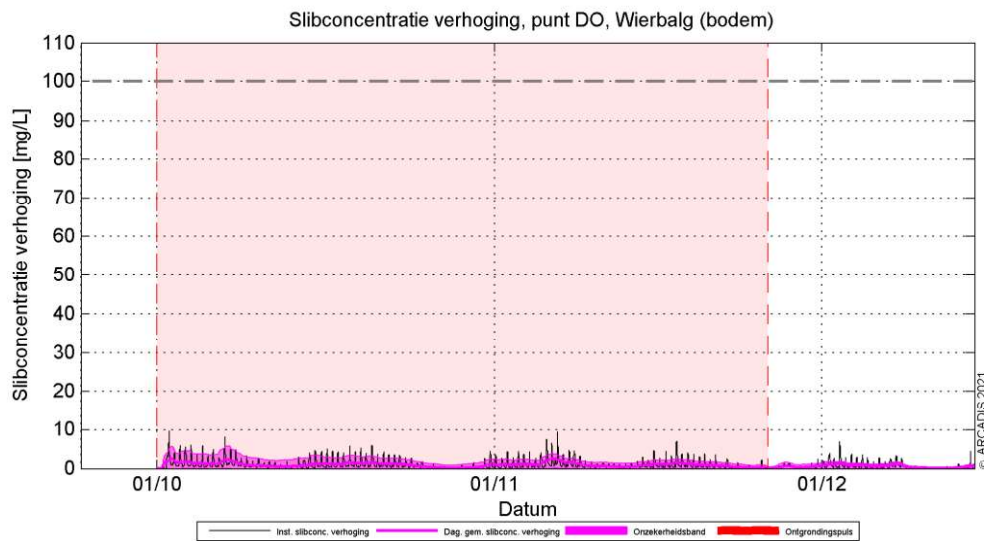
- De verhoging van de slibconcentratie in de spuikom is uiteraard zeer gecorreleerd aan de bronterm van de sedimentpuls. De spui acties zijn zichtbaar in het instantane signaal. De daggemiddelde concentratie piekt aan het begin van de sedimentpuls tot ruim 70 mg/l. Na ongeveer een week zakt deze echter al onder de 10 mg/l en daarna stabiliseert het op een concentratie van zo'n 5 mg/l voor de resterende duur. Na het stoppen van de puls dempt het signaal vrijwel direct uit. De onzekerheidsband is relatief klein vanwege de kleine afstand tot de bronterm.
- Het beeld op de locatie in het Visjagersgaatje is vergelijkbaar, maar een orde kleiner qua concentratieverhoging van het slib. Ook hier is de piek zichtbaar aan het begin van de sedimentpuls, maar deze blijft beperkt tot circa 5 mg/l. De concentratie neemt daarna zelfs verder af. Het effect van het doodtij-springtij is minimaal zichtbaar. De beperkte verhoging is te verklaren op basis van de lokale hydrodynamica. De getijstrooming is doorgaans hoog genoeg om de fractie te transporteren zonder dat het accumuleert. Bij het wegvallen van de stroming kan materiaal neerslaan, maar dit zal maar minimaal in resuspensie komen bij het volgende getij vanwege de grotere diepte. In beide gevallen is de bijdrage aan de lokale concentratieverhoging beperkt.
- Ter hoogte van de Wierbalg is een ander patroon waarneembaar. Hier lijkt tijdens de start van de sedimentpuls een geringe hoeveelheid slib afgezet te worden. Deze slaat daar neer en komt in resuspensie ten gevolge van het doodtij-springtij signaal. De concentraties nemen maar minimaal af in de tijd, wat erop duidt dat het lokale slib veelal blijft hangen.
- Het gedrag op de andere plaat, de Boerenplaat, is vergelijkbaar maar vertoont daarbij wat hogere concentraties. Hier komt relatief meer slib terecht, wat zorgt voor een daggemiddelde concentratieverhoging van maximaal 25 mg/l. Dit neemt geleidelijk af naar circa 5 mg/l. Ook hier is het effect van het doodtij-springtij signaal waar te nemen. Ook is de gevoeligheid van de modelinstellingen hier relatief groot. De instellingen beïnvloeden hier significant in hoeverre de fijne fractie de locatie bereikt en accumuleert.



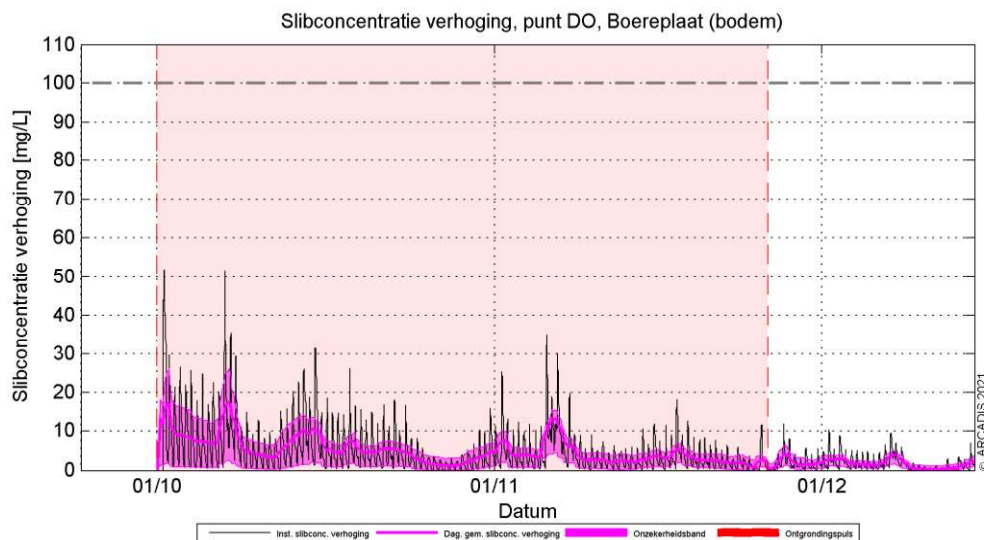
Figuur 6-3 Slibconcentratieverhoging in de tijd in de spuikom bij Den Oever.



Figuur 6-4 Slibconcentratieverhoging in de tijd in het Visjagersgaatje.



Figuur 6-5 Slibconcentratieverhoging in de tijd bij de Wierbalg.



Figuur 6-6 Slibconcentratieverhoging in de tijd in de spuikom bij de Boereplaat (Afsluitdijk).

