Deltares

Enabling Delta Life

KPP Onderzoek Bodemdynamiek 2014

Effect van baggeren op bodemdynamiek locatie Maasgeul & Pilot koppeling Kust en Zee.

Deltares

KPP Onderzoek Bodemdynamiek 2014

Effect van baggeren op bodemdynamiek locatie Maasgeul & Pilot koppeling Kust en Zee.

dr. Thaiënne A.G.P. van Dijk
Tommer Vermaas MSc
dr. Marc P. Hijma

1209377-010

© Deltares, 2014, B

Deltares

Titel
KPP Onderzoek Bodemdynamiek 2014

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat	1209377-010	1209377-010-ZKS-0001	45

Trefwoorden
Bodemdynamiek, gebaggerde gebieden, Maasgeul

Samenvatting
Voor scheepvaartveiligheid is het van belang om de monitoring van dynamische zee- en rivierbodems zó af te stemmen dat vaardiepten, zoals in de gebaggerde vaargeulen naar de havens van Rotterdam en Amsterdam, gegarandeerd kunnen worden. Rijkswaterstaat streeft naar geoptimaliseerde, risico-gestuurde monitorings- en baggerstrategieën. Bodemdynamiek speelt hierin een cruciale rol.
De eerder ontwikkelde methode voor de kwantificatie van de natuurlijke verticale bodemdynamiek is uitgebreid naar een methode die toepasbaar is in gebaggerde gebieden. Hiermee worden de berekende trends in bodemdynamiek niet langer onderschat. In de Maasgeul is een 'hersteleffect' vastgesteld, een periode van twee maanden na een baggeringreep waarin versnelde sedimentatie plaatsvindt. In relatie tot de diepte van de baggeringrepen is een 'hersteltijd' gedefinieerd, de periode waarna de bodemhoogte gelijk is aan die van vóór de ingreep, waaruit bleek dat ondiepe baggeringrepen mogelijk efficiënter zijn dan diepe ingrepen. Aanzanding is het sterkst aan de zuidrand van de Maasgeul en is sinds de aanleg van de Tweede Maasvlakte zeewaarts verschoven.
Uit de koppeling van Noordzeedata en kustdata, welke complementair blijken te zijn en goed op elkaar aansluiten, volgt dat beneden de -10 m NAP en tot dieptes van -35 m NAP de netto bodemhoogteveranderingen constant licht negatief zijn voor een tijdschaal van tientallen jaren. Deze waarneming suggereert dat voor die tijdschaal de *closure depth* langs de Nederlandse kust rond de -10 m NAP ligt. Deze informatie is belangrijk voor de discussie of de basis van het kustfundament, thans gelegen op -20 m NAP en gebaseerd op de veronderstelde *closure depth* voor een tijdschaal van 50-200 jaar, hoger gelegd kan worden. Dit zou namelijk betekenen dat suppletievolumes kunnen worden verkleind en zandwinning dichter bij de kust zou kunnen plaatsvinden. Een uitbreiding van deze *pilot* waarin meer factoren moeten worden meegewogen, zal meer inzicht geven in de dynamiek van de diepe vooroever, waarmee de basis van het kustfundament beter onderbouwd zou kunnen worden.

Referenties
- KPP Bodemdynamiek is een onderdeel van KPP Efficiënte Monitoring.
- *Pilot* Megaribbels en Rivierduinen (rapportnummer 1209377-010-ZKS-0002)

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	okt. 2014	dr. Thaïënne A.G.P. van Dijk	TMD	dr. Sytze van Heteren		drs. Frank Hoozemans	
		Tommer Vermaas MSc					
		dr. Marc P. Hijma					

Status
definitief

Inhoud

1 Inleiding **1**

2 Effect van baggeren op de verticale bodemdynamiek (in de Maasgeul) **3**
2.1 Data en methoden 4
2.1.1 Databeschrijving 4
2.1.2 Automatisch herkennen van een baggeringreep 4
2.1.3 Bepalen 'natuurlijke' dynamiek 6
2.1.4 Bepalen effect van baggeringrepen 7
2.2 Gebaggerde volumes *versus* sedimentatie: update over 2013 7
2.3 Resultaten trendberekeningen in de Maasgeul 9
2.3.1 'Natuurlijke' dynamiek 9
2.3.2 Effect van baggeringrepen 16
2.4 Interpretatie en discussie 19
2.4.1 'Natuurlijke' dynamiek 19
2.4.2 Effecten van baggeringrepen 20
2.4.3 Trends in verticale bodemdynamiek (*dz/dt*) ten noorden en ten zuiden van de Maasgeul 22
2.5 Conclusies 26
2.6 Stappen tot implementatie 27

3 Koppeling Kust en Zee **28**
3.1 Data en methoden 28
3.2 Resultaten 30
3.2.1 Vaklodingen 30
3.2.2 Gecombineerde datasets voor Zuid-Holland 30
3.3 Interpretatie 37
3.3.1 Vaklodingen 37
3.3.2 Gecombineerde datasets voor Zuid-Holland 38
3.4 Discussie en implicaties 38
3.5 Conclusies 39

4 Samenvatting en vooruitkijk 2015 **40**

Referenties **42**

A Beschikbare bodemopnames **A-1**

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De scheepvaart op de Noordzee en op Nederlandse rivieren is gebaat bij betrouwbare nautische kaarten. Rijkswaterstaat en de Dienst der Hydrografie van de Koninklijke Marine meten daartoe met een echolood periodiek de waterdiepte (de loding). Omdat natuurlijke waterbodems dynamisch zijn, verandert de waterdiepte in de tussenliggende perioden voortdurend. Zowel onder normale omstandigheden als bij extreme condities vindt sedimenttransport plaats en migreren bodemvormen zoals zandgolven en megaribbels met variabele snelheden. In het algemeen belang van scheepvaartveiligheid, streven zowel Rijkswaterstaat als de Dienst der Hydrografie (gezamenlijk het NHI, Nederlands Hydrografisch Instituut) naar een risico-gestuurde en efficiënte monitoringsstrategie voor de veranderende bodemligging. Een optimaal gebruik van de beschikbare middelen en een maximale scheepvaartveiligheid staan hierbij centraal. Vooral de gemeten bodemdynamiek in de aanvaargeulen naar de Nederlandse havens, waar gegarandeerde waterdiepten gelden, is van groot belang. Hier vormen lodingen de basis voor jaarlijkse onderhoudswerkzaamheden. Naast een geoptimaliseerd monitoringsbeleidsplan streeft Rijkswaterstaat tevens naar een efficiënte baggerstrategie. Hiertoe zijn kwantitatieve analyses van bodemligging en bodemdynamiek cruciaal. Aan de hand van de resulterende systeemkennis kunnen waterdieptevoorspellingen worden gedaan, en kan het effect van baggeringrepen op voorhand worden bepaald.

In voorafgaand onderzoek voor de Dienst der Hydrografie (ValHYD-project, Van Dijk et al., 2011) heeft Deltares een methode ontwikkeld waarmee de verticale bodemdynamiek kan worden gekwantificeerd op basis van lodingen. Met deze geautomatiseerde methode is voor het gehele Nederlands Continentaal Plat (NCP) per gridpunt van 25 x 25 m een trend berekend van verticale bodemhoogteverandering in de tijd (in m/jaar). Voor deze berekening zijn alle beschikbare datasets in de BAS-database van de Dienst der Hydrografie (inclusief een deel van Rijkswaterstaatdata) gebruikt. De berekende lineaire trends in verticale bodemdynamiek zijn gebaseerd op de gehele tijdreeks beschikbaar voor elk gridpunt en maskeren daarmee plotselinge veranderingen door bijvoorbeeld menselijk ingrijpen, zoals baggeren. Voor de schaal van het NCP, en met de BAS database, waarin de tijdreeks op 1 gridpunt vaak uit slechts 2 of 3 metingen bestaat, was deze methode toereikend. Echter, binnen de gebieden op de Noordzee die onder verantwoordelijkheid van Rijkswaterstaat vallen, zoals de aanvaargebieden en vaargeulen naar Rotterdam en IJmuiden en de zone waarin zand geëxtraheerd wordt, heeft frequent baggeren op veel plaatsen een significante verandering in bodemligging tot gevolg die de trendberekeningen kan beïnvloeden.

