

**Modelling alternatieve
loswal locaties**



Modellering alternatieve loswal locaties

Erik Hendriks, Filip Schuurman

1230860-000


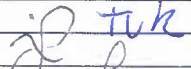


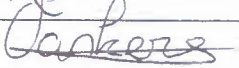
Titel
Modellering alternatieve loswal locaties

Opdrachtgever Havenbedrijf Rotterdam	Project 1230860-000	Kenmerk 1230860-000-ZKS-0008	Pagina's 54
------------------------------------------------	-------------------------------	----------------------------------------	-----------------------

Trefwoorden
maasmond loswal baggerspecie recirculatie retourstroming

Samenvatting
Dit rapport bespreekt resultaten van berekeningen van de retourstroming van baggerspecie vanaf de loswal naar de Maasmond als functie van loswallocatie en hydrodynamische omstandigheden. Deze resultaten geven inzicht in de dynamiek van het slibtransport in de kustzone rondom de Maasmond en bieden een essentieel kwantitatief kader voor de keuze van een alternatieve loswallocatie. Het verband tussen de afstand van de loswallocatie tot de Maasmond en de retourstroming van baggerspecie blijkt sterk te zijn en goed kwantificeerbaar. Het berekende retourpercentage voor de huidige loswal (op 8 km van de monding) is 36% voor het referentiejaar 2007. Een vergroting van deze afstand tot 17 km leidt tot een afname van het retourpercentage tot 20%. Het retourpercentage varieert slechts beperkt van jaar tot jaar (+/- 3%), terwijl de aanslibbing sterker varieert (+/- 20%). De retourstroming en het baggerbezwaar zijn gevoelig voor de zoetwaterafvoer door de Nieuwe Waterweg. Een afname van de afvoer van 25% leidt tot 25% minder aanslibbing en 5% minder retourstroming. Een toename van de afvoer van 25% leidt tot 28% meer aanslibbing en 4% meer retourstroming.

Referenties
Samenwerkingsovereenkomst DEK048

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	okt. 2017	Erik Hendriks, Filip Schuurman		Petra Dankers Thijs van Kessel		Frank Hoozemans	
							

Status
definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Achtergrond	1
1.2 Verspreidingslocaties voor de Nederlandse kust: de Loswallen	2
1.3 Aanleiding	3
1.4 Doelstelling	3
1.5 Leeswijzer	4
2 Aanpak	5
2.1 Literatuurstudie	5
2.2 Modelstudie	5
2.3 Analyse van resultaten	5
3 Literatuuroverzicht	7
3.1 Kennisoverzicht verspreiden slib op zee	7
3.1.1 Verspreidingslocaties	7
3.1.2 Wegstroming van slib vanaf verspreidingslocatie	8
3.2 Kennisoverzicht retourstroming van slib	9
3.2.1 Stutterheim (2002)	10
3.2.2 De Kok (2002)	11
3.2.3 HbR & RWS (2014)	11
3.3 Kennisleemtes	12
4 Hoeveelheden verspreid slib	13
4.1 Afbakening	13
4.2 Verspreid volume slibrijke baggerspecie periode 2000-2016	14
4.2.1 Data Rijkswaterstaat	14
4.2.2 Data Havenbedrijf Rotterdam	14
4.3 Percentage slib ($D < 63 \mu\text{m}$) in baggerspecie	16
4.4 Omrekenen van beunvolumes naar tonnen droge stof (tds)	17
5 Modelbeschrijving	19
5.1 Inleiding	19
5.2 Algemene beschrijving hydrodynamisch model	19
5.3 Algemene beschrijving slibtransportmodel	19
5.4 Modelschematisatie ZUNO-DD	20
5.5 Scenario's	23
5.5.1 Wel/niet baggeren en verspreiden in de Noordzee	23
5.5.2 Alternatieve stortlocaties	23
5.5.3 Rivierafvoer	24
5.5.4 Jaarafhankelijke stromingscondities	24
6 Resultaten en discussie	25
6.1 Inleiding	25
6.2 Huidige situatie	25
6.2.1 Hydrodynamica	25
6.2.2 Slib	26
6.3 Invloed van baggeren en storten	28

6.4	Invloed van stortlocatie	29
6.5	Variatie in het jaar en tussen verschillende jaren	36
6.6	Invloed van rivierafvoer	40
7	Analyse resuspensie uit Verdiepte Loswal	43
7.1	Introductie	43
7.1.1	Uitgangspunten berekening resuspensie	43
7.2	Berekening bodemschuifspanning	44
7.2.1	Geïdealiseerde berekening bodemschuifspanning	44
7.2.2	Berekening bodemschuifspanning op basis van modeldata	45
7.3	Berekening erosieflux	46
7.3.1	Vullen over rand Verdiepte Loswal	48
7.3.2	Kwalitatieve vergelijking erosieflux met modelresultaten	48
8	Conclusies	51
9	Literatuurlijst	53
	Bijlage(n)	
A	Omrekening beunvolumes naar TDS	A-1
B	Theoretische berekening schuifspanning	B-1
B.1	Formulering bodemschuifspanning	B-1
B.2	Formulering erosieflux	B-2
C	Zwevend stofconcentratie (in mg/l) op basis van remote sensing beelden 2013 – 2015 van het Maasmondgebied	C-1
D	Zwevend stofconcentratie (in mg/l) op basis van remote sensing beelden 2007 in de Noordzee	D-1

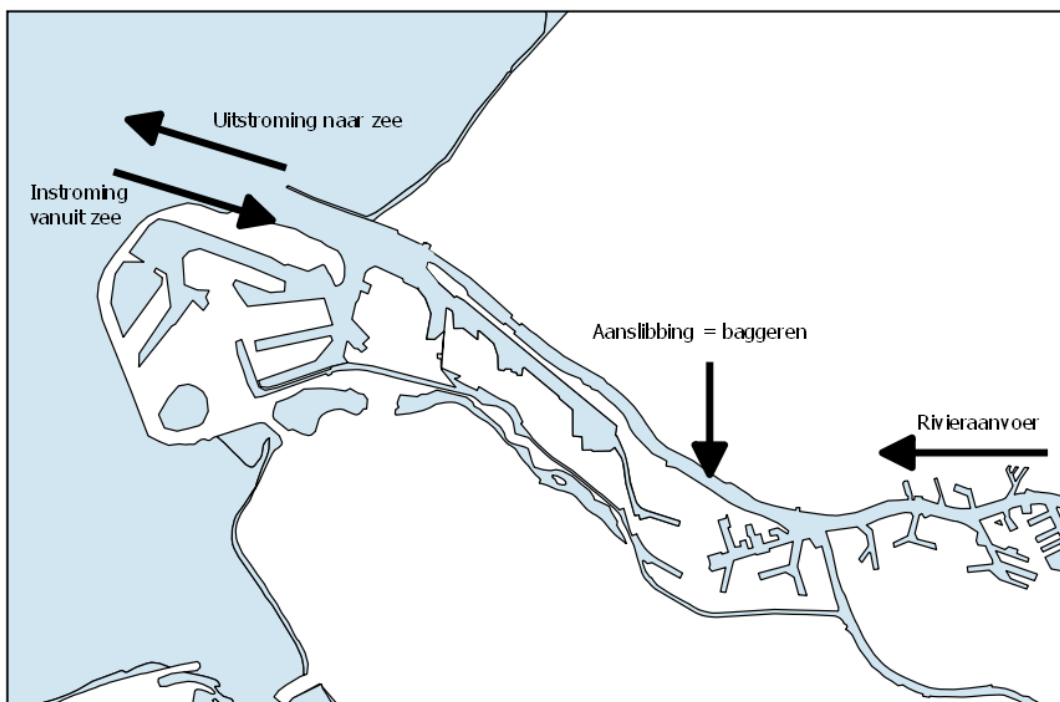
1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Jaarlijks bezinkt ca. 2,6 miljoen ton slib in de haven van Rotterdam. Een deel van dit sediment wordt aangevoerd vanuit de diverse Rijn- en Maastakken, en een deel komt de haven binnen vanuit zee. Het slib dat bezinkt in de haven van Rotterdam wordt gebaggerd en vervolgens verspreid op de Noordzee, op daartoe aangewezen locaties. Deze verspreidingslocaties worden in paragraaf 1.2 verder toegelicht.

Uit eerdere modelstudies is gebleken dat een aanzienlijk deel (circa 10 tot 45%, zie Hoofdstuk 3) van het verspreide sediment onder invloed van o.a. getijstroming terug wordt getransporteerd naar de haven van Rotterdam. Hier bezinkt het slib weer, waarop het wederom gebaggerd dient te worden. Het slib dat is verspreid op zee, maar daarna toch weer bezinkt in de haven van Rotterdam wordt de retourstroming genoemd. Vanuit een economisch oogpunt is het aantrekkelijk deze retourstroming te minimaliseren.

Bovenstaande betekent dat het baggerbezwaar in de haven van Rotterdam deels bepaald wordt door de verspreidingslocatie en stromingscondities. Het direct meten van de retourstroming is zonder het gebruik van tracers niet mogelijk, simpelweg omdat tijdens metingen niet te bepalen valt of slib al eerder is gebaggerd of dat het nieuw aangevoerd slib betreft. Met tracers is de directe meting van de retourstroming alleen goed mogelijk over kleine afstanden en korte periodes omdat anders teveel verdunning optreedt. De retourstroming over grotere afstanden en langere perioden kan daarentegen wel met verspreidingsmodellen worden gekwantificeerd.

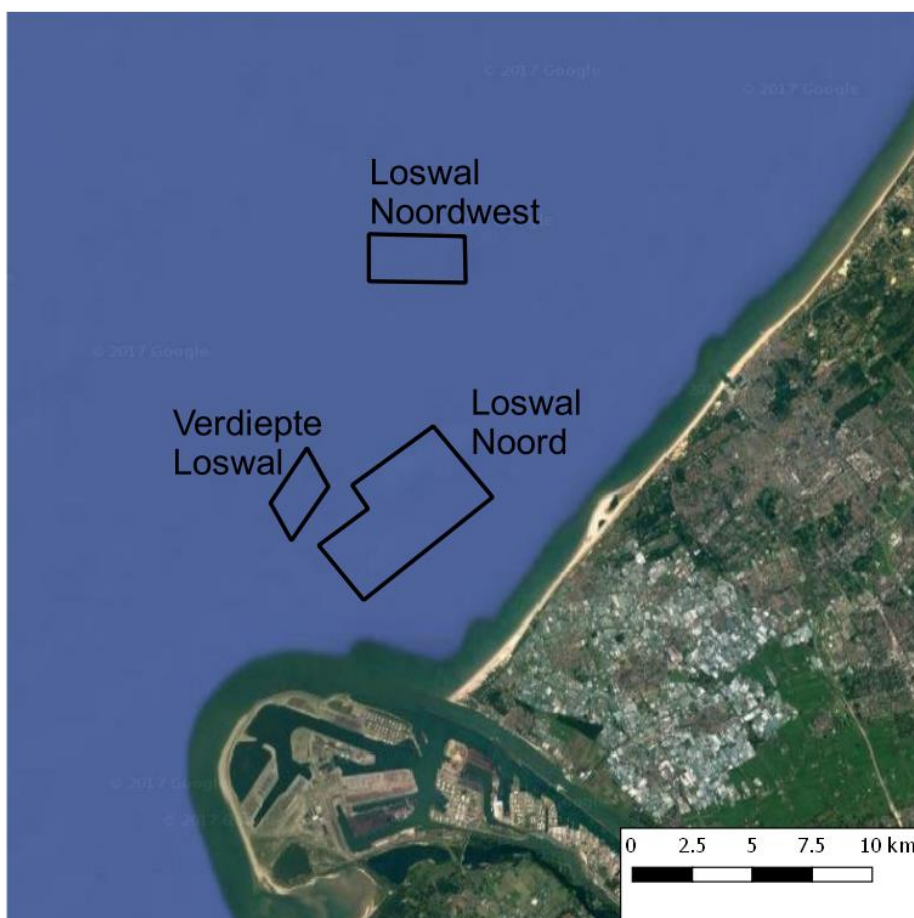


Figuur 1.1. De vier belangrijkste natuurlijke transportfluxen voor het opstellen van het sedimentbudget in de haven van Rotterdam. Het merendeel van het gebaggerde sediment wordt op zee verspreid en een klein deel wordt op land geborgen. Deze antropogene fluxen zijn hierin niet weergegeven.

Het sedimentbudget van de haven van Rotterdam wordt gestuurd door vier slibfluxen, weergegeven in Figuur 1.1: 1) sedimentinstroming vanuit de rivieren Rijn en Maas, 2) sedimentinstroming vanuit de Noordzee, 3) sedimentuitstroming naar de Noordzee, en 4) aanslibbing in de haven. Het sediment dat bezinkt in de haven zorgt voor verondieping van de haven en dient dus gebaggerd te worden. De baggerspecie van de Rotterdamse haven bestaat voornamelijk uit een mengsel van slib en zand. Het merendeel van het slib is schoon en wordt op de Noordzee verspreid. Een klein deel van het slib is vervuild en wordt op land geborgen in de Slufter. Als de baggerspecie hoofdzakelijk zand bevat, wordt dit verspreid binnen het kustfundament op een andere locatie dan de slibverspreidingslocaties.

1.2 Verspreidingslocaties voor de Nederlandse kust: de Loswallen

Voor de haven van Rotterdam is door de jaren heen gebruik gemaakt van verscheidene verspreidingslocaties. Deze zijn te zien in Figuur 1.2. Tussen 1961 en 1996 werd voor verspreiding van slib gebruik gemaakt van Loswal Noord, gelegen nabij de monding van de Nieuwe Waterweg. Nadeel van deze locatie was dat een relatief groot deel van de verspreide baggerspecie met de stroming terugkeerde naar de haven en dus opnieuw gebaggerd moest worden (Rijkswaterstaat, 2014). De geschatte terugstroming van het slib vanaf Loswal Noord werd geschat op 44% (Stutterheim, 2002).



Figuur 1.2 Overzicht van ligging verspreidingslocaties in Nederlandse kustzone. Loswal Noord is sinds geruime tijd buiten gebruik.

In 1996 is Loswal Noordwest in gebruik genomen. De grote afstand vanaf de Rijnmaasmonding zou een voordeel op moeten leveren door de lage terugstroming van slib, maar is ook een nadeel door de hoge vaarkosten die een significant deel van de totale onderhoudskosten uitmaken (HbR & RWS, 2014). De keuze van de verspreidingslocatie is dus een optimalisatieprobleem.

In 1998 is de Verdiepte Loswal in gebruik genomen als verspreidingslocatie voor baggerspecie uit de Rijn-Maasmonding en de haven van Rotterdam. Bij een verdiepte loswal wordt eerst zand gewonnen waarna in de daardoor ontstane put baggerspecie wordt verspreid (HbR & RWS, 2014). Vanaf 2009 wordt er alleen nog slibrijk sediment in de Verdiepte Loswal verspreid; baggerspecie die voornamelijk zand bevat wordt elders in het kustfundament verspreid.

1.3 Aanleiding

In het kader van de Passende Beoordeling en MER verdieping Nieuwe Waterweg is het effect van aanslibbing in het havengebied en de verspreiding van baggerspecie op de troebelheid in de kustzone berekend (Vijverberg et al., 2015). Een nieuw inzicht uit deze studie is dat de retourstroming van slib vanaf de Verdiepte Loswal naar het havengebied op de lange termijn (maanden tot jaren) aanmerkelijk groter is dan volgens in het verleden uitgevoerde studies gebaseerd op metingen en korte termijn modellen (dagen tot weken). Dit betekent dat het, in het kader van het beperken van de retourstroming, mogelijk aantrekkelijker is om verder uit de kust te verspreiden.

Het transport van slib – en daarmee ook de retourstroming – is sterk afhankelijk van de hydrodynamica rond de Maasmonding. Dit is echter een complex systeem, zowel wat hydrodynamica als morfologie betreft. Een beter begrip van dit systeem is gewenst om te begrijpen waarom er een grotere berekende retourstroming optreedt dan voorheen is afgeschat, en om daarnaast de invloed van de verspreidingslocatie te kunnen kwantificeren.

1.4 Doelstelling

Het doel van deze studie is het bepalen en begrijpen van de retourstroming van de verspreidingslocatie naar de haven van Rotterdam. In tegenstelling tot eerder uitgevoerde analyses is de insteek van deze studie om de retourstroom te evalueren op de lange termijn gericht. Met behulp van modellen kan voor meerdere jaren de aanslibbing worden berekend. Door naar de lange termijn te kijken, kan onderscheid worden gemaakt tussen verschillende factoren die een mogelijke invloed hebben op de retourstroming.

De begripsvorming die ontwikkeld wordt in deze studie kan worden aangewend om de verspreidingslocatie van baggerspecie te optimaliseren. Van de volgende factoren wordt verwacht dat zij een rol spelen bij de retourstroming van slib, deze worden op basis van modelresultaten geëvalueerd:

- Verspreidingslocatie slib
- Meteorologische condities
 - Wind- en golfklimaat voor verschillende jaren
 - Rivierafvoer

Om de invloed van de hiervoor genoemde factoren te beoordelen worden deze getoetst aan een basisscenario. Op basis daarvan kan de invloed van de verschillende factoren worden gekwantificeerd.

1.5 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 wordt de aanpak van deze studie beschreven. Hoofdstuk 3 & 4 bevatten de literatuurstudie met daarbij ook een overzicht van de verspreide hoeveelheden slib in de periode 2000-2016. Hoofdstuk 5 en 6 beschrijven de modelstudie en de resultaten daarvan. Hoofdstuk 7 behandelt de resuspensieflux vanaf de verdiepte loswal als functie van de (over)diepte ten opzichte van de omringende zeebodem. Het rapport wordt afgesloten met conclusies en aanbevelingen.

2 Aanpak

Deze studie bestaat uit twee delen: een literatuurstudie met data-analyse en een modelstudie. Een cruciaal onderdeel van de modelstudie is het duiden van de modelberekeningen. Hier zal ook kort op worden ingegaan in dit hoofdstuk.

2.1 Literatuurstudie

Ten eerste is er een korte literatuurstudie uitgevoerd. Hierbij is gekeken naar de volgende onderdelen:

- Overzicht van kennis met betrekking tot het verspreiden van gebaggerd slib op zee, rekening houdend met de verschillende verspreidingslocaties
- Overzicht van huidige kennis met betrekking tot de retourstroming van slib naar de Rotterdamse haven
- Overzicht en berekening van baggerbezwaar in Rotterdamse haven over periode 2000-2016

De eerste twee voornoemde punten worden behandeld in Hoofdstuk 3. Het derde punt wordt in Hoofdstuk 4 verder uitgewerkt.

2.2 Modelstudie

Volgend op de literatuurstudie is er een modelstudie uitgevoerd. Voor deze modelstudie wordt gebruik gemaakt van het Delft3D modelinstrumentarium. Allereerst worden er hydrodynamische berekeningen gemaakt met Delft3D-FLOW, die vervolgens worden toegepast in het waterkwaliteitsmodel Delwaq. Dit waterkwaliteitsmodel kan worden gebruikt om slibtransport te berekenen, waarbij ook rekening kan worden gehouden met baggeren en verspreiden van slib op vastgestelde locaties. De gebruikte modellen worden verder toegelicht in Hoofdstuk 5.

In de modelstudie zullen verschillende scenario's worden doorgerekend om de factoren zoals deze in §1.4 zijn gedefinieerd te kwantificeren. De resultaten van de verschillende scenario's worden geduid ten opzichte van een basisscenario. Als basisscenario is gekozen voor de hydrodynamische en meteorologische condities van het jaar 2007, en voor het hieruit berekende slibtransport. Dit is gedaan om de resultaten te kunnen vergelijken met de eerdere studies in het kader van de MER 'Verdieping Nieuwe Waterweg' (Vijverberg et al., 2015) en de MER Zandwinning (van der Kaaij et al., 2017). In deze studies zijn veranderingen in slibdynamica ten gevolge van geplande menselijke ingrepen getoetst aan het basisscenario van het jaar 2007.

Op basis van de modelberekeningen kan een inschatting worden gemaakt van het sedimentbudget en de retourstroming voor o.a. verschillende stromingscondities, rivierafvoeren en stortlocaties.

2.3 Analyse van resultaten

Een essentieel onderdeel van een modelstudie is het duiden van de berekende resultaten. Hiertoe worden de volgende twee aspecten gekwantificeerd middels berekeningen:

- Ten eerste zal op basis van de berekende slibtransporten een slibbalans op worden gesteld voor het Rotterdamse havengebied. Deze slibbalans wordt voor alle scenario's

opgesteld. Op basis hiervan kunnen de verschillen tussen de afzonderlijke scenario's worden gekwantificeerd.

- Ten tweede wordt de hoeveelheid slib die wordt geërodeerd vanuit de bodem berekend voor verschillende dieptes. Hiermee kan in worden geschat wat het effect is van een verdiepte verspreidingslocatie op de hoeveelheid slib die weer in suspensie komt na verspreid te zijn op de betreffende locatie. Het kwantificeren van deze term is van belang bij het inschatten van de geldigheid van de modelresultaten voor een verdiepte verspreidingslocatie. Deze berekening kan ook worden gebruikt om te beoordelen of het voordeel oplevert een verdiepte verspreidingslocatie niet tot aan de rand op te vullen, maar een overdiepte te laten bestaan.
- Niet beschouwd worden details van de configuratie van de put en de oriëntatie t.o.v. de dominante stroming. Hiervoor is de resolutie van het hydrodynamische model te laag. Voor meer details zie Hoofdstuk 5 en Figuur 5.3 hierin.

3 Literatuuroverzicht

In dit korte overzicht wordt ingegaan op de volgende hoofdpunten:

- Overzicht van kennis met betrekking tot het verspreiden van gebaggerd slib op zee, rekening houdend met de verschillende verspreidingslocaties
- Overzicht van huidige kennis met betrekking tot de retourstroming van slib naar de Rotterdamse haven
- Overzicht en berekening van baggerbezwaar in Rotterdamse haven over periode 2000-2016

De eerste twee hoofdpunten worden in twee aparte paragrafen behandeld. Ter afsluiting van de literatuurstudie worden de belangrijkste bevindingen kort samengevat. Het derde hoofdpunt komt aan bod in het volgende hoofdstuk.

Dit literatuuroverzicht betreft alleen de grootschalige verspreiding van slib vanaf de loswallen in de kustzone. Lokale verschijnselen in de toegangsheul en in de Nieuwe Waterweg, zoals de vorming en transport van 'fluid mud' (o.a. Winterwerp en Van Kessel, 2003) worden niet besproken. Ook de lokale uitwisseling van slib tussen de Nieuwe Waterweg en havenbekkens zoals de Botlek (De Nijs et al., 2009) door neervorming en dichtheidsstromingen blijft buiten beschouwing. Omdat de lokale resolutie van het grootschalige verspreidingsmodel ontoereikend is om deze mechanismen voor slibinvang goed te kunnen berekenen, valt het lokale transport- en depositiegedrag buiten de scope van deze studie. De gebiedsgemiddelde en langjarig gemiddelde slibinvang in het mondingsgebied is niettemin toch in overeenstemming met de waargenomen aanslibbing na een lokale aanpassing van de kritische schuifspanning voor erosie.

Hiernaast gaat dit overzicht specifiek over slibtransport en niet over allerlei hydrodynamische aspecten van de kustrivier. Hiervoor wordt verwezen naar De Boer et al. (2006). Tenslotte is dit overzicht niet bedoeld als een kritische beschouwing van bestaande literatuur. Een beschouwing van de nieuwe resultaten ten opzichte van eerdere inzichten vindt plaats in Hoofdstuk 6.

3.1 Kennisoverzicht verspreiden slib op zee

3.1.1 Verspreidingslocaties

De Rotterdamse haven en de vaargeul er naar toe slibben voortdurend aan, onder invloed van o.a. getijstroming, golven en rivieraanvoer (HbR & RWS, 2014). Door deze aanslibbing worden de havenbekkens en vaarwegen minder diep, wat problemen op kan leveren voor de scheepvaart. Om de haven op diepte te houden wordt er met regelmaat gebaggerd in de Rotterdamse haven. De baggerspecie die hierbij uit het havengebied wordt verwijderd wordt vervolgens, mits deze niet vervuild is, verspreid op zee. Van 1961 tot en met 1996 is hiervoor gebruik gemaakt van de Loswal Noord, waarvan de locatie ook al aangegeven was in Figuur 1.2. Omdat de Loswal Noord al sinds geruime tijd buiten gebruik is worden de studies die betrekking hebben op weg- en retourstroming van slib van deze locatie niet meegenomen in dit rapport.

Sinds 1996 wordt er slibrijk sediment verspreid op de Loswal Noordwest. Sinds 1998 vindt er ook verspreiding van slibrijk sediment plaats vanaf de Verdiepte Loswal. Aangezien deze verspreidingslocaties van belang zijn in het vervolg van deze studie worden ze hieronder beiden kort toegelicht:

Loswal Noordwest

Verspreidingslocatie voor slib, ca. 10 kilometer uit de kust ter hoogte van den Haag. Geen verdieping ten opzichte van natuurlijke ligging van zeebed.

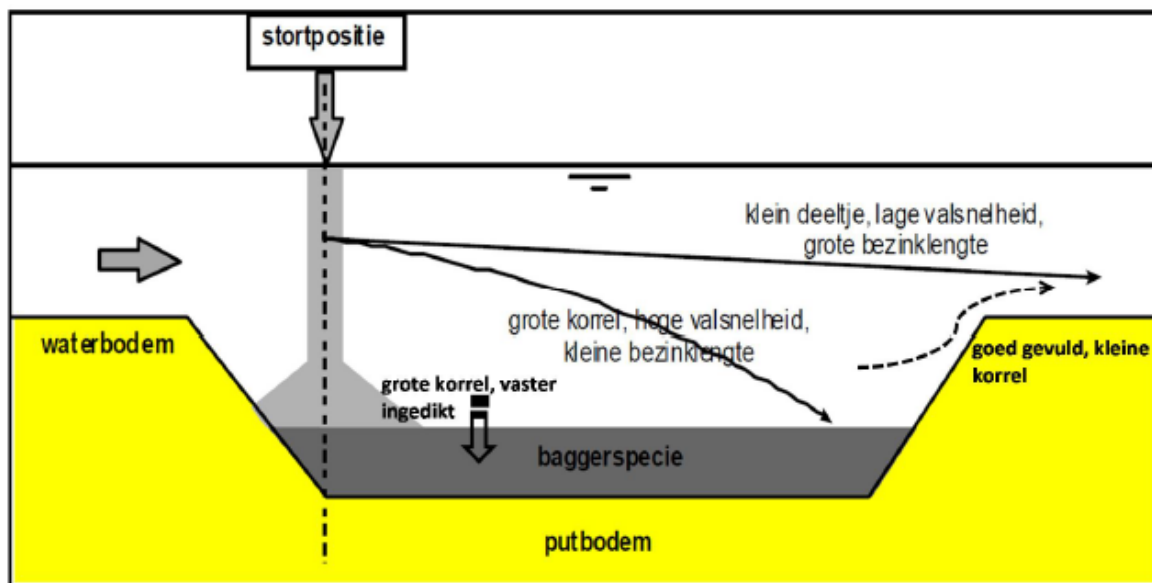
Verdiepte Loswal

Verspreidingslocatie voor slib, ca. 8 kilometer uit de kust ter hoogte van Hoek van Holland. Bestaat uit 6 verdiepte putten van elk 5 miljoen m³ met een diepte van 10 m, die ontstaan zijn door zandwinning. Het gebruik van deze verspreidingslocatie kan in twee verschillende fases worden opgedeeld: fase 1 bestond uit het ontgronden en vervolgens vullen van 2 putten, en heeft plaatsgevonden van 1998 tot 2006. Na evaluatie van fase 1 is een vergunning afgegeven om 4 extra putten volgens het zelfde procedé te ontgronden en te vullen. Deze 2^e fase vindt plaats van 2007 tot het heden. Het havenbedrijf benut ca. 30% van de baggerspeciereizen met een retourreis zand. Naast het economisch voordeel van de Verdiepte Loswal is een lagere mobiliteit van het slib in de verdieping, en dus minder terugstroming een groot voordeel van een verdiepte stortlocatie. Daarnaast was de verwachting dat de putten na opvulling met slib zich op natuurlijke wijze zouden bedekken met zand. De natuurlijke sedimentatie en bedekking door zand bleek echter zeer gering (HbR & RWS, 2014).

Naast slibrijk sediment wordt er ook zandig sediment uit de haven – en voornamelijk vaargeul – gebaggerd. In 2009 is besloten zandige baggerspecie te verspreiden binnen het kustfundament. Volgens beschikbare data is de zandige specie vooral van 2009 tot en met 2011 binnen het kustfundament verspreid (HbR & RWS, 2014). Hierna neemt dit volume weer af, maar niet tot nul.