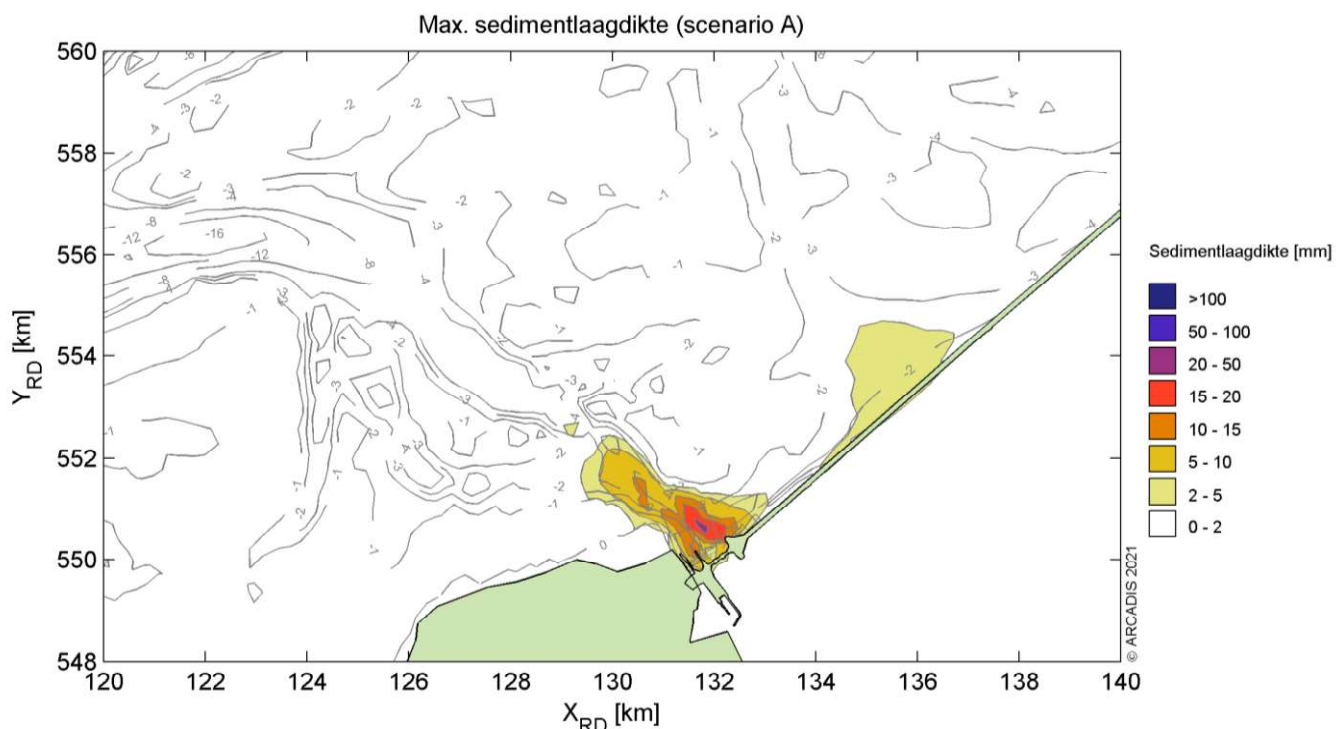
6.3 Additionele bedekking

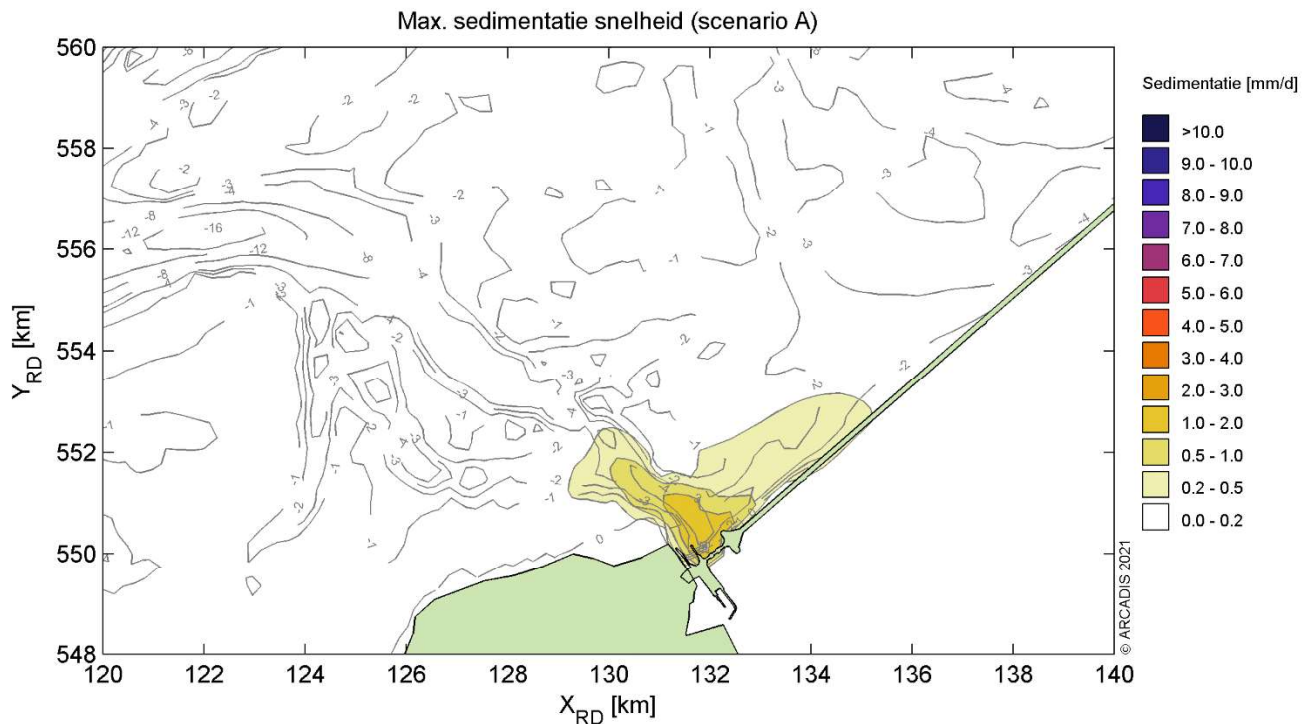
In deze paragraaf wordt gekeken wat de impact is op de bedekking ten gevolge van het beschouwde scenario. Dit is uitgedrukt in zowel de (maximale) laagdikte in mm, maar ook in (maximale) sedimentatiesnelheid in mm/d. Opnieuw zijn de resultaten zowel ruimtelijk weergegeven, als ook op specifieke locaties in de Waddenzee aan de hand van tijdseries op de desbetreffende locaties. Nota bene: er wordt hier onderscheid gemaakt in het gedrag van de slibfracties en de zandfracties, omdat dit gedrag zich op een ander schaalniveau uit.

6.3.1 Ruimtelijke variatie in de bedekking slib

Figuur 6-7 toont het ruimtelijke beeld van de maximale sedimentlaagdikte, bestaande uit de slibfractie, tijdens het beschouwde scenario. De kleurschaal loopt op van 2 mm (geel) tot 100 mm (paars). Opgemerkt moet worden dat het hier gaat om de behaalde maxima op elk punt binnen het gebied, deze waarden zullen niet simultaan optreden, maar verspreid over de periode van de sedimentpuls. In de figuren is ook een indicatie van de dieptecontouren opgenomen en is het vasteland weergegeven met de groen gearceerde vlakken.

Het 2 mm areaal beslaat de spuikom, een deel van het Visjagersgaatje en een deel van de Boereplaat. Daarmee is het areaal zeer beperkt tot de directe omgeving van de spuikom. De maximale sedimentatie bedraagt 50 mm en bevindt zich op de plaat direct achter de banaanvormige golfbreker ten noorden van de spuikom. De sedimentatie in de havens ten westen van de spuikom (de Buitenhaven, de Waddenhaven en de Vissershaven), is gemiddeld circa 15 mm. Overigens is het op basis van het natuurlijk gedrag van de lokale slibfractie aannemelijk dat het slib dat neerslaat in de geulen binnen afzienbare tijd ook weer in resuspensie zal worden gebracht door de lokale hydrodynamica en uiteindelijk ook op de platen zal bezinken. De bezinking op de platen is vaak meer permanent van aard. Hier is de getijstrooming doorgaans te mild om tot resuspensie te leiden.



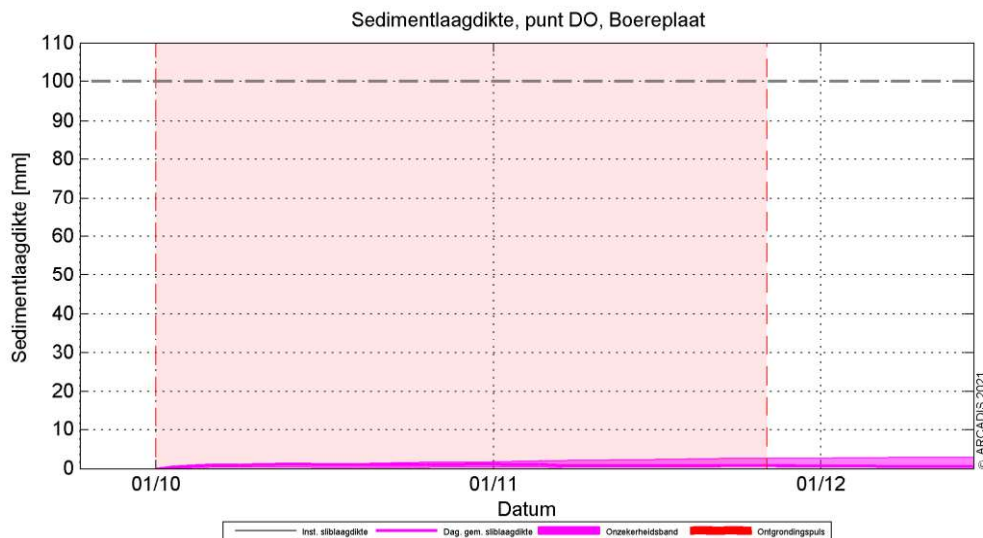


Figuur 6-8 Maximale sedimentatiesnelheid (slib) gedurende het beschouwde scenario.

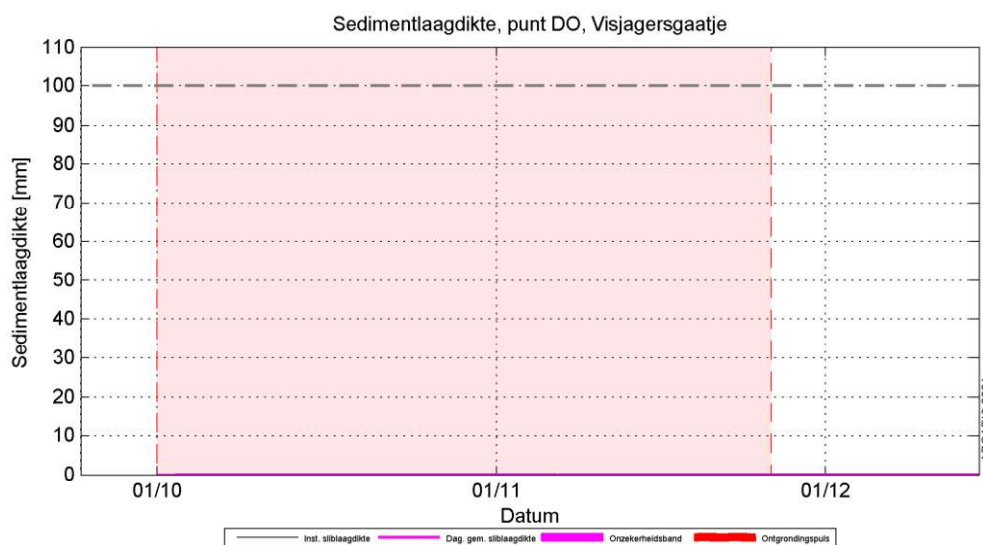
6.3.2 Bedekking met slib door de tijd

In Figuur 6-10 en Figuur 6-9 is het verloop van de sedimentlaagdikte in de tijd getoond. Hierin is de zwarte grafiek de instantane sliblaagdikte (10 minuten waarde) en magenta beschrijft de daggemiddelde waarde (24 uren waarde). De fluctuatie in de sliblaagdikte is echter relatief beperkt wat betekent dat de zwarte grafiek vrijwel altijd onder de magenta grafiek ligt. De magenta band die deze lijn omvat is de onzekerheidsband op basis van de uitkomsten van de scenario's 1a tot en met 1d. De verticale begrenzing van de onzekerheidsband is samengesteld door op elk punt in de tijd het minimum en maximum te selecteren van de 4 modelresultaten. Tot slot is het transparant rood gearceerde vlak de periode waarin de initiële sedimentpuls wordt gesimuleerd. Er is gekozen voor een constante begrenzing van de y-as in de grafieken. Zo kunnen de resultaten eenvoudiger vergeleken worden, maar kan het ook voorkomen dat (hoge) waarden tijdelijk buiten de begrenzing vallen, of nauwelijks waarneembaar in het geval van lage waarden.