Tijdreeksen van Rijkswaterstaat met hoogfrequente lodingen (tot 16 datasets in 20 jaar in de aanvaargebieden en maandelijkse *surveys* in de vaargeulen nabij de havens) geven de mogelijkheid om trends in meer detail en correcter te bepalen voor met name gebaggerde gebieden. In een vervolgstudie voor Rijkswaterstaat, hebben hoogfrequente waarnemingen van bodemligginggegevens geleid tot de hypothese van hersteltijd (Van Dijk et al., 2012), waarin verondersteld wordt dat na een baggeringreep een versnelde sedimentatie optreedt die na verloop van tijd weer normaliseert naar een meer natuurlijke waarde.

In dit rapport wordt de aandacht gevestigd op het effect van baggeren op de bodemdynamiek in de Maasgeul en op de noodzaak van verfijning van de berekeningen van verticale bodemdynamiek tussen baggermomenten. Daarnaast wordt beschreven hoe de koppeling van kust- en offshore data kan bijdragen aan inzichten in de dynamiek van de

onderwateroever. Hiertoe is een aantal specifieke onderzoeksvragen opgesteld en beantwoord (zie paragraaf 1.2).
De *pilot* naar de toepasbaarheid van de bestaande methode voor de analyse van megaribbels en rivierduinen is in een apart document gerapporteerd.

1.2 Doel en rationale

Op basis van voorgaande hypotheses en geconstateerde kennishiaten zijn voor het KPP Onderzoek Bodemdynamiek 2014 de volgende onderzoeksvragen opgesteld:

1. Wat is het effect van baggeren op de bodemdynamiek van de Maasgeul? Het antwoord op deze vraag geeft inzicht in de verandering van bodemligging (in functie van sedimentatiesnelheid) na baggeringrepen van bepaalde grootte, en draagt bij aan realistische en effectieve richtlijnen voor baggerstrategieën.
2. Is de aanname van een lineaire trend, en extrapolatie daarvan in de kwantitatieve analyse en voorspelling van verticale bodemdynamiek, gerechtvaardigd? Zowel in gebaggerde gebieden als in zandgolfgebieden kan een lineaire analyse en voorspelling van veranderingen in de bodemligging een te grote versimpeling zijn. Het antwoord op deze vraag geeft inzicht in mogelijke onder- of overschattingen van bodemdynamiek.
3. Hoe te komen tot een monitoring- en/of baggerstrategie voor de Maasgeul (of richtlijnen daarvoor)? In het KPP onderzoek van dit jaar worden losse vragen beantwoord die de ontbrekende kennis uit voorgaand jaar aanvullen. De opgedane kennis wordt vertaald in praktische stappen die moeten worden gezet in opmaat naar dergelijke strategieën.
4. Hoe kunnen KPP B&O Kust en KPP Bodemdynamiek Noordzee worden gekoppeld? De datasets van lodingen nabij de kust en verder offshore waren tot nu toe gescheiden, en onderzoek van kustmorfologie en offshore morfologie is steeds apart uitgevoerd. Deze twee datasets worden in dit KPP 2014 voor het eerst gekoppeld in een *pilot*studie die beoogt meer inzicht te geven in zowel de praktische mogelijkheden als de kenniswaarde van deze koppeling. Specifieke vragen betreffen het netto zandtransport over de -20 m NAP dieptelijn, en de validiteit van de -20 m NAP lijn als grens voor kustfundament en zandextractie.

1.3 Structuur van het rapport

Omdat de gestelde onderzoeksvragen afzonderlijke onderwerpen zijn die alle hun eigen methode kennen, worden de resultaten per onderwerp behandeld in verschillende hoofdstukken. Vragen 1 t/m 3 over het effect van baggeren op de bodemdynamiek en de rechtvaardiging van een aanname van een lineaire trend vallen beide in Hoofdstuk 2. De *pilot* ‘Koppeling Kust en Zee’ wordt besproken in Hoofdstuk 3. Ieder van deze hoofdstukken bevat paragrafen met databeschrijving, methodebeschrijving, resultaten, interpretaties/discussie en conclusies. De voorlopige richtlijnen voor bagger- en monitoringstrategieën (vraag 3) komen terug in de algemene synthese van alle kennis opgebouwd tot nu toe en het hieruit volgend advies in Hoofdstuk 4.

2 Effect van baggeren op de verticale bodemdynamiek (in de Maasgeul)

In Hijma en Vermaas (2013) zijn de sedimentatie- en baggerpatronen in de Maasgeul op een grootschalige manier gekwantificeerd, namelijk op basis van kilometervakken (Figuur 2.1). In hun rapport zijn de veranderingen in bodemhoogte van de Maasgeul voor de jaren 2008-2012 geanalyseerd en is een eerste aanzet gedaan om de veranderingen te koppelen aan de natuurlijke sedimentatie en de baggeractiviteiten. Onderstaand hoofdstuk is hier een voortzetting en verdieping van. Om de eerste drie onderzoeksvragen (zie paragraaf 1.2) te beantwoorden is het nodig de bodemdynamiek van gebaggerde gebieden in meer detail dan voorheen te bestuderen. Dit is gedaan op pixel-niveau van de bodemmetingen van de Maasgeul. Voor iedere pixel (van 1 x 1 m) zijn de 'natuurlijke' verandering in bodemligging en het effect van de baggeringrepen afzonderlijk van elkaar gekwantificeerd. Doordat de Maasgeul al sterk door de mens is beïnvloed, wordt de verandering zonder invloed van de baggeringrepen aangeduid met 'natuurlijke' verandering.
De methodes die hiervoor zijn ontwikkeld, worden beschreven in paragraaf 2.1. In paragraaf 2.2 worden de resultaten uit Hijma en Vermaas (2013) aangevuld met een vergelijkbare, grootschalige analyse waarin ook de meest recente lodingsdata en baggergegevens worden meegenomen. Een belangrijke reden om de data van 2013 op een zelfde manier te bekijken is de mogelijke verandering van sedimentatiepatronen in de Maasgeul als gevolg van de in 2012 afgeronde aanleg van de Tweede Maasvlakte. De buitencontour van de Tweede Maasvlakte was eind 2010 reeds grotendeels klaar, en oefent al vanaf die tijd invloed uit op de Maasgeul. Daarnaast omvat de eerder onderzochte reeks slechts 5 jaar aan metingen. Een extra jaar aan gegevens is daarmee erg waardevol. Na deze update over de grootschalige ontwikkeling worden de resultaten van de nieuw ontwikkelde methoden gepresenteerd en geïnterpreteerd (paragrafen 2.3 en 2.4). In paragrafen 2.5 en 2.6 worden conclusies getrokken en aanbevelingen gedaan voor vervolgstappen.

Figuur 2.1 Ligging van de Maasgeul en de gebruikte indeling in kilometer vakken. De rode rechthoek geeft de locatie weer van Figuur 2.2.

2.1 Data en methoden

2.1.1 Databeschrijving

In de Maasgeul wordt maandelijks de bodemligging ingemeten ten behoeve van het vaargeulbeheer. Alle metingen vanaf 2008 tot eind 2013, 73 opnames in totaal, zijn door Rijkswaterstaat aangeleverd als 1 x 1 m rasters met een diepte ten opzichte van Lowest Astronomical Tide (LAT). Bijlage A bevat een volledige lijst van de gebruikte rasters en de bijbehorende meetperiodes.