3.1.2 Wegstroming van slib vanaf verspreidingslocatie

Het verspreiden van slib op de loswallen gebeurt door middel van het openklappen van de laaddeuren van het beun van een sleephopperzuiger. Dit proces is schematisch weergegeven in Figuur 3.1. In deze figuur zijn de belangrijkste kenmerken benoemd die een rol spelen bij het verspreiden van baggerspecie in een put in een gebied met stroming (HbR & RWS, 2014).



Figuur 3.1 Schematische weergave van het stortproces van baggerspecie in een verdiepte put.

Het meeste slib dat op deze manier wordt verspreid blijft niet achter op de loswal zelf. In verschillende studies zijn er schattingen gemaakt van de wegstroming van slib: het percentage van slib dat op de loswallen wordt verspreid maar er niet achterblijft. Voor Loswal Noordwest is een gemiddeld wegstroompercentage berekend van 78%, op basis van lodingen (Stutterheim, 2002). Uit theoretisch onderzoek volgt een wegstroompercentage voor de Verdiepte Loswal van 45-65% (HbR & RWS, 2014). Dit is opgebouwd uit de volgende 3 termen:

- Wegstroming tijdens verspreiden: ca. 3%
- Wegstroming direct na verspreiden: 10-20%
- Wegstroming tijdens stormcondities: 30-40%

Op basis van stortvolumes en lodingen is er een inschatting gemaakt van het daadwerkelijke wegstroompercentage vanaf de Verdiepte Loswal. De eerste periode nadat een put in gebruik is genomen is het wegstroompercentage ordegrrootte 50%. Als de put bijna vol is (sliboppervlak minder dan 3m dieper dan rand van de put) neemt dit wegstroompercentage sterk toe: berekende waarden variëren tussen de 80 en 90%. Dit verklaart ook waarom het totaal aan gestort baggerslib (100 miljoen m³) een veelvoud is van het totaal aan gewonnen zand: 100 om 31 miljoen m³ (Dankers, 2015).

3.2 Kennisoverzicht retourstroming van slib

De eerder genoemde verspreidingslocaties liggen relatief dicht bij de Rotterdamse haven, wat voornamelijk voortkomt uit economische overwegingen. Hoe dichter de verspreidingslocatie bij de haven van Rotterdam gelegen is, des te korter is de vaartijd voor baggerschepen voordat zij bij de verspreidingslocatie zijn. Dit levert een direct economisch voordeel op. Aan de andere kant kan een verspreidingslocatie die nabij het havengebied ligt ook leiden tot een grotere retourstroming, wat het economische voordeel weer teniet zou doen.

In het verleden zijn er verscheidene studies uitgevoerd naar de retourstroming vanaf verschillende verspreidingslocaties naar het havengebied. Hier worden de relevante uitkomsten van de verschillende studies samengevat:

In dit rapport gaat het vaak over de retourstroming. Deze is als volgt gedefinieerd:

De retourstroming is het deel van de op de loswal verspreide baggerspecie dat terugstroomt naar de haven en opnieuw gebaggerd moet worden. De retourstroming wordt uitgedrukt als percentage (PRS in %) van het totale baggerbezwaar (B) of als massaflux (FRS in Mton/jaar). Er geldt: $FRS = PRS \times B$. Algemeen geldt: hoe dichter de loswal bij de haven ligt, des te groter is de retourstroming. In dit rapport wordt dit verband gekwantificeerd voor het Maasmondgebied.

De andere bijdrage aan het baggerbezwaar is de natuurlijke slibflux vanuit de zee en de rivier. Veelal is deze natuurlijke bijdrage dominant, tenzij de loswal ongunstig is gesitueerd. In tegenstelling tot de retourstroming is de natuurlijke bijdrage onafhankelijk van de locatie van de loswal. De retourstroming en de natuurlijke bijdrage zijn allebei afhankelijk van de stromingscondities beïnvloed door getij, wind en zoetwaterafvoer. In dit rapport worden ook deze verbanden gekwantificeerd.

Er zit ook een tijdsaspect aan de retourstroming. Direct na verspreiding is de retourstroming nog nul, maar deze neemt toe in de tijd naarmate meer van verspreide baggerspecie de haven bereikt. Dit kan snel gebeuren via een korte weg voor slib dat in suspensie blijft, maar ook langzaam via een omweg inclusief sedimentatie van slib op de zeebodem en resuspensie. Uiteindelijk neemt de retourstroming niet verder toe omdat de rest van de baggerspecie via andere transportpaden verdwenen is uit de wijde omgeving van het Maasmondgebied. Dit rapport beschouwt het evenwichtspercentage van de retourstroming. Havenonderhoud en de verspreiding van baggerspecie is immers een continu proces. Dit betekent wel dat het effect van het verplaatsen van de loswal pas na verloop van tijd zichtbaar wordt in het baggerbezwaar. Na een jaar heeft het nieuwe evenwicht zich grotendeels ingesteld.

3.2.1 Stutterheim (2002)

Voor deze studie is van 1995 tot 2002 onderzoek uitgevoerd in twee loswallen, Loswal Noord en Loswal Noordwest. Dit betrof biologisch, chemisch, toxicologisch en fysisch onderzoek. In deze studie zijn de effecten van slibverspreiding op Loswal Noordwest geëvalueerd, waarbij met name gekeken is naar de wegstroming van slib, de retourstroming en ecologische effecten. Het laatste aspect zal hier niet nader worden toegelicht.

De retourstroming van slib vanaf Loswal Noordwest is in dit onderzoek op twee verschillende manieren berekend. Dit is berekend als percentage van de totale hoeveelheid verspreid slib:

- Met behulp van modelberekeningen: het retourpercentage is bepaald op 22%
- Met behulp van lodingen: het retourpercentage is bepaald op 27%

Het slibtransport nabij de bodem op Loswal Noordwest is onderzocht door slibtransport te meten op 15 en 55 cm boven de zeebodem op deze locatie. De resttransportvector van slib is bij de bodem naar het zuiden toe gericht. Van het slibtransport treedt dan ook 63,1% in zuidelijke richting op. Er kan dus retourtransport naar de haven en vaargeul plaatsvinden, ondanks het dieptegemiddeld noordwaarts gerichte resttransport van slib in de kustzone. 62,4% van het transport vond in 6% van de tijd plaats. Het retourtransport tijdens stormen speelt een belangrijke rol, naast het meer gestage aanslibben onder relatief rustige omstandigheden.

De retourpercentages zijn dezelfde ordegrrootte en worden in een later stadium ook vergeleken met nieuw gedane berekeningen.

3.2.2 De Kok (2002)

In deze studie is het getijafhankelijk verspreiden van baggerspecie onderzocht op basis van een modelstudie. Baggerspeciéstoringen bij eb- en vloedkentering zijn onderzocht voor Loswal Noord en Noordwest. Op basis van numerieke modelberekeningen is het retourpercentage vanaf de Loswal Noordwest berekend op 13% +/- 6,5%. Bij deze modelberekeningen moet echter wel het volgende worden opgemerkt:

- Modeltijd is relatief kort, met een modeltijd van 20 dagen
- Model rekent alleen met slib dat in begin van modelberekening op verspreidingslocatie gestort wordt
- Invloed van storm is alleen via een extra windterm in hydrodynamica meegenomen. Er wordt dus geen rekening gehouden met invloed van golven.

Deze beperkingen zijn een logisch gevolg van de toenmalige status van numerieke modellen. Onder voorbehoud van de genoemde beperkingen blijkt echter wel uit modelresultaten dat het retourpercentage afneemt als er gestort wordt bij:

- Beginnende vloedstroming
- Wind uit zuidwestelijke richting
- Lage rivierafvoer.

De verklaring voor het laatste punt ligt in de dichtheidsgradiënt ten gevolge van de uitstroming van de Rijn in de Noordzee (in de zogenaamde ROFI = region of freshwater influence). Bij een hogere rivierafvoer is er een grotere dichtheidsgradiënt en dus ook een sterkere bodemstroming richting de Maasmond.

3.2.3 HbR & RWS (2014)

In deze rapportage is de effectiviteit van het verspreiden van baggerspecie op de Verdiepte Loswal geëvalueerd. In deze studie zijn o.a. de economische aspecten van het gebruik van deze loswallocatie bestudeerd. Ook de retourstroming van slib wordt in dit rapport behandeld.

In de 1e fase van het gebruik van de Verdiepte Loswal zijn verschillende onderzoeksmethoden toegepast om de vermoede retourstroom vanuit Loswal Noord, Loswal Noordwest en de Verdiepte Loswal aan te tonen en te kwantificeren. Deze onderzoeksmethoden zijn: modelstudies (De Kok, 2002, zie ook paragraaf 4.2.2), meten met Medusa (Multi Element Detector System for Underwater Sediment Activity) en tracer praktijkproeven. In alle uitgevoerde onderzoeken is geen significante verandering in hoeveelheden baggerspecie in het Rijnmondgebied aangetoond. Op basis hiervan kunnen geen conclusies getrokken worden over het bestaan van een retourstroming en dus ook niet over een af- of toename van de retourstroming.

In de 2e fase is in 2007 een tracer praktijkproef uitgevoerd. Deze proef heeft geen kwantitatieve resultaten opgeleverd betreffende retourstroom of wegstroming van geloste baggerspecie. Hier moet bij worden opgemerkt dat tracer praktijkproeven lastig uitvoerbaar zijn, nog los van de complexiteit van het hydrodynamische en morfologische systeem rond de Maasmonding.

3.3 Kennisleemtes

Het onderzoek dat vanaf de jaren 80 tot heden is uitgevoerd heeft al veel inzichten opgeleverd met betrekking tot het verspreiden van slib op zee. Er zijn echter nog aspecten die nader onderzocht moeten worden. Deze zijn geïdentificeerd als:

- Invloed van golven en wind op de resuspensie van slib; en dus ook op de retourstroming.
- Invloed van hoge en lage rivierafvoeren op retourstroming van slib, rekening houdend met de dichtheidsverschillen die door meer/minder zoetwaterafvoer ontstaan.
- Kwantificeren van de retourstroming van de Verdiepte Loswal naar het havengebied, rekening houdend met natuurlijke variabiliteit in slibconcentraties in de Noordzee.

4 Hoeveelheden verspreid slib

Het tweede gedeelte van de literatuurstudie bestaat uit het opstellen van een overzicht van de verspreide hoeveelheden baggerspecie in de periode 2000-2016. Dit overzicht is gebaseerd op data die door Rijkswaterstaat en Havenbedrijf Rotterdam aangeleverd is. Het doel van dit overzicht is tweeledig: ten eerste dient het als validatie van de Delwaq modelresultaten. Ten tweede geeft dit overzicht een globaal inzicht in het af- of toenemen van het baggerbezwaar in de Rotterdamse haven in de periode 2000-2016.

Onderstaand zal eerst een afbakening worden gemaakt van het baggerbezwaar en welk gedeelte daarvan als relevant wordt beschouwd voor deze studie. Daaropvolgend wordt de aangeleverde data kort besproken. Hierna volgt een omrekening van kubieke meters baggerspecie naar droge stof slib. Het laatste is noodzakelijk voor een juiste vergelijking met Delwaq, omdat het model rekent met droge stof slib.

4.1 Afbakening

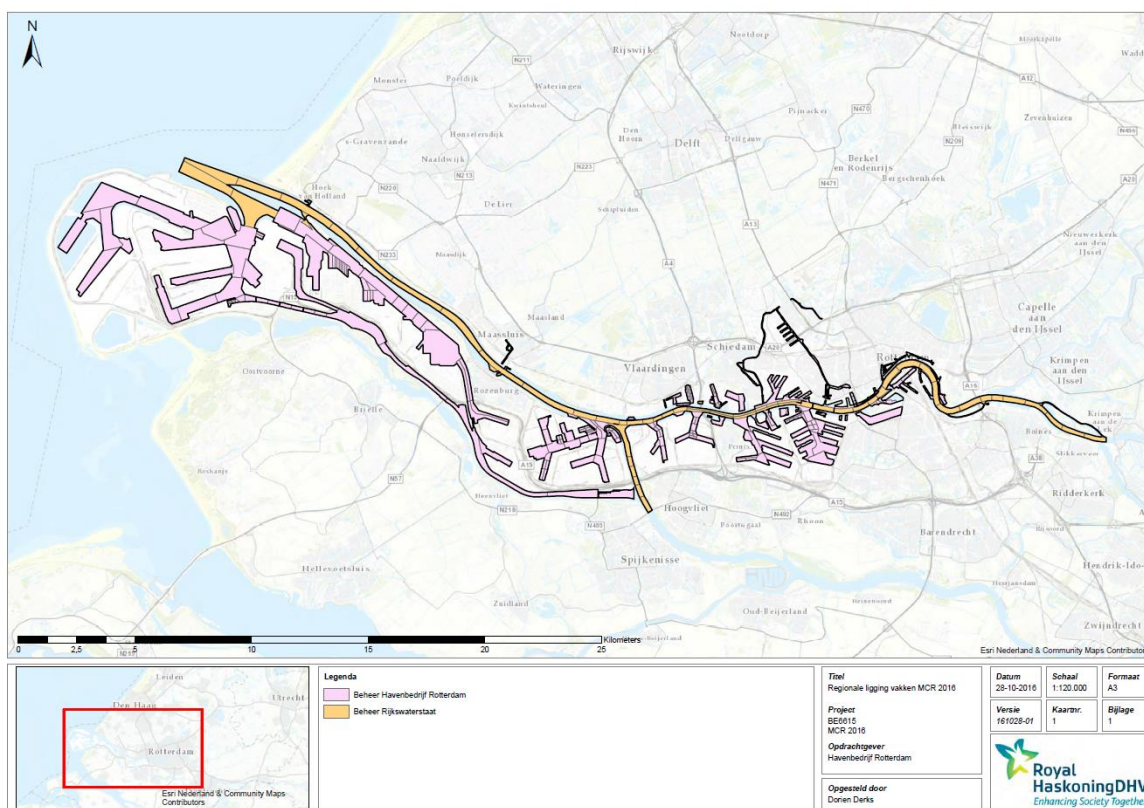
Om een duidelijke vergelijking tussen modelresultaten en gemeten data mogelijk te maken moet af worden gebakend welk gedeelte van het totale baggerbezwaar in ogenschouw wordt genomen bij de analyse. De afbakening is als volgt gekozen:

- In de analyse worden alleen de op de Verdiepte Loswal en de Loswal Noordwest verspreide volumes beschouwd.
- Bij de berekening van droge stof slib wordt alleen de fractie van de baggerspecie die bestaat uit slib ($D < 63 \mu\text{m}$) meegenomen, zie ook paragraaf 5.3.

Paragraaf 5.2 behandelt de totale hoeveelheden baggerspecie zoals deze op Loswal Noordwest en de Verdiepte Loswal zijn verspreid, maar ook de hoeveelheden (vervuilde) baggerspecie die in de Slufter zijn gestort. Dit laatste is gedaan om een volledig overzicht van het baggerbezwaar te geven. De baggerspecie die hoofdzakelijk uit zand bestaat en in binnen het kustfundament is verspreid wordt niet meegenomen in het overzicht. De volumes die zijn verspreid binnen het kustfundament zijn terug te vinden in HbR & RWS (2014).

De baggerspecie die in de Slufter wordt gestort, wordt echter niet in de modelstudie beschouwd. Dit wordt gedaan omdat de modelstudie de recirculatie van slib beschouwt, en het slib dat in de Slufter wordt gestort uit het hydrodynamische systeem wordt gehaald. Omdat het percentage van vervuild slib dat in de Slufter wordt gestort niet groter is dan 5-10% van het gehele baggerbezwaar, wordt het acceptabel geacht de volumes die gestort zijn in de Slufter buiten beschouwing te laten in de modelstudie.

De verspreide volumes zoals deze in paragraaf 5.2 worden behandeld zijn gebaggerd in de beheersgebieden van RWS en HbR. Deze beheersgebieden zijn aangegeven in Figuur 4.1. Grosso modo kan worden gesteld dat RWS de vaarwegen beheert, en HbR de havenbassins. Dit onderscheid wordt nu nog gemaakt, omdat meerdere studies al hebben laten zien dat de baggerspecie uit de havenbassins een hoger percentage slib bevat, zie ook paragraaf 5.3. Na omrekening van kubieke meters baggerspecie naar droge stof slib worden de totalen bij elkaar opgeteld, aangezien in de modelstudie alleen wordt gekeken naar sedimentatie in het gehele havengebied.



Figuur 4.1 Begrenzing van de beheersgebieden van RWS en het Havenbedrijf.

4.2 Verspreid volume slibrijke baggerspecie periode 2000-2016

4.2.1 Data Rijkswaterstaat

Tabel 4.1 geeft een overzicht van de hoeveelheden baggerspecie die door RWS op zee zijn verspreid in de periode 2000-2016. Voor de periode 2000-2013 is dit gebaseerd op HbR & RWS (2014), voor 2014-2016 is aanvullende data aangeleverd door RWS. Voor zover bekend heeft RWS in deze periode geen gebruik gemaakt van de Slufter. De gemeten volumes zijn beunvolumes en zijn gespecificeerd in mln m³ baggerspecie. Er wordt hier onderscheid gemaakt tussen baggerspecie die is verspreid op de Verdiepte Loswal en Loswal Noordwest.

4.2.2 Data Havenbedrijf Rotterdam

Tabel 4.2 geeft een overzicht van de hoeveelheden baggerspecie die door HbR op zee zijn verspreid in de periode 2000-2016, aangevuld met volumes die in de periode 2000-2016 in de Slufter zijn gestort. Voor de periode 2000-2013 is dit gebaseerd op HbR & RWS (2014), voor 2014-2016 is aanvullende data aangeleverd door HbR.

Tabel 4.1: Totaal verspreide slibrijke baggerspecie, afkomstig uit beheersgebied Rijkswaterstaat in de periode 2000-2016.

Verspreide volumes RWS periode 2000-2016 [mln m ³]		
Jaar	Verdiepte Loswal	Loswal Noordwest
2000	1,10	6,69
2001	4,12	2,21
2002	3,14	5,60
2003	3,41	2,59
2004	3,42	2,00
2005	6,23	0,83
2006	2,30	2,22
2007	5,51	4,54
2008	7,06	0,00
2009	5,56	0,00
2010	2,38	2,59
2011	1,81	1,67
2012	4,10	0,00
2013	3,55	0,00
2014	1,71	0,00
2015	2,43	0,00
2016	6,15	0,00

Tabel 4.2 : Totaal verspreide slibrijke baggerspecie, afkomstig uit beheersgebied Havenbedrijf Rotterdam in de periode 2000-2016. Voor stortingen in Slufter is pas vanaf 2006 data beschikbaar, met als gevolg dat tot 2006 N/A wordt weergegeven voor de Slufter.

Verspreide volumes HbR periode 2000-2016 [mln m ³]			
Jaar	Verdiepte Loswal	Loswal Noordwest	Slufter
2000	0,64	2,82	N/A
2001	1,40	1,42	N/A
2002	3,09	1,30	N/A
2003	3,06	0,00	N/A
2004	3,22	0,74	N/A
2005	4,23	0,00	N/A
2006	1,80	1,38	0,38
2007	3,09	2,26	0,38
2008	4,99	0,00	0,39
2009	5,94	0,00	0,15
2010	3,48	1,52	0,37
2011	0,93	2,98	0,53
2012	4,96	0,00	0,48
2013	6,28	0,00	0,99
2014	6,83	0,00	0,34
2015	7,40	0,00	0,76
2016	9,73	0,00	0,38

De in totaal op de Verdiepte Loswal en Loswal Noordwest verspreide volumes zijn weergegeven in Tabel 4.3. Hierbij zijn de verspreide volumes geclusterd voor zowel RWS als HbR. Dit overzicht bevat dus niet de baggervolumes die zijn geborgen in de Slufter of in het kustfundament zijn verspreid.

Tabel 4.3 Totaal op Verdiepte Loswal en Loswal Noordwest verspreide baggerspecie in periode 2000-2016.

Jaar	Totaal RWS [Mm ³]	Totaal HbR [Mm ³]	Totaal verspreid [Mm ³]
2000	7,79	3,45	11,24
2001	6,33	2,82	9,15
2002	8,74	4,39	13,13
2003	6,00	3,06	9,06
2004	5,42	3,96	9,38
2005	7,05	4,23	11,28
2006	4,52	3,18	7,70
2007	10,05	5,35	15,40
2008	7,06	4,99	12,06
2009	5,56	5,94	11,50
2010	4,97	5,00	9,97
2011	3,48	3,91	7,39
2012	4,10	4,96	9,05
2013	3,55	6,28	9,82
2014	1,71	6,83	8,54
2015	2,43	7,40	9,82
2016	6,15	9,73	15,88

4.3 Percentage slib (D<63 µm) in baggerspecie

Hoewel het sediment dat wordt gebaggerd in de Rotterdamse haven 'slibrijk' wordt genoemd, betekent dit niet automatisch dat dit sediment alleen een slibfractie bevat. Hierin is de slibfractie gedefinieerd als de fractie van het sediment waarvan de korrelgrootte D kleiner is dan 63 µm. In de literatuur zijn verschillende schattingen te vinden voor de grootte van deze slibfractie, gebaseerd op sedimentmonsters waarvan de korrelgrootteverdeling bepaald is. Zo heeft Stutterheim (2002) de slibfractie bepaald op basis van baggerspeciemonsters genomen in het beun van de baggerschepen. Hierbij is een onderscheid gemaakt tussen baggerspecie afkomstig uit havenbassins en baggerspecie afkomstig uit de vaargeul. De respectievelijke slibfracties van deze baggerspecie zijn 86% en 28%. Dit is echter alleen de fractie van anorganisch materiaal kleiner dan 63 µm. Indien zowel de organische als de anorganische fractie mee worden genomen in de bepaling van de slibfractie, dan komt de slibfractie in de vaargeul neer op 49%. De slibfractie in de havenbassins blijft echter wel gelijk (Stutterheim, 2002). Dankers (2015) heeft de slibfractie bepaald op basis van korrelgrootteverdelingen, genomen in de periode 2009-2011. Het resultaat was een berekend slibpercentage tussen de 40-50%, waarbij niet aan is gegeven of dit (an)organisch materiaal betreft en of de baggerspecie afkomstig is uit de havenbassins danwel de vaargeul.

In de gedane berekeningen zijn de slibpercentages inclusief organisch materiaal, zoals gegeven door Stutterheim (2002), aangehouden. Dit komt neer op een slibfractie voor de havenbassins van 86%, en een slibfractie van 49% in de vaargeul. Het is namelijk aannemelijk dat de baggerspecie afkomstig uit de havenbassins een hoger percentage slib bevat dan de baggerspecie uit de vaarwegen. Deze aanname is gebaseerd op de gedachte

dat de stroomsnelheden in de vaarwegen hoger zijn dan de stroomsnelheden in de havenbassins.

4.4 Omrekenen van beunvolumes naar tonnen droge stof (tds)

In Stutterheim (2002) en Deltares (2013) wordt de volgende formule gebruikt voor het omrekenen van volumes gemeten in het beun naar tonnen droge stof (TDS):

$$TDS = \left(\frac{\rho_{beun} - \rho_{water}}{\rho_{vast} - \rho_{water}} \right) * V_{beun} * \rho_{vast}$$

Bij deze formule moet worden opgemerkt dat de dichtheden in deze formule worden uitgedrukt in ton/m³. Wanneer de tonnen droge stof vervolgens vermenigvuldigd worden met het percentage slib in de baggerspecie is de hoeveelheid slib (in TDS) bekend. Dit kan vervolgens worden gebruikt om de modelresultaten mee te toetsen.

Uitgaande van de parameters zoals deze in Tabel 4.4 zijn opgesomd, komt dit per jaar neer op de hoeveelheden TDS slib die grafisch zijn weergegeven in Figuur 4.2. Hierbij wordt uitgegaan van de volumes verspreid slib zoals deze in Tabel 4.3 zijn weergegeven. Daarnaast wordt aangenomen dat er in de periode 2000-2016 geen verandering plaats heeft gevonden in de desbetreffende parameters. Bij deze berekening moet verder nog worden opgemerkt:

- Er wordt onderscheid gemaakt tussen de percentages slib in de baggerspecie afkomstig uit havenbassins en de vaargeul.
- Hoeveelheid slib worden gegeven in MTDS (megaton droge stof). 1 MTDS staat gelijk aan 10⁹ kg droge stof.

Ten behoeve van consistentie met eerder onderzoek (Stutterheim, 2002; Dankers, 2015), is er een TDS-factor van 0.40 aangehouden bij de berekening. Hiermee zou de dichtheid van de baggerspecie in het beun neerkomen op 1270 kg/m³. Deze waarde valt binnen de te verwachten waarden voor beundichtheden.

Voor een uitgewerkte berekening, zie Appendix A.

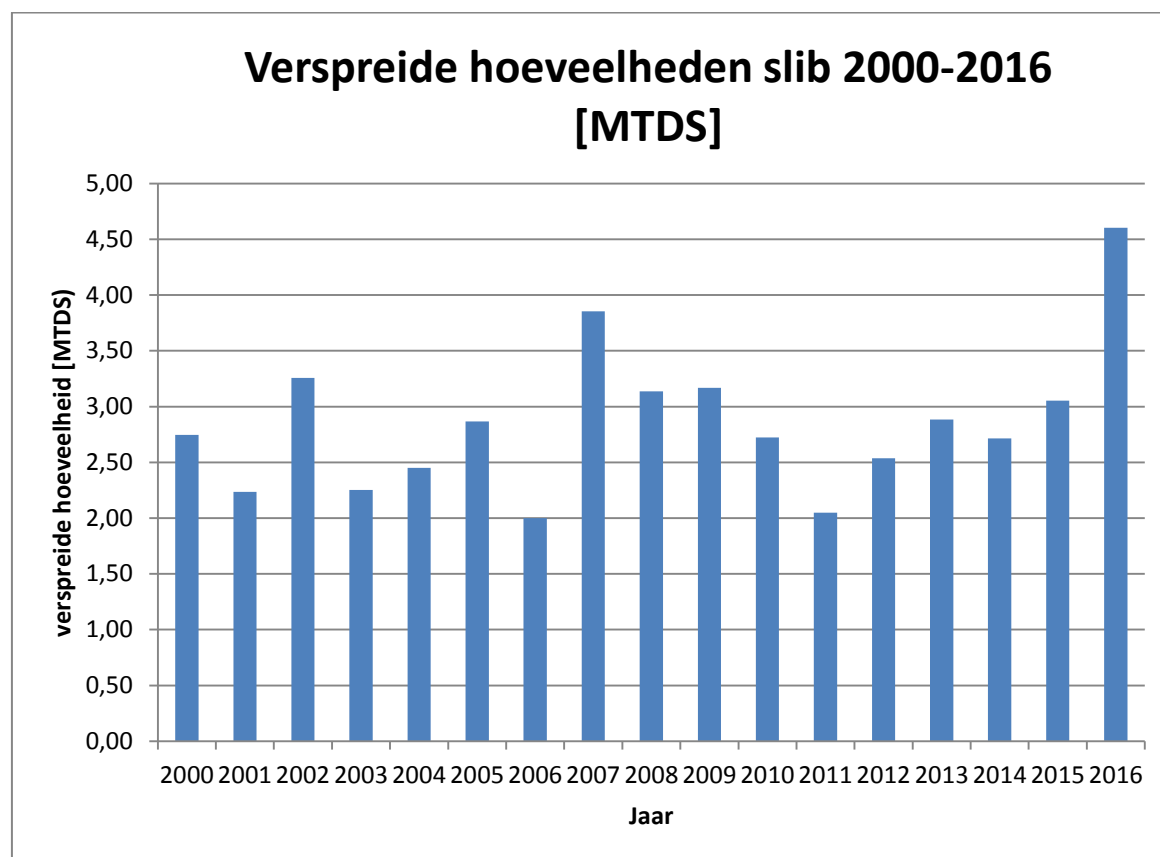
Tabel 4.4 : Parameters voor berekening van totale hoeveelheid slib, uitgedrukt in TDS.

Parameter	Waarde
ρ_{beun}	1,27
ρ_{water}	1,025
ρ_{vast}	2,6
TDS-factor	0,40
slibfractie haven	0,86
slibfractie vaargeul	0,49

Zoals in Figuur 4.2 te zien is, is er over de periode 2000-2016 geen duidelijk op- of neerwaartse trend te ontdekken in de volumes slib die op zee zijn verspreid. De jaren 2007 en 2016 kennen het grootste baggerbezwaar: voor 2007 is dit een interessant gegeven omdat dit jaar als base case wordt gebruikt bij de modelberekeningen en daarop volgende analyse. Bij deze totalen moet echter wel worden opgemerkt dat andere invloeden, zoals economische overwegingen, niet konden worden gekwantificeerd. Daarnaast is de

aanslibbing in de wintermaanden het grootste, zoals ook wordt beschreven in Hoofdstuk 6, vanwege de invloed van stormen. Aangezien in diezelfde periode de omslag zit tussen de verschillende jaren, kan dit ook leiden tot een vertekening van de baggervolumes per jaar.