Op de Boereplaat is de beperkte aanzanding waarneembaar. Figuur 6-9 laat zien dat hier ook na de sedimentpuls nog aanzanding in de tijd plaatsvindt, aan het einde van de simulatie is dit opgelopen tot zo'n 3 mm. In het Visjagersgaatje vindt geen wezenlijke sedimentatie van slib plaats, zoals zicht is in de grafiek in Figuur 6-10.



Figuur 6-9 Sedimentlaagdikte in de tijd op de Boereplaat.

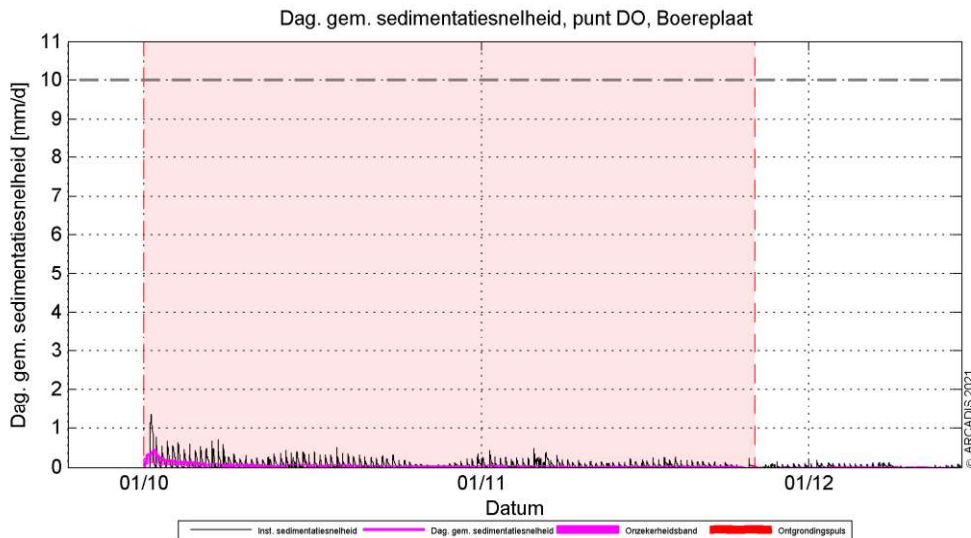


Figuur 6-10 Sedimentlaagdikte in de tijd in het Visjagersgaatje.

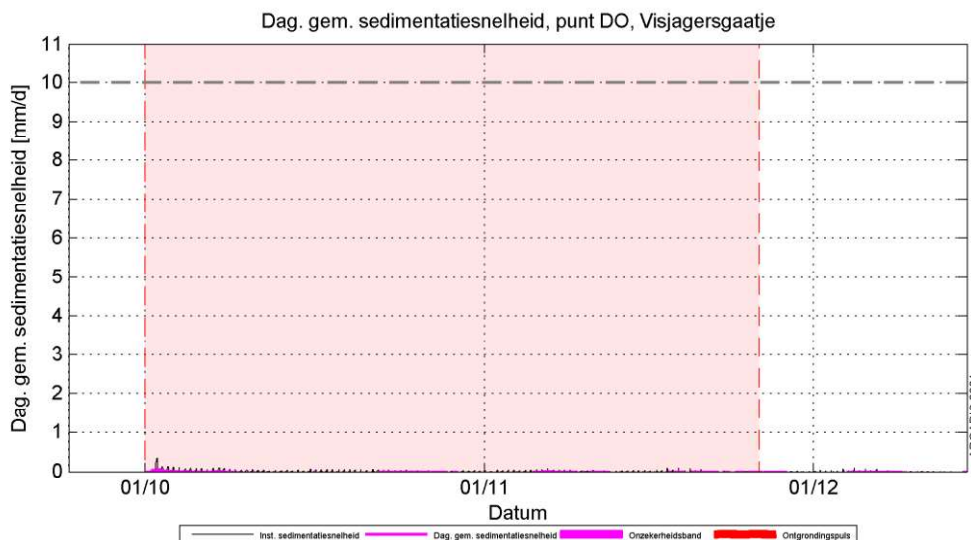
In Figuur 6-12 en Figuur 6-11 is het verloop van de sedimentatiesnelheid in de tijd getoond. Hierin is de zwarte grafiek de instantane sedimentatiesnelheid (10 minuten waarde) en magenta beschrijft de daggemiddelde waarde (24 uren waarde). De magenta band die deze lijn omvat is de onzekerheidsband op basis van de uitkomsten van de simulaties 1a tot en met 1d. De verticale begrenzing van de onzekerheidsband is samengesteld door op elk punt in de tijd het minimum en maximum te selecteren van de 4 modelresultaten. Tot slot is het transparant rood gearceerde vlak de periode waarin de initiële sedimentpuls plaatsvindt.

Figuur 6-12 en Figuur 6-11 tonen de sedimentatiesnelheid op de Boereplaat en in het Visjagersgaatje respectievelijk. Het sedimentatiegedrag ter hoogte van de Boereplaat is gedomineerd door de getijstrooming. De meeste sedimentatie vindt plaats tijdens de kentering van het tij. Daggemiddeld is dit echter maar een fractie van één mm/d. Op de overige

relevante locaties is geen significante sedimentatiesnelheid waarneembaar, en de sedimentatiesnelheid in het Visjagersgaatje illustreert dit.



Figuur 6-11 Sedimentatiesnelheid in de tijd op de Boereplaat.



Figuur 6-12 Sedimentatiesnelheid in de tijd in het Visjagersgaatje.

6.3.3 Bedekking met zand in ruimte en tijd

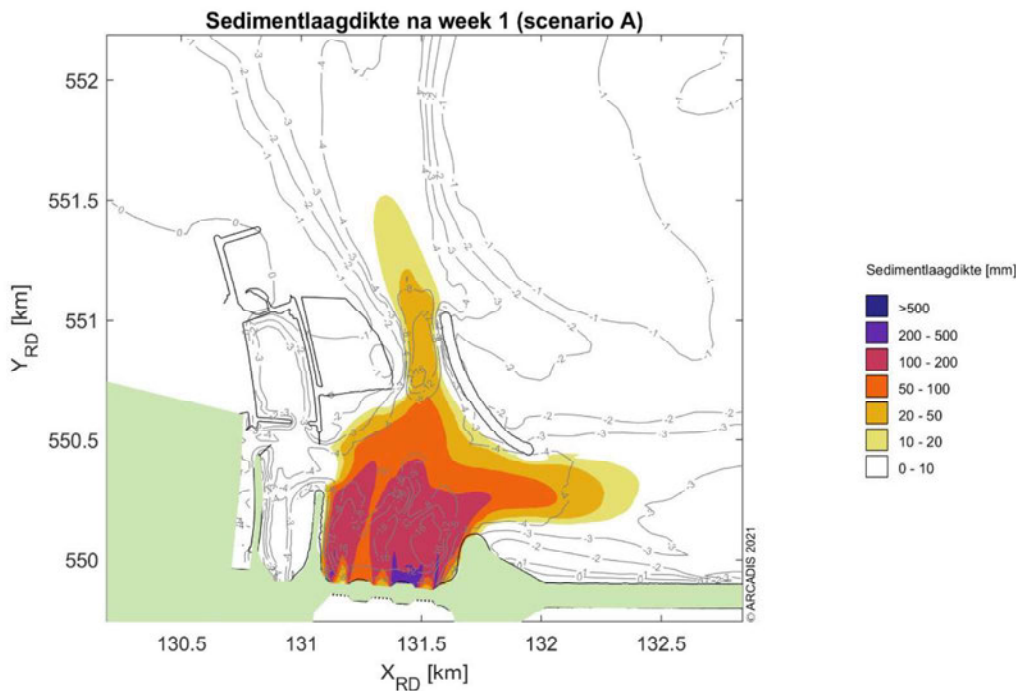
De zandfractie gedraagt zich wezenlijk anders dan de slibfractie, met name ten gevolge van de relatief fors hogere valsnelheid. Het gedrag van het grootste deel van de zandfractie is daarom meer begrensd in de ruimte tot het gebied in de directe omgeving van de spuirom. Om het gedrag toch goed in beeld te brengen is een detailmodel opgezet voor de buitenzijde van Den Oever (zie ook paragraaf 5.2).