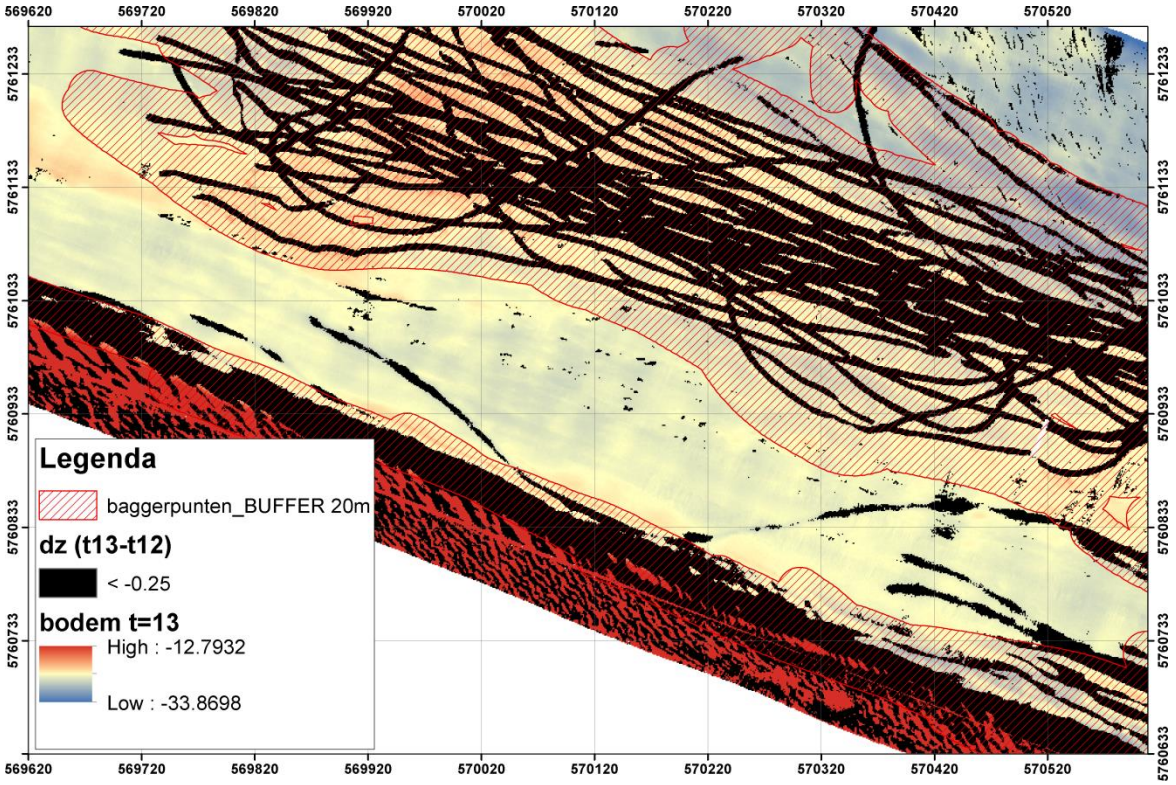
Voor dezelfde periode zijn gegevens van de baggerinspanning geleverd uit het Monitoring and Registration System (MARS). Deze informatie bevat het gewicht van het gebaggerde materiaal, en is omgerekend naar volumes op basis van dichtheden van het gebaggerde materiaal, zoals beschreven in Hijma en Vermaas (2013). De berekende volumes zijn samengevoegd naar de periodes begrensd door de tijdstippen van de bodemmetingen.

2.1.2 Automatisch herkennen van een baggeringreep

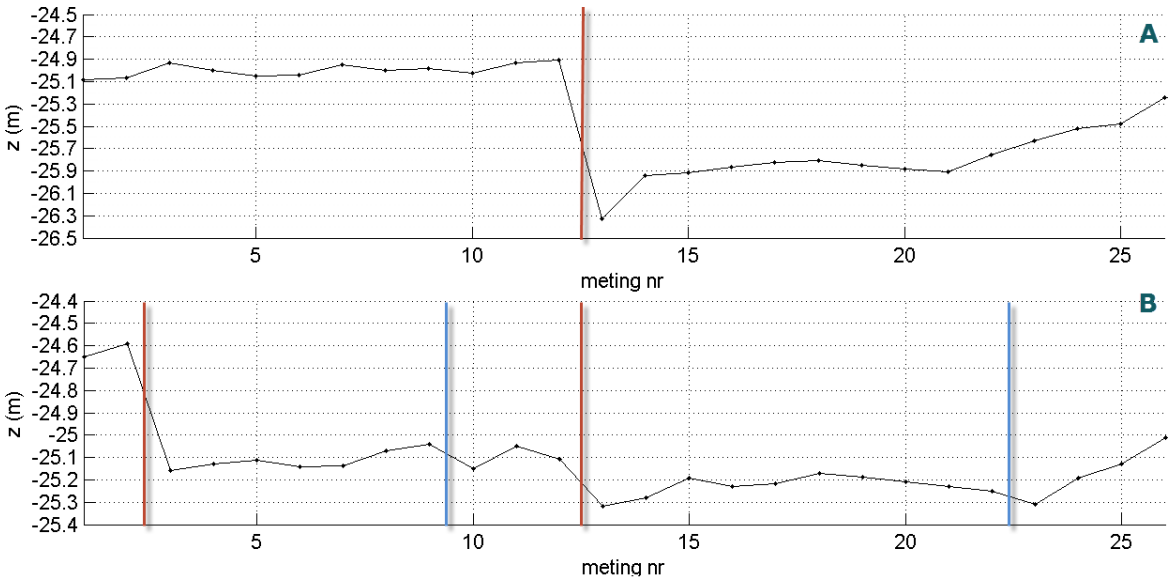
Om de 'natuurlijke' verandering in bodemligging snel en objectief te kunnen onderscheiden van de effecten van een baggeringreep is automatische herkenning van ingrepen een belangrijke stap. Gezien de diepere ligging van de geul ten opzichte van de omgeving is de verwachting dat er door natuurlijke processen geen erosie in de geul zal optreden. Passerende bodemvormen, zoals megaribbels, kunnen voor lokale verdieping zorgen maar komen niet in de geul zelf voor. Op een kaart van het verschil in bodemligging vóór en ná een baggeringreep zijn baggersporen duidelijk zichtbaar als stroken waarbinnen de bodem is verlaagd (Figuur 2.2). Wanneer niet naar het ruimtelijke beeld van een kaart gekeken wordt, maar naar diepteverandering in de tijd op één punt, zijn de baggeringrepen niet altijd even duidelijk. De baggerinformatie van MARS heeft tot doel om tot een objectieve verrekening van de baggeractiviteiten met de aannemer te komen en is te onnauwkeurig voor de nieuwe toepassing om de 1 x 1 m pixels waar is gebaggerd te herkennen. Zelfs met een buffer van 20 m om de uit MARS gehaalde baggerpunten heen wordt een deel van de daadwerkelijke baggersporen niet gedekt, terwijl een groot deel van de pixels binnen de buffer juist niet gebaggerd is (Figuur 2.2).

Diepe baggersporen voor afzonderlijke punten zijn duidelijk te herkennen in een grafiek van de ontwikkeling van de bodemligging in de tijd (*t-z* grafiek, Figuur 2.3A). Ondiepe baggersporen zijn nog wel te herkennen in het ruimtelijke beeld aan het lijnvormige patroon, maar niet zo duidelijk in een *t-z* grafiek (Figuur 2.3B). Omdat koppeling van geringe waterdieptetoenames aan bijbehorende baggermomenten uit de gebrekkige MARS-data niet mogelijk is, en baggeren als oorzaak daarmee niet kan worden bevestigd, zijn alleen sporen met een initiële diepte van minimaal 0,25 m nog met zekerheid te herkennen in een *t-z* grafiek. Op de verschilkaarten is te zien dat veranderingen groter dan -0,25 m inderdaad voornamelijk door baggeringrepen zijn veroorzaakt. Deze veranderingen zijn weerspiegeld in voornamelijk lijnvormige patronen, terwijl kleinere dieptetoenames steeds meer losse punten laten zien die niet door baggeringrepen zijn veroorzaakt.