Los van deze kanttekeningen is het zinvol om dit overzicht te vergelijken met modeluitvoer. Ten behoeve daarvan is het langjarige gemiddelde ook berekend, wat neerkomt op een gemiddeld baggerbezwaar van 2,9 MTDS slib per jaar. Dit vertaalt zich naar een verspreidingshoeveelheid van 10.6 Mm³ slib per jaar.



Figuur 4.2: Op zee verspreide hoeveelheid slib per jaar. Periode 2000-2016, uitgedrukt in MTDS.

5 Modelbeschrijving

5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een beknopte beschrijving gegeven van de gebruikte ZUNO-DD modelschematisatie. De hydrodynamica is berekend met Delft3D-Flow en het slibtransport is berekend met Delft3D-Waq. Het slibtransport is dus ontkoppeld van de waterbeweging uitgerekend. Dit heeft als voordeel dat er voor vele verschillende slibscenario's (denk aan een andere ligging van de verspreidingslocaties) slechts één waterbeweging nodig is. Dit spaart veel rekentijd. Een nadeel is wel dat er geen terugkoppeling plaatsvindt tussen slibtransport en waterbeweging. Dit betekent dat het model niet geschikt is om het transport van hooggeconcentreerde sliblagen bij de bodem ('fluid mud') te berekenen. Omdat het doel van de huidige studie is om de grootschalige verspreidingsdynamiek in kaart te brengen, is dit geen zwaarwegend nadeel. Op de Noordzeebodem wordt immers met uitzondering van geulen en putten nauwelijks fluid mud waargenomen en is suspensietransport dominant. Wel wordt hierdoor de invang van slib in de Maasgeul onderschat, maar door een lokale aanpassing van de kritische schuifspanning voor erosie berekent het model toch het correcte langjarig gemiddelde baggervolume, zie Vijverberg et al. (2015).

5.2 Algemene beschrijving hydrodynamisch model

Voor het modelleren van de hydrodynamica is gebruik gemaakt van Delft3D-Flow. Delft3D is een driedimensionaal hydrodynamisch model dat gebruik maakt van een gestructureerd rekenrooster. Het lost de stromingsvergelijkingen in drie dimensies op stroming met behoud van massa en momentum.

Delft3D berekent naast de hydrodynamica ook zoutgehalte en temperatuurverschillen. Aan het wateroppervlak is een ruimtelijk variërende wind en druk opgelegd afkomstig van het KNMI. De opgelegde zoetwaterdebieten zijn daggemiddelde waarden die zijn opgetreden in de gemodelleerde periode.

Golven zijn niet in Delft3D gemodelleerd, maar achteraf is het effect van de golven op de bodemschuifspanning toegevoegd aan de stroming-gerelateerde bodemschuifspanning door middel van data-assimilatie. Hierbij zijn eerder gemodelleerde jaargemiddelde golfvelden en in-situ golfmeetdata van meerdere meetstations in de Noordzee gebruikt om de golf-gerelateerde bodemschuifspanning te berekenen. Het jaar 2007 is gebruikt als referentiejaar voor de hydrodynamica. Dit is conform eerdere studies waarin dit jaar ook is gebruikt als zijnde voldoende representatief voor het gemiddelde windklimaat en de gemiddelde zoetwaterafvoer. Wat betreft baggeronderhoud is 2007 echter niet gemiddeld maar juist hoog. Om de invloed van de keuze voor 2007 op de resultaten van deze studie te bepalen, zijn ook berekeningen voor recente jaren uitgevoerd (2012 t/m 2015).

5.3 Algemene beschrijving slibtransportmodel

Voor het modelleren van het slibtransport, de aanslibbing en het baggeren en verspreiden van slib is gebruik gemaakt van het Delft3D-Waq (Delwaq) model. Delwaq is ontwikkeld door Deltares en gebruikt een ongestructureerd rekenrooster.

Delwaq gebruikt de stromingscondities zoals berekend door Delft3D-Flow.

5.4 Modelschematisatie ZUNO-DD

In dit project is gebruik gemaakt van het Zuidelijke Noordzee model met domeindecompositie (ZUNO-DD), hetgeen de gehele Nederlandse kust, het zuidelijke deel van de Noordzee en Het Kanaal omvat (Figuur 5.1). Het rekenrooster bevat (met beperkte resolutie) ook de Oosterschelde en Westerschelde en de Nieuwe Waterweg.

Langs de Nederlandse kust is de resolutie van het rooster relatief hoog met rekenroostercellen van ca. 1-2 km, en in het Kanaal en in het noordwesten is de resolutie relatief laag met rekenroostercellen van ca. 5 km. Deze verschillen in resolutie zijn bereikt met behulp van drie deelroosters met een afwijkende resolutie ('domeindecompositie' genoemd). Dit is geïllustreerd in Figuur 5.1. In Delwaq zijn de hydrodynamische resultaten van het fijnste rekendomein (in blauw) 2x2 geaggregeerd tot de resolutie van het middelste domein (in rood).

Het ZUNO-DD model is in het kader van een aantal eerdere studies voor HbR en RWS ontwikkeld en toegepast (o.a. Keetels et al., 2012; Cronin en Blaas, 2013; Arentz et al., 2012; Cronin en Blaas, 2015).

Het model maakt gebruik van de meest recente parameter-instellingen (zie Vijverberg et al., 2016 en Cronin en Blaas, 2013 en 2015) die op basis van een groot aantal meetgegevens van de slibconcentratie gevalideerd. Dit betreft naast klassieke MWTL-metingen o.a. scheepsmetingen buiten het reguliere MWTL-programma, remote-sensing gegevens, hoogfrequente metingen vanaf vaste meetlocaties en slibfluxen langs de Hollandse kust

Het model bevat 3 slibfracties, ieder gekarakteriseerd door een specifieke valsnelheid. De instellingen hiervoor zijn gelijk aan de van MOS²-II (Cronin en Blaas, 2013 en 2015):

- De fijnste fractie heeft een verwaarloosbare valsnelheid (0.001 mm/s) en bezinkt zo goed als niet. Voor havenaanslibbing is deze fractie dus onbelangrijk. Deze fractie is wel relevant voor de troebelheid bovenin de waterkolom tijdens rustig weer en kentering, wanneer de fracties met een hogere valsnelheid uitzakken.
- De middelste fractie heeft een valsnelheid van 0.125 mm/s en is representatief voor microvlokken. Deze fractie blijft over het algemeen redelijk goed gemengd over de waterverticaal en draagt zowel bij aan vertroebeling aan de oppervlakte als aanslibbing aan de bodem.
- De grootste fractie heeft een valsnelheid van 1 mm/s en is representatief voor macrovlokken. Deze fractie is over het algemeen ongelijk verdeeld over de waterkolom, met een lage concentratie aan de oppervlakte en een hoge concentratie aan de bodem. Deze fractie draagt over het algemeen weinig bij aan de vertroebeling bovenin de waterkolom (behalve tijdens hoog-energetische momenten zoals storm) maar draagt belangrijk bij aan aanslibbing.

De enige afwijkingen ten opzichte van MOS²-II betreft de modellering van de slibverspreiding vanaf de loswal t.g.v. baggeronderhoud, de aparte labelling van het verspreide sediment en de kalibratie van de gemiddelde baggerhoeveelheid d.m.v. een lokale aanpassing van de kritische schuifspanning voor erosie.

Zand is geen onderdeel van het verspreidingsmodel. Een essentieel verschil tussen zandtransport en slibtransport in de kustzone is dat het eerste typisch wordt gestuurd door de lokale hydrodynamische transportcapaciteit en de tweede typisch door de beschikbare hoeveelheid slib. Dit komt enerzijds doordat de transportcapaciteit voor zand relatief laag is maar er wel zeer veel zand aanwezig is in de kustzone en anderzijds doordat de

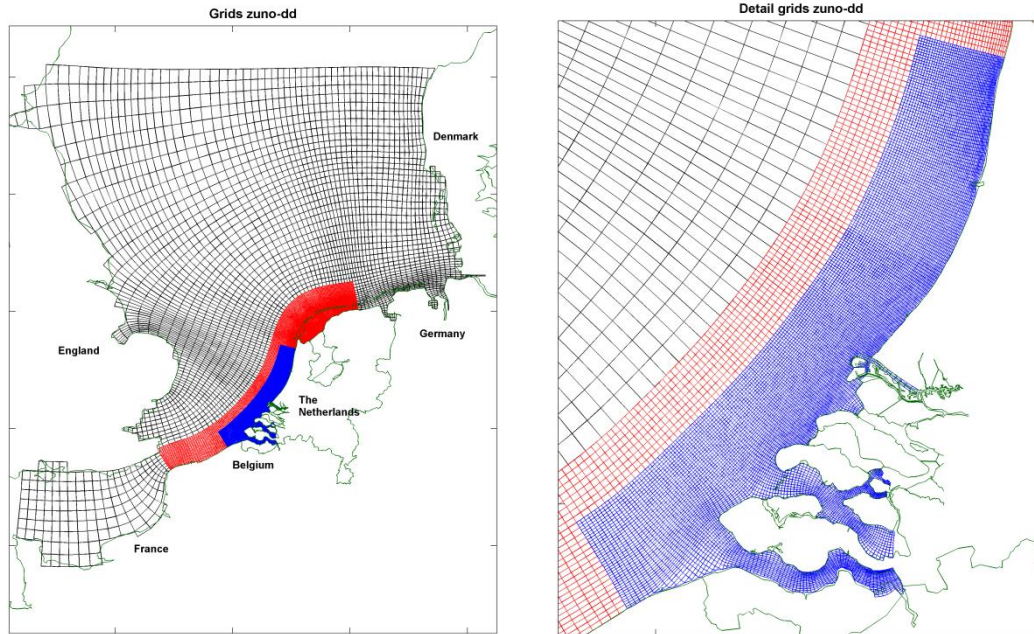
transportcapaciteit voor slib relatief hoog is maar er vrij weinig slib aanwezig is in de kustzone. De verspreiding van slib leidt dus tot meer slibtransport in de wijde omgeving, de verspreiding van zand leidt daarentegen niet tot meer zandtransport, behalve zeer lokaal rondom de gecreëerde bult die hierdoor kan afvlakken. De beschouwing van zand vraagt dus om een ander type model, namelijk een morfologisch model en dit valt buiten de doelstelling van de huidige studie.

Het slibtransportmodel berekent niet alleen de slibconcentratie in de waterkolom als functie van de hydrodynamische condities, maar ook de sedimentatie naar en erosie van de bodem en de beschikbare hoeveelheid slib in de bodem. De bodem wordt geschematiseerd met twee lagen, een 'flufflaag' van vers afgezet slib dat makkelijk erodeerbaar is en een 'bufferlaag' die meer geconsolideerd is of doorgemengd met de zandige zeebodem die moeilijker erodeerbaar is (maar nog wel tijdens springtij of storm). Zie Van Kessel et al. (2011) voor meer details.

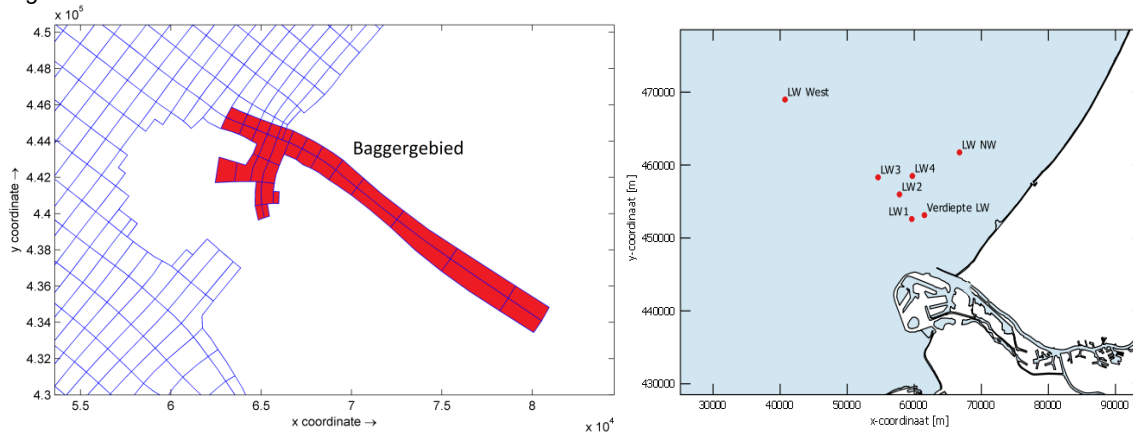
In de modelscenario's met baggeren wordt in het Delwaq automatisch gebaggerd wanneer er sedimentatie plaatsvindt in het baggergebied. Het baggergebied is de gehele haven tot aan de monding (met rood aangegeven in Figuur 5.2). De zogenoemde 'bagger- en stortroutine' in Delwaq is zo ingesteld dat baggeren ieder uur plaatsvindt vanaf $t=0$ en dat het gebaggerde materiaal wordt verspreid vanaf een van de in Figuur 5.2 (rechterzijde) met rode stippen aangegeven locaties. De maximale verspreidingsnelheid bedraagt 20 kton per uur, maar de daadwerkelijke flux is meestal veel lager gezien de jaarlijkse aanslibbing van ongeveer 3 Mton. Het aldus vanuit de bodemlaag verspreide sediment wordt bovendien in het model gelabeld, zodat de herkomst van al het sediment in het model traceerbaar is, namelijk ofwel de natuurlijke achtergrond, ofwel de verspreidingslocatie. Hierdoor is het mogelijk om de retourstroming naar de haven vast te stellen. Dit is voor alle drie fracties apart of gecombineerd te beschouwen.

Aan de rivierkant van de Nieuwe Waterweg wordt een gemeten afvoertijdserie opgelegd met een constante sedimentconcentratie, waarvan 50% een valsnelheid heeft van 0.125 mm/s (microvlokken) en 50% een valsnelheid van 1 mm/s (macrovlokken).

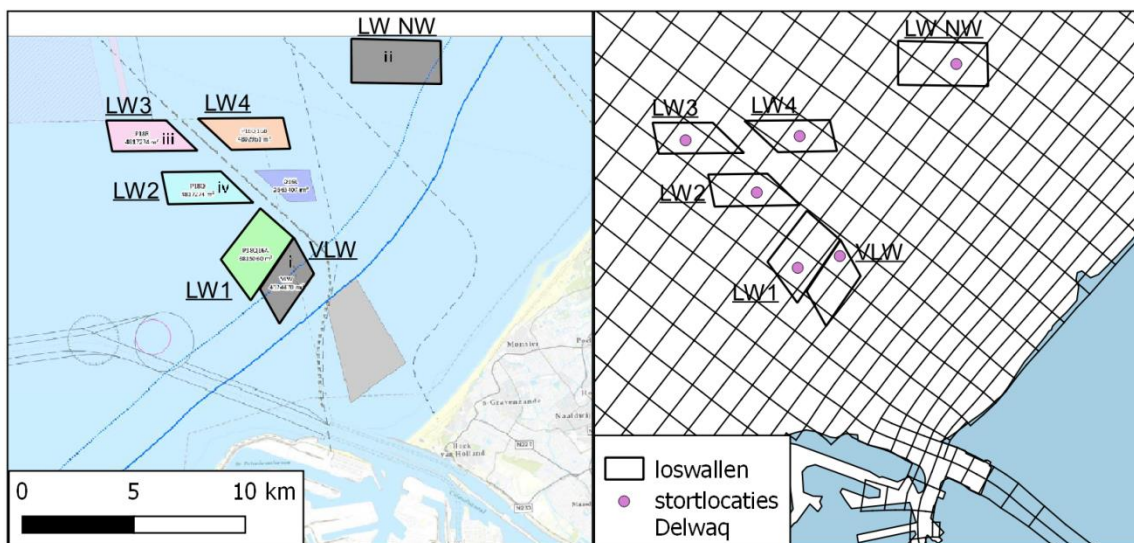
Het Delwaq-model wordt voor 10 jaar gedraaid, waarvan het laatste jaar gebruikt wordt voor de analyse. Doel van het draaien van de 10 jaar is om een (dynamisch) evenwicht te bereiken, waarbij o.a. de concentratie van gebaggerd sediment een evenwicht bereikt. Bij de start van de berekeningen is immers nog geen sediment gelabeld 'verspreid' in het model aanwezig, dit moet geleidelijk opbouwen en dit kost een aantal jaren. De natuurlijke achtergrondconcentratie is op $t=0$ al wel volledig ingespeeld. Een inspeelperiode van 10 jaar blijkt ruim voldoende.



Figuur 5.1. Rekenrooster van het ZUNO model.



Figuur 5.2. Te baggeren gebied in de haven van Rotterdam (links) en de verspreidingslocaties in de verschillende scenario's.



Figuur 5.3. Links: definitie van verspreidingslocaties op GIS-kaart (links) en op het rekenrooster (rechts). In het model wordt baggerslib verspreid in de rekencellen waarin de paarse stippen vallen.

5.5 Scenario's

Een overzicht van alle modelscenario's is gegeven in Tabel 5.1. Er is gevarieerd met de volgende condities:

- Met en zonder baggeren en storten
- Ligging van de verspreidingsvakken
- Rivierafvoer (gemiddeld, 25% hoger en 25% lager)
- Diverse jaren met hydrodynamische condities (2007 en 2012 t/m 2015)

De verschillende verspreidingslocaties zijn weergegeven in Figuur 5.2.

5.5.1 Wel/niet baggeren en verspreiden in de Noordzee

Het sedimentbudget van de haven van Rotterdam wordt deels bepaald door het baggeren en de verspreiding van slib in de Noordzee. Bijv. het verspreiden van slib in de Noordzee verhoogt de lokale slibconcentratie, waardoor naar verwachting meer slib terug de haven in stroomt. Daarnaast heeft de haven van Rotterdam invloed op het sedimentbudget, want aanslibbing wordt versterkt door de grotere waterdiepte in de Nieuwe Waterweg en de Maasgeul t.o.v. omliggende zeebodem en door de vele luwtegebieden in de haven.

Daarom zijn twee aanvullende modelscenario's gedefinieerd: 1) met baggeren maar zonder verspreiding in de Noordzee, en 2) zonder baggeren en zonder verspreiding in de Noordzee, waarbij bovendien sedimentatie in de haven wordt 'uitgezet' door een lokale parameteraanpassing.

5.5.2 Alternatieve stortlocaties

Als alternatief voor de stortlocaties Verdiepte Loswallen en Loswal Noordwest zijn 6 locaties geselecteerd en gemodelleerd voor de condities in jaar 2007. De verschillende stortlocaties zijn weergegeven in Figuur 5.2. Hierbij is onderscheid te maken tussen stortlocaties die op verschillende locaties in een lijn loodrecht op de Nederlandse kustlijn liggen (Verdiepte LW, LW1, LW2, LW3 en LW West) en stortlocaties die op verschillende locaties op een lijn parallel aan de kustlijn liggen (LW1 en LW NW).

Tabel 5.1. Overzicht van de verschillende scenario's.

Scenario	Hydrodynamische condities	Baggeren	Verspreidingslocatie	Bijzonderheid
Basis	2007	ja	Verdiepte LW	-
Basis_a	2007	ja	-	zonder storten
Basis_b	2007	nee	-	zonder baggeren
Loc_NW	2007	ja	LW NW	alternatieve verspreidingslocatie
Loc_1	2007	ja	LW 1	alternatieve verspreidingslocatie
Loc_2	2007	ja	LW 2	alternatieve verspreidingslocatie
Loc_3	2007	ja	LW 3	alternatieve verspreidingslocatie
Loc_4	2007	ja	LW 4	alternatieve verspreidingslocatie
Loc_West	2007	ja	LW West	alternatieve verspreidingslocatie
Rivier_Laag	2007	ja	Verdiepte LW	lage rivierafvoer
Rivier_Hoog	2007	ja	Verdiepte LW	hoge rivierafvoer
Run_2012	2012	ja	Verdiepte LW	jaar 2012
Run_2013	2013	ja	Verdiepte LW	jaar 2013
Run_2014	2014	ja	Verdiepte LW	jaar 2014
Run_2015	2015	ja	Verdiepte LW	jaar 2015

5.5.3 Rivierafvoer

Voor de twee modelscenario's met hogere of lagere rivierafvoer is de rivierinstroming aan de oostkant van de haven van Rotterdam aangepast door middel van een constante vermenigvuldigingsfactor. Voor de lage rivierafvoerscenario is de afvoer in de gehele afvoertijdserie met 25% verlaagd, en voor de hoge rivierafvoerscenario is de afvoer met 25% verhoogd.

5.5.4 Jaarafhankelijke stromingscondities

Het sedimenttransport is afhankelijk van de golf- en stromingscondities in de Noordzee en de rivierafvoeren. Enerzijds ter validatie van de jaarlijkse baggervolumes, en anderzijds ter indicatie van de gevoeligheden van de baggervolumes en sedimentbudget zijn scenario's met de condities in 2012, 2013, 2014 en 2015 gedefinieerd. Voor deze jaren zijn aangepaste rivierafvoeren, golfcondities en windcondities opgelegd conform de in deze jaren opgetreden condities.

6 Resultaten en discussie

6.1 Inleiding

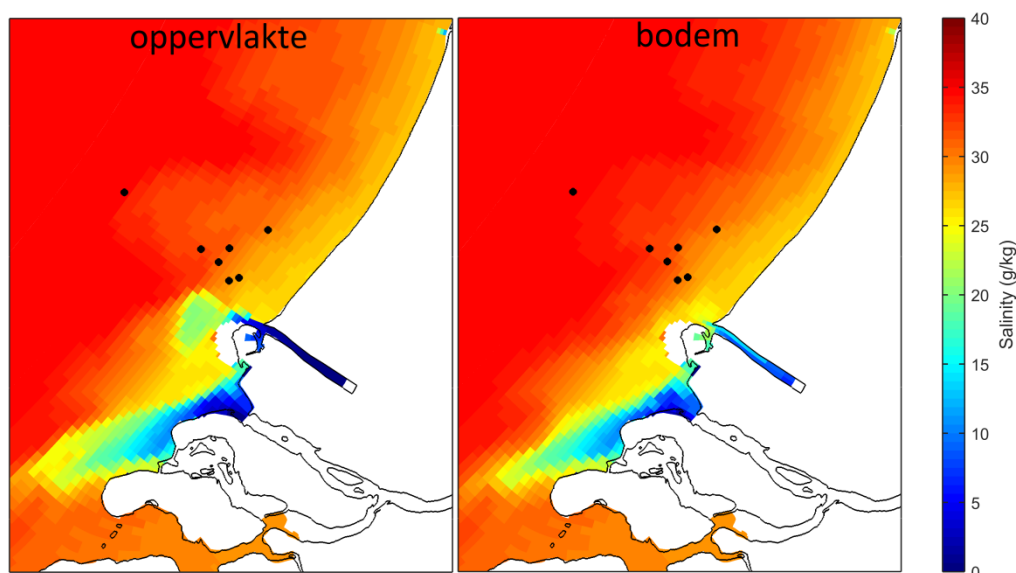
In dit hoofdstuk worden de resultaten van de modelberekeningen van het sedimenttransport en baggerwerkzaamheden beschreven.

Ten eerste worden de resultaten voor de huidige situatie geschetst, daarna wordt de invloed van de scenario's op de aanslibbing, retourstroming en slibconcentratie in de kustzone besproken.

6.2 Huidige situatie

6.2.1 Hydrodynamica

Door de uitstroming van zoetwater door de Nieuwe Waterweg en Haringvlietsluizen ontstaan er in de kustzone aanzienlijke saliniteitsgradiënten. Onder invloed van de aardrotatie buigt de zoetwaterpluim af in noordoostelijke richting en gaat aanliggen tegen de Hollandse kust (Figuur 6.1). Tijdens doottijd kan er een aanzienlijke stratificatie optreden, tijdens springtij vindt meer doormenging plaats. Door het samenspel van getij, wind, aardrotatie en saliniteitsgradiënten ontstaat aan de bodem een kustwaarts gerichte reststroming, waardoor slib zich concentreert in een smalle band langs de kust. De grootschalige kustlangse reststroming is in noordoostelijke richting, hoewel er lokaal rond de monding van de Nieuwe Waterweg aan de bodem ook wel een naar binnen gerichte reststroming optreedt. Voor meer details over de complexe dynamiek van de Rijnpluim zie o.a. De Boer (2009) en citaties hierin.



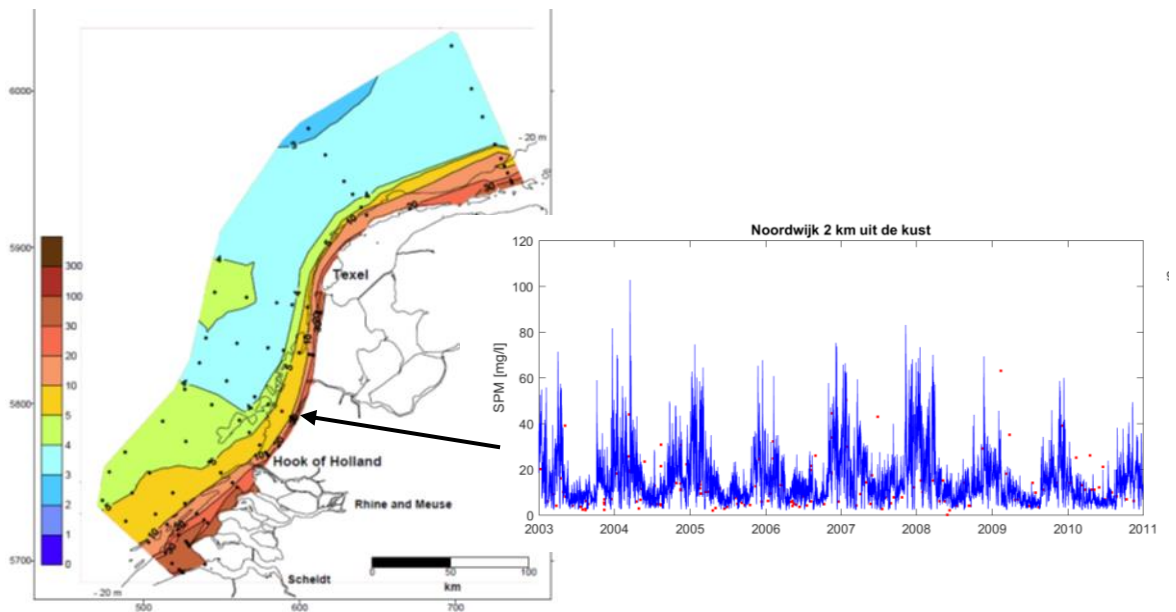
Figuur 6.1: Berekende momentane saliniteit in het Maasmondgebied (10 april 2007 om 00:00:00) aan het oppervlak (links) en aan de bodem (rechts). De zwarte stippen representeren de diverse loswalscenario's.

6.2.2 Slib

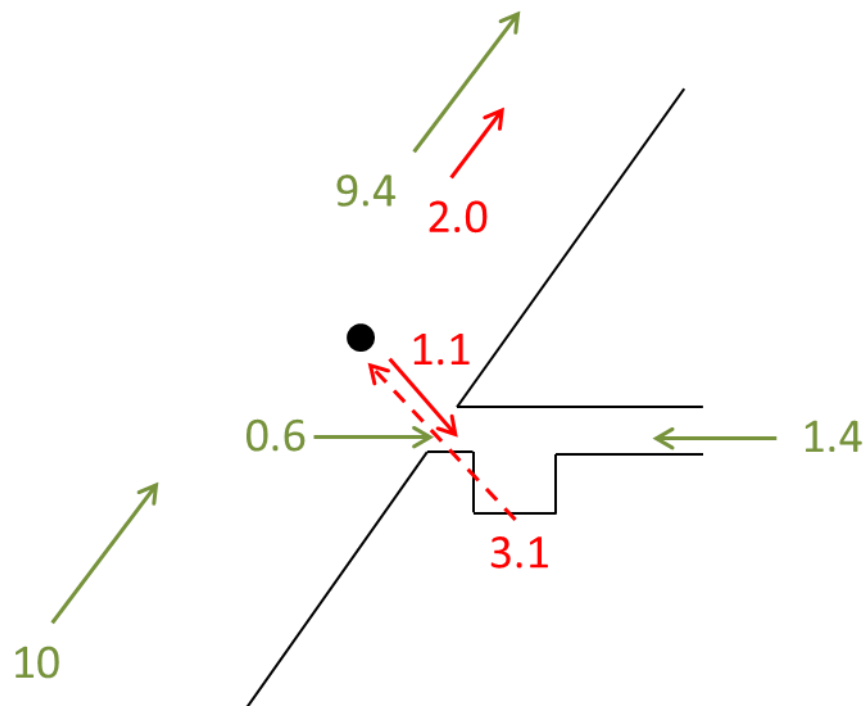
Slibdynamiek in de Rijnpluim wordt grotendeels bepaald door de lokale en momentane hydrodynamica, maar hiernaast speelt ook de beschikbare hoeveelheid slib een belangrijke rol. Zo wordt de concentratieverhoging tijdens een storm niet alleen bepaald door de golfhoogte, maar ook door de hoeveelheid en eigenschappen van slib in de bodem. Een beschikbaarheid van weinig, goed geconsolideerd slib leidt tot een veel lagere concentratiepiek dan een beschikbaarheid van veel ongeconsolideerd slib. De actuele hoeveelheid en toestand van het slib is het cumulatieve resultaat van de condities voor sedimentatie, erosie en transport in het verleden. Dit verleden kan zich uitstrekken tot meerdere jaren omdat de verblijftijd van slib in de kustzone lang is (Arentz et al., 2012 en Laane et al., 1999). Dit verklaart ook waarom de scenarioberekeningen zo'n lange simulatieduur hebben (10 jaar).