Figuur 6-13 tot en met Figuur 6-16 tonen de sedimentlaagdikte na 1, 2, 7 en 13 weken na de initiële sedimentpuls, respectievelijk. Omdat een aanzienlijk deel van de zandfractie neerslaat tijdens de kentering van het tij en weer in suspensie komt bij de volgende getijcyclus, is de bedekking op een aantal momenten in de tijd getoond. In de eerste 2

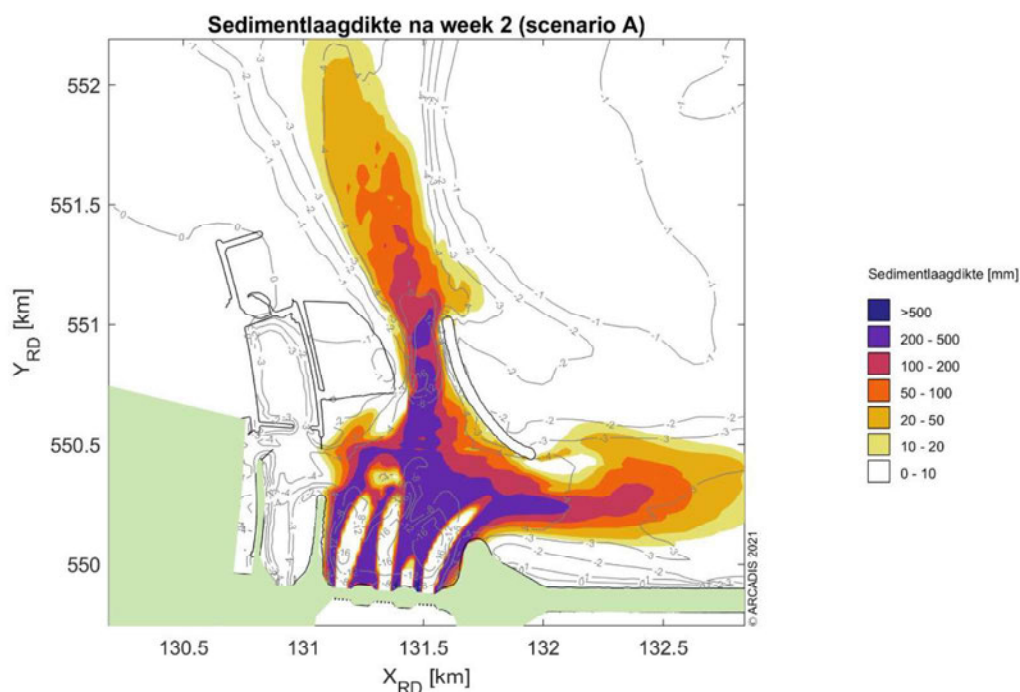
weken, wanneer het grootste deel van de sedimentpuls plaatsvindt slaat het materiaal direct bij de spuikom neer en zelfs binnen de spuikom (tussen de spuiacties door). Daarna beweegt het zand zich langzaam richting het Visjagersgaatje en in mindere mate in oostelijk richting langs de Afsluitdijk. De spuikom wordt als het ware weer 'schoon geblazen' door de heftig turbulente stroming daar.

Opgemerkt dient te worden dat het zand dat in oostelijk richting gaat, voornamelijk uit de meest oostelijk spuigroep (SG1.3) komt en uit de ontgrondingskuil hier direct voor. Mocht aanzanding op de Boereplaat niet gewenst zijn, kan er voor gekozen worden om geen materiaal te storten in de oostelijke ontgrondingskuil en eventueel zelfs SG1.3 niet in te zetten tijdens de initiële sedimentpuls.

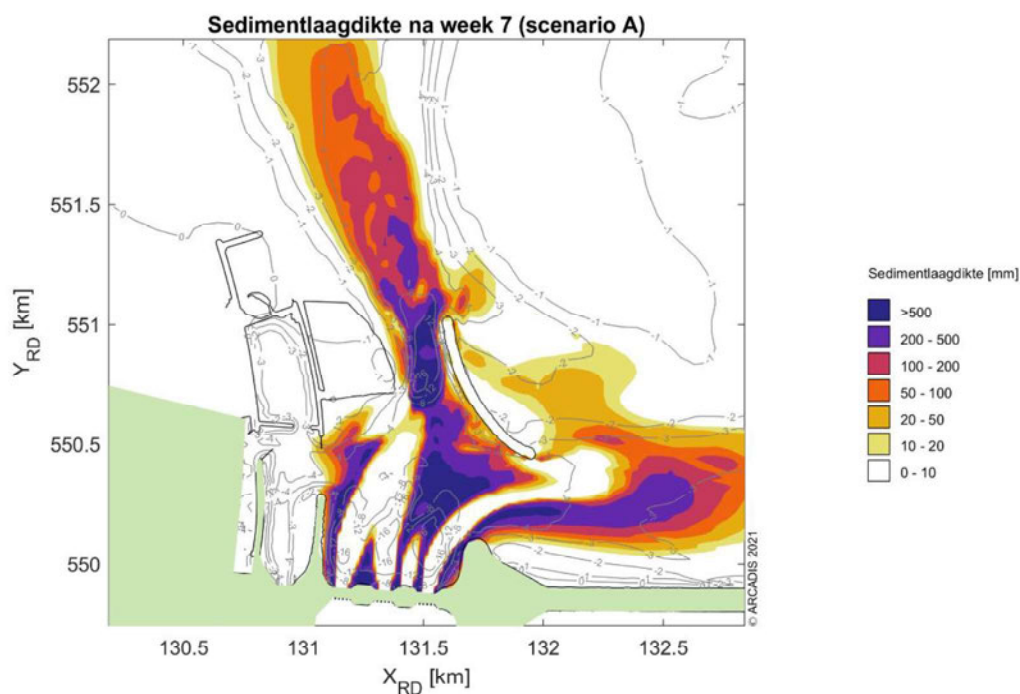
Na 13 weken is nog circa driekwart van het zandige volume van de sedimentpuls binnen een straal van 3 km van de spuikom aanwezig. De overige kwart is over een grotere lengte van met name de getijgeul verdeeld, wat leidt tot verwaarloosbaar kleine sedimentatiediktes en -snelheden. Op de platen kan de zandfractie nog in beweging worden gebracht door de wat extremere (storm)condities. Dit volume zal zich op de langere termijn zo nog wat meer verspreiden in de nabije omgeving. Op de diepe plekken zal deze aanzanding minder makkelijk in resuspensie komen, het is aannemelijk dat dit enkel met baggeren verwijderd kan worden.



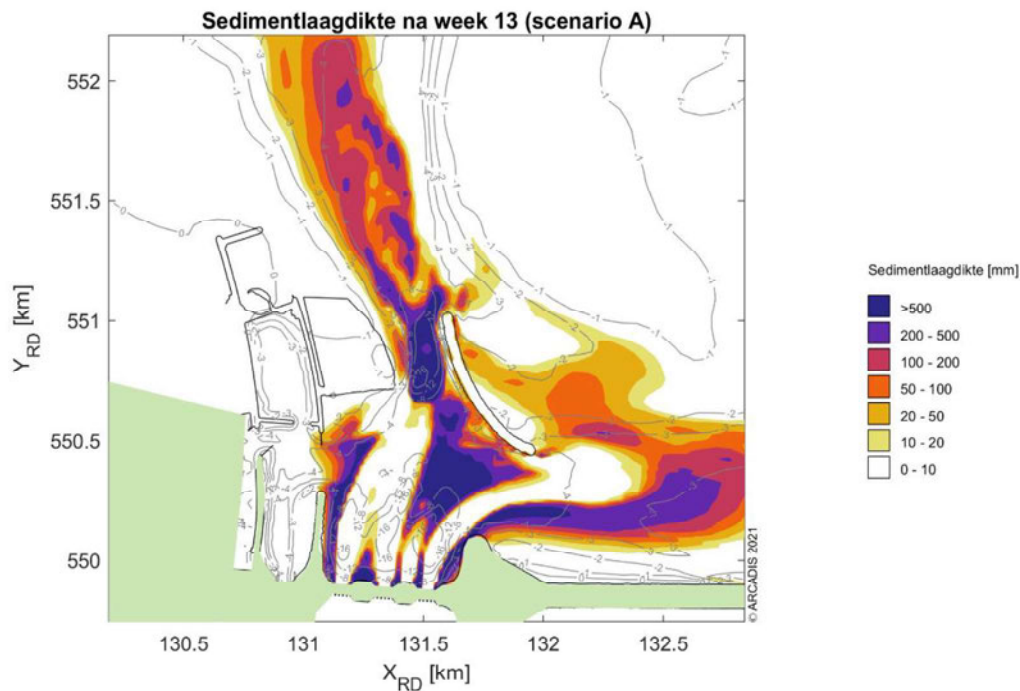
Figuur 6-13 Sedimentatie van de zandfractie na 1 week na de start van de sedimentpuls.



Figuur 6-14 Sedimentatie van de zandfractie na 2 week na de start van de sedimentpuls.