De nauwkeurigheid van het verschil tussen twee metingen, 0,21 cm (Hijma en Vermaas, 2013), is kleiner dan deze waarde. Dit betekent dat een verdieping van meer dan 0,25 m in de meeste gevallen niet wordt veroorzaakt door een meetfout. Het is onwaarschijnlijk dat in de Maasgeul door natuurlijke processen erosie van deze grootte optreedt. Hierom zijn in dit onderzoek alle verdiepingen van meer dan 0,25 m aangerekend als baggeringreep; de informatie van de baggerinspanning uit MARS is hier niet verder bij gebruikt.



Figuur 2.2 Detail van de Maasgeul (zie voor locatie Figuur 2.1). In zwart zijn de dieptetoenames groter dan 0,25 m weergegeven. De rode gearceerde zone is een 'bufferzone' van 20 m rondom de coördinaten van de baggerinformatie uit MARS. Deze zone dekt niet alle baggersporen en omvat ook gebieden waar niet gebaggerd is. De bufferzone is daarom niet gebruikt bij het herkennen van baggeringrepen.



Figuur 2.3 Bodemligging in de tijd voor twee pixels. De baggermomenten zijn aangegeven met een rode balk, dieptetoenames die niet als baggeringreep kunnen worden aangeduid zijn aangegeven met een blauwe balk. De ingreep in A en de eerste ingreep in B zijn duidelijk te herkennen, terwijl de tweede ingreep in B minder duidelijk is.

2.1.3 Bepalen ‘natuurlijke’ dynamiek

De ‘natuurlijke’ dynamiek die in de Maasgeul plaatsvindt is op verschillende manieren berekend. Hierbij zijn baggermoment onderscheiden zoals hierboven beschreven.

1 Lineaire trend door gehele tijdserie

Dit is de oorspronkelijke methode zoals toegepast door Van Dijk et al. (2011) voor het gehele NCP. Hierbij wordt de trend gefit aan de gehele tijdserie, dus ongeacht de aanwezigheid van baggermomenten. De trend per pixel, in m per dag, is als raster geëxporteerd om op een kaart weer te geven.

2 Lineaire trend tussen baggeringrepen

De tweede, nieuw ontwikkelde methode berekent voor elke pixel één tot meerdere lineaire trends. Hierbij wordt het aantal trends bepaald door het aantal baggermomenten: de trends worden afgeleid uit de metingen tussen de baggeringrepen in. De trends worden alleen bepaald als er minstens drie metingen beschikbaar zijn per trend. Bij pixels waar geen baggermoment aanwezig is, wordt één lineaire trend door alle beschikbare metingen gefit. Bij één baggermoment worden twee trends bepaald, mits er voldoende metingen per trend zijn. Twee of meer baggermomenten geven bij voldoende metingen drie of meer trends.
De berekende lineaire trends geven per pixel één tot meerdere waardes voor de trend (de ‘natuurlijke’ dynamiek). Per pixel is ook een gewogen gemiddelde van de berekende trends bepaald. Wanneer bijvoorbeeld 1/3 van de periode trend A heeft en de andere 2/3 trend B, weegt trend B twee maal zo zwaar als trend A. Gewogen gemiddeldes zijn ook bepaald voor de afzonderlijke jaren. Deze gemiddeldes (per jaar en voor de gehele periode) zijn als raster geëxporteerd om op een kaart weer te geven.

3 Gebroken trend

Bij deze analyse is het effect van elke baggeringreep meegenomen in het fitten van de trend. Hierbij wordt de trend gefit aan de gehele meetreeks, en worden de baggermomenten meegegeven als onafhankelijke variabele. Een lineaire trend ($y = a*x + b$) zoals hierboven toegepast heeft de tijd en een constante als onafhankelijke variabelen:

*bodemhoogte = tijd*A + constante B*

Voor de gebroken trendanalyse is hier het baggermoment als onafhankelijke variabele aan toegevoegd:

*bodemhoogte = tijd*A + baggermoment*B + constante C*

Hierin kunnen de parameters A, B en C zowel positief als negatief zijn. Deze manier van trendanalyse geeft één trend voor de gehele periode en fit zelf de baggeringrepen. Ten opzichte van methode 2 hierboven, is het verschil dat de parameter A voor de hele tijdserie dezelfde waarde heeft en dat de grootte van de baggeringrepen wordt gefit door de functie in parameter B.
Naast het baggermoment zelf (de maand waarin $dz < -0{,}25$ m), is een tweede variant berekend, waarbij ook het verwachtte *hersteleffect* wordt meegenomen. Het hersteleffect is het optreden van grotere sedimentatie dan de ‘natuurlijke’ trend, direct na het uitvoeren van een baggeringreep. De grootte van dit hersteleffect wordt bepaald door het fitten aan de data. Hiervoor is een extra variabele toegevoegd voor de eerste twee maanden na elk baggermoment, welke afhankelijk is gemaakt van de grootte van de baggeringreep:

*bodemhoogte = tijd*A + baggermoment*B + hersteleffect*C + constante D*

Voor beide benaderingen – zonder en met hersteleffect – is de trend als raster geëxporteerd om op een kaart weer te geven.

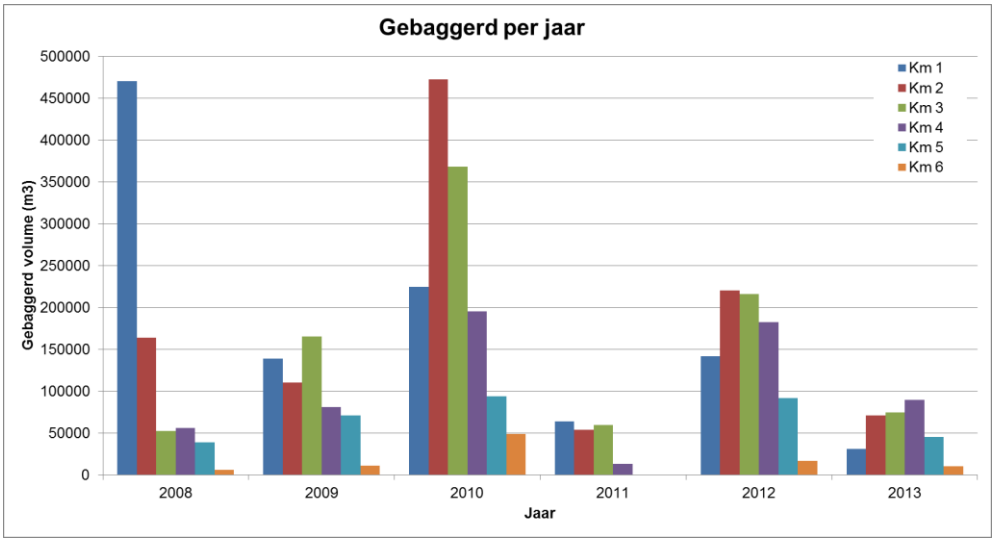
2.1.4 Bepalen effect van baggeringrepen

De effecten van baggeringrepen op de 'natuurlijke' trend zijn bepaald door per pixel de bodemverandering in de maanden ná een baggeringreep te analyseren. Hierbij zijn baggermomenten onderscheiden zoals hierboven beschreven (paragraaf 2.1.2). De gemiddelde verandering per maand na een ingreep is berekend per diepte-klasse van de baggeringreep. Dit is gedaan voor de eerste twaalf maanden na elke ingreep, of tot de eerst volgende baggeringreep indien die voor de twaalfde maand heeft plaatsgevonden, en per km-vak van de Maasgeul (Figuur 2.1; km 1 bij de haven, km 6 het verst uit de kust).