Het Delwaq slibmodel is redelijk goed in staat om de waargenomen slibdynamiek te reproduceren (Cronin en Blaas, 2013 en 2015). Naast sterke ruimtelijke gradiënten in de slibconcentratie wordt ook een sterke variatie in de tijd waargenomen. Figuur 6.2 geeft een indruk van deze gradiënten en variatie rondom de Maasvlakte op basis van modelresultaten. Appendix C toont een tiental bewerkte hoge resolutie Landsat-8 satellietbeelden die de lokale ruimtelijke gradiënten van de slibconcentratie in het Maasmondgebied dichtbij de kust goed zichtbaar maken. Hiernaast zijn van de slibatlas (Blaas et al., 2011) enkele grootschaliger MERIS-beelden opgenomen uit 2007. Hierin wordt ook een vergelijking gemaakt met het ZUNO-DD slibmodel. De slibconcentratie varieert sterk van beeld tot beeld sterk.

Naast de slibconcentratie is ook de slibflux een erg belangrijke parameter. De grootte van de slibflux t.g.v. de verspreiding van baggerspecie ten opzichte van de natuurlijke slibflux bepaalt de potentiële invloed van de bagger- en stortstrategie op de natuurlijke slibdynamiek. De natuurlijke slibflux bedraagt ongeveer 10 MT/jaar (Cronin en Blaas, 2015), terwijl de slibverspreiding i.v.m. havenonderhoud ongeveer 3 MT/jaar bedraagt. Dit betekent dat de invloed van specieverspreiding op de slibdynamiek in de Maasmonding potentieel groot is, maar dat de mogelijkheden voor optimalisatie van deze fluxen ook groot zijn. Figuur 6.3 geeft een schematisch overzicht van de berekende slibfluxen in de Maasmonding, waarbij de bijdrage van de natuurlijke achtergrond en de bijdrage van baggerspecieverspreiding met aparte kleuren is zichtbaar gemaakt (respectievelijk groen en rood). Hierbij is verondersteld dat de hoeveelheid slib op de huidige verdiepte loswal niet verder toeneemt, d.w.z. wat lokaal wordt gestort, verspreidt zich over een groot gebied. Volgens de berekeningen keert 1.1 MT/jaar van de gebaggerde en verspreide hoeveelheid van 3.1 MT/jaar weer terug naar de haven. Het huidige retourpercentage bedraagt dus 36%. Van de netto instroming vanaf zee van 1.7 MT/jaar bestaat zelfs 1.1 MT/jaar = 65% uit reeds eerder verspreid slib.



Figuur 6.2. Links: gemeten jaargemiddelde slibconcentratie aan de oppervlakte. Rechts: berekende (blauwe lijn) en gemeten (rode punten) slibconcentratie bij station Noordwijk 2 km in de periode 2003 - 2011.



Figuur 6.3. Berekende slibfluxen in de Maasmond (in MT/jaar) voor de huidige situatie, d.w.z. verspreiding vanaf de (reeds volledig opgevulde) verdiepte loswal. Groene pijlen: natuurlijke fluxen. Rode pijlen: fluxen t.g.v. baggeren en storten. Retourpercentage = $1.1/3.1 = 36\%$.

6.3 Invloed van baggeren en storten

Een belangrijke vraag is hoe groot de invloed is van de retourstroming op de slibfluxen in het Maasmondgebied. Daartoe doen we twee numerieke experimenten, namelijk a) een eerste waarbij het gebaggerde slib niet langer wordt teruggebracht in het systeem en b) een tweede waarbij de aanslibbing in de haven kunstmatig is uitgezet door de depositieflux vanuit de onderste waterlaag naar de bodem in het model op nul te zetten. Het tweede numerieke experiment heeft dus een sterk hypothetisch karakter.

De resultaten van deze scenario's zijn samengevat in Tabel 6.1 in combinatie met de resultaten voor de referentieberekening met slibverspreiding vanaf de loswal. Hieruit blijkt dat niet langer terugstorten (basis_a) leidt tot een sterke afname van het baggerbezwaar, van 3.1 tot 1.9 MT/jaar. Deze afname is bijna gelijk aan de retourstroming van 1.1 MT/jaar vanaf de loswal naar de haven in de referentie. Omdat het slib niet langer wordt verspreid vanaf de loswal, valt deze retourstroming volledig weg. Wat betreft baggerbezwaar is scenario basis_b oninteressant omdat dit is uitgezet. Wel is deze variant interessant vergelijkingsmateriaal voor de invloed van de bagger- en stortcyclus op de slibconcentratie en troebelheid in de kustzone. Merk op dat de balans in Tabel 6.1 niet exact sluit. Dit komt omdat enkele kleine termen in de sedimentbalans niet in deze tabel zijn opgenomen om de tabel overzichtelijk te houden. Deze termen zijn o.a. accumulatie in de waterkolom en sedimentatie in niet onderhouden gebieden.

Scenario basis_a (zonder slibverspreiding) geeft de bovengrens voor de optimalisatie van het baggerbezwaar. Ook al zou alle slib op land worden geborgen of zo ver weg op de Noordzee worden verspreid dat de retourstroming nul wordt, dan nog blijft er een natuurlijke aanslibbing van circa 2 MT/jaar over. Niettemin is het reductiepotentieel met bijna 1.2 MT/jaar of 40% zeker interessant.

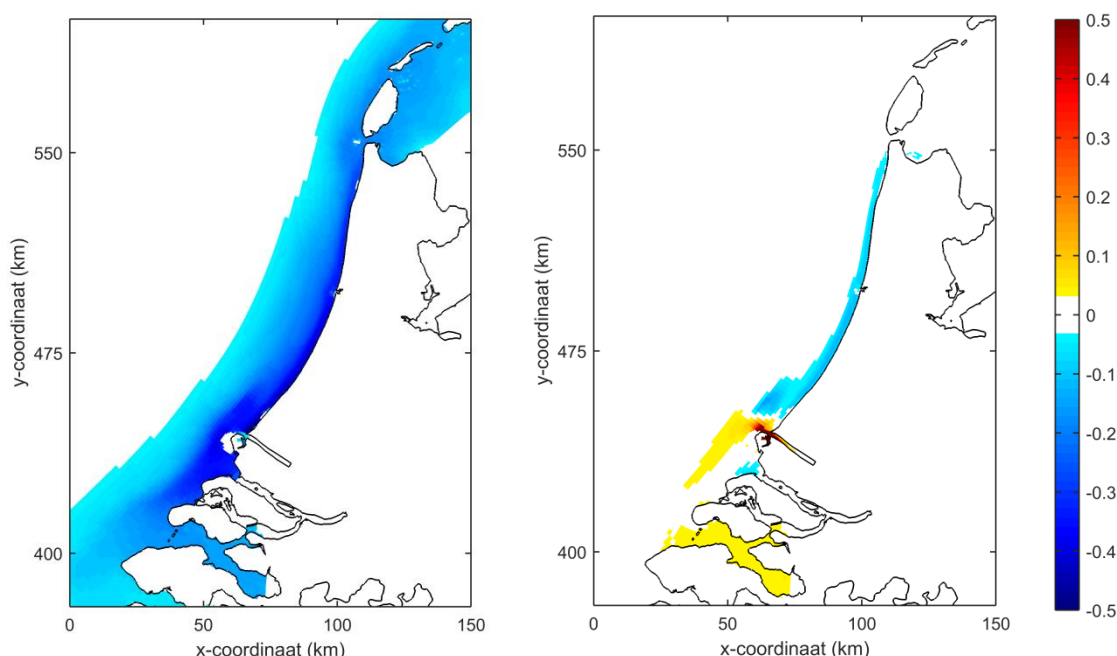
Figuur 6.4 toont het relatieve verschil tussen de berekeningen basis_a en basis_b ten opzichte van basis m.b.t. de jaargemiddelde slibconcentratie aan de oppervlakte. Hieruit blijkt dat het niet meer terugstorten van baggerspecie leidt tot een aanmerkelijke verlaging van de slibconcentratie in de kustzone. Het effect strekt zich tot ver naar het noorden uit. Het verschil tussen de berekening zonder aanslibbing en slibverspreiding ('zonder haven') en de referentie met aanslibbing en slibverspreiding ('met haven') is veel kleiner. Ten noorden van het mondingsgebied treedt in basis_b een iets lagere slibconcentratie op door het ontbreken van specieverspreiding. Ten zuiden van het mondingsgebied treedt een iets hogere slibconcentratie op door het ontbreken van havenaanslibbing. Het concentratieverhogende effect van slibverspreiding wordt dus in belangrijke mate gecompenseerd door het concentratieverlagende effect van aanslibbing, maar beide effecten werken ruimtelijk iets anders door vanwege de ligging van de loswal ten noorden van het havengebied.

Vanwege de noordwaarts gerichte reststroming langs de kust zou de verwachting kunnen ontstaan dat effecten van de haven zoals aanslibbing en verspreiding van baggerspecie voornamelijk ten noorden van de havenmonding optreden. Maar de getijstroming is circa de helft van de tijd zuidwaarts gericht en bij noordelijke wind kan de reststroming zelfs langere tijd zuidwaarts gericht zijn. Hierdoor wordt b.v. de saliniteit in de Voordelta sterker bepaald door de uitstroming van zoet Rijn- en Maaswater via de Nieuwe Waterweg en Haringvliet dan door de uitstroming van zoet Scheldewater (Lacroix et al., 2004). Daarom zijn ook ten zuiden van de havenmonding effecten te verwachten zoals ook volgt uit de berekeningen.

Door aanpassing van het stortbeleid is dus niet alleen het baggerbezwaar te optimaliseren, maar ook de troebelheid in de kustzone. Dit biedt b.v. perspectieven voor de mitigatie van andere vertroebelende activiteiten in de kustzone zoals zandwinning. Ook kan hiermee de inspanning van de haven om de ecologische voetafdruk te verminderen ('greenport') beter zichtbaar worden gemaakt.

Tabel 6.1. Sedimentfluxen in de haven van Rotterdam voor scenario's met en zonder baggeren en verspreiden.

Scenario	Rivier in (Mton/year)	Zee in (Mton/year)	Zee uit (Mton/year)	Baggeren (Mton/year)
Basis	1,44	3,39	-1,60	-3,13
Basis_a	1,44	1,51	-0,90	-1,93 (-38%)
Basis_b	1,44	6,67	-7,82	0,00 (-100%)



Figuur 6.4. Effect scenario met havenaanslibbing maar zonder slibverspreiding (links) en scenario zonder havenaanslibbing en slibverspreiding (rechts) op jaargemiddelde slibconcentratie in de kustzone (relatief verschil t.o.v. referentie met aanslibbing en slibverspreiding). Een relatief verschil van 0.1 is equivalent met een 10% verandering.

6.4 Invloed van stortlocatie

De volgende stap is om te bepalen hoe de retourstroming en het baggerbezwaar afhangt van de stortlocatie. De doorgerkende varianten van de stortlocatie worden getoond in Figuur 4.2. De sedimentbudgets van deze scenario's zijn weergegeven in Tabel 6.2, Figuur 6.5 en Figuur 6.6. De bijschriften IM1, IM2 en IM3 in de laatstgenoemde figuur betreffen de verschillende slibfracties in het model. Zie §5.4 en de uitleg hieronder.

Uit deze resultaten blijkt een zeer duidelijk verband tussen de ligging van de loswal, het baggerbezwaar en het retourpercentage (Figuur 6.8 en Figuur 6.9). Hoe verder de loswal af ligt van de Maasmond, des te lager is het baggerbezwaar en het retourpercentage. De verst weg gelegen loswal (LW West) resulteert in een baggerbezwaar dat slechts 0.2 MT/jaar boven het in de vorige paragraaf bepaalde minimum zonder slibverspreiding ligt. De afname van het baggerbezwaar wordt veroorzaakt door de afname van de slibimport vanaf zee (Figuur 6.5).

Figuur 6.7 toont voor de verschillende stortlocaties het retourpercentage voor de verschillende slibfracties. Dit percentage is het hoogste en het meest gevoelig voor locatie voor de grove slibfractie (IM2, 'macrovlokken') met een valsnelheid van 1 mm/s. De middelste slibfractie (IM1, 'microvlokken') met een valsnelheid van 0.125 mm/s heeft een ongeveer tweemaal lager retourpercentage. Omdat deze fractie beter gemengd is over de waterverticaal, is ze minder gevoelig voor het kustwaartse resttransport bij de bodem. De fijnste slibfractie (IM3, 'colloïdaal') speelt geen rol van betekenis vanwege de zeer lage valsnelheid. De optimale verspreidingsafstand is dus afhankelijk van de samenstelling van de baggerspecie. Overigens kunnen de eigenschappen van slib na lozing wijzigen door de vorming of afbraak van vlokken. Dit is in de huidige modellering en beschouwing niet meegenomen.

Uit Figuur 6.8 blijkt wel dat de effectiviteit van het verder wegbrengen van de specie afneemt met de afstand tot de monding. De afstand tussen de verdiepte LW en LW3 is circa 7.5 km en dit resulteert in een afname van het baggerbezwaar van 0.66 MT (afname 88 kT/km). De afstand tussen LW3 en LW West is circa 17.5 km dit resulteert in een afname van 0.39 MT (22 kT/km, d.w.z. een 4x zwakkere gradiënt). Rekening houdend met bagger- en vaarkosten kan de economisch meest gunstige loswallocatie worden bepaald. Deze optimalisatieslag valt echter buiten de scope van deze studie en zal door de beheerders zelf worden uitgevoerd.

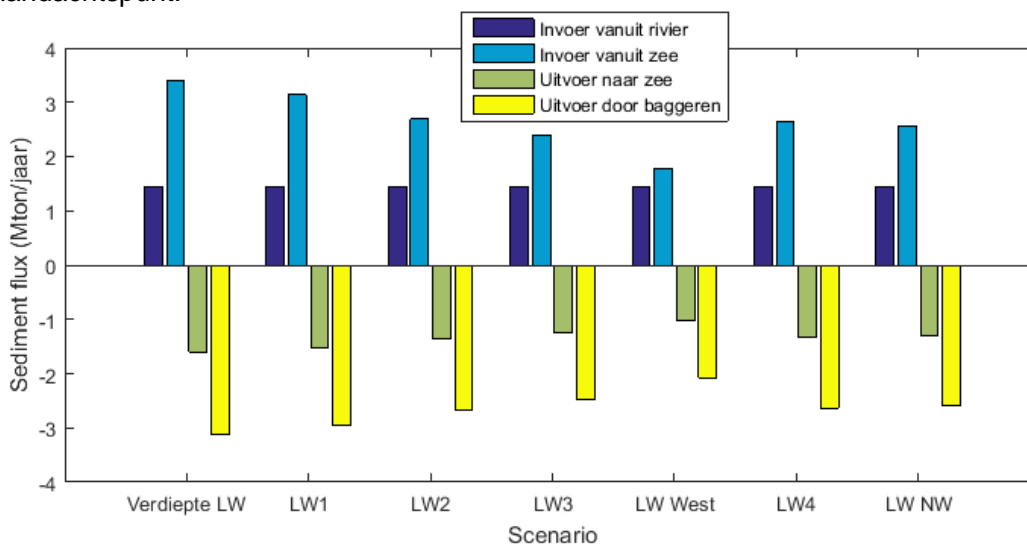
Tabel 6.2. Sedimentfluxen in de haven van Rotterdam voor verschillende stortlocaties. De flux vanuit de rivier is in alle gevallen 1.44 MT/jr.

Stortlocatie	Afstand tot monding (km)	Vanuit zee (Mton/jr)	Naar zee (Mton/jr)	Baggeren (Mton/jr)	Retourstroming (%)
Verdiepte LW	8,1	3,39	-1,60	-3,13	36
LW1	9,9	3,14	-1,51	-2,96 (-5%)	32
LW2	13,7	2,69	-1,35	-2,67 (-15%)	25
LW3	17	2,40	-1,25	-2,47 (-21%)	20
LW West	34,2	1,79	-1,03	-2,08 (-34%)	6
LW4	14,8	2,65	-1,34	-2,64 (-16%)	25
LW NW	17,1	2,56	-1,31	-2,59 (-17%)	24

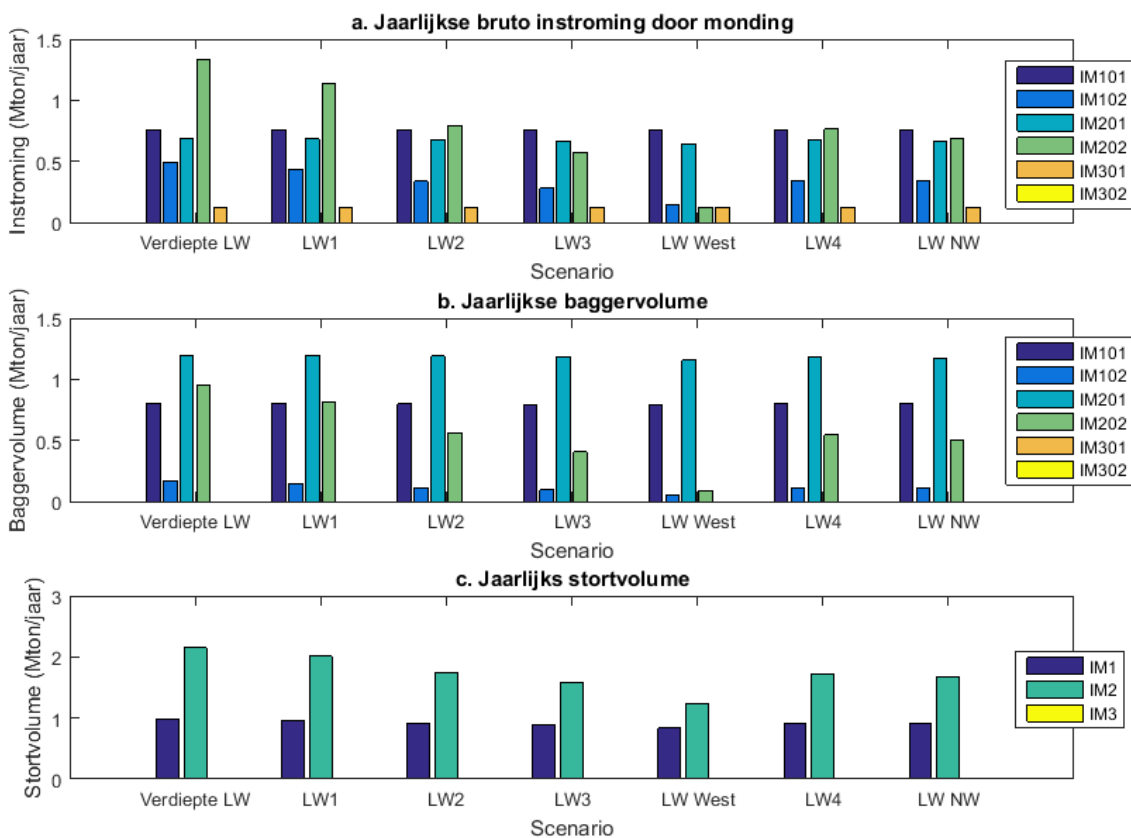
Baggerbezwaar en retourpercentage zijn zeer sterk gekoppeld via een exponentieel verband, zie Figuur 6.10. Een loswal dichterbij de Maasmond dan de huidige locatie verdiepte LW (hier niet onderzocht) is sterk te ontraden, omdat bij hoger retourpercentages het baggerbezwaar snel toeneemt. Zo leidt een retourpercentage van 50% tot een baggerbezwaar van 3.8 MT/jaar en een percentage van 75% tot 5.3 MT/jaar.

Het berekende retourpercentage voor loswal NW is 24%. Dit percentage is in redelijke overeenstemming met eerdere studies waarin dit retourpercentage is geschat op 30%. Zie Hoofdstuk 3 voor verdere details over deze studies. Het retourpercentage van 36% voor de verdiepte loswal ligt in de buurt van het door Stutterheim (2002) gerapporteerde retourpercentage van 44% voor loswal Noord. Loswal Noord ligt nabij loswal NW maar nog iets dichterbij de monding, zie Figuur 1.2.

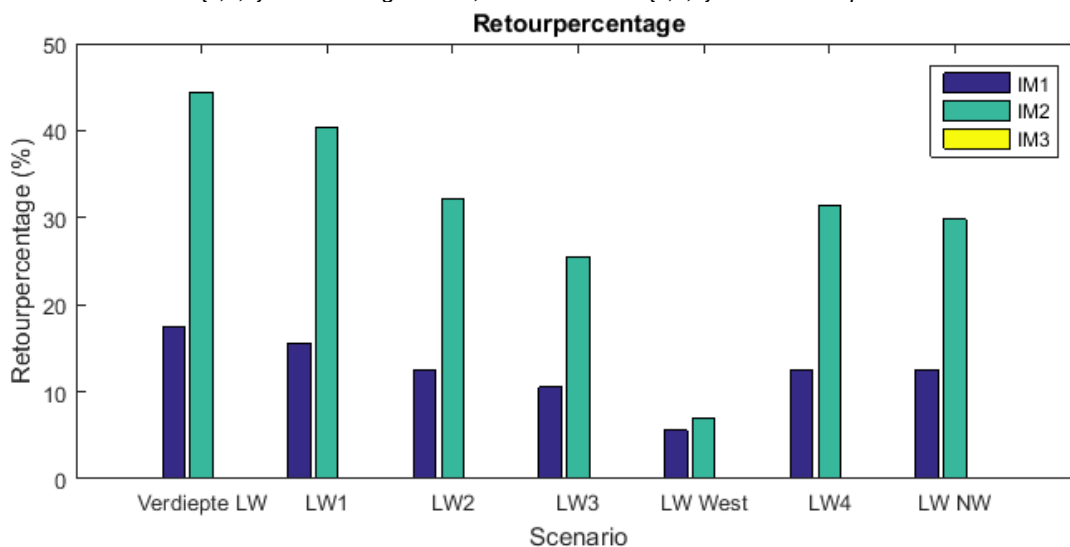
Figuur 6.11 toont het relatieve verschil van de jaargemiddelde slibconcentratie aan het oppervlak van de diversie loswallocaties ten opzichte van de huidige locatie (verdiepte LW). Rondom de nieuwe locatie wordt logischerwijs een toename van de slibconcentratie berekend, maar de slibconcentratie vlakbij de kust en de Maasmonding neemt sterker af naarmate de loswallocatie verder zeewaarts ligt. Dit is het resultaat van de verminderde retourstroming. Een noordwaartse verplaatsing (zoals voor loswal NW) resulteert in een concentratietoename naar het noorden toe en een afname in het zuiden. Bij de optimalisatie van de verspreidingslocatie is naast retourstroming ook slibconcentratie (vertroebeling) een aandachtspunt.



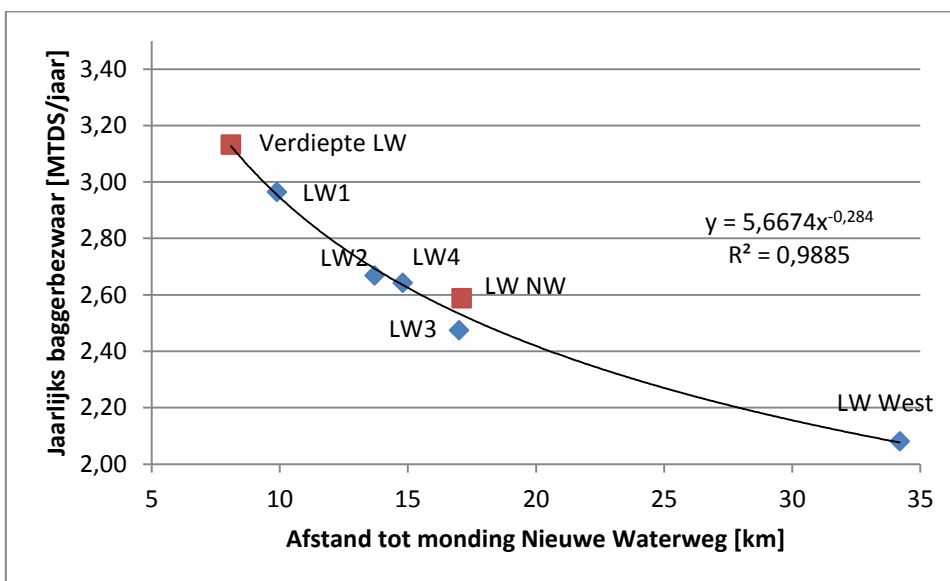
Figuur 6.5. Sedimentfluxen in de haven van Rotterdam.



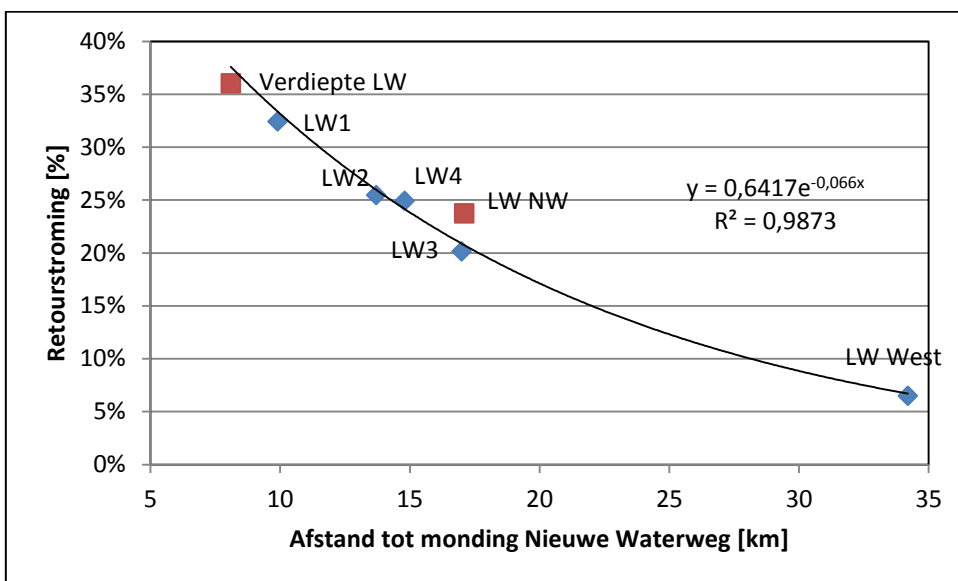
Figuur 6.6. Jaarlijkse sedimentflux vanuit zee (a); baggervolumes (b) en stortvolumes (c) per sedimentfractie. De subfractie IM{1,2,3}01 is achtergrondslib, de subfractie IM{1,2,3}02 is slib verspreid vanaf de loswal.