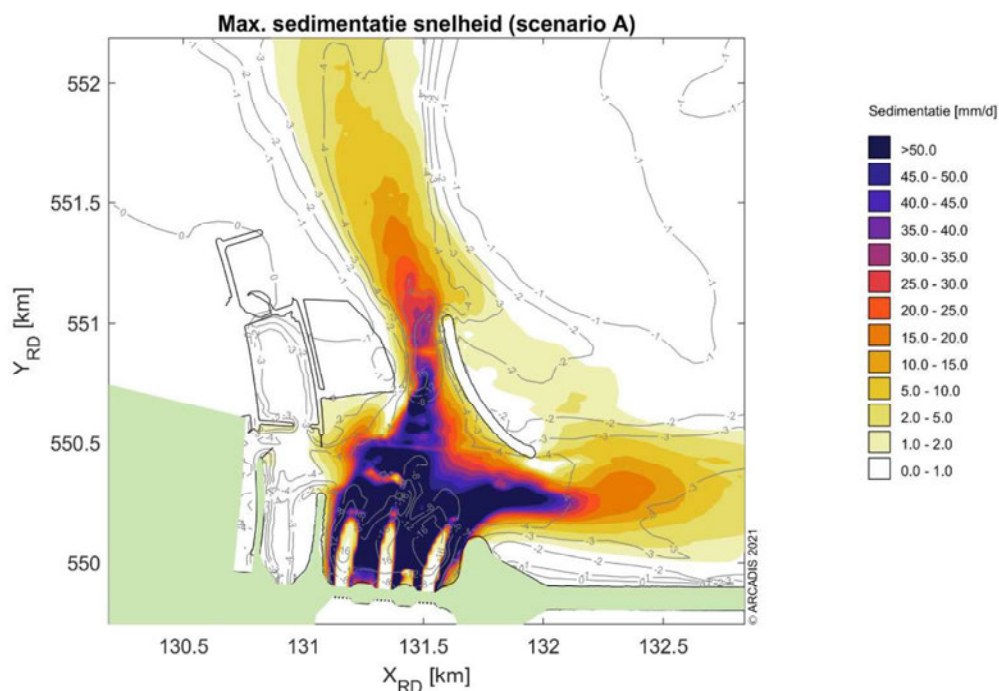


Figuur 6-15 Sedimentatie van de zandfractie na 7 week na de start van de sedimentpuls.



Figuur 6-16 Sedimentatie van de zandfractie na 13 week na de start van de sedimentpuls.

Figuur 6-17 toont de maximale sedimentatiesnelheid tijdens de initiële sedimentpuls. Deze snelheden treden niet simultaan in de tijd en ruimte op. In de eerste weken zal vooral sedimentatie plaatsvinden in de spuikom en direct erbuiten door het relatief hoge initiële aanbod aan materiaal. Daarna zal dit materiaal zich verder verplaatsen de getijgeul in en de plaat op in oostelijke richting.



Figuur 6-17 Maximale sedimentatiesnelheid tijdens de initiële sedimentpuls.

6.4 Gevolgen vrijkomen slib en zand vanuit de ontgrondingskuilen en het IJsselmeer

In het voorgaande hoofdstuk zijn de modelresultaten gepresenteerd van het vrijkomen van slib en zand uit de ontgrondingskuilen en uit het IJsselmeer. Het grootste deel van het sediment dat op deze wijze vrijkomt in de Waddenzee bestaat uit zand (zie paragraaf 5.3). De bevindingen zijn hieronder samengevat.

Vertroebeling

De vertroebeling die optreedt door het vrijkomen van slib is beperkt tot een toename van 2 tot 5 millimeter tot maximaal 10 kilometer vanaf de spuisluizen bij Den Oever. De toename van de concentraties vindt zowel plaats in de geulen als in het water boven het sublitoraal en de wadplaten. De hoogste concentraties treden op direct nabij de spuisluizen, in de dagen direct na het in gebruik nemen van de spuigroepen en de concentraties nemen daarna snel af.

Slibbedekking

De bedekking door sedimentatie van slib op de bodem vindt plaats over een veel kleiner gebied dan waar de vertroebeling optreedt, met een maximale sedimentlaagdikte tot 5 mm op een afstand van enkele kilometers vanaf de spuisluizen. De maximale sedimentatie op de wadplaten in de nabijheid van de spuisluizen is minder dan 2 mm. De sedimentatiesnelheden die optreden zijn overal zeer laag, met maximaal enkele millimeters per dag.

Zandbedekking

Het transport van zand is beperkt tot de geulen in de nabijheid van de spuisluizen, omdat alleen daar de stroomsnelheden voldoende hoog zijn om het zand te eroderen en te verplaatsen. De bedekking met zand is daardoor ook beperkt tot de geulen in de nabijheid van de spuisluizen. De maximale laagdikte en sedimentatiesnelheid die daarbij optreden zijn het hoogste tijdens de initiële sedimentpuls in de directe omgeving direct nabij de spuisluizen. De maximale sedimentatiesnelheden nabij de spuisluizen zijn dan meer dan 5 cm per dag. Het zand verplaatst gaandeweg verder van de spuisluizen door de geulen, zodat in de weken daarna lokaal laagdiktes tot 50 cm optreden.

Deze modelresultaten betreffen een realistisch worst-case scenario, waarbij sprake is van een doorgaande periode van spuien na de ingebruikname van de spuumiddelen. De kans dat zich zo'n langere periode van hogere afvoeren voordoet is niet zo groot, zodat in de praktijk het vrijkomen van zand en slib waarschijnlijk over een langere periode zal optreden. De gevolgen van het vrijkomen over een langere periode zijn in termen van de maximale waarden van vertroebeling en bedekking altijd kleiner dan de gevolgen die hierboven zijn beschreven. Voor de beoordeling van de gevolgen kunnen de uitkomsten van de berekeningen daarom als maatgevend worden beschouwd.

7 Ademen nieuwe ontgrondingskuilen

7.1 Inleiding

Tijdens periode waarin weinig wordt gespuid bouwt in de ontgrondingskuilen een laag slib op, die tijdens een periode met hoge afvoer uit de ontgrondingskuilen wordt 'geblazen'. Ook in de nieuwe ontgrondingskuilen zal dit 'ademen' gaan optreden, omdat ook deze ontgrondingskuilen bezinkputten vormen in perioden dat weinig of geen water wordt afgevoerd vanuit het IJsselmeer naar de Waddenzee. In paragraaf 3.4.4 is het ademen van de bestaande ontgrondingskuilen beschreven en dit komt overeen met de processen in de nieuwe ontgrondingskuilen. De nieuwe ontgrondingskuilen gaan meedoen met het 'ademen' zodra de werkzaamheden voor de aanleg (in de vorm van het baggeren en het aanbrengen van bodembescherming) zijn afgerond.

7.2 Omvang

De omvang van de ontgrondingskuilen is gekoppeld aan de omvang van de spuidebieten vanuit de betreffende spuigroep en wordt daarbij gecontroleerd door het aanbrengen van bestortingen. Voor het uitvoeren van de berekeningen is het een voorzichtig uitgangspunt om uit te gaan van de omvang van de drie bestaande spui groepen en hun ontgrondingskuilen. Hieraan worden twee nieuwe spui groepen toegevoegd, met bijbehorende ontgrondingskuilen. De omvang van de nieuwe ontgrondingskuilen bedraagt dan 2/3 van de bestaande ontgrondingskuilen. Eigenlijk zijn de nieuwe ontgrondingskuilen iets kleiner, omdat naar de zijanten toe sprake is van enige overlap met de bestaande ontgrondingskuilen.

De omvang van de sedimentatie in de gecombineerde en nieuwe ontgrondingskuilen zal groter zijn dan de sedimentatie in de bestaande ontgrondingskuilen, maar deze toename zal niet geheel evenredig zijn aan de toename van de omvang van de ontgrondingskuilen. Door de aanwezigheid van de nieuwe ontgrondingskuilen neemt namelijk wel het gebied toe waar slib onder rustige omstandigheden kan bezinken, maar de aanvoer van slib met het water verandert niet. Wat aan slib wordt aangevoerd, wordt nog efficiënter 'gevangen' in de bezinkput die wordt gevormd door de gecombineerde ontgrondingskuil. Omdat sprake is van een combinatie van verschillende processen (naast het direct bezinken uit de waterkolom kan bij beperkte zoetwaterafvoer bijvoorbeeld ook sprake zijn van de aanvoer van slib via estuariene circulatie) en het aantal waarnemingen aan de omvang van de slibsedimentatie in de ontgrondingskuilen, is het niet mogelijk om een verdere analyse en berekening uit te voeren van de omvang van slibsedimentatie. Daarom wordt uitgegaan van een omvang van 167% (5/3) van de slibsedimentatie ten opzichte van de huidige situatie. Deze omvang komt overeen met de bovengrens van de toename van het volume van de ontgrondingskuilen. In werkelijkheid zal de omvang naar verwachting kleiner zijn.

7.3 Gevolgen

De gevolgen van het ademen zijn bestaan uit twee onderdelen.

1. Tijdens de periode dat sedimentatie plaatsvindt in de ontgrondingskuilen nemen de slibconcentraties in het water af. De toename van de omvang van de slibsedimentatie door de twee nieuwe ontgrondingskuilen betekent dat deze afname van de slibconcentraties iets groter zal zijn. Dit betekent dat lagere slibconcentraties in de waterkolom optreden over een groter gebied rondom de spuisluizen bij Den Oever. Deze lagere concentraties zullen over het algemeen optreden in de voorjaars en zomermaanden, wanneer gemiddeld sprake is van lagere afvoeren.
2. Tijdens de periode dat erosie plaatsvindt vanuit de ontgrondingskuilen neemt de slibconcentratie in het water toe. Omdat de omvang van de slibsedimentatie groter is door de aanwezigheid van de twee nieuwe ontgrondingskuilen, worden de slibconcentraties iets hoger in een groter gebied ten opzichte van de huidige situatie.

Het ademen van de ontgrondingskuilen is een terugkerend proces dat altijd zal optreden zolang er wordt gespuid via de spui groepen. Ook wanneer in de toekomst het spuien onder vrij verval minder lang en minder vaak zal kunnen

plaatsvinden vanwege de zeespiegelstijging, zal het ademen optreden. Ook in dit situatie zal namelijk sprake zijn van een verschil in de stromingscondities bij de ontgrondingskuilen, tijdens perioden dat wel en dat niet wordt gespuid.