Daarnaast is de gemiddelde *herstelperiode* bepaald: de tijd na een baggeringreep tot het overschrijden van de bodemhoogte van vóór de ingreep. Indien voor een bepaalde baggeringreep deze bodemhoogte niet is overschreden, is de herstelperiode van die ingreep niet meegenomen. De gemiddeldes zijn voor elk km-vak en per diepte-klasse van de baggeringreep berekend, zowel om ruimtelijke variatie tussen deze km-vakken te zien als om praktische redenen.

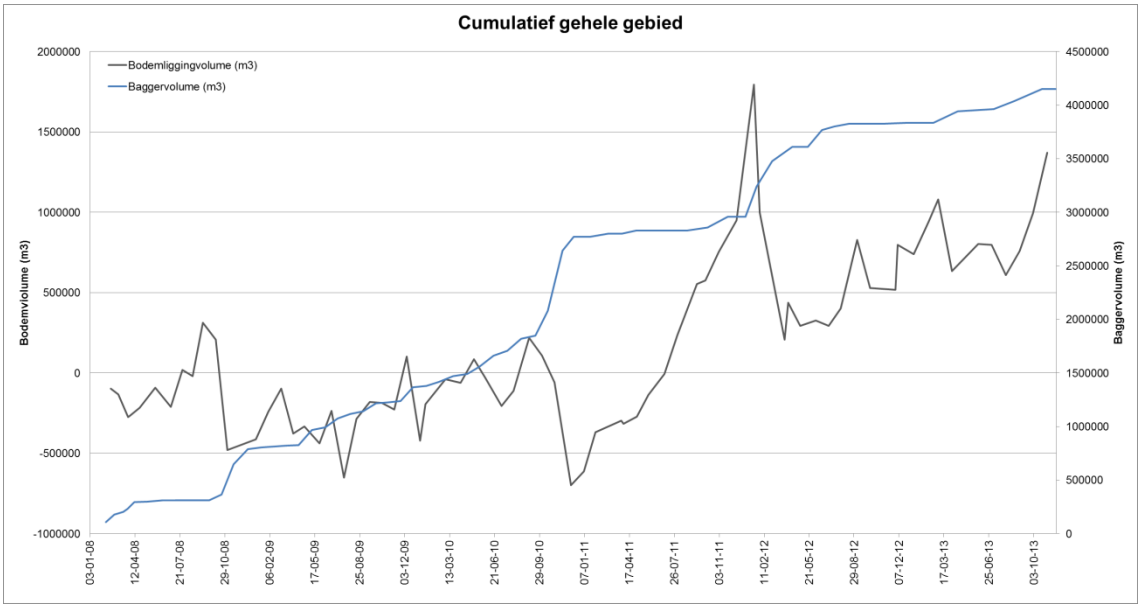
2.2 Gebaggerde volumes *versus* sedimentatie: update over 2013

Figuur 2.4 geeft een overzicht van de hoeveelheid gebaggerd materiaal in de periode 2008-2013, als uitbreiding op Hijma en Vermaas (2013). Wat direct opvalt, is dat in 2013 relatief weinig is gebaggerd: de totale hoeveelheid is ongeveer 325.000 m^3, terwijl voor de gehele periode het jaarlijkse gemiddelde ongeveer 700.000 m^3 is. Wat ook opvalt, is dat in km 4 het grootste volume gebaggerd is, terwijl in voorgaande jaren altijd het meest gebaggerd werd in km 1-3. Het verschil is echter klein en aangezien er in 2013 weinig gebaggerd is, geeft dit nog geen directe aanleiding om te spreken van een trendbreuk. Omdat deze waarneming strookt met de modelverwachtingen dat er na de aanleg van Tweede Maasvlakte minder sedimentatie in km 1-3 zal plaatsvinden en juist meer in km 4-6 (Roelvink en Aarninkhof, 2007), is er een analyse uitgevoerd naar eventuele veranderingen in de autonome, 'natuurlijke' sedimentatiesnelheid (zie Figuur 2.10 tot Figuur 2.12 in paragraaf 2.3.1). Of de sedimentatiesnelheden in de toekomst structureel hoger blijven dan vóór de aanleg moeten de komende jaren uitwijzen, maar hier moet wel rekening mee gehouden worden. In dit scenario zal er aanzienlijk meer gebaggerd moeten worden om de Maasgeul op diepte te houden. Figuur 2.4 laat zien dat er de laatste jaren geen toename van de baggerinspanning is geweest, terwijl de 'natuurlijke sedimentatie' wel toegenomen is. Deze onbalans heeft geleid tot een gemiddelde verondieping van de Maasgeul van ongeveer 0,4 m over de periode 2008-2013.

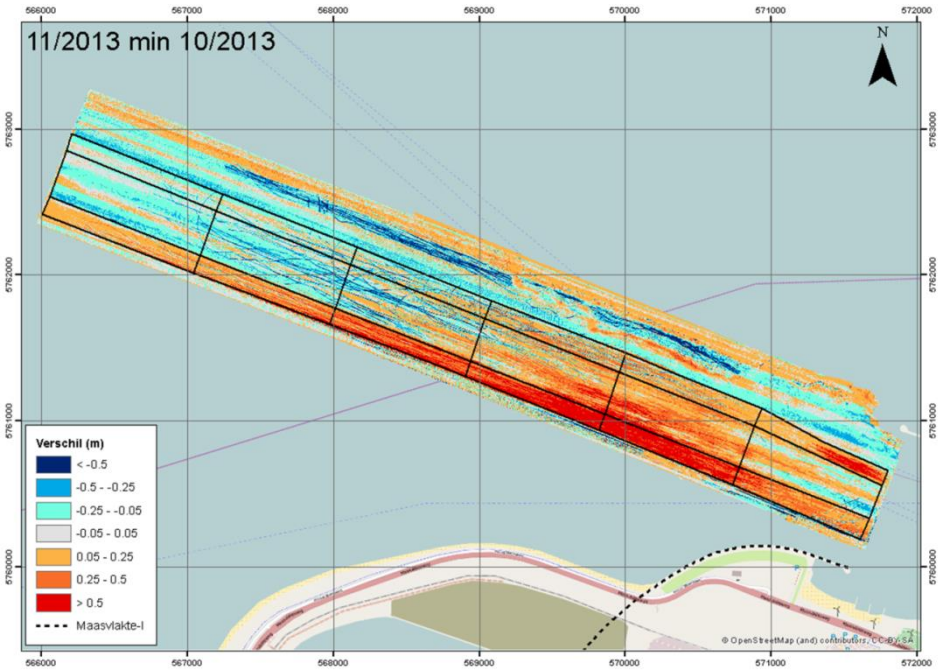


Figuur 2.4 Gebaggerd materiaal per jaar per km-vak, uitgedrukt in m^3.

Indien de gebaggerde hoeveelheden in de tijd uitgezet worden tegen de cumulatieve veranderingen in bodemligging (Figuur 2.5) is duidelijk dat de geringe baggerinspanning in 2013, net als die in 2011, heeft geleid tot een toename in bodemvolume. De Maasgeul is netto iets ondieper geworden. In oktober 2013 vindt er verder een opvallend snelle toename plaats van het bodemvolume. Deze is sterk geconcentreerd in km 2-3 (Figuur 2.6). Naar een oorzaak voor deze versnelde sedimentatie is vooralsnog geen nader onderzoek gedaan.



Figuur 2.5 Cumulatieve bodemvolumes (grijze lijn) en gebaggerde volumes (blauwe lijn) voor de gehele Maasgeul.