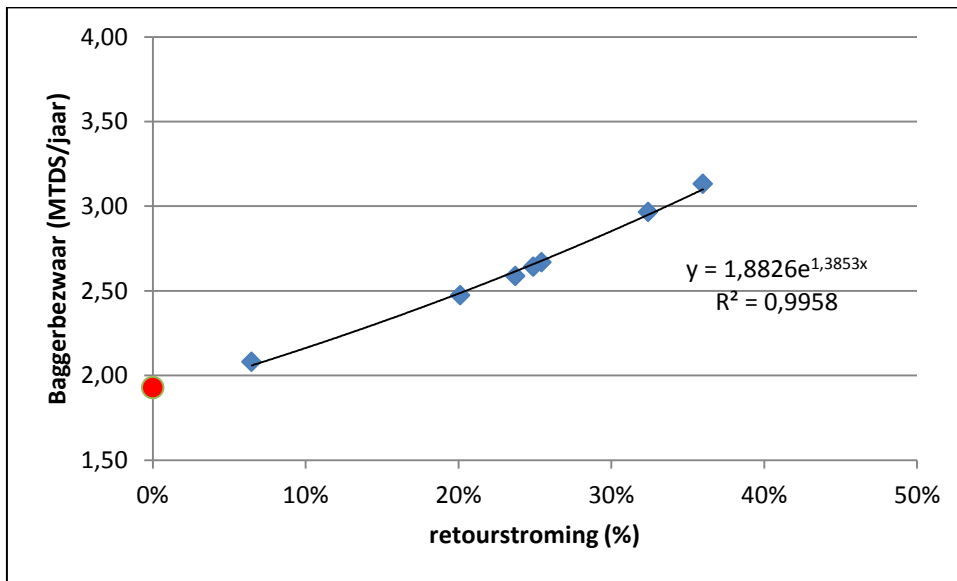
Figuur 6.7. Retourpercentage voor de verschillende stortlocaties per slibfractie (IM1 = 0.125 mm/s; IM2 = 1 mm/s). Het retourpercentage voor de zeer langzaam bezinkende fractie IM3 is zeer laag en daardoor niet zichtbaar.



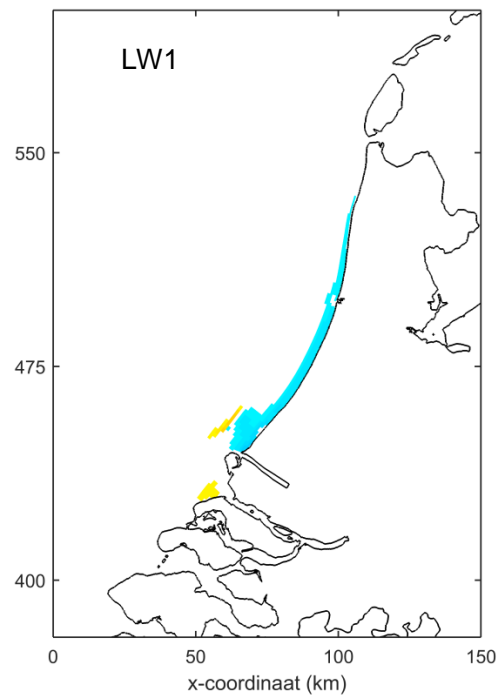
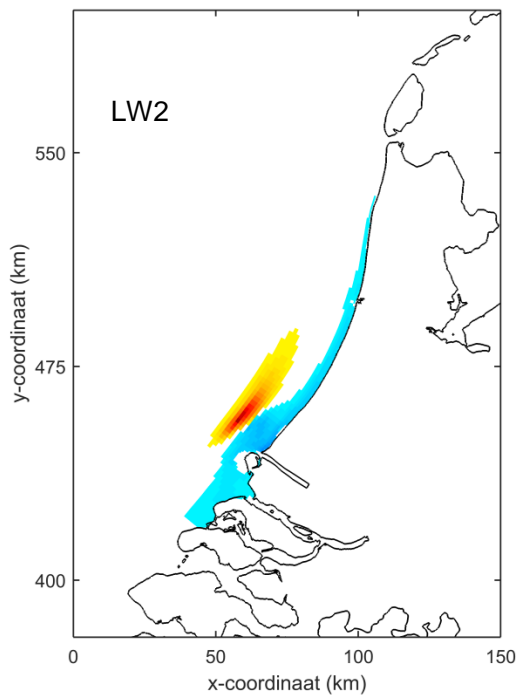
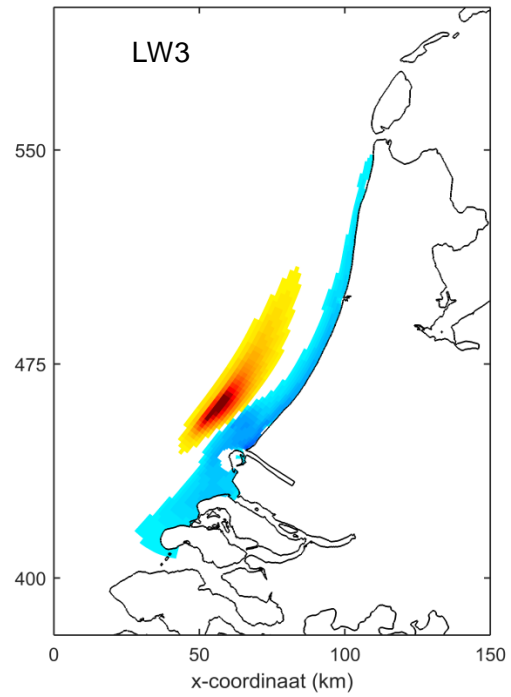
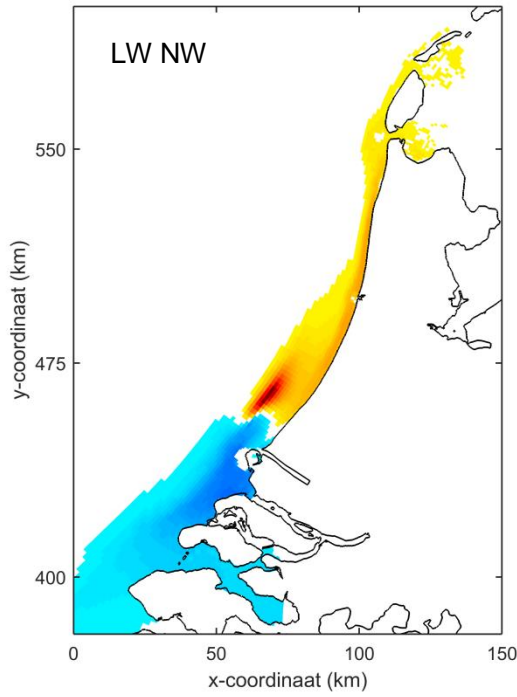
Figuur 6.8. Jaarlijks baggervolume als functie van de afstand tussen de stortlocatie en de Nieuwe Waterweg. De rode punten zijn bestaande verspreidingslocaties, de blauwe punten zijn de hypothetische locaties.

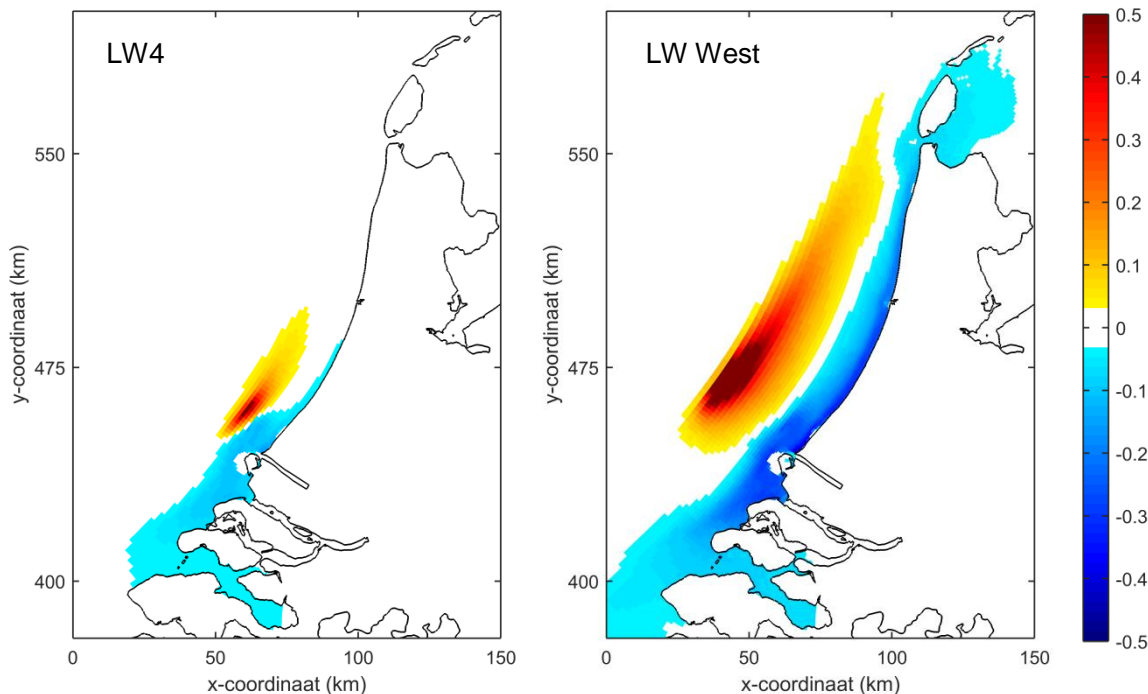


Figuur 6.9. Retourpercentage als functie van de afstand tussen de stortlocatie en de Nieuwe Waterweg.



Figuur 6.10: Relatie tussen baggerbezwaar en retourstroming voor de in Tabel 7.5 gedefinieerde scenario's. Het scenario basis_a zonder slibverspreiding is hieraan toegevoegd als rode punt.





Figuur 6.11: Relatief verschil in jaargemiddelde slibconcentratie (-) aan de oppervlakte tussen scenario met alternatieve en huidige loswallocatie. Een verschil van 0.1 is equivalent met 10%.

6.5 Variatie in het jaar en tussen verschillende jaren

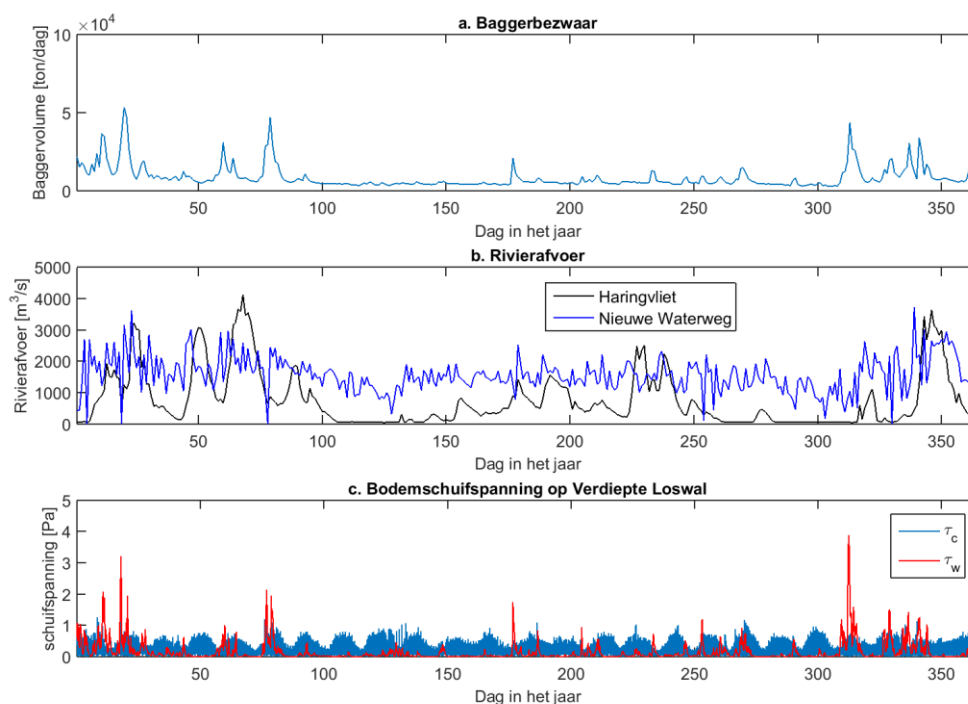
De eerdere resultaten zijn alle verkregen op basis van de hydrodynamische omstandigheden in 2007 m.b.t. getij, wind, golven en rivierafvoer en zijn in het voorafgaande alleen jaargemiddeld beschouwd. De vraag is in hoeverre het baggerbezwaar en de retourstroming gevoelig is voor variaties in de hydrodynamica, zowel binnen het jaar en tussen verschillende jaren. Daarom zijn ook sedimenttransportberekeningen uitgevoerd die gebruik maken van de hydrodynamica die representatief is voor de jaren 2012 t/m 2015.

Maar eerst wordt de variatie van de aanslibbing over het jaar 2007 beschouwd. Figuur 6.12 toont het berekende baggerbezwaar in de tijd alsmede het verloop van de zoetwaterafvoer door de Nieuwe Waterweg en de Haringvlietssluisen en de getij- en windgedreven bodemschuifspanning bij de verdiepte loswal.

In 2007 blijkt de meeste aanslibbing op te treden in de periode januari – maart en november – december. Het baggerbezwaar bereikt af en toe pieken van circa 50 kton/dag. Van april tot oktober is de aanslibbing een stuk minder en fluctueert rond een basis van circa 4 kton/dag. Van de totale aanslibbing van 3.13 MT/jaar = 8.6 kton/dag wordt dus ongeveer de helft veroorzaakt door een continu basisaanslibbing en de helft door kortstondige pieken met tot een factor 10 hogere sedimentatiesnelheid.

De pieken lijken op het eerste oog zowel samen te vallen met perioden van hoge rivierafvoer als perioden met hoge golven. Bij nadere inspectie is het verband tussen golfgedreven bodemschuifspanning en baggervolume het sterkste. Zowel qua fasering als amplitude vallen pieken tussen beide parameters meestal goed samen. Hierbij wordt opgemerkt dat in het

model het tijdsverschil tussen aanslibbing en baggervolume klein is, namelijk maximaal de inverse van de ingestelde baggerfrequentie van 1 maal per uur. Tussen rivierafvoer en baggervolume is het verband veel zwakker en een afvoerpiek tussen dagnummers 225 en 250 uit zich niet in een hoger baggervolume.



Figuur 6.12. Verloop van het baggerbezwaar, rivierafvoer en getij- en golfgedreven bodemschuifspanning over het jaar 2007.

De variatie in sedimentbudget tussen de verschillende jaren – 2007 als basis en de jaren 2012 t/m 2015 – is weergegeven in Tabel 6.3 en in Figuur 6.13. Deze berekeningen laten zien dat er vrij grote verschillen zijn tussen de diverse jaren wat betreft baggerbezwaar (bandbreedte $\pm 20\%$), maar dat de verschillen m.b.t. retourstroming kleiner zijn (bandbreedte $36 \pm 3\%$, dus minder dan 10% afwijking). Dit duidt erop dat de verschillen in baggerbezwaar vooral ontstaan door natuurlijke variaties van het slibaanbod in de Noordzee en in mindere mate door verschillen in de retourstroming. Het is echter moeilijk om de invloed van diverse mogelijke oorzaken precies te kwantificeren zonder aanvullende gevoeligheidsberekeningen, omdat in de jaarberekeningen variaties van het getij, wind, golven en rivierafvoer gelijktijdig optreden in een steeds wisselend samenspel. Bovendien is niet alleen het momentane samenspel tussen deze factoren bepalend voor de momentane aanslibbing en retourstroming, maar ook de omstandigheden in de voorafgaande periode in combinatie met de eveneens variabele voor transport beschikbare hoeveelheid slib. Niettemin wordt hieronder een poging gedaan om de meest in het oog springende resultaten te duiden en wordt een vergelijking gemaakt met het in deze jaren waargenomen baggerbezwaar.

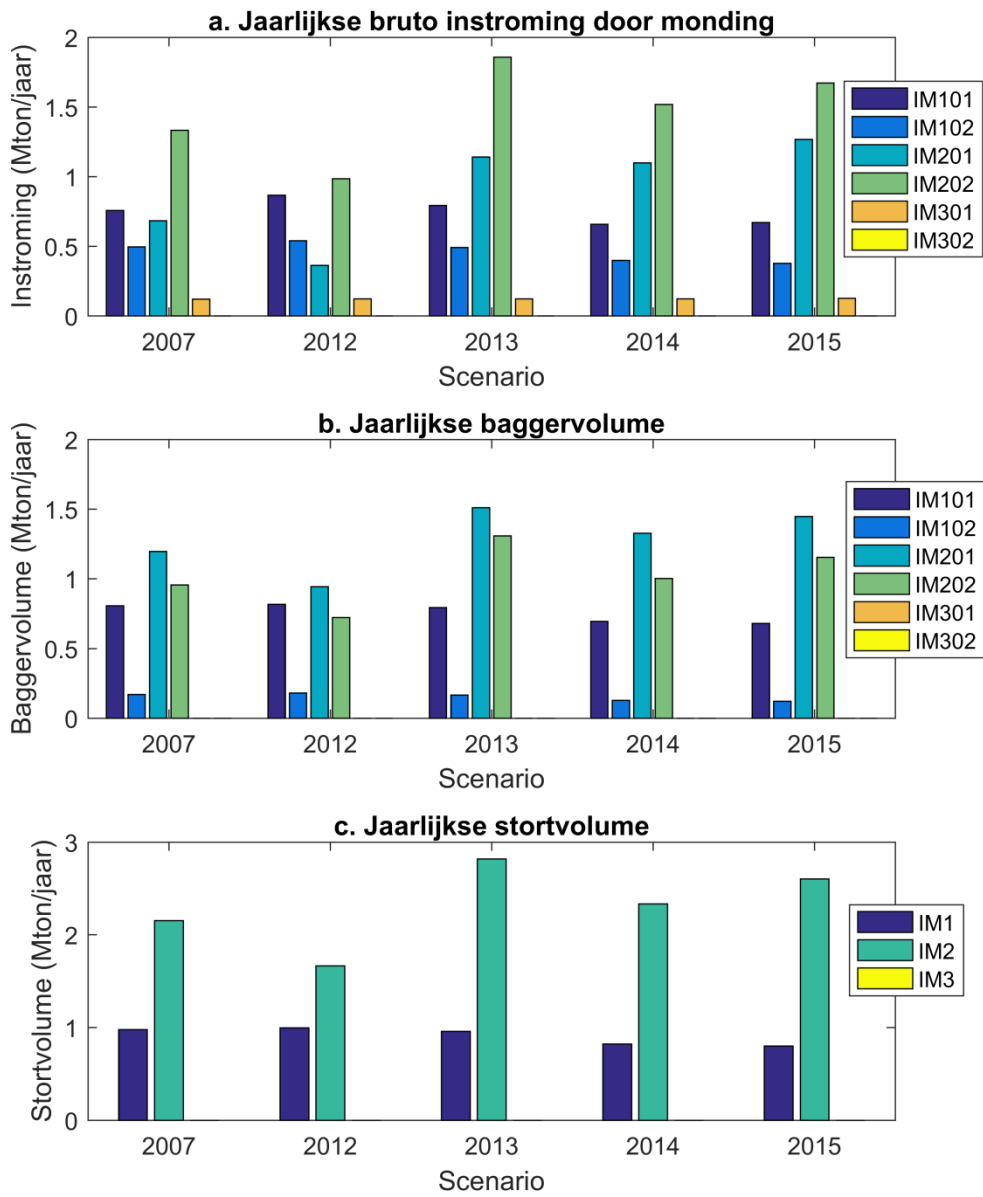
In de jaren 2012 en 2013 was de instroming vanuit de rivier vrijwel gelijk aan 2007, maar week de uitwisseling met de zee duidelijk af, wat resulteerde in een 15% lagere baggervolume in 2012 en een 20% hogere baggervolume in 2013. Deze verschillen in baggervolume komen deels overeen met de geregistreerde baggervolumes. Kijkend naar de baggervolumes geregistreerd door het Havenbedrijf Rotterdam, dan was het baggervolume in

2012 inderdaad lager dan in 2007 (-7%) en was het baggervolume in 2013 hoger dan in 2007 (+17%). In de baggervolumes geregistreerd door RWS is dit patroon juist tegenovergesteld. Echter, dit heeft deels economische en beleidsmatige redenen die niet gemodelleerd worden.

In de jaren 2014 en 2015 was de sedimentinvoer vanuit de rivier relatief laag (circa -15%). De sedimentinvoer vanuit de Noordzee was hoger (+5-10%) en de sedimentuitvoer naar de Noordzee was alleen in 2014 hoger (circa +13%). Het netto resultaat hiervan is een berekend baggervolume in 2014 dat vrijwel gelijk is aan het baggervolume in 2007, en een 9% hoger baggervolume in 2015. Het geregistreerde baggervolume in 2014 was inderdaad in de zelfde orde van grootte als in 2015, maar beide baggervolumes weken wel af van 2007: een iets lager totaal baggervolume van RWS + HbR (-20-30%), en een veel lager baggervolume door alleen RWS (-80%). De relatief grote baggerinspanning van RWS in 2007 is mede gestuurd door budgettaire overwegingen en hoeft niet direct gekoppeld te zijn aan een hoge aanslibbing.

Tabel 6.3. Sedimentfluxen in de haven van Rotterdam voor verschillende jaren..

Scenario	Rivier in (Mton/jr)	Zee in (Mton/jr)	Zee uit (Mton/jr)	Baggeren (Mton/jr)	Retour- stroming (%)
Basis_2007	1,44	3,39	-1,60	-3,13	36
Run_2012	1,37	2,88	-1,48	-2,66 (-15%)	34
Run_2013	1,40	4,41	-1,93	-3,78 (+20%)	39
Run_2014	1,24	3,80	-1,80	-3,15 (+1%)	36
Run_2015	1,16	4,12	-1,79	-3,41 (+9%)	38



Figuur 6.13. Sedimentbudget voor de verschillende jaren.

6.6 Invloed van rivierafvoer

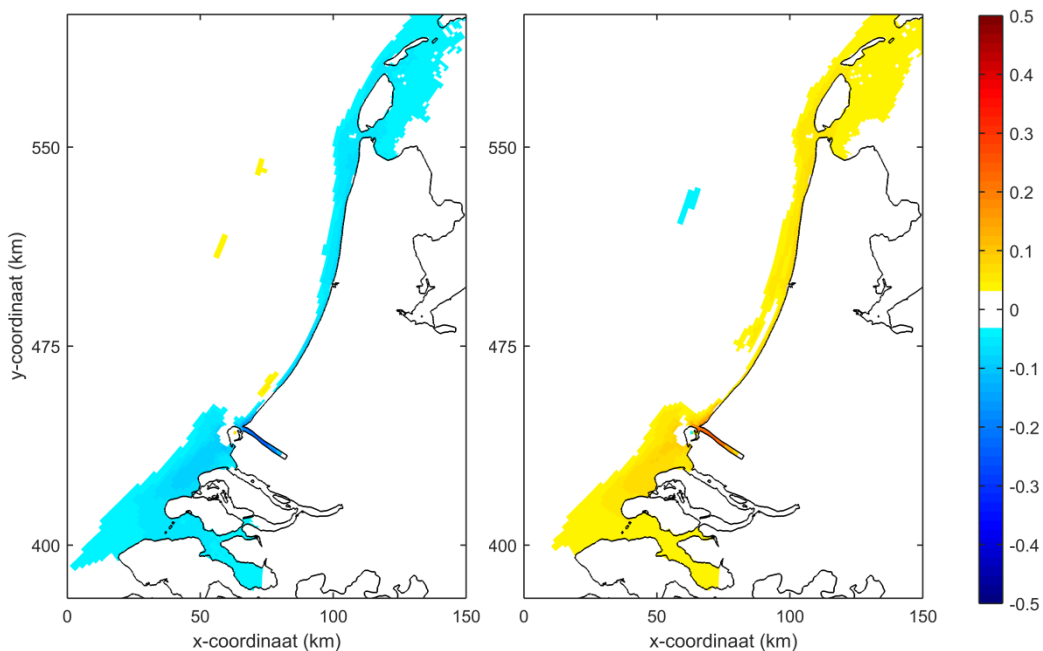
Het effect van de Rijn-Maasafvoer op het sedimentbudget en de baggervolumes is aangegeven in Tabel 6.4. Naast de te verwachten verschillen in sedimentaanvoer vanuit de rivieren, welke overeenkomen met de verschillen in debieten (-25% en +25%) zijn de sediment in- en uitstromingen verschillend: een ca. 22% af- of toename van sedimentinstroming vanuit de Noordzee, en een ca. 17% af- of toename van de sedimentuitstroming naar de Noordzee. Voor het scenario met een lage rivierafvoer resulteert dit in een afname van het jaarlijkse baggervolume van 25%, en voor het scenario met een hoge rivierafvoer resulteert het in een toename van het baggervolume met 28%. De toe- en afname van het baggerbezwaar is dus bijna 1:1 gerateerd aan de zoetwaterafvoer.

Er zijn twee verklaringen voor het verband tussen rivierafvoer en aanslibbing. De eerste verklaring is de toename van de sliblast vanuit de rivier. De tweede verklaring is de toename is een mogelijke toename van de sliblast uit zee doordat onder invloed van de sterkere saliniteitsgradiënten bij hoge rivierafvoer de kustwaarts gerichte reststroming aan de bodem sterker wordt en meer slib naar de Maasmonding terugvoert. Het eerste punt kan slechts een deel van de toename verklaren, omdat de sliblast uit de rivier minder sterk toeneemt (0.72 MT/j) dan het baggerbezwaar (1.67 MT/j). Het tweede punt moet dus wel dominant zijn. Dit wordt bevestigd door het retourpercentage, wat voor het lage afvoerscenario veel kleiner is dan voor het hoge afvoerscenario.

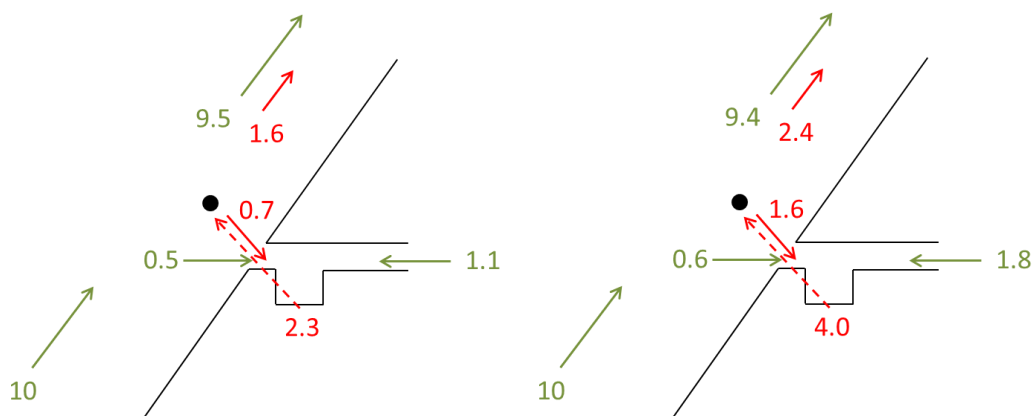
Figuur 6.14 toont de jaargemiddelde slibconcentratie in de kustzone voor beide scenario's ten opzichte van het basisscenario. Hieruit blijkt duidelijk dat een hogere afvoer leidt tot een hogere slibconcentratie in de kustzone en een lagere afvoer tot een lagere slibconcentratie. De resulterende slibbalans voor beide scenario's is weergegeven in Figuur 6.15.

Tabel 6.4. Sedimentfluxen in de haven van Rotterdam voor verschillende rivierafvoerscenario's.

Scenario	Rivier in (Mton/jr)	Zee in (Mton/jr)	Zee uit (Mton/jr)	Baggeren (Mton/jr)	Retourstroming (%)
Rivier_Laag	1,08	2,70	-1,34	-2,34 (-25%)	31%
Basis	1,44	3,39	-1,60	-3,13	36%
Rivier_Hoog	1,80	4,18	-1,89	-4,01 (+28%)	40%



Figuur 6.14. Relatief verschil in jaargemiddelde slibconcentratie aan de oppervlakte (mg/l). Links: Effect van 25% lagere afvoer t.o.v. het gemiddelde. Rechts: effect van 25% hogere afvoer.



Figuur 6.15. Slibbalans in MT/jaar voor het scenario met lage afvoer (links) en hoge afvoer (rechts). Zie ter vergelijking Figuur 6.3 voor de slibbalans voor het basisscenario.

7 Analyse resuspensie uit Verdiepte Loswal

7.1 Introductie

In dit hoofdstuk wordt een berekening gemaakt van resuspensie vanuit de loswallen en hoe dit afhangt van de vuldiepte van de loswal. Deze berekening kan worden gebruikt als duiding van de recirculatieberekeningen die gemaakt zijn met Delwaq.

De Verdiepte Loswal is, zoals de naam al suggereert, dieper dan de directe omgeving; voordat er baggerspecie in is verspreid is deze locatie als zandwinput gebruikt. Deze zandwinput is maximaal 10 meter dieper dan de originele bodem. Als deze put vervolgens met baggerspecie wordt gevuld is de huidige strategie om de put in zijn geheel op te vullen. Aan de hand van een berekening zal worden getoetst of het voordelig kan zijn deze strategie aan te passen.