7.4 Gevolgen ‘ademen’ in combinatie met andere morfologische gevolgen

In theorie kan het ademen van de nieuwe ontgrondingskuilen samen optreden met de erosie vanuit de ontgrondingskuilen en de aanvoer van zand vanuit het IJsselmeer, in de periode na de afronding van de werkzaamheden en de ingebruikname van de nieuwe en de bestaande spuigroepen. Dit is afhankelijk van de noodzaak om water af te voeren vanuit het IJsselmeer in die periode. Indien na het gereedkomen van de nieuwe spuigroep met de bijbehorende ontgrondingskuilen enige tijd niet wordt of slecht beperkt wordt gespuid, dan kan in de nieuw ontgrondingskuilen slib sedimenteren. Op het moment dat veel water moet worden afgevoerd, zal zowel sediment vrijkomen dat is gestort in de bestaande ontgrondingskuilen, als zand vanuit het IJsselmeer worden aangevoerd en slib vrijkomen door het ademen vanuit de ontgrondingskuilen.

8 Verbreding/verdieping geulen Waddenzee

8.1 Inleiding

Bij de geulen in de buurt van het spuicomplex van Den Oever wordt de omvang bepaald door het getij en door het debiet dat vanuit het IJsselmeer wordt afgevoerd. De omvang van de getijdegeulen in de Waddenzee is namelijk gekoppeld aan de hoeveelheid water die er tijdens de vloed door naar binnen stroomt en bij eb weer naar buiten stroomt, zoals schematisch weergegeven in A1. Figuur 8-1. De hoeveelheid water die door de geulen nabij Den Oever stroomt is medeafhankelijk van de afvoer van het water dat wordt gespuid. Bij hoge afvoeren kan het debiet door de geul zodanig toenemen dat deze iets ruimer wordt, zoals schematisch aangegeven in A2 in Figuur 8-1.

Wanneer de afvoer vanuit het IJsselmeer naar de Waddenzee duidelijk toeneemt ten opzichte van de huidige situatie, kan de omvang van de getijdegeulen toenemen ten opzichte van de situatie zonder die afvoer, zoals schematisch is weergegeven in 2B in Figuur 8-1.

Twee ontwikkelingen die ook op de langere termijn van een tiental jaren spelen moeten hierbij ook worden beschouwd, om een realistische bepaling uit te voeren van de gevolgen.

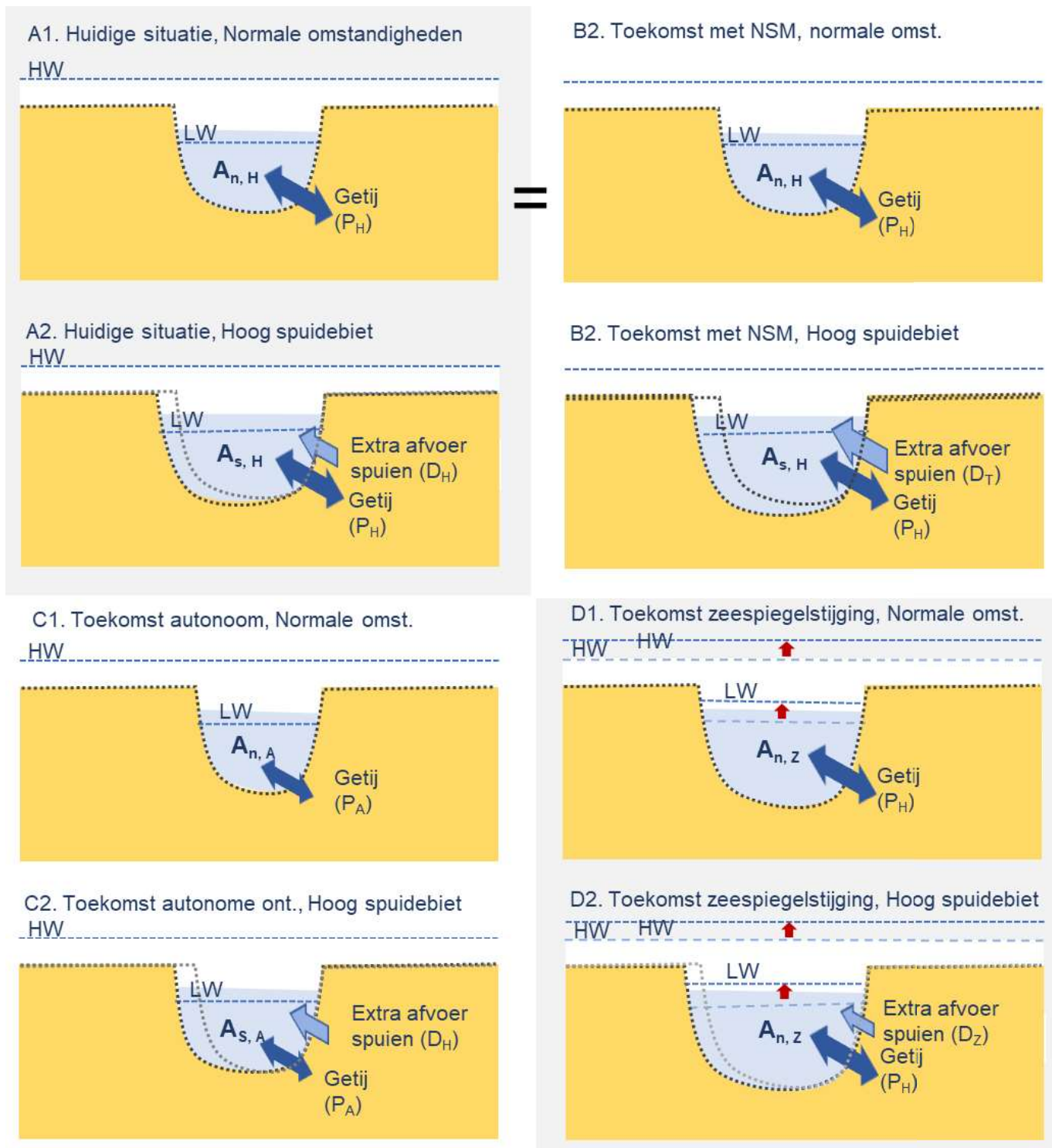
De eerste ontwikkeling betreft de autonome ontwikkeling van de morfologie. In paragraaf 3.4 is een beschouwing opgenomen van de morfologische veranderingen die de afgelopen 35 jaar zijn opgetreden in de omgeving van Den Oever. In het gebied is sprake van een afname van de omvang van de getijdegeul de Wierbalg, zodat de getijdegeul het Visjagersgaatje gaandeweg de rol van de Wierbalg heeft overgenomen. Ondertussen is ook de omvang van het Visjagersgaatje afgenomen, waarbij de geul smaller en dieper is geworden. Het intergetijdegebied (de Boerenplaat) is in dezelfde periode ook in omvang toegenomen. Ook is het sublitorale areaal voor de Afsluitdijk ondieper geworden. De stroming door het getij en vanwege het spuien is door deze veranderingen steeds meer in de geulen plaats gaan vinden. De afname van de omvang van het Visjagersgaatje betekent dat de relatieve bijdrage van het spuien aan de stroming door de geul is toegenomen. Het ligt in de lijn van de verwachting dat deze autonome ontwikkelingen nog verder door zullen gaan, maar de mate van deze veranderingen is niet bekend en ook ten minste deels afhankelijk van de snelheid waarmee de zeespiegel stijgt. De gevolgen van deze autonome ontwikkeling zijn schematisch weergegeven in C1 en C2 in Figuur 8-1, waarbij nog niet de invloed van de NSM is opgenomen.

De tweede ontwikkeling die van belang is voor de morfologische situatie in het gebied nabij Den Oever (en voor het kombergingsgebied van het Marsdiep en de gehele Waddenzee) is de snelheid waarmee de zeespiegel stijgt. Die snelheid is namelijk bepalend voor de ontwikkeling van de wadplaten en de geulen (Wang et al., 2018). In de huidige situatie heeft de sedimentatie in de omgeving van Den Oever een snelheid die meer dan voldoende is voor het bijhouden van huidige snelheid van zeespiegelstijging. Het gevolg hiervan is de hierboven beschreven ontwikkeling, waarbij de omvang van de wadplaten toeneemt en omvang van geulen afneemt. Bij een versnelling van de snelheid van zeespiegelstijging kan een situatie ontstaan waarbij de wadplaten deze snelheid niet meer kunnen volgen door sedimentatie. In dat geval zal ook de omvang van de getijdegeulen toenemen. De gevolgen van de zeespiegelstijging op de morfologie is schematisch weergegeven in D1 in Figuur 8-1.

De zeespiegelstijging heeft nog een ander invloed die belangrijk is voor het bepalen van de gevolgen, namelijk dat het spuienster steeds kleiner wordt, omdat de waterstanden in de Waddenzee toenemen. Effectief betekent dit dat het volume dat tijdens het laagwater wordt gespuid afneemt en dat een steeds groter volume met pompen naar de Waddenzee wordt getransporteerd. De morfologische gevolgen van het pompen zijn klein ten opzichte van het spuien, omdat het maximale momentane debiet van het pompen (het debiet per seconde) beduidend kleiner is dan het maximale momentane debiet van het spuien. De gevolgen van de zeespiegelstijging op het afvoerdebiet is schematisch weergegeven in C2 in Figuur 8-1, zonder dat daarbij de invloed van de NSM is opgenomen.