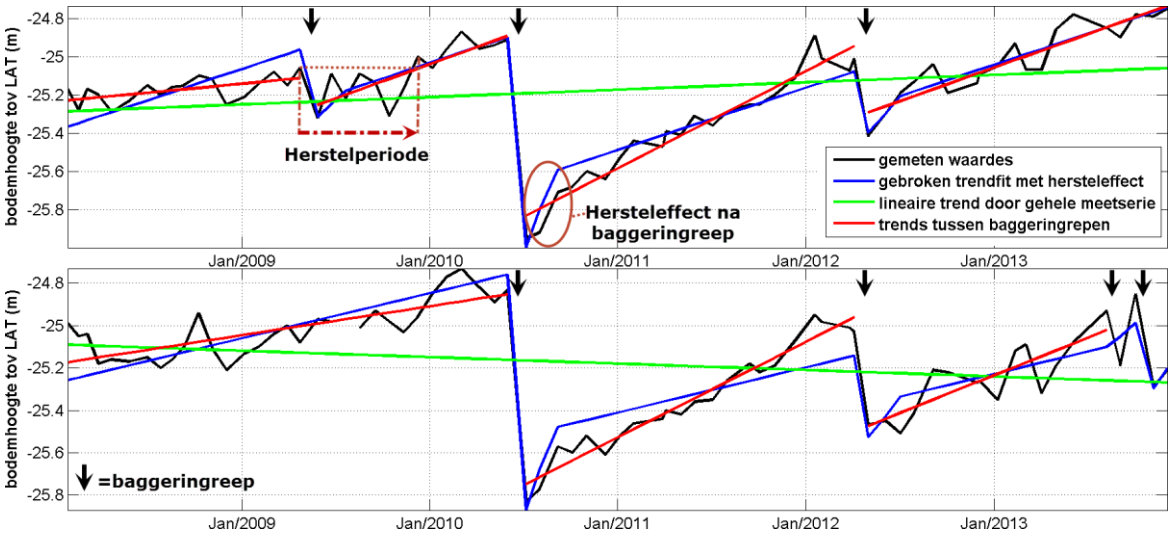
Figuur 2.6 Het verschil in bodemhoogte tussen de maanden november en oktober 2013. In km-vakken 2 en 3 heeft aanzienlijke sedimentatie plaatsgevonden.

2.3 Resultaten trendberekeningen in de Maasgeul

2.3.1 'Natuurlijke' dynamiek

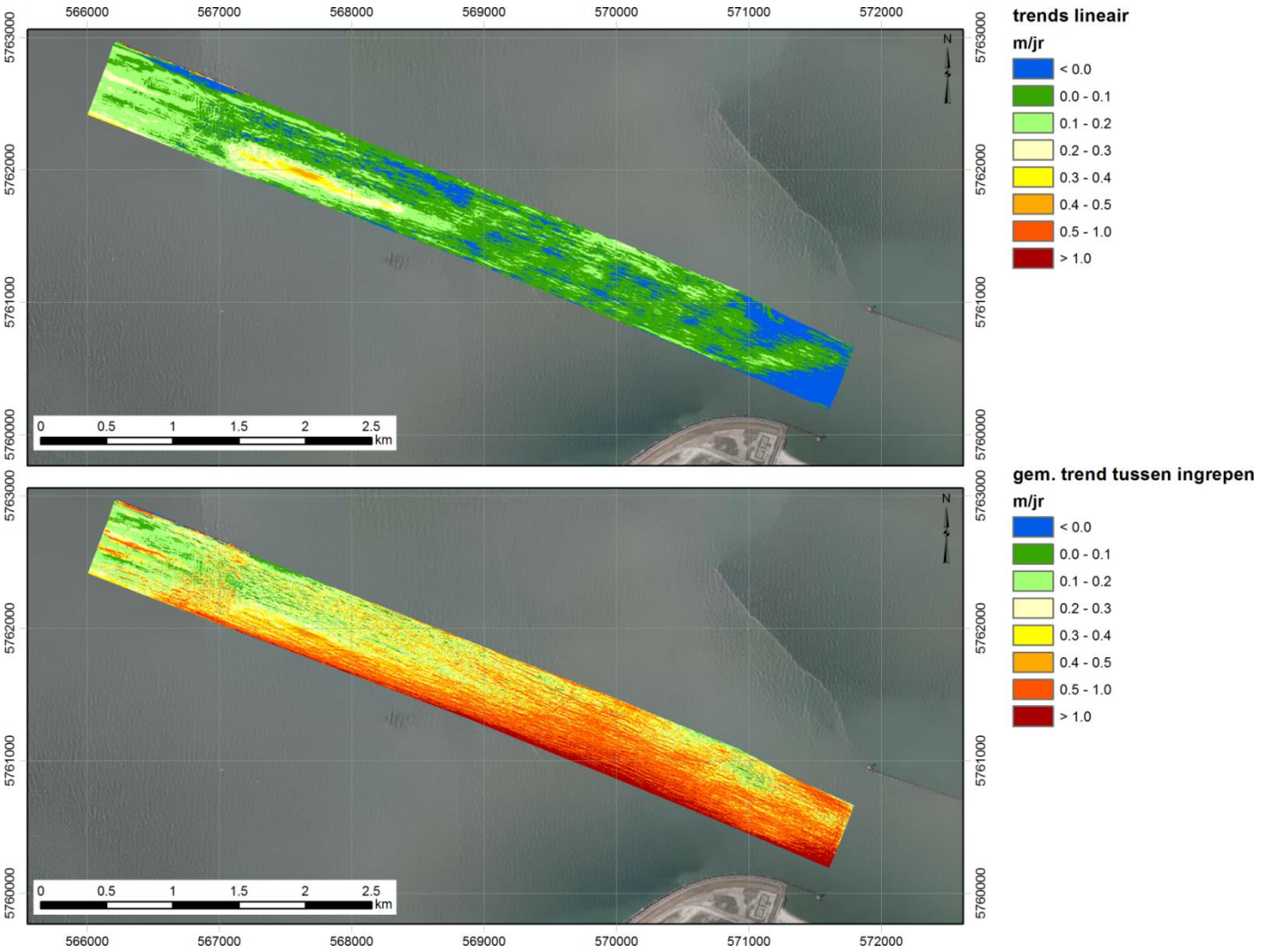
De verschillende manieren van *trend fitting* die toegepast zijn om de 'natuurlijke' dynamiek te bepalen, zijn goed te zien in *t-z* grafieken, zie Figuur 2.7 voor twee voorbeelden. In deze figuur geeft de groene lijn methode 1 weer, de rode methode 2 en de blauwe methode 3 (paragraaf 2.1.3). Al in deze twee voorbeelden is te zien dat de lineaire trend door de gehele meetserie (groene lijnen) veel afwijkt van de gemeten 'natuurlijke' waardes (zwarte lijnen). In de onderste grafiek is de trend zelfs negatief, terwijl de 'natuurlijke' verandering die plaatsvindt positief is. De lineaire trends tussen de baggeringrepen (rode lijnen) en de gebroken trends (blauwe lijnen) laten een heel ander beeld zien dan de lineaire trend door de gehele meetserie.

De lineaire trendlijnen tussen de baggeringrepen en de gebroken trendlijnen liggen dichter bij elkaar. Voor sommige perioden geeft de ene methode een grotere trend (steilere lijn), voor andere perioden de andere. Iedere gebroken trendlijn heeft, behalve ten tijde van het hersteleffect, dezelfde helling (maat voor sedimentatie) over de gehele periode, terwijl de lineaire trendlijnen tussen de baggeringrepen steeds een andere helling hebben. Bij de lineaire trendlijnen tussen de ingrepen is het hersteleffect opgegaan in de trend, hetgeen leidt tot een grotere trend (steilere lijn). Het hersteleffect is zichtbaar aan de steile lijn direct na de baggeringrepen en vóór de knik in de gebroken trends (Figuur 2.7).