Het duiden van de resultaten is ook bruikbaar voor het beoordelen van de geldigheid van de Delwaq modelresultaten. Het model heeft immers niet de resolutie om de Verdiepte Loswal als een put in het model op te kunnen nemen. Daarmee wordt de Verdiepte Loswal in het model dus automatisch beschouwd als een put die tot de rand toe wordt gevuld. Met behulp van de resuspensieberekening kan worden afgeschat wat de relatieve afname is van de erosieflux als een verdiepte verspreidingslocatie nog gevuld moet worden. Dit kan worden toegepast voor eventuele nieuwe verdiepte verspreidingslocaties.

7.1.1 Uitgangspunten berekening resuspensie

De resuspensieberekening vindt plaats in drie stappen. Ten eerste wordt de schuifspanning op de bodem berekend als functie van het bodemniveau, voor een geïdealiseerde situatie. Hiermee kan inzicht worden verkregen in de ordegrrootte van de schuifspanning en hoe deze verschilt met een toe- of afname van het bodemniveau. Als tweede stap worden de golf- en stromingscondities zoals deze in Delwaq zijn toegepast gebruikt voor eenzelfde soort berekening. Hiermee kan over een geheel jaar de optredende bodemschuifspanning worden berekend. Als derde en laatste stap zal de berekende bodemschuifspanning worden gebruikt om de erosieflux vanuit de loswallen te berekenen als functie van vuldiepte. Deze erosieflux kan worden beschouwd als de maximale resuspensie die er per jaar op kan treden vanuit de loswal. De uitkomsten van deze laatste berekening worden vervolgens bediscussieerd.

De gebruikte formules en gevolgde stappen worden in detail beschreven in Appendix B. Om de resuspensie te berekenen moet eerst een bodemschuifspanning worden berekend. De bodemschuifspanning als functie van diepte kan met een handberekening worden berekend, uitgaande van de volgende aannames:

- De bodemschuifspanning kan worden gezien als de som van twee onafhankelijke bijdragen ten gevolge van getijstroming en wind
- Stratificatie wordt buiten beschouwing gelaten
- Stroming en golven werken in dezelfde richting; de facto wordt de loswal dus als een 1D punt beschouwd.
- Voor de golven is lineaire golftheorie van toepassing
- De bodem wordt als een vlakke, hydraulisch ruwe bodem geschematiseerd. De mogelijke effecten van een lokale put worden buiten beschouwing gelaten.

Hoewel stratificatie in dit gebied optreedt is het, zoals hierboven al vermeldt, buiten beschouwing gelaten. Dit is gedaan om twee redenen. Ten eerste: de orbitaalsnelheden onder golven worden niet beïnvloed door stratificatie. Op de gebruikte waterdieptes is de verwachting dat golven dominant zijn voor het bepalen van de totale erosie. Ten tweede zorgt stratificatie ervoor dat de aanname van een logaritmisch snelheidsprofiel niet langer opgaat. De aanname van een logaritmisch snelheidsprofiel is noodzakelijk voor het

7.2 Berekening bodemschuifspanning

7.2.1 Geïdealiseerde berekening bodemschuifspanning

In de geïdealiseerde berekening wordt er onderscheid gemaakt tussen een bodemschuifspanning ten gevolge van golven en ten gevolge van stroming. De stroming wordt gezien als stationair en uniform. In Tabel 7.1 staan de constanten weergegeven die in alle komende berekeningen zijn gebruikt:

Tabel 7.1 Constanten voor geïdealiseerde en modeldata berekening

constante	beschrijving	waarde	eenheid
g	valversnelling	9.81	m/s ²
ρ	dichtheid	1025	kg/m ³
d ₉₀	90 ^e percentiel korrelgrootte	300	μm

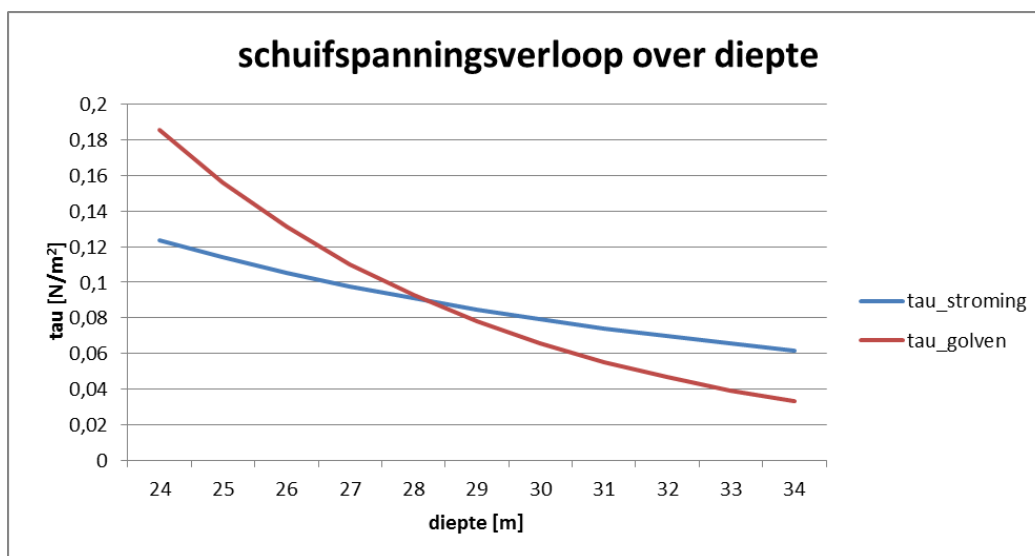
Voor wat betreft de keuze van de d₉₀ wordt aangenomen dat in de loswal slibrijk sediment wordt verspreid, dat nog wel een fractie zand bevat. Deze aanname is noodzakelijk omdat de formulering van van Rijn (1982) voor de ruwheidshoogte k_s niet opgaat voor een bodem die alleen uit slib bestaat.

In de geïdealiseerde situatie worden de volgende variabelen aangehouden. In stap 2 (berekening op basis van modeldata) worden deze waarden gebaseerd op Delwaq modeluitvoer.

Tabel 7.2 Variabelen voor geïdealiseerde berekening

variabele	beschrijving	waarde	eenheid
h	waterdiepte ter plaatste van loswal	24-34	m
u	gemiddelde stroomsnelheid	0.4	m/s
T	golfperiode	6	s
H _s	significante golfhoogte	2.0	m

Als deze waarden worden gebruikt om de bodemschuifspanning uit te rekenen leidt dat tot de volgende waarden als functie van de diepte (Figuur 7.1). Tau_c staat hierin voor de schuifspanning ten gevolge van stroming (c = current) en tau_w staat voor de schuifspanning ten gevolge van golven (w = waves).



Figuur 7.1 Schuifspanningsverloop bij toenemende diepte voor zowel getijgedreven als golfgedreven bodemschuifspanning. Bodemschuifspanning ten gevolge van golven neemt sterker af met diepte (kwadratisch).

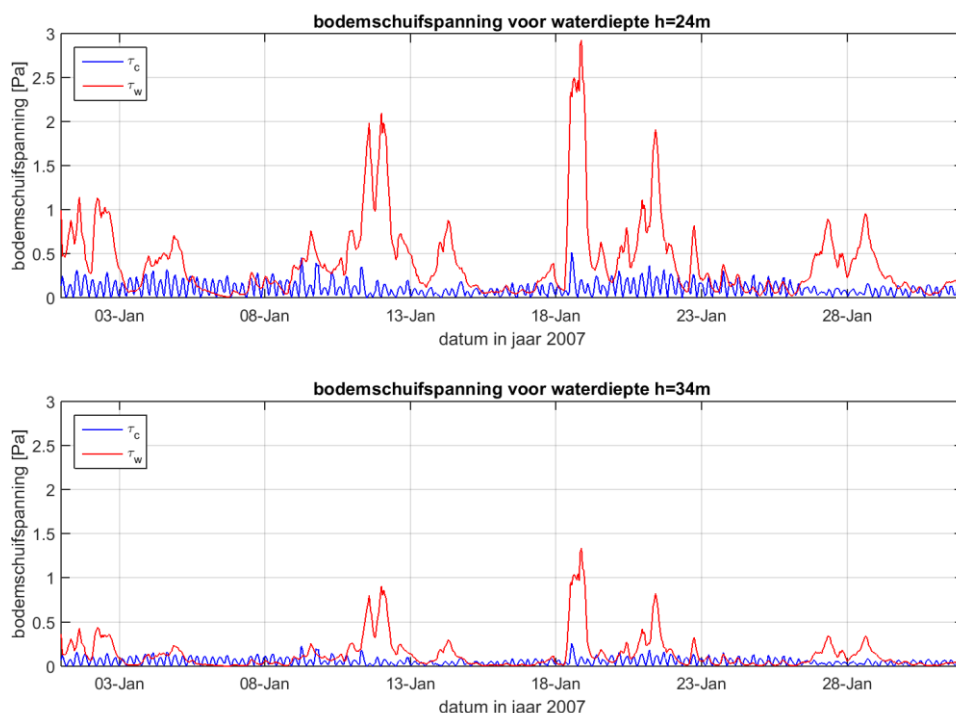
Figuur 7.1 geeft een kwalitatief beeld van de afname van de bodemschuifspanning als alleen de diepte als parameter wordt gevarieerd. De bodemschuifspanning ten gevolge van golven neemt omgekeerd kwadratisch af met het afnemen van diepte. Daarnaast zijn de waarden die nu aan worden gehouden voor de golfgedreven bodemschuifspanning relatief laag. Een significante golfhoogte van $H_s=1.5\text{m}$ en golfperiode van $T=6\text{s}$ komt op de Noordzee veelvuldig voor. In de meeste gevallen is de bodemschuifspanning ten gevolge van golven een ordegrrootte groter dan de bodemschuifspanning ten gevolge van getijstrooming.

7.2.2 Berekening bodemschuifspanning op basis van modeldata

In deze paragraaf wordt een schuifspanningsberekening gemaakt op basis van modeldata. Voor de twee bijdragen aan de bodemschuifspanning door stroming en golven wordt de volgende modeldata gebruikt:

- Voor getijgedreven stroming wordt een gemiddelde genomen van stroomsnelheden op locatie 'Verdiepte Loswal' in het ZUNO-DD model. Om rekening te houden met stratificatie – aangezien dit wel in het hydrodynamische model aanwezig is – wordt een gemiddelde genomen van de onderste 4 modellagen (12 totaal). Omdat zonder stratificatie kan worden uitgegaan van een logaritmisch snelheidsprofiel is de snelheid die hieruit berekend wordt vergelijkbaar met de gemiddelde stroomsnelheid.
- Voor de golfgedreven bodemschuifspanning worden de significante golfhoogte en piekperiode aangehouden zoals deze met SWAN zijn berekend. Op basis van de golfperiode kan de golflengte uit worden gerekend via de dispersierelatie.

Op basis van deze data kan voor de Verdiepte Loswal de bodemschuifspanning per jaar uit worden gerekend, afhankelijk van vuldiepte. Hierbij wordt de waterdiepte ter plaatse van de loswal gevarieerd tussen de 24 en 34 meter. Een tijdsserie op basis van de hydrodynamica van januari 2007 is in Figuur 7.2 te zien:



Figuur 7.2 Schuifspanning voor twee verschillende dieptes: $h=24$ meter (bovenste paneel) en $h=34$ m (onderste paneel).

In deze figuur is het duidelijk te zien dat de golven een belangrijke bijdragen leveren aan de totale schuifspanning, en in het geval van stormen een ordegrrootte groter zijn dan de schuifspanning ten gevolge van stroming. De schuifspanning ten gevolge van stroming varieert op een dagelijkse schaal (getij) en daarnaast ook nog op een tweewekelijkse schaal (springtij-doodtij cyclus). In absolute waarde komt deze echter niet boven de 0.5 Pa uit. Als de waterdiepte toeneemt van 24 meter (diepte zeebed ter plaatse van Verdiepte Loswal) naar 34 meter, als de loswal zelf nog eens 10 meter verdiept zou zijn, beïnvloed dit natuurlijk de bodemschuifspanning. Kwalitatief gezien is er een soortgelijke ontwikkeling als bij de geïdealiseerde berekening: de maximale schuifspanningen ten gevolge van golven nemen af van ca. 3 Pa tot minder dan 1.5 Pa. De schuifspanning ten gevolge van stroming neemt met minder dan een factor 2 af, dus een minder sterke afname dan de schuifspanning die door golven wordt veroorzaakt.

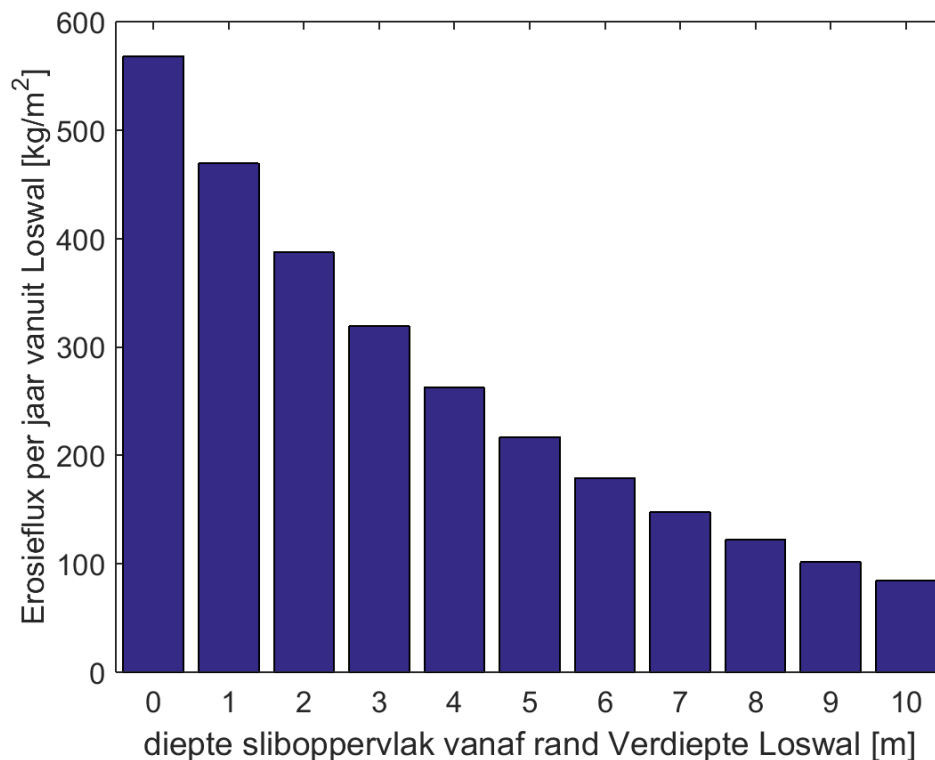
7.3 Berekening erosieflux

Als de bodemschuifspanning bekend is, kan de erosieflux worden berekend door de Partheniades-Krone formulering te gebruiken (zie Appendix B). Voor deze formule worden de volgende twee parameters gebruikt.

Tabel 7.3 Parameters gebruikt in Partheniades-Krone formule voor bodemerrosie

variabele	beschrijving	waarde	eenheid
M	erosieparameter	$1 \cdot 10^{-4}$	$\text{kg/m}^2/\text{s}$
T_c	kritische bodemschuifspanning	0.4	N/m^2

De erosieflux verloopt als volgt met diepte voor het gehele jaar (Figuur 7.3). Hierbij is de erosieflux dus uitgedrukt als kg/m^2 voor een geheel jaar.



Figuur 7.3 Berekende erosieflux per jaar vanuit de Loswal als functie van de vuldiepte van de Verdiepte Loswal

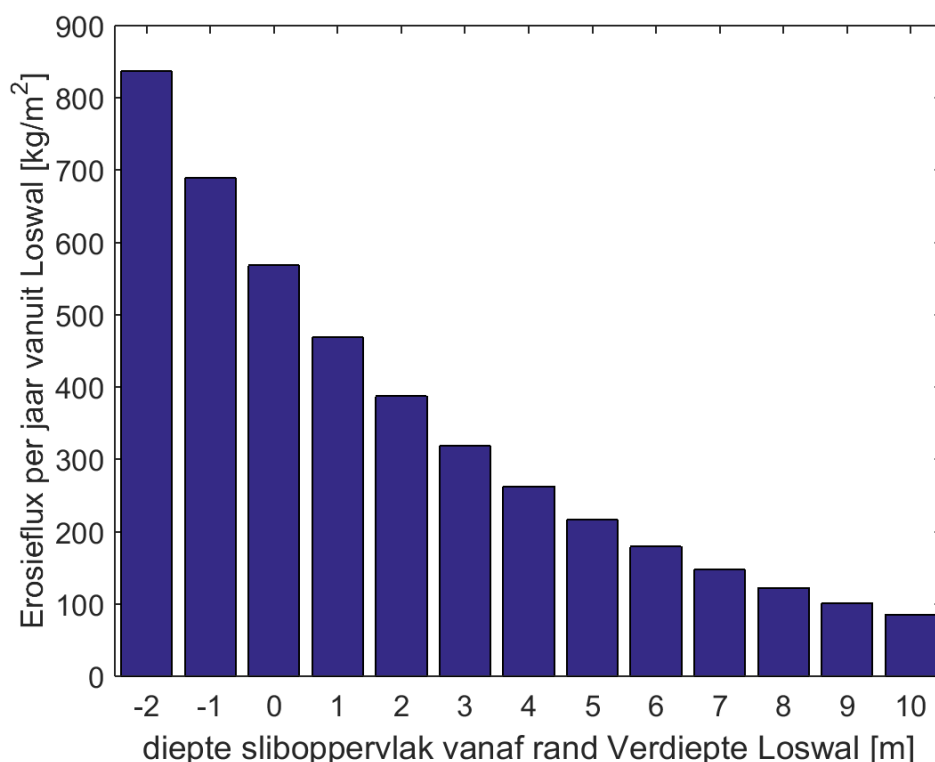
De diepte van het sliboppervlak vanaf de rand van de Verdiepte Loswal lijkt vooral een invloed te hebben op de erosieflux wanneer dit oppervlak net onder de rand van de Loswal ligt. Dit ligt voornamelijk aan de sterke afname van bodemschuifspanning door golven. De bijdrage van golven neemt kwadratisch af als de waterdiepte toeneemt. Daarnaast zijn de golven dominant voor de erosie van slib vanaf de zeebodem. De menging en transport van slib hangt echter veel sterker af van de getijstrooming en dichtheidseffecten.

Bij vullen tot de rand zou leiden golven en stroming dus tot resuspensie van $550\text{-}600 \text{ kg}/\text{m}^2$ slib per jaar. Dit houdt in dat door deze natuurlijke processen de bovenste halve meter (uitgaande van een dichtheid van rond de $1200\text{-}1300 \text{ kg}/\text{m}^3$) slib uit de Loswallen wordt opgewoeld. Als dit wordt vermenigvuldigd met de totale oppervlakte van de Verdiepte Loswal is de totale resuspensie bekend. Uitgaande van een oppervlak van $5,3 \text{ mln m}^3$ komt de totale resuspensie per jaar neer op 3 mln. ton slib (natte dichtheid) of op $2,6 \text{ mln m}^3$ slib.

Het wordt benadrukt dat dit het materiaal is dat wordt geërodeerd tijdens een jaar; het betekent niet dat dit materiaal zich dus ook daadwerkelijk vanaf de Loswallen verspreid. Het kan na erosie namelijk ook weer in de loswal sedimenteren. Het gaat dus om een bruto erosieflux.

7.3.1 Vullen over rand Verdiepte Loswal

Een beoogde vulstrategie is om slib te verspreiden in loswalputten die al geheel gevuld zijn. Effectief gezien is dit dus hetzelfde als de verspreidingsprocedure als op Loswal Noordwest. Volgens dezelfde procedure kan bepaald worden wat het effect is op erosie van slib als het sliboppervlak hoger ligt dan de rand van de Verdiepte Loswal. In Figuur 7.4 is te zien dat de erosieflux per jaar verder zal toenemen als de waterdiepte afneemt.



Figuur 7.4 Berekende erosieflux per jaar vanuit de Loswal als functie van de vuldiepte van de Verdiepte Loswal voor het geval er bovenop gevulde putten verspreid gaat worden, tot een overdiepte van 2 meter.

De wegstroming zal dus waarschijnlijk verder toenemen ten opzichte van een situatie waarbij de put nog niet compleet gevuld is. Dit is al het geval, zonder dat eventuele andere effecten zoals een dichtheidsstroming van slib, in ogenschouw worden genomen.

7.3.2 Kwalitatieve vergelijking erosieflux met modelresultaten

Er zijn twee hoofdpunten waarop de gekozen benadering verschilt van de modelaanpak. Dit zijn:

- Schematisering van de bodem
- Ruwheid van de bodem

Deze twee punten hangen samen met elkaar maar zullen apart van elkaar worden toegelicht.

1. Schematisering van de bodem

Het Delwaq model wat in deze studie is gebruikt heeft een module waarmee uitwisseling van slib met een zandig zeebed kan worden gemodelleerd. Dit model is geschikt voor het grootste

deel van de Noordzee, waar het bed voornamelijk zandig is met een kleine fractie slib. In het model hangt het vrijkomen van slib dus voornamelijk af van erosie van het zandige zeebed, waarbij deze erosie ook afhangt van de hoeveelheid slib die er zich in het zeebed bevindt. Voor het grootste deel van de Noordzee is die benadering correct. Voor de Loswallen is het waarschijnlijk dat de bodem juist uit slib bestaat, met een kleine fractie zand, zeker voor de bovenste meters van de Loswal. Het model heeft echter niet de functionaliteit of de resolutie om dit verschil in schematisatie voor alleen de Verdiepte Loswal aan te passen.

2. Ruwheid van de bodem

De bodemruwheid wordt in Delwaq als een van de kalibratieparameters gebruikt. De bodemruwheid die in Delwaq wordt toegepast is een combinatie van oppervlaktewrijving en wrijving ten gevolge van (kleine) bodemvormen zoals ribbels. De tweede term is vaak (veel) groter dan de oppervlaktewrijving, maar de kleine bodemvormen zijn allemaal subgrid. Met andere woorden: de modelresolutie is te grof om deze bodemvormen mee te nemen. Daarom is de bodemruwheid in Delwaq relatief hoog. Dit leidt ertoe dat de bodemschuifspanning ten gevolge van stroming relatief hoog is. De bodemschuifspanning ten gevolge van golven wordt apart uitgerekend en dan toegepast in Delwaq. Omdat golven dominant zijn voor opwoeling van slib, en deze met een lagere bodemruwheid worden berekend gaat dit voor de grootste gedeeltes van Noordzee op.

Voor de Verdiepte Loswal is ook hier een voorbehoud te maken: deze bodem bestaat hoofdzakelijk uit slib en zal nog gladder zijn dan de bodemruwheid die voor de berekening van bodemschuifspanning ten gevolge van golven wordt aangehouden. Daarnaast treden er geen bodemvormen op als de bodem bestaat uit slib.

8 Conclusies

De uitgevoerde gegevensanalyses en modelberekeningen leiden tot de volgende conclusies:

- Voor de huidige verdiepte loswal is het berekende retourpercentage 36%. Dit betekent dat van het berekende jaarlijkse baggerbezwaar van 3.1 Mton slib, 1.1 Mton afkomstig is van de retourstroming van eerder verspreide baggerspecie en 2.0 Mton van natuurlijke bron.
- Dit betekent dat de maximale jaarlijkse afname van de aanslibbing door optimalisatie van de loswallocatie circa 1.1 Mton bedraagt.
- Indien de baggerspecie op land zou worden geborgen of zeer ver weg op zee verspreid, zou de slibconcentratie en troebelheid in de kustzone aanmerkelijk afnemen.
- Dit concentratieverhogende effect van slibverpreiding op zee wordt echter voor het overgrote deel gecompenseerd door het concentratieverlagende effect van havenaanslibbing. Het netto effect van de haven op de slibfluxen en de slibconcentratie is dus beperkt, mits de retourstroming niet te groot wordt.
- De doorgerekende alternatieve locaties laten allen een kleinere retourstroming zien dan de huidige locatie. Ook hebben de meeste locaties een dempend effect op de slibconcentratie en troebelheid in de kustzone ten opzichte van de huidige locatie.
- Het voor Loswal Noordwest berekende retourpercentage van 24% komt qua ordegrrootte overeen met in het verleden gemaakte schattingen (Stutterheim, 2002). Merk op dat de toenmalige kustlijn nog zonder Maasvlakte-2 was, terwijl deze in de huidige berekeningen wel is opgenomen.
- De retourstroming varieert slechts beperkt tussen verschillende jaren. De aanslibbing varieert aanmerkelijk sterker tussen verschillende jaren. Dit betekent dat de variaties in de aanslibbing vooral worden veroorzaakt door variatie in het slibaanbod en minder sterk door variatie in de retourstroming.
- Een hogere rivierafvoer vergroot niet alleen het slibaanbod vanaf land, maar leidt ook tot een hogere retourstroming vanaf zee. Het totale effect is een bijna lineaire afhankelijkheid van de aanslibbing van de rivierafvoer: 25% meer afvoer betekent 25% meer baggerbezwaar.
- Het berekende baggerbezwaar is niet evenredig verdeeld over het jaar. In de winter is het baggerbezwaar aanmerkelijk hoger dan in de zomer. Pieken in baggerbezwaar zijn vrij direct gerelateerd aan perioden met hoge golven waardoor het aanbod van slib toeneemt.
- In de uitgevoerde modelberekeningen verdwijnt het overgrote deel (>90%) van de verspreide specie weer uit de loswallocaties. In een verdiepte loswal kan tijdelijk een veel hoger percentage achterblijven. Hierdoor kan de retourstroming van nieuwe verdiepte loswallocaties tijdelijk lager zijn dan de met het model berekende percentage.
- Het huidige model is vooral geschikt om de grootschalige verspreiding van slib in de kustzone te berekenen. In het havengebied zelf is de resolutie beperkt en daarom berekent het model alleen het totale baggerbezwaar en niet de verdeling over het havengebied. Voor een berekening van de lokale verdeling van het baggerbezwaar als functie van omstandigheden (getij, zoetwaterafvoer, golven) is een detailmodel noodzakelijk. Het transport van vloeibare sliblagen aan de bodem ('fluid mud') kan evenmin met het huidige grootschalige model worden berekend.
- Naast een economisch optimale locatie kan afgeleid van deze studie ook een ecologisch optimale locatie worden gedefinieerd, d.w.z. de loswallocatie met de minste invloed op de troebelheid in de kustzone. Een locatie verder weg verlaagt immers de

troebelheid vlakbij de kust, maar verhoogt de troebelheid ver op zee. De invloed van deze verschuiving op primaire productie kan worden berekend met het beschikbare primaire productiemodel van de kustzone en Noordzee. Dit vraagt om nadere studie.

- De baggervolumes over de periode 2000-2016 laten geen langjarige af- of toename zien van het baggerbezwaar in het Rotterdamse havengebied. Los daarvan lijkt het niet mogelijk kwantitatieve conclusies te trekken op basis van de baggervolumes. Dit komt doordat externe factoren, zoals economische afwegingen en ontwikkelingen rond het havengebied, niet te kwantificeren zijn. Daarnaast zijn de beunvolumes met constante factoren omgerekend naar tonnen droge stof (TDS). Ook dit brengt een extra onzekerheid met zich mee.
- De resuspensieberekeningen benadrukken de invloed van golven voor resuspensie van slib uit de Loswallen. De resuspensie van slib neemt, naarmate een verdiepte put verder wordt gevuld, steeds sterker toe.
- Als de Verdiepte Loswal tot aan de rand wordt gevuld wordt gedurende 1 jaar de bovenste 0.5m aan slib geërodeerd. Of deze na erosie weer sedimenteert of wegspoelt is afhankelijk van de getijstrooming en kan op basis van de huidige berekeningen niet worden voorspeld.
- Uit de resuspensieberekeningen volgt ook dat het slibmodel de resuspensie uit een verdiepte loswal waarschijnlijk zal overschatten. Dit heeft een tweetal oorzaken:
 1. De resolutie van het model staat het niet toe om de Verdiepte Loswal als een put te schematiseren. Het effect van een lokale verdieping wordt dus niet meegenomen in de modelberekeningen.
 2. De zeebodem wordt in het ZUNO-DD model geschematiseerd als een zandige bodem, een benadering die voor praktisch de gehele Nederlandse kustzone op gaat. Dit leidt ertoe dat de berekende bodemschuifspanning op de Verdiepte Loswal, waar de bodem hoofdzakelijk uit slib bestaat, een overschatting zal zijn van de daadwerkelijke bodemschuifspanning.

9 Literatuurlijst

Arentz, L., V. Harezlak, T. van Kessel en T. van der Kaaij (2012). Kalibratie slibtransport- en GEM-model. Deltares rapport 1205620.