Om een uitspraak te kunnen doen over de gevolgen van de veranderingen in de spuidebieten op de omvang van de geulen, moeten aannames worden gedaan over de verschillende ontwikkelingen. De schematische weergegeven ontwikkelingen in B2, C2 en D2 in Figuur 8-1 moeten daarvoor worden gecombineerd. Daarbij dient rekening te worden gehouden met aannames die resulteren in relatief grote gevolgen, om op die manier tot een conservatieve, voorzichtige beschouwing van de gevolgen te komen. De grootste gevolgen van veranderingen in de spuidebieten treden op kleine getijdegeulen, omdat in die situatie de relatieve bijdrage van het spuien aan de stroming door de geul het grootst is. Het lastige bij het combineren van de ontwikkelingen is dat de invloeden van de autonome ontwikkeling

en van zeespiegelstijging op de morfologie tegengesteld zijn en dat de zeespiegelstijging daarbij ook nog eens gevolgen heeft voor de omvang van de spuidebieten. Bij het doorzetten van de huidige morfologische trend kan de omvang van het Visjagersgaatje nog verder afnemen. Het gevolg van de versnelde zeespiegelstijging is een afname van de omvang van de platen, gecombineerd met een toename van de omvang van de geul en een reductie van de spuidebieten. Beide veranderingen door de zeespiegelstijging betekenen dat de gevolgen van het spuien voor de omvang van het Visjagers afnemen ten opzichte van de huidige situatie.



Figuur 8-1 Schematische weergaven van de gevolgen van hoge spuidebieten op de omvang van de geul, onder de huidige omstandigheden (A), in de situatie met de nieuwe spuumiddelen (B), in de toekomst bij doorgaande autonome afname van de omvang van de geul (C) en bij versnelde zeespiegelstijging (D).

Een werkbare en conservatieve aanname is dat de omvang van het Visjagersgaatje onder invloed van de autonome ontwikkeling en de versnelde stijgende zeespiegel niet groter is dan de huidige situatie. In de schematische weergave in Figuur 8-1 betreft het de verandering van de situatie in A2 naar de situatie in B2.

8.2 Omvang

De omvang van de extra verbreding/verdieping van de geulen in de Waddenzee door de extra spuicapaciteit vanuit de nieuwe spuinmiddelen wordt bepaald door het extra spuivolume. De maximale toename bedraagt 67%, zoals in het voorgaande hoofdstuk is geconstateerd. De invloed van deze toename van de spuidebieten op de omvang van de geulen is afhankelijk van wijze waarop deze toename doorwerkt op de evenwichtsomvang van de geulen. Hierbij dient bedacht te worden dat alleen tijdens het getijvenster wordt gespuid, dat wil zeggen gedurende een het laatste deel van de vloedfase en het begin van de eb-fase. En hierbij ook gedacht te worden dat sprake is van het spuien van zoetwater in een zoutwateromgeving, waardoor het zoete water zal uitstromen over het zoute water.

De omvang van de dwarsdoorsnede van het Visjagersgaatje zoals getoond in Figuur 3-14 kan worden gebruikt om de omvang van het bijbehorende getijdeprisma te bepalen. Op basis van de relatie tussen het doorstroomoppervlak A (onder de gemiddelde zeestand) en het getijdeprisma P van $A = 70 \cdot 10^{-6} \times P$, zoals vastgesteld door Eijssink (1979), kan worden bepaald dat de omvang van het getijdeprisma rond de $43 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ bedraagt. De maximale afvoerdebieten per getij vanuit de spuisluizen van Den Oever hebben ongeveer dezelfde grootte van orde. Het is daarmee plausibel dat bij grote spuidebieten de stroming in de geulen nabij de spuisluis Den Oever merkbaar wordt beïnvloed. De reikwijdte van deze beïnvloeding is waarschijnlijk enkele kilometers

Worst-case zou de omvang van de getijdegeulen evenredig toenemen met de toename in de omvang van de maximale spuidebieten. Dit zou een toename van 67% inhouden van de omvang van de geul. Maar daarmee wordt geen recht gedaan aan het beperkt aantal keren dat dergelijke hoge afvoeren optreden, zoals weergegeven in Figuur 3-6. Omdat sprake is van een tijdelijke situatie met hoge afvoeren, zullen de geulen niet volledig in evenwicht komen met deze situatie, maar zal slechts een gedeeltelijk aanpassing optreden.

8.3 Gevolgen

De toename van de maximale afvoerdebieten heeft als gevolg dat de getijdegeulen tijdelijk in omvang toenemen. Het sediment dat daarbij vrijkomt wordt verderop in de geulen afgezet. Dat het sediment op de geulen wordt afgezet is het gevolg van het spuien tijdens het laagwater spuivenster. De waterstanden zijn op het moment van spuien dermate laag dat de wadplaten nog niet overstromen. Er is dus geen sprake van stroming naar de wadplaten die het sediment kan meevoeren. De toename van de omvang van de geulen door verbreding betekent dat omvang van de aangrenzende plaatgebieden tijdelijk afnemen. De verdieping van de geul levert geen afname van het areaal van de wadplaten.

De theoretisch maximale toename van de omvang van de geul met 67% is nog steeds kleiner dan de afname van de omvang van het Visjagersgaatje sinds de aanleg van de Afsluitdijk. a

9 Conclusies

Vrijkomen slib en zand vanuit de ontgrondingskuilen en het IJsselmeer

Als sediment uit de aan te leggen ontgrondingskuilen in de bestaande ontgrondingskuilen wordt gestort, zal het bij spuien vrijkomen in de Waddenzee. Tijdens het gebruik zal ook nog steeds sediment vrijkomen uit de ontgrondingskuilen. De totale omvang van het vrijkomen tijdens gebruik is minder dan de helft van het volume dat bij aanleg vrijkomt en het sediment komt geleidelijk vrij. De gevolgen van het vrijkomen van het sediment tijdens het gebruik zijn daarom minder groot dan het vrijkomen tijdens de aanleg. Daarom wordt het vrijkomen van het sediment tijdens de aanleg beschouwd. Door het vrijkomen van fijn sediment uit de ontgrondingskuilen neemt de troebelheid van het Waddenzee water toe. Ook zet zich extra sediment (fijn sediment en zand) af in geulen en op wadplaten.

De gevolgen van het vrijkomen van fijn sediment uit de ontgrondingskuil zijn berekend met een numeriek model, waarbij rekening is gehouden met een realistisch worst-case scenario wat betreft de aanleg werkzaamheden (realisatie van beide ontgrondingskuilen in één kalenderjaar), gevolgd door een periode met grote waterafvoer uit het IJsselmeer. Onder invloed van het vrijkomende sediment neemt de slibconcentratie in de Waddenzee vrijwel nergens toe met meer dan 50 mg/l. In feite bedraagt de toename op iets meer dan één kilometer al minder dan 20 mg/l. Deze toenames zijn kortdurend, ze treden op in de periode direct na ingebruikname van de spuisluisen.

Bij het bepalen van de ecologische effecten van sedimentatie zijn twee factoren van belang: de sedimentatiesnelheid en de totale dikte van de sedimentlaag. Het slib dat vrijkomt uit de ontgrondingskuilen wordt wat verder verspreid dan het zand, omdat de slibdeeltjes langer in de waterkolom aanwezig blijven. De sedimentatiesnelheid als gevolg van het vrijkomende slib bedraagt vrijwel nergens meer dan 0,5 mm/dag en de maximale laagdikte die zich afzet bedraagt op meer dan 1 kilometer afstand al minder dan 1 cm.

Het zand dat vrij komt blijft aanwezig in de geulen nabij de sluisen. De laagdikte door de sedimentatie van het zand is beduidend groter dan die van het slib. Maar deze omvang heeft dezelfde orde van grootte als de sedimentatie en erosie die van nature optreedt in dit type geulen, zoals in aangegeven in paragraaf 3.4.3.

Ademen ontgrondingskuilen

Ook door het ademen komt fijn sediment in de waterkolom tijdens spuien, waardoor de troebelheid toeneemt. Tijdens perioden waarin weinig wordt gespuid, bouwt in de ontgrondingskuilen een laag slib op, die tijdens een periode met hoge afvoer uit de ontgrondingskuilen wordt 'geblazen'. Dit gebeurt al sinds het ontstaan van de ontgrondingskuilen en speelt nog steeds in de gebruiksfase. De omvang van het ademen neemt toe als de nieuwe ontgrondingskuilen klaar zijn en de spuumiddelen in gebruik worden genomen. Het ademen van de nieuwe ontgrondingskuilen kan in theorie samen optreden met de erosie vanuit de bestaande ontgrondingskuilen en de aanvoer van zand vanuit het IJsselmeer. Indien na het gereedkomen van de nieuwe spuigroep met de bijbehorende ontgrondingskuilen enige tijd niet of slechts beperkt wordt gespuid, dan kan in de nieuwe ontgrondingskuilen ook slib sedimenteren. De omvang van die slibsedimentatie is wel kleiner dan in de situatie zonder dat in de ontgrondingskuilen is gestort, omdat er minder volume beschikbaar is voor de sedimentatie. Op het moment dat veel water moet worden afgevoerd, zal zowel sediment vrijkomen dat is gestort in de bestaande ontgrondingskuilen, als zand vanuit het IJsselmeer worden aangevoerd en slib vrijkomen door het ademen vanuit de ontgrondingskuilen.