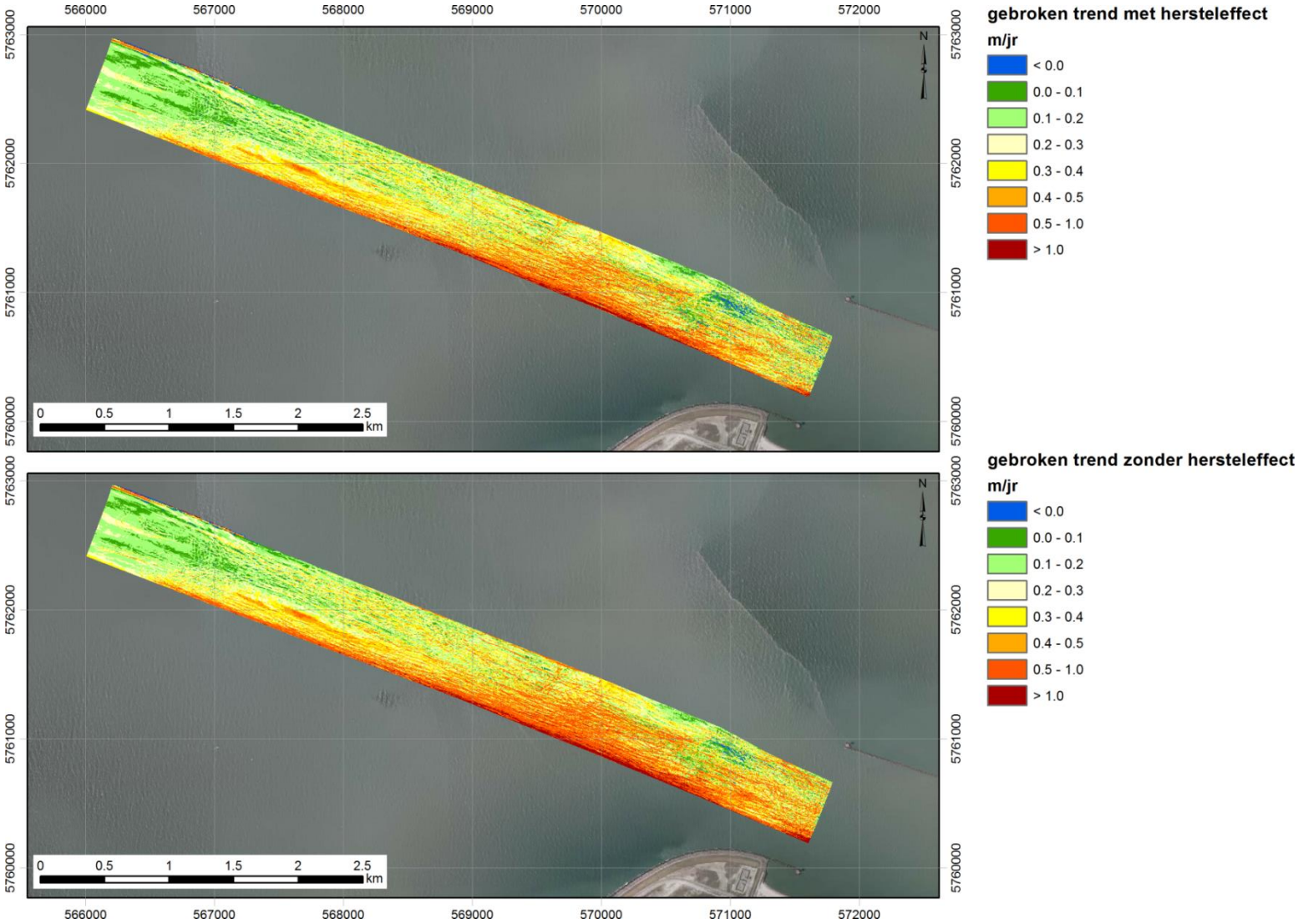


Figuur 2.7 Bodemhoogte in de tijd (t-z grafieken) voor twee pixels (zwarte lijn), gefit met de verschillende methodes van trendberekening. De groene lijn vertegenwoordigt de oorspronkelijke methode; de blauwe en rode lijnen geven de uitkomsten van de hierboven beschreven nieuwe methodes die rekening houden met de baggeringrepen. De baggeringrepen zijn aangegeven met zwarte pijlen aan de bovenkant van de grafieken; het hersteleffect en de herstelperiode zijn aangegeven in de bovenste grafiek.

De kaarten van de 'natuurlijke' dynamiek laten ook zien dat de lineaire trend door de gehele meetserie afwijkt van de andere twee methodes (Figuur 2.8 en Figuur 2.9). In de kaart van de lineaire trend door de gehele meetserie zijn grote gebieden te zien waar een negatieve trend is, terwijl de kaarten met de waarden bepaald met de nieuwe methodes worden gedomineerd door positieve trends.
Deze overige kaarten tonen een onderling vergelijkbaar ruimtelijk patroon, waarbij de trends bepaald tussen de baggeringrepen een grotere trend laten zien (snellere aanzanding) dan de gebroken trends. De gebroken trendanalyse laat slechts een klein verschil zien tussen de varianten met en zonder hersteleffect, waarbij de trend zonder hersteleffect net iets groter is (Figuur 2.9). In alle drie de kaarten is sprake van een strook met grote aanzanding aan de zuidelijke rand van de geul, welke breder wordt nabij de rand van de Tweede Maasvlakte.

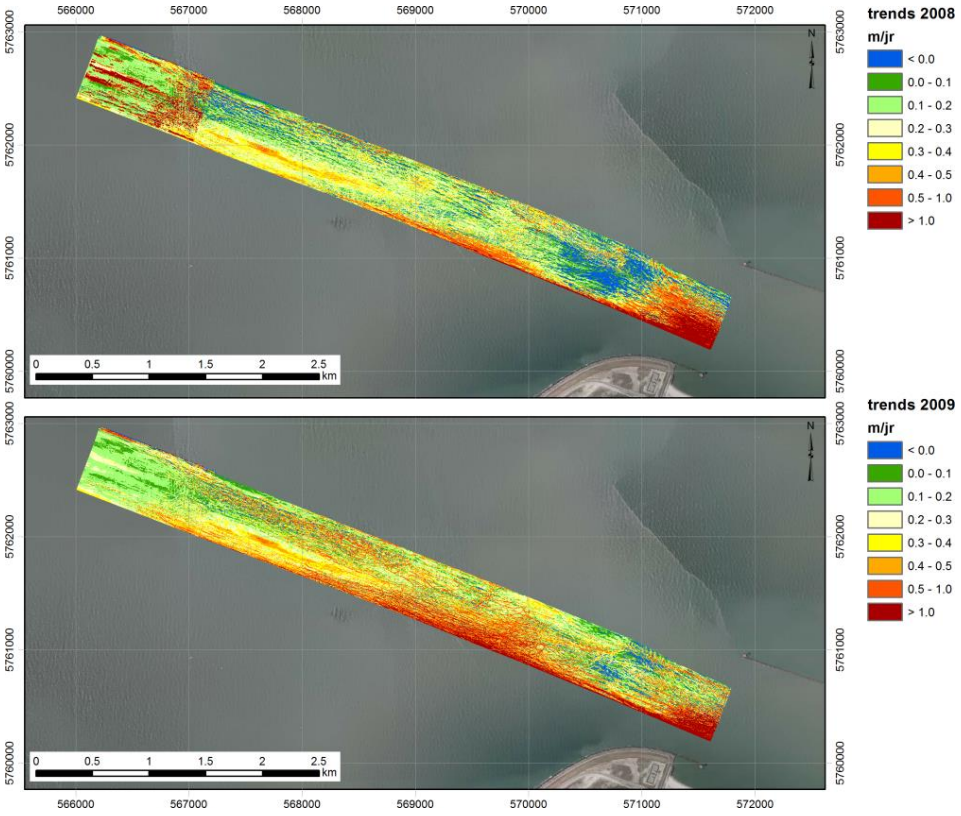


Figuur 2.8 Lineaire trend berekend over de gehele meetserie (links), en gewogen gemiddelde van de trends tussen de baggeringrepen (rechts). Blauwe kleuren geven een negatieve trend aan (afname van de bodemhoogte in de tijd); alle andere kleuren vertegenwoordigen positieve trends (toename in bodemhoogte).