Blaas, M. K. Cronin, G.Y. El Serafy, M.A. Eleveld, S. Gaytan Aguilar, Y.F. Friocourt, G.H. Keetels, N.O. de Reus, H.J. van der Woerd (2011). Composite atlas of SPM in the southern North Sea 2007. Atlas no. 1002611-000, Delft, The Netherlands

Boer, G.J. de (2009). On the interaction between tides and stratification in the Rhine Region of Freshwater Influence. Proefschrift Technische Universiteit Delft.

Boer, G.J. de, J.D. Pietrzak, J.C. Winterwerp (2006). On the vertical structure of the Rhine region of freshwater influence. *Ocean dynamics* 56 (3-4), 198-216.

Cronin, K. en M. Blaas (2013). MoS2-II Deterministic Model Calibration. Updates of the ZUNO-DD Hydrodynamic and SPM model. Deltares rapport 1204561.

Cronin, K. and M. Blaas. (2015). Maasvlakte 2 and fine sediment fluxes towards the Wadden Sea. 1210059, Deltares, Delft.

Dankers, P.J.T. (2015). Notitie slibverspreiding loswallen d.d. 11-12-2015. RDCHM_BE1044_N0003_902199_f02

Guo, J. (2002). Simple and explicit solution of wave dispersion equation, *Coastal Engineering*, Volume 45, Issue 2, 2002, Pages 71-74, ISSN 0378-3839.

Havenbedrijf Rotterdam & Rijkswaterstaat (2014). Evaluatie Praktijkproef Verdiepte Loswallen 1998-2014 Rijnmondgebied.

Kaaij, T. van der, T. van Kessel, T. Troost, P.M.J. Herman, L. van Duren, N. Villars (2017). Modelondersteuning MER zandwinning, modelvalidatie. Deltares rapport, 1230888-002-ZKS-0002

Keetels, G., V. Harezlak, T. van Kessel, A. van Rooijen, Y.F. Friocourt, T. van der Kaaij, H. Los (2012). Winning suppletiezand Noordzee 2013-2017 – Validatierapport. Deltares rapport 1204963-000-ZKS-0038.

Kessel, T. van (2001). Effects of land reclamation Maasvlakte-2 on silt transport and siltation. Phase 4: local effects on siltation in Rotterdam harbour. Delft Hydraulics report Z2874.40.

Kessel, T. van, J.C. Winterwerp, B.C. van Prooijen, M. van Ledden, W. Borst. (2011). Modelling the seasonal dynamics of SPM with a simple algorithm for the buffering of fines in a sandy seabed. *Continental Shelf Research* 31 S124–S134. DOI:10.1016/j.csr.2010.04.008.

Kok, J.M. de (2002), Getijafhankelijk storten van baggerspecie, Resultaten van numeriek modelonderzoek. Ref. RIKZ/2002.027.

Laane, R.W.P.M., H.L.A. Sonneveldt, A.J. Van der Weyden, J.P.G. Loch, G. Groeneveld (1999). Trends in the spatial and temporal distribution of metals (Cd, Cu, Zn and Pb) and organic compounds (PCBs and PAHs) in Dutch Coastal zone sediments from 1981 to 1996: a model case study for Cd and PCBs. *J. Sea Res.* 41, pp. 1 – 17.

Lacroix, G., K. Ruddick, J. Ozer, C. Lancelot (2004). Modelling the impact of the Scheldt and Rhine/Meuse plumes on the salinity distribution in Belgian waters (southern North Sea). *Journal of Sea Research* 52, 149 – 163

Nijs, M.A.J. de, J.C. Winterwerp, J.D. Pietrzak (2009). On harbour siltation in the fresh-salt water mixing region. *Continental Shelf Research* 29 (2009) 175–193

Rijkswaterstaat (2014), Onderzoek naar slib bij storm. Memo Praktijkproef Verdiepte Loswal.

Swart, D.H. 1974. Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles. Ph.D. thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands. Delft Hydraulics Publ. 131.

Vijverberg, T., P.J.T. Dankers en T. van Kessel (2015). Grootschalige slibverspreiding uit loswallen. Rapport RHDHV, RDCHM_BE1044_R0003_902199_f

van Rijn, L.C. (1982). Equivalent roughness of alluvial bed. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 118, No. 10, p. 1215-1218.

Winterwerp, J.C. and Kessel, T. van (2003). Siltation by sediment-induced density currents. *Ocean Dynamics*, vol. 53, no. 3, pp. 186-196.

Stutterheim, S. (2002). Van Noord tot Noordwest, een studie naar de berging van baggerspecie op loswallen. Ref. RIKZ/2002.047.

Thoolen, P.M.C., L.M. Merckelbach, T. van Kessel (2001). Effects of land reclamation Maasvlakte-2 on silt transport and siltation. Phase 2: large-scale effects along the Dutch coast and in the Wadden Sea. Delft Hydraulics report Z2874.20.

A Omrekening beunvolumes naar TDS

In deze Appendix wordt een korte beschrijving gegeven van de berekening TDS gestort slib. Voor de volledigheid worden de uitgangspunten zoals deze zijn beschreven in Sectie 5 nog herhaald:

- Er wordt onderscheid gemaakt tussen de slibfractie in de baggerspecie uit havenbassins en de vaargeul
- Gestorte volumes in de Slufter zijn niet meegenomen in berekening

De basisdata die door RWS en HbR is aangeleverd is gespecificeerd in Mm^3 beunvolume, en is beschreven in Tabel A.1. Het betreft hierbij dus de volumes die op de Verdiepte Loswal en de Loswal Noordwest zijn verspreid. In dit overzicht zijn de volumes die zijn geborgen in de Slufter (verontreinigde baggerspecie) of zijn verspreid binnen het kustfundament (voornamelijk zandige baggerspecie) dus niet meegenomen:

Tabel A.1: Totale beunvolumes per jaar in Mm^3 . De gestorte volumes voor het onderhoudsdeel van RWS voor 2014 en zijn geschatte volumes. Deze zijn gelijk gesteld aan het langjarige gemiddelde in gestorte volumes voor de periode 2000-2013.

Jaar	Totaal RWS [Mm^3]	Totaal HbR [Mm^3]	Totaal baggerbezwaar [Mm^3]
2000	7,79	3,45	11,24
2001	6,33	2,82	9,15
2002	8,74	4,39	13,13
2003	6,00	3,06	9,06
2004	5,42	3,96	9,38
2005	7,05	4,23	11,28
2006	4,52	3,18	7,70
2007	10,05	5,35	15,40
2008	7,06	4,99	12,06
2009	5,56	5,94	11,50
2010	4,97	5,00	9,97
2011	3,48	3,91	7,39
2012	4,10	4,96	9,05
2013	3,55	6,28	9,82
2014	1,71	6,83	8,54
2015	2,43	7,40	9,82
2016	6,15	9,73	15,88

Om de gestorte volumes om te rekenen van Mm^3 naar TDS, wordt gebruik gemaakt van onderstaande formule, waarbij de dichtheden (ρ -termen) worden uitgedrukt in ton/m^3 :

$$TDS = \left(\frac{\rho_{beun} - \rho_{water}}{\rho_{vast} - \rho_{water}} \right) * V_{beun} * \rho_{vast}$$

De parameters die hierbij zijn toegepast, staan in Tabel A.2.

Tabel A.2: Parameters gebruikt bij omrekenen baggervolumes naar TDS.

Parameters

ρ_{beun}	1,27
ρ_{water}	1,025
ρ_{vast}	2,60
TDS-factor	0,40

Dit levert de hoeveelheden TDS op zoals beschreven in Tabel A.3. Als vervolgens het onderhoudsdeel van RWS met een factor 0.49 wordt vermenigvuldigd, en het onderhoudsdeel van HbR met een factor 0.85, dan volgen hieruit de totale hoeveelheden slib in TDS. Hierbij is dus expliciet rekening gehouden met een verschillende slibfractie tussen de vaargeul (RWS) en de havenbassins (HbR). Het resultaat van deze berekening is terug te vinden in Figuur 4.2.

Tabel A.3: Gestorte volumes in TDS voor periode 2000-2016, met onderscheid tussen onderhoudsdeel RWS en HbR.

Jaar	Totaal RWS [MTDS]	Totaal HbR [MTDS]
2000	3,15	1,40
2001	2,56	1,14
2002	3,53	1,77
2003	2,43	1,24
2004	2,19	1,60
2005	2,85	1,71
2006	1,83	1,29
2007	4,06	2,16
2008	2,86	2,02
2009	2,25	2,40
2010	2,01	2,02
2011	1,41	1,58
2012	1,66	2,00
2013	1,43	2,54
2014	0,69	2,76
2015	0,98	2,99
2016	2,49	3,94

B Theoretische berekening schuifspanning

Deze appendix is een toevoeging op de berekeningen die in Hoofdstuk 7 zijn gepresenteerd. Ten eerste worden de formules voor berekening van de bodemschuifspanning, gevolgd door de formulering van Partheniades-Krone erosieformulering.

B.1 Formulering bodemschuifspanning

De bodemschuifspanning τ wordt gegeven door de eenvoudige formulering:

$$\tau = \tau_c + \tau_w$$

Waarbij de bodemschuifspanning ten gevolge van stroming (τ_c) wordt gegeven door de formule:

$$\tau_c = \rho u_*^2$$

Waarbij ρ : dichtheid van zeewater en u_* gegeven wordt door:

$$u_* = \frac{\sqrt{g}}{C} \bar{u}$$

Waarbij g = valversnelling, C = Chezy ruwheidsparameter en \bar{u} = dieptegemiddelde stroomsnelheid.

De bodemschuifspanning ten gevolge van golven (τ_w) wordt gegeven door (Swart, 1974):

$$\tau_w = 0.5 f_w \rho \hat{u}_{orb}$$

Waarbij:

$$f_w = \begin{cases} \frac{\hat{u}_{orb}}{\omega k_s} > \frac{\pi}{2}: & f_w = 0.025 * \exp \left\{ 5.21 \left(\frac{\hat{u}_{orb}}{\omega k_s} \right)^{-0.19} \right\} \\ \frac{\hat{u}_{orb}}{\omega k_s} < \frac{\pi}{2}: & f_w = 0.3 \end{cases}$$

$$\hat{u}_{orb} = \frac{\omega * a}{\sinh(kh)}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

De Nikuradse ruwheidshoogte wordt geschat met behulp van uitdrukking van van Rijn (1982):

$$k_s = 3 * d_{90}$$

En het golfgetal k kan worden berekend met de formulering van Guo (2002):

$$k = \frac{\omega^2}{g} \left(1 - \exp \left\{ \left(-\omega \sqrt{\frac{h}{g}} \right)^{2.5} \right\} \right)^{-0.4}$$

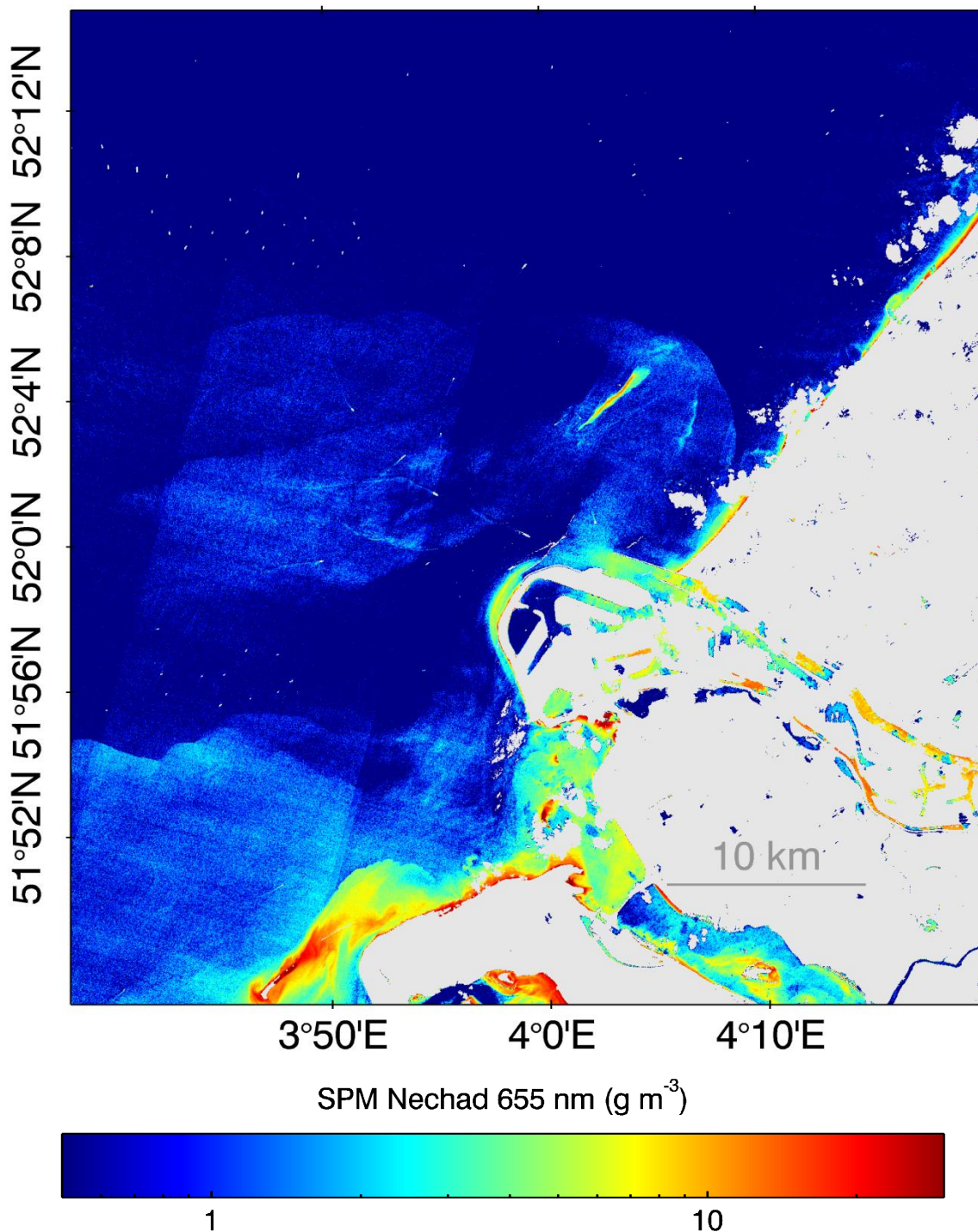
B.2 Formulering erosieflux

Voor bepaling van de erosieflux wordt de Partheniades-Krone formulering aangehouden:

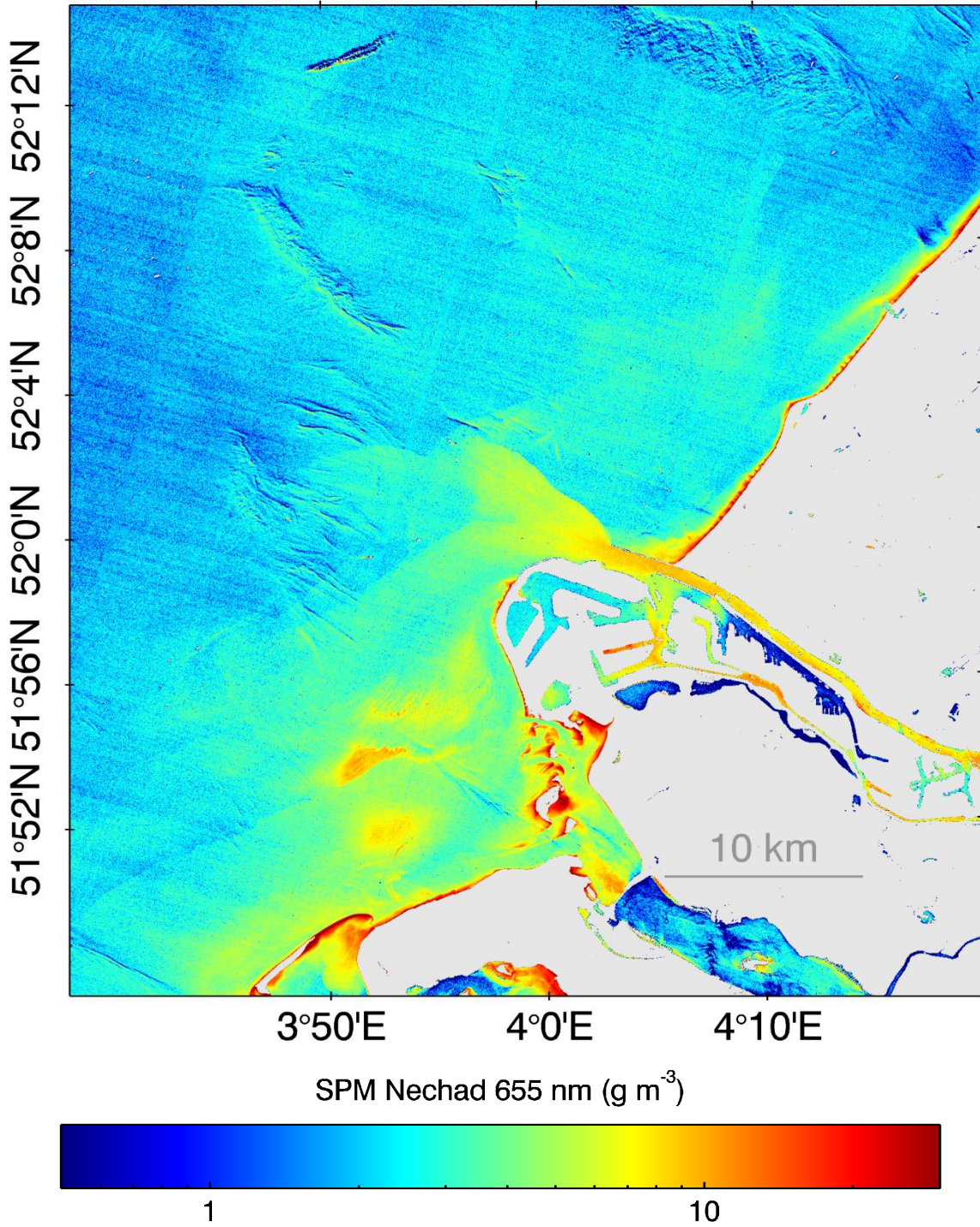
$$E = M * \left(\frac{\tau}{\tau_c} - 1 \right)$$

Waarbij: M = erosieparameter [$\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$] en τ_c = kritische bodemschuifspanning voor resuspensie. Met kritisch wordt hier bedoeld dat onder deze bodemschuifspanningswaarde geen erosie plaats zal vinden.

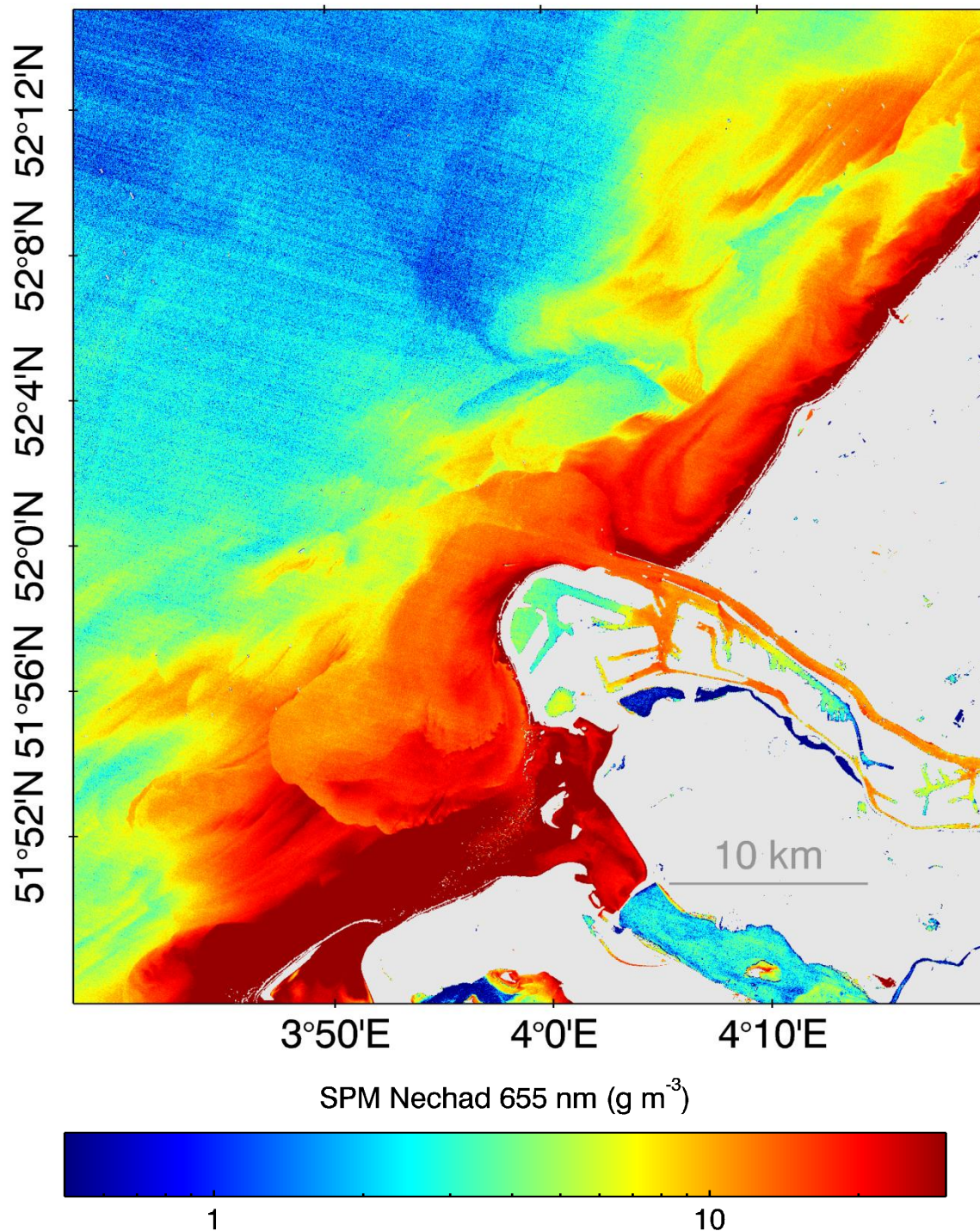
C Zwevend stofconcentratie (in mg/l) op basis van remote sensing beelden 2013 – 2015 van het Maasmondgebied