De omvang van de nieuwe ontgrondingskuilen 2/3 van de bestaande ontgrondingskuilen. Eigenlijk zijn de nieuwe ontgrondingskuilen iets kleiner, omdat naar de zijanten toe sprake is van enige overlap met de bestaande ontgrondingskuilen. De omvang van de sedimentatie in de gecombineerde ontgrondingskuilen (bestaande + nieuwe) zal groter zijn dan de sedimentatie in de bestaande ontgrondingskuilen alleen, maar deze toename zal niet geheel evenredig zijn aan de toename van de omvang van de ontgrondingskuilen. Door de aanwezigheid van de nieuwe ontgrondingskuilen neemt namelijk wel het gebied toe waar slib onder rustige omstandigheden kan bezinken, maar de aanvoer van slib met het water verandert niet. Wat aan slib wordt aangevoerd, wordt nog efficiënter 'gevangen' in de bezinkput die wordt gevormd door de gecombineerde ontgrondingskuil. De slibsedimentatie in de ontgrondingskuilen treedt op door een combinatie van processen: naast het bezinken van het slib uit de waterkolom kan bij beperkte zoetwaterafvoer ook sprake zijn van de aanvoer van slib via estuariene circulatie. Het aantal waarnemingen aan de omvang van de slibsedimentatie in de ontgrondingskuilen is beperkt. Daarom is het niet mogelijk om een gedetailleerde analyse en berekening uit te voeren van de omvang van slibsedimentatie. We gaan uit van een toename omvang van 67 % (2/3) van de slibsedimentatie ten opzichte van de huidige situatie (100 %). Deze omvang

komt overeen met de bovengrens van de toename van het volume van de ontgrondingskuilen. In werkelijkheid zal de toename van de sedimentatie kleiner zijn.

Tijdens de periode dat sedimentatie plaatsvindt in de ontgrondingskuilen nemen de slibconcentraties in het water af. De toename van de omvang van de slibsedimentatie door de twee nieuwe ontgrondingskuilen betekent dat deze afname van de slibconcentraties iets groter zal zijn. Dit betekent dat lagere slibconcentraties in de waterkolom optreden over een groter gebied rondom de spuisluizen bij Den Oever dan in de huidige situatie. Deze lagere concentraties zullen over het algemeen optreden in de voorjaars en zomermaanden, wanneer gemiddeld sprake is van lagere afvoeren. Tijdens de periode dat erosie plaatsvindt vanuit de ontgrondingskuilen, neemt de slibconcentratie in het water toe. Omdat de omvang van de slibsedimentatie groter is door de aanwezigheid van de twee nieuwe ontgrondingskuilen, worden de slibconcentraties iets hoger in een groter gebied ten opzichte van de huidige situatie.

Het ademen van de ontgrondingskuilen is een terugkerend proces dat altijd zal optreden zolang er wordt gespuid via de spui groepen. Ook wanneer in de toekomst het spuien onder vrij verval minder lang en minder vaak zal kunnen plaatsvinden vanwege de zeespiegelstijging, zal het ademen optreden. Ook in die situatie zal namelijk sprake zijn van een verschil in de stromingscondities bij de ontgrondingskuilen, tijdens perioden dat wel en dat niet wordt gespuid.

Verbreding/verdieping geulen Waddenzee

De omvang van de getijdegeulen in de Waddenzee is gekoppeld aan de hoeveelheid water die er tijdens de vloed door naar binnen stroomt en bij eb weer naar buiten stroomt. Bij de geulen in de buurt van het spuicomplex van Den Oever wordt het volume dat door de geulen stroomt niet alleen bepaald door het getij, maar ook door het debiet dat vanuit het IJsselmeer wordt afgevoerd. Wanneer dit extra watervolume dat door de geulen wordt afgevoerd een substantiële omvang heeft ten opzichte van het getijvolume, dan zal de omvang van de geul toenemen. Het zand dat daarbij vrijkomt wordt dan elders in het gebied afgezet, onder andere op de aangrenzende wadplaten. In de huidige situatie, tijdens de aanleg en gedurende de eerste jaren van het gebruik, is alleen sprake van afvoeren via de spuisluizen die van invloed kunnen zijn op de omvang van de geulen tijdens piekafvoeren. Vanwege de relatief korte duur van de piekafvoeren zijn de morfologische veranderingen tijdelijk.

In paragraaf 3.4.2 is een beschouwing opgenomen van de morfologische veranderingen die de afgelopen 35 jaar zijn opgetreden in de omgeving van Den Oever. In het gebied is sprake van een afname van de omvang van de getijdegeul de Wierbalg, zodat de getijdegeul het Visjagersgaatje gaandeweg de rol van de Wierbalg heeft overgenomen. Ondertussen is ook de omvang van het Visjagersgaatje afgenomen, waarbij de geul smaller en dieper is geworden. Het intergetijdegebied (de Boerenplaat) is in dezelfde periode ook in omvang toegenomen. Tevens is het sublitorale areaal voor de Afsluitdijk ondieper geworden. De stroming door het getij en vanwege het spuien is door deze veranderingen steeds meer in de geulen plaats gaan vinden. En de afname van de omvang van het Visjagersgaatje betekent dat de relatieve bijdrage van het spuien aan de stroming door de geul is toegenomen. Het ligt in de lijn van de verwachting dat deze autonome ontwikkelingen nog verder door zullen gaan, maar de mate van deze veranderingen is niet bekend.

Ook bij een duidelijke toename van de afvoer vanuit het IJsselmeer via de spuisluizen, zullen geen blijvende effecten optreden op de omvang van de geulen in de Waddenzee. De aanpassingen aan de hoge afvoeren zullen namelijk nog steeds beperkt zijn tot de perioden met hoge afvoeren. De frequentie en omvang van deze afvoeren kan veranderen als gevolg van klimaatverandering. De omvang van dit soort tijdelijke aanpassingen is klein ten opzichte van autonome veranderingen van de geulen en platen die al hebben plaatsgevonden in het gebied. In feite betekent dit dat de morfologische veranderingen vooral door de autonome ontwikkelingen worden bepaald. Er is dus niet specifiek sprake van duidelijk effecten op de morfologie door het gebruik van de nieuwe spuumiddelen.

10 Referenties

- Arcadis, 2020. Baggerwerkzaamheden langsgoed Waddenzeezijde voor versterking Afsluitdijk; Achtergrondstudie huidige morfodynamiek, onderhoudsvakken en hydrodynamische modellering. Rapport.
- Buijsman, M. & Ridderinkhof, H. (2007). Long-term ferry-ADCP observations of tidal currents in the Marsdiep inlet. *Journal of Sea Research*. 57. 237-256. 10.1016/j.seares.2006.11.004.
- Deltares (2019). Morfologie Kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie. Beheerbibliotheek Waddenzee, versie 2019. Rapport met kenmerk 11203669-000-ZKS-0006.
- De Vries, J.J., 2015. On the local dynamics of currents in the estuarine Marsdiep basin. Porefschrift Universiteit Utrecht.
- Elias, E. & Stive, M. (2006). The Effect of Stratification on the Residual Flow in a Mixed-Energy Tide-Dominated Inlet. *Coastal Dynamics 2005 - Proceedings of the Fifth Coastal Dynamics International Conference*. 1-13.
- Elias, E. 2019. Een actuele sedimentbalans van de Waddenzee. Deltares rapport 11203683-001-ZKS-0002
- Kessel, van T. 2015. Opzet en toepassing slibmodel Waddenzee. Eindrapportage.1220102-000-0010 Deltares, Delft
- Levvel, 2020. 3D model Spuimiddel Den Oever (Mike3); Project Afsluitdijk. Levvel-rapport met documentnummer ASD-RAP-0959
- Rijkswaterstaat, 2016. Rijksinpassingsplan Afsluitdijk. Toelichting en regels. Januari 2016. Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Den Haag.
- Wang, Z.B., E. P. Elias, A. J. van der Spek and Q. J. Lodder. 2018 Sediment budget and morphological development of the Dutch Wadden Sea: Impact of accelerated sea-level rise and subsidence until 2100. *Netherlands Journal of Geosciences*, 97(3):183–214.
- Witteveen+Bos, 2015. Verdiepend effectonderzoek waterkwaliteit en morfologie. Definitief 3.0.

Colofon

MORFOLOGISCHE GEVOLGEN AANLEG EN GEBRUIK NIEUWE SPUIMIDDELEN AFSLUITDIJK
ACHTERGRONDRAPPORT BIJ DE PASSENDE BEOORDELING

KLANT

Levvel & Rijkswaterstaat

AUTEURS

[Redacted]

ONZE REFERENTIE

D10042961:78

DATUM

5 april 2022

Over Arcadis

Arcadis is een toonaangevend wereldwijd ontwerp- en consultancybureau voor de natuurlijke en gebouwde omgeving. Wij maken het verschil voor onze klanten en de maatschappij met doeltreffende, duurzame en digitale oplossingen. Met 27.000 mensen in meer dan 70 landen genereerden we in 2020 een omzet van €3,3 miljard. Wij ondersteunen UN-Habitat met kennis en expertise om leefomstandigheden te verbeteren in gebieden getroffen door de gevolgen van de klimaatverandering.

www.arcadis.com

Arcadis Nederland B.V.

Postbus 137
8000 AC Zwolle
Nederland



Arcadis. Improving quality of life

Volg ons op



[arcadis-nederland](https://www.arcadis-nederland.nl)



[arcadis_nl](https://twitter.com/arcadis_nl)



[ArcadisNetherlands](https://www.ArcadisNetherlands.nl)