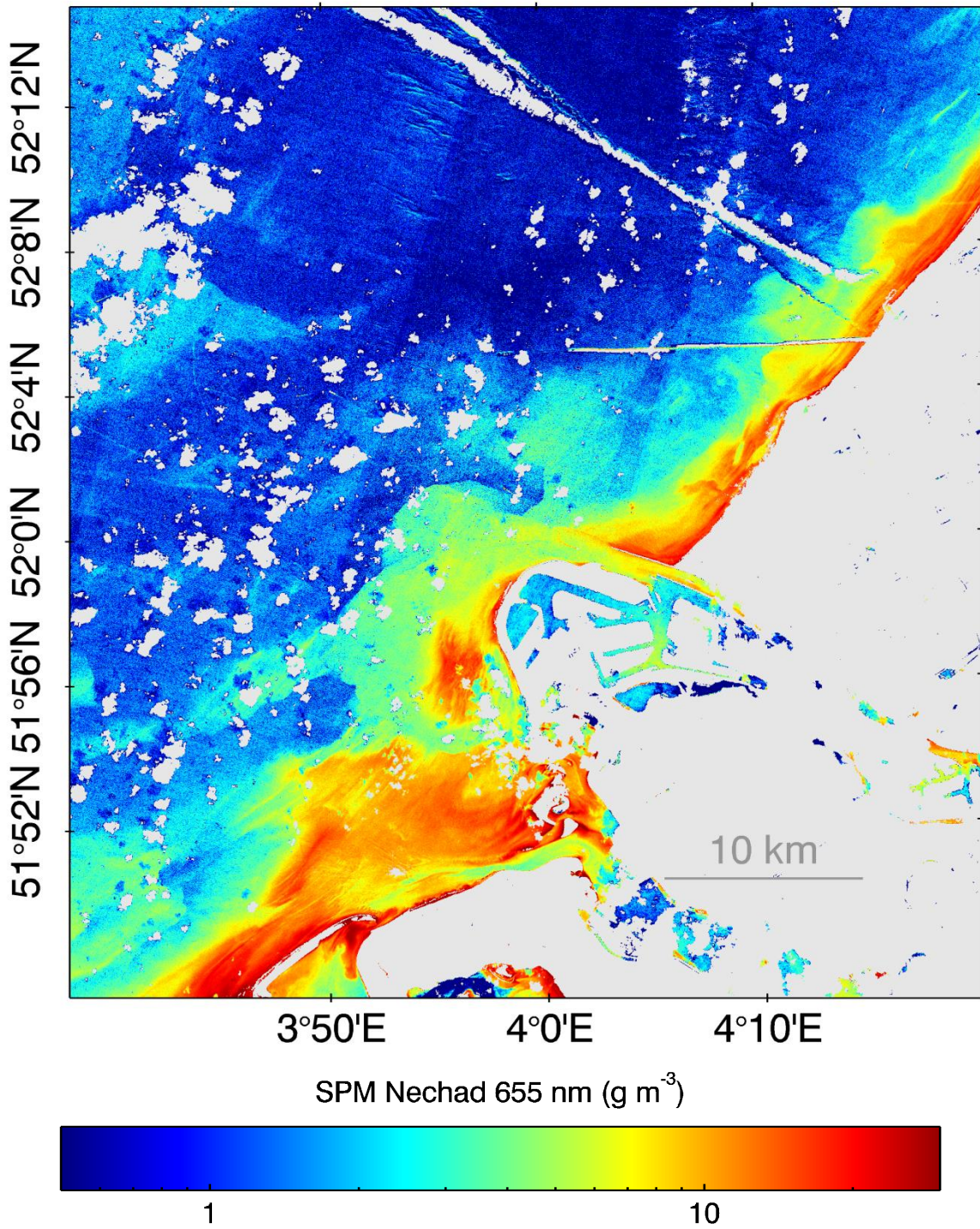
Datum 19-07-2013 10:41



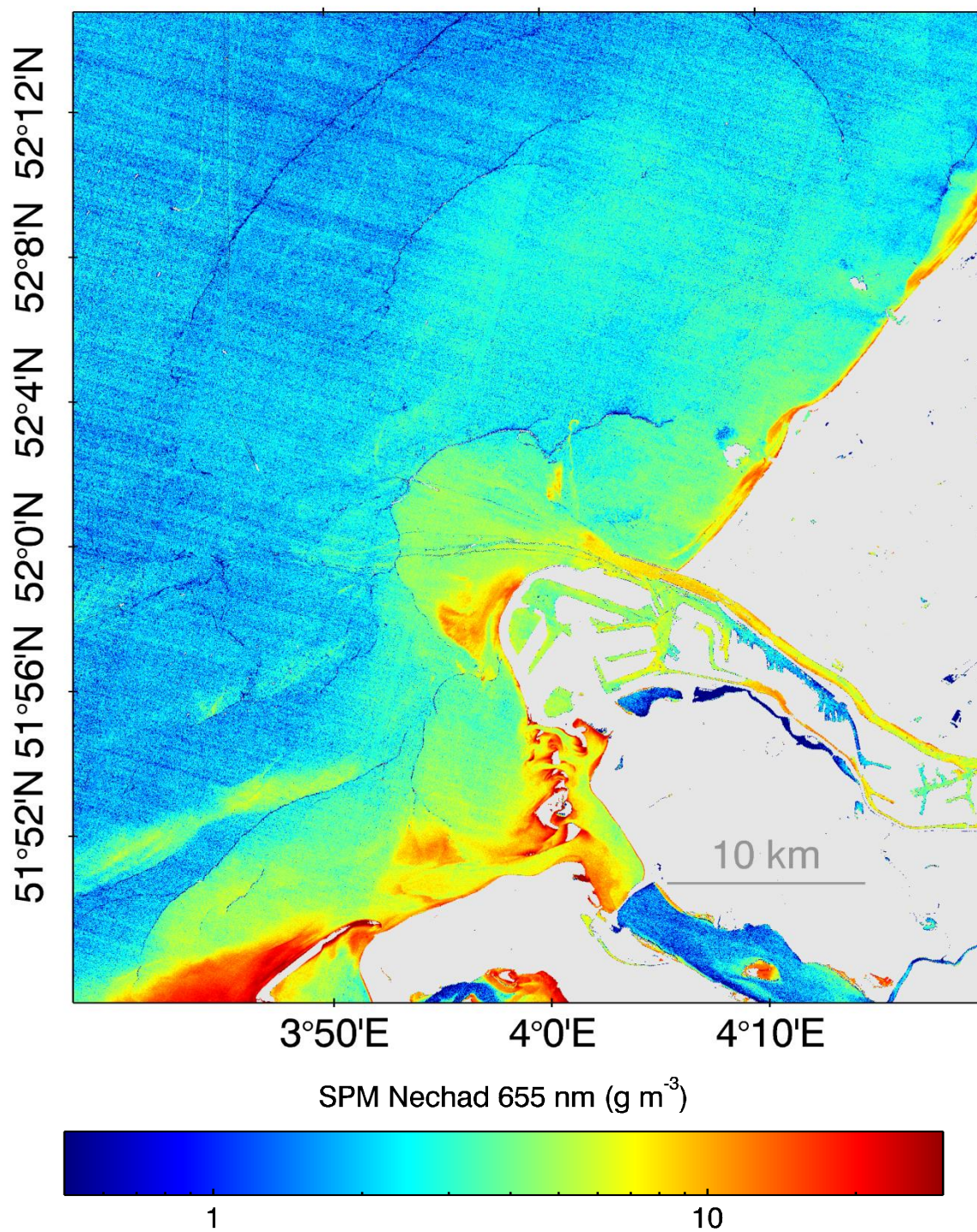
Datum 05-09-2013 10:42



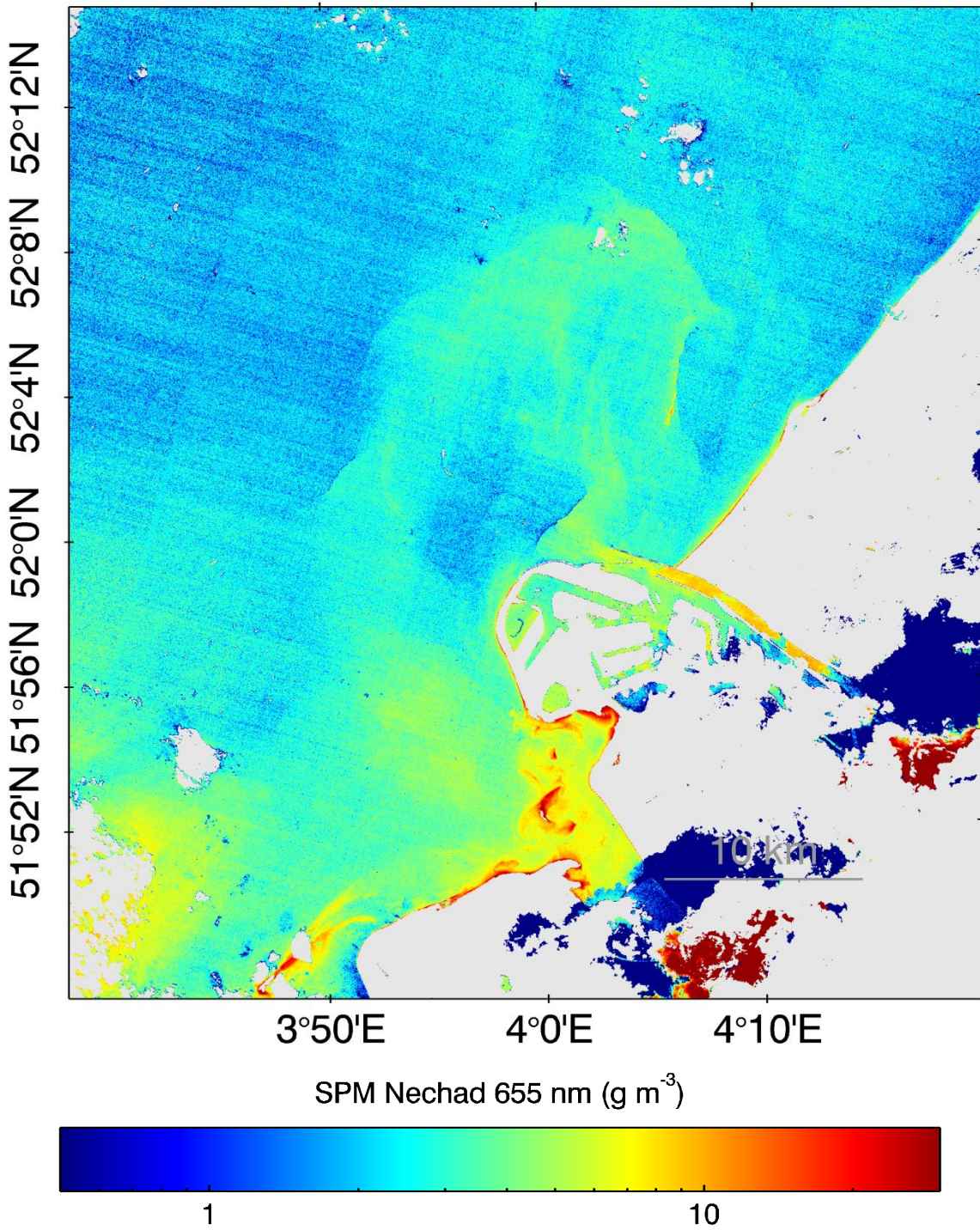
Datum 16-03-2014 10:40



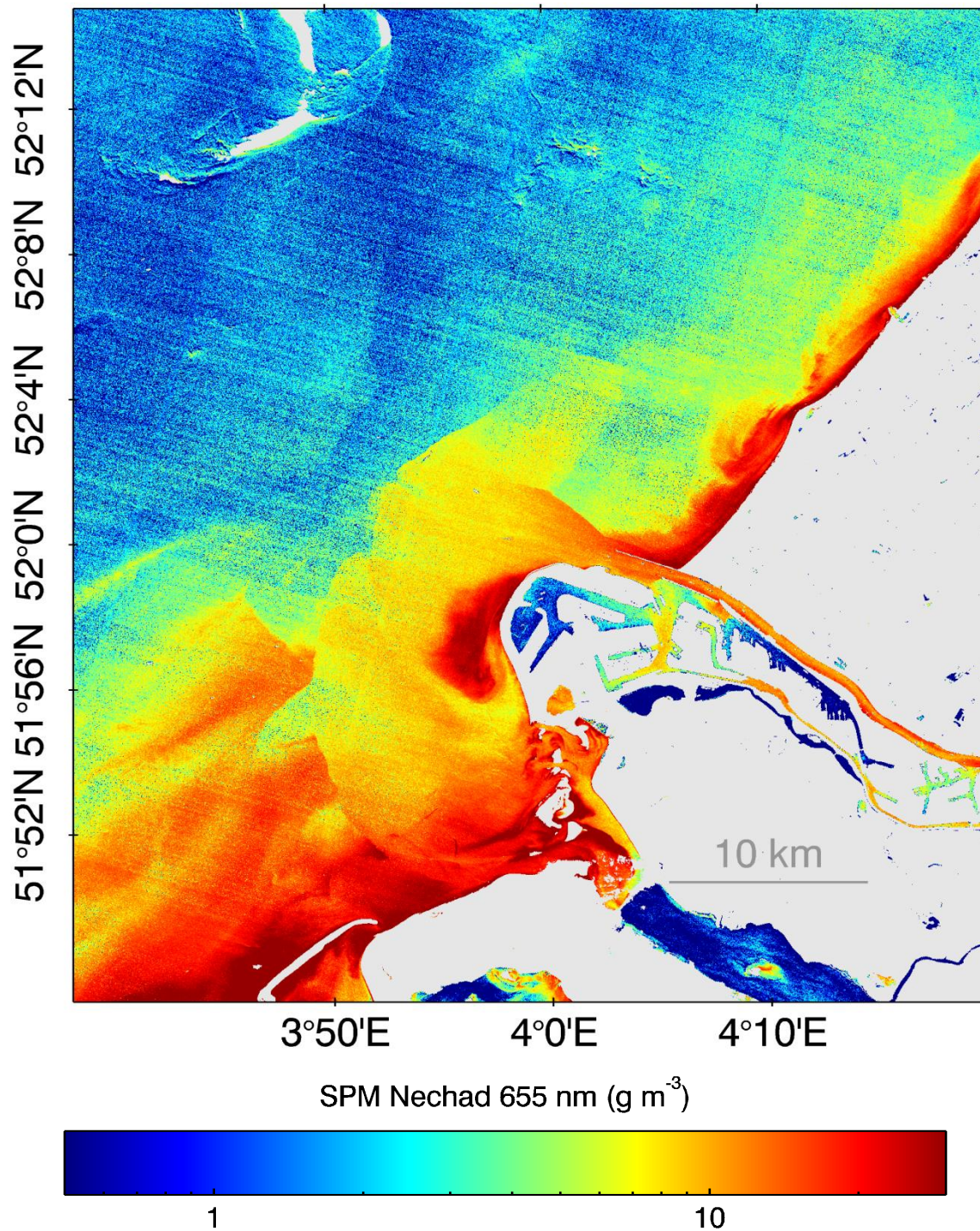
Datum 03-05-2014 10:39



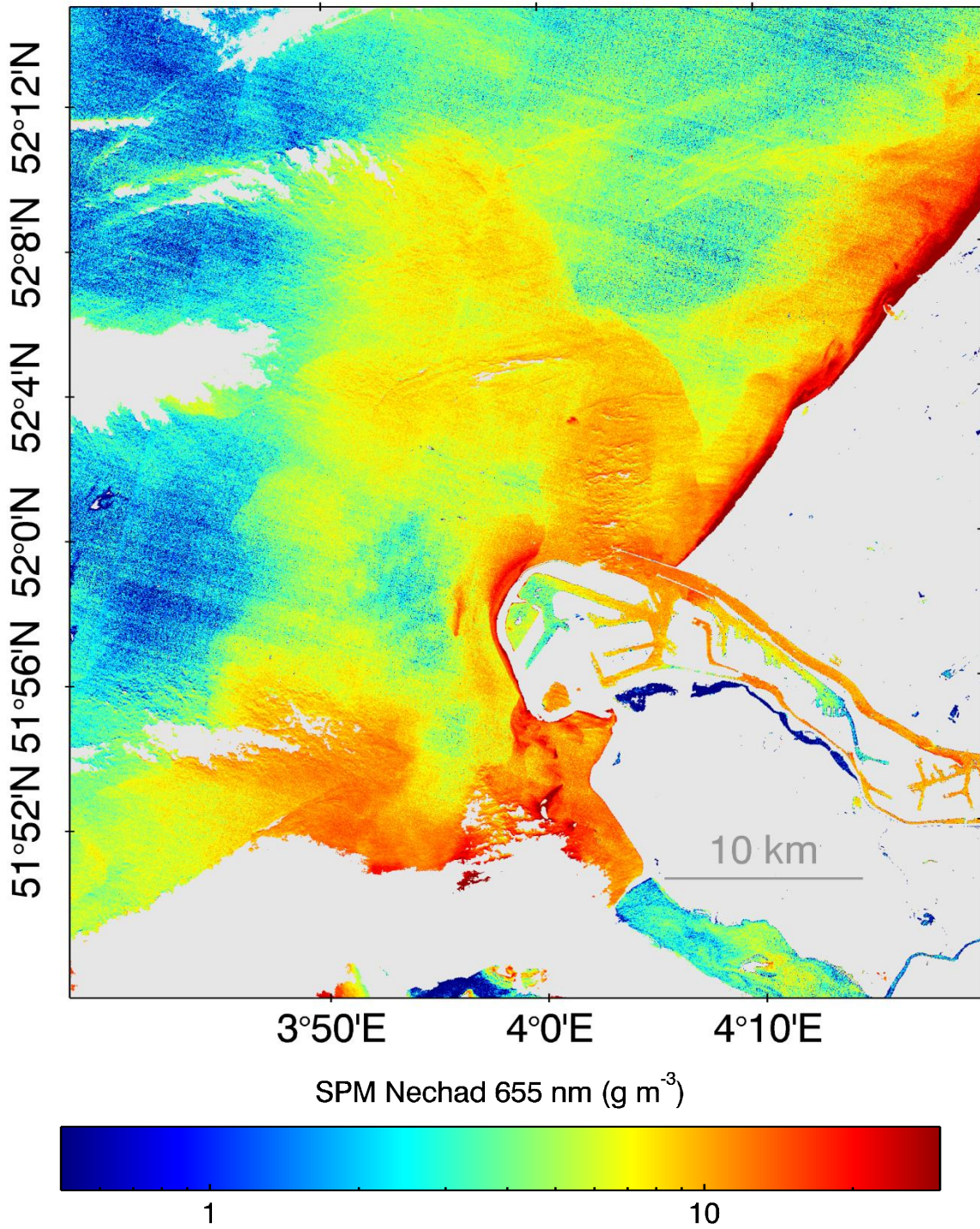
Datum 19-05-2014 10:39



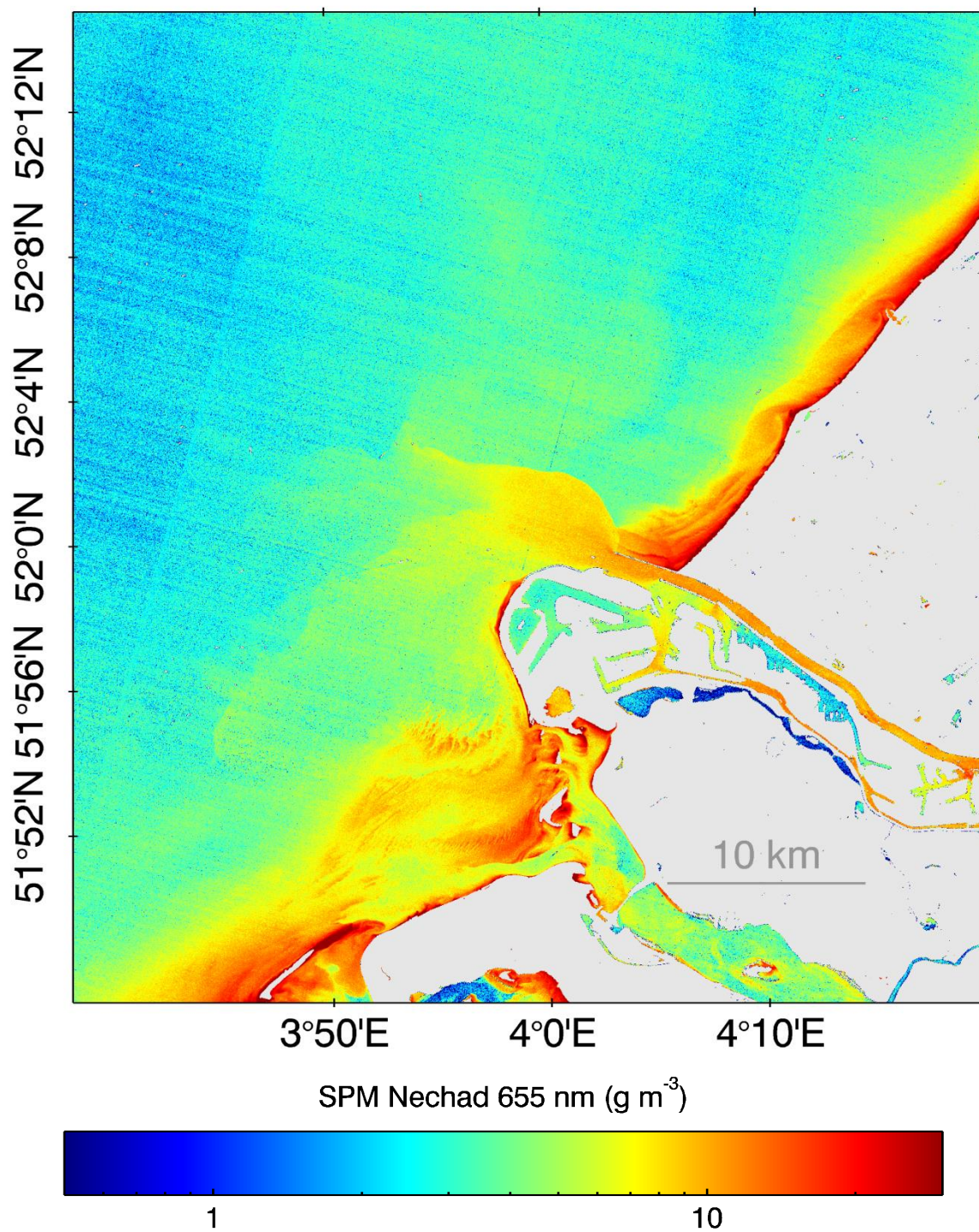
Datum 07-08-2014 10:40



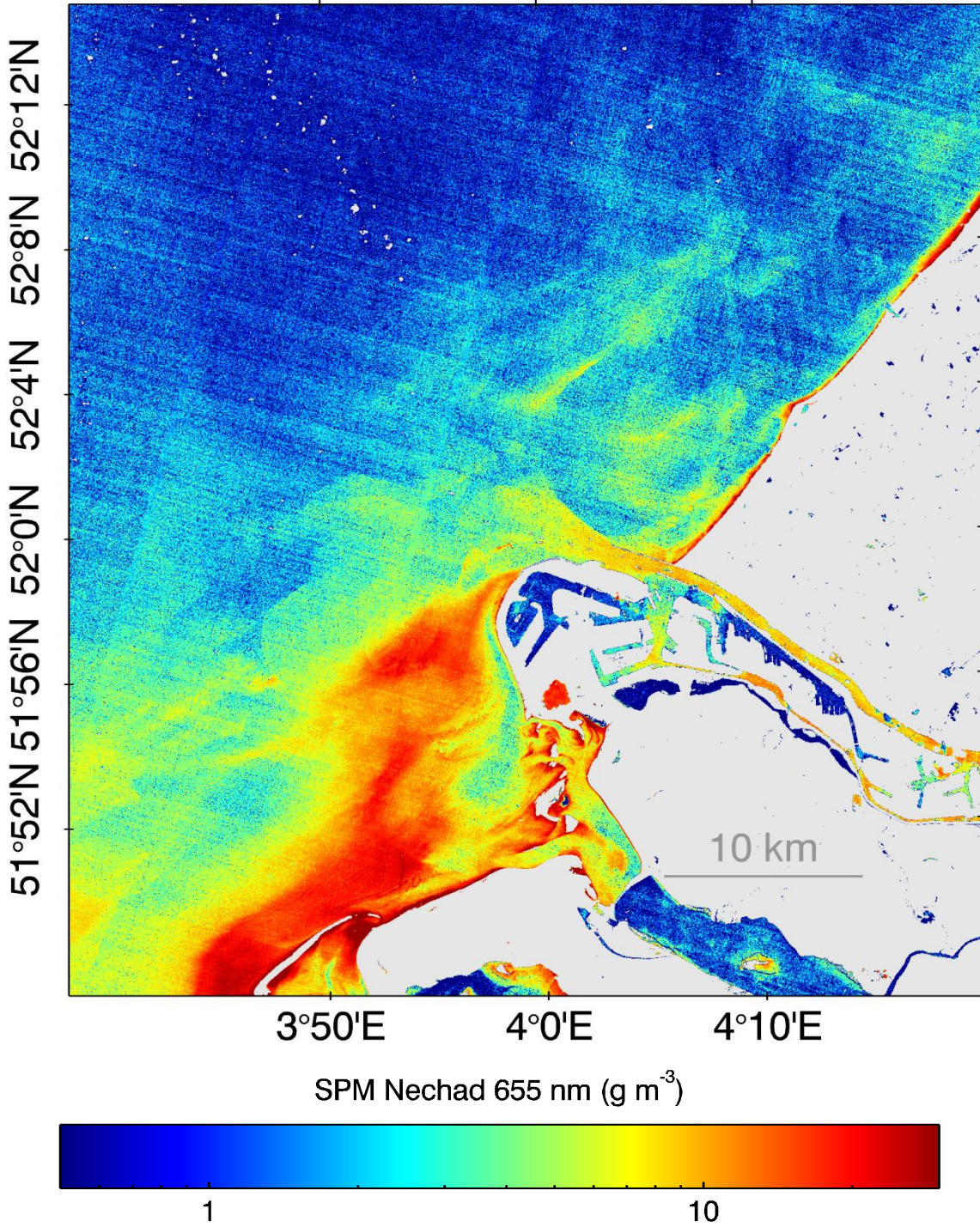
Datum 11-11-2014 10:40



Datum 15-02-2015 10:39

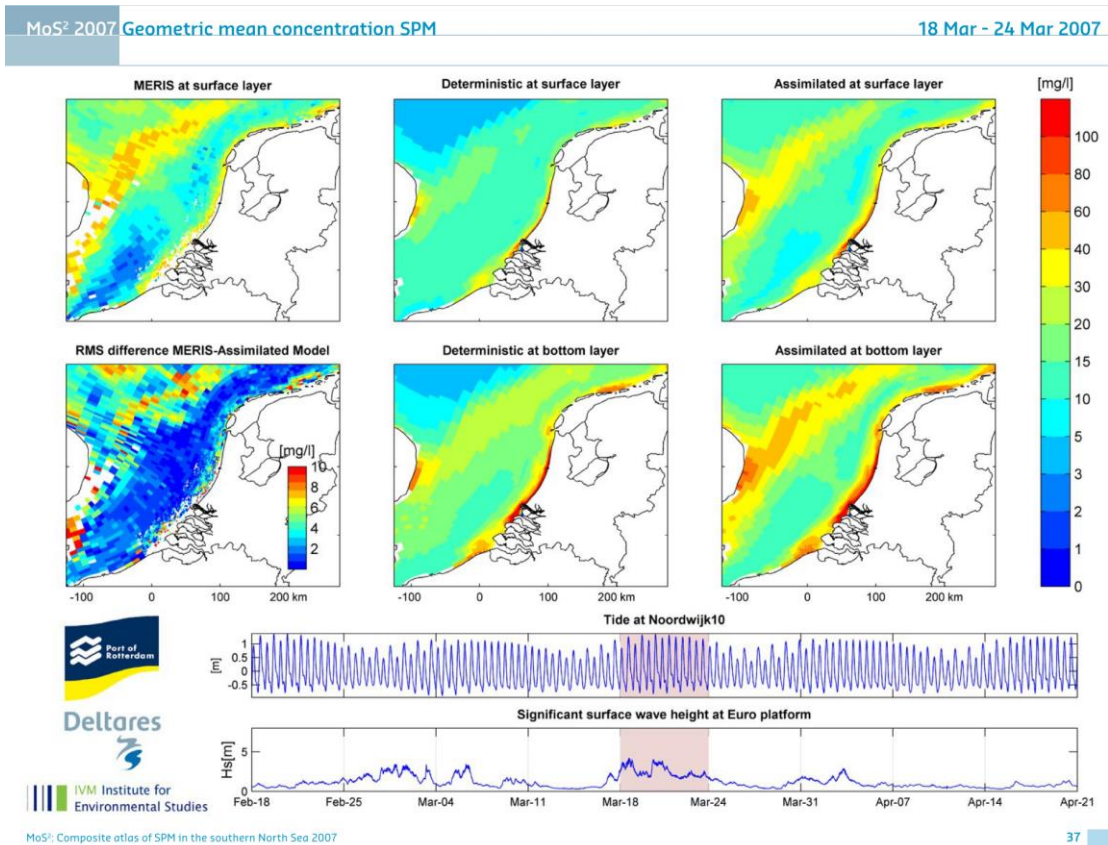


Datum 11-09-2015 10:39



Datum 29-10-2015 10:40

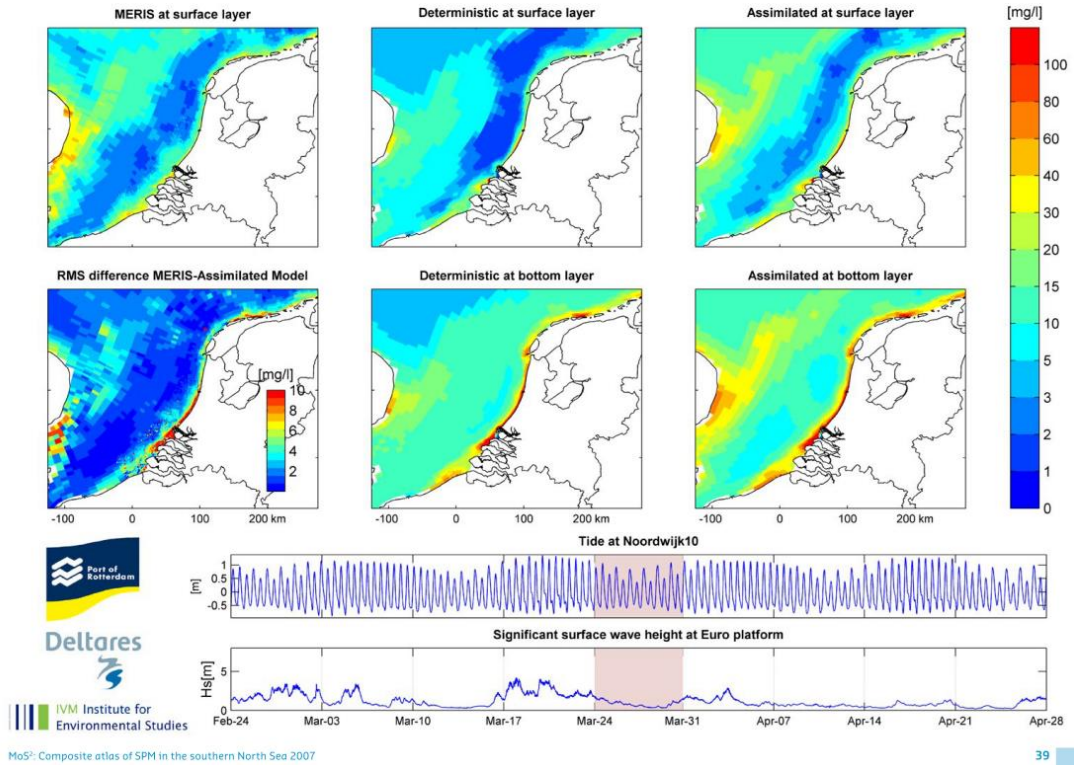
D Zwevend stofconcentratie (in mg/l) op basis van remote sensing beelden 2007 in de Noordzee



Bron: Blaas et al. (2011)

MoS² 2007 Geometric mean concentration SPM

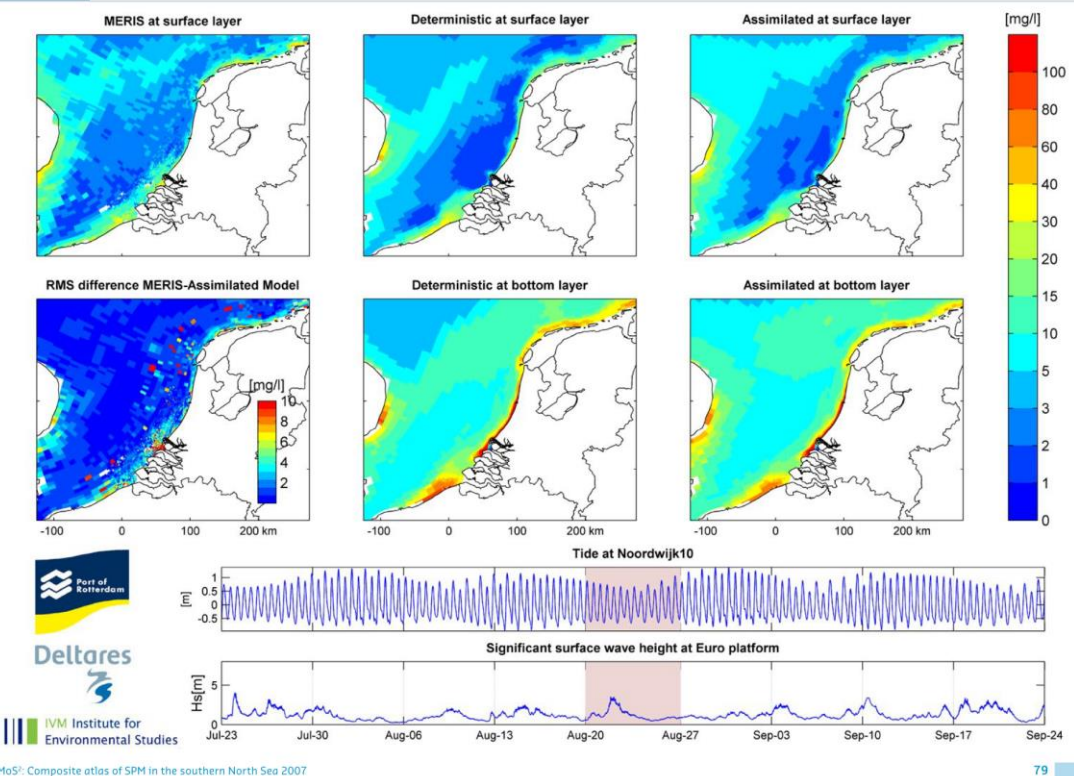
24 Mar - 31 Mar 2007



MoS²: Composite atlas of SPM in the southern North Sea 2007

MoS² 2007 Geometric mean concentration SPM

20 Aug - 27 Aug 2007



MoS²: Composite atlas of SPM in the southern North Sea 2007