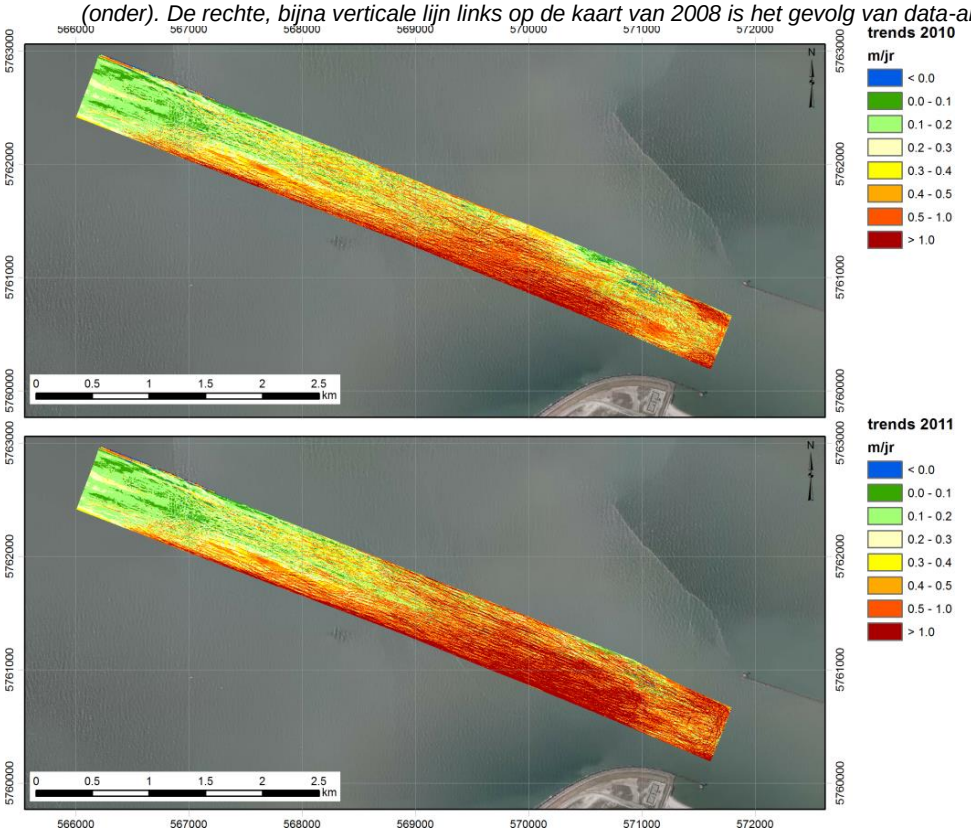


Figuur 2.9 Trends berekend met de gebroken trend analyse, mét hersteleffect (links) en zonder (rechts). Blauwe kleuren geven een negatieve trend aan (afname van de bodemhoogte in de tijd), alle andere kleuren vertegenwoordigen positieve trends (toename in bodemhoogte).

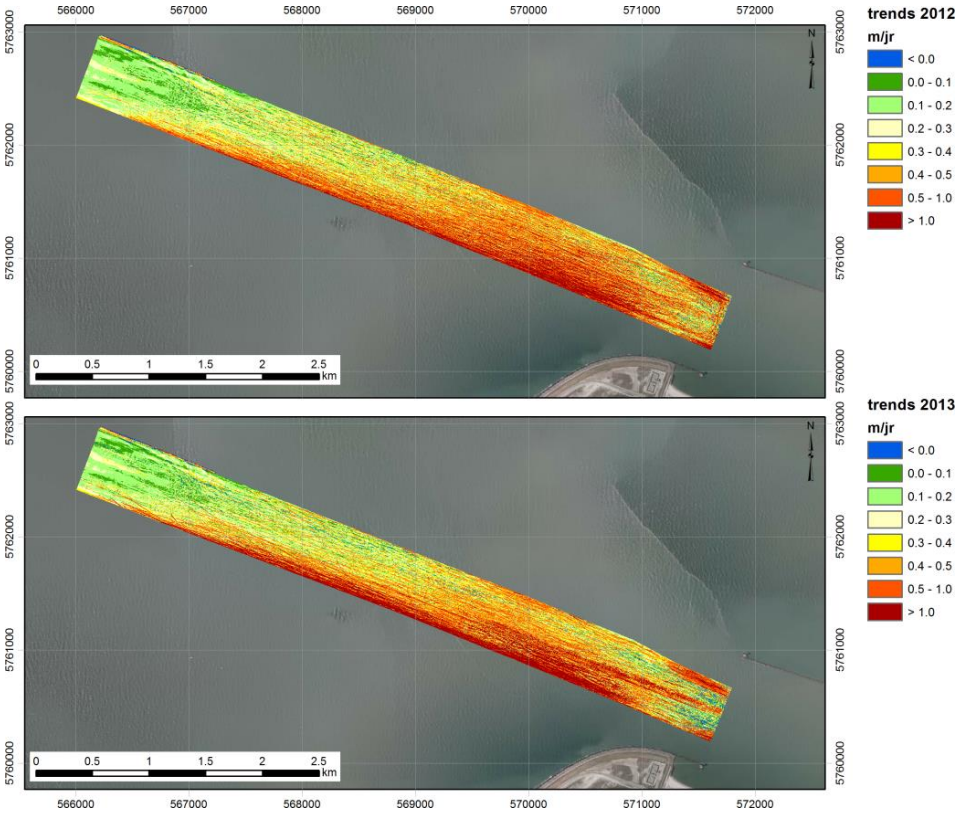
In de jaargemiddelde trends, berekend met de trends tussen de baggeringrepen (methode 2), zijn temporele veranderingen in de 'natuurlijke' trend te zien. Vooral tussen 2008 en de jaren daarna is een groot verschil te zien (Figuur 2.10 t/m Figuur 2.12). In 2008 is de grootste aanzanding te zien in het meest landwaartse deel van de geul en strekt de aanzanding langs de zuidelijke rand van de geul zich minder ver zeewaarts uit. In 2009 is de aanzanding in de eerste kilometer in oppervlak afgenomen en verder zeewaarts juist toegenomen. Ook is de aanzanding aan de zuidelijke rand duidelijker en strekt deze zich wat verder zeewaarts uit. In de daarop volgende jaren lijkt dit patroon zich te bestendigen, waarbij de aanzanding in 2010 en 2011 is toegenomen en daarna weer wat is afgenomen, met de snelste aanzanding in 2011. De som van de trends per jaar van alle pixels in de Maasgeul geeft de totale aanzanding van de gehele geul per jaar weer. De ontwikkeling van deze totale aanzanding laat na 2008 een jaargemiddelde toename zien van 0,9 miljoen m^3 tot 2011. In 2012 en 2013 is sprake van een lichte afname ten opzichte van 2011, maar is het volume van de aanzanding nog steeds ca. 0,5 miljoen m^3 groter dan in 2008 (Figuur 2.13). Vanaf 2012 lijkt de aanzanding weer stabieler te worden, hoewel dit slechts op twee jaren is gebaseerd. Dit betekent dat er tegenwoordig op jaarbasis al gauw 400.000 m^3 meer materiaal afgezet wordt dan vóór de aanleg van de Tweede Maasvlakte, oftewel een stijging van meer dan 30%. Of de sedimentatiesnelheden structureel hoger blijven liggen dan vóór de aanleg moeten de komende jaren uitwijzen, maar hier moet wel rekening mee gehouden worden. Een snellere sedimentatie betekent immers dat er aanzienlijk meer gebaggerd zal moeten worden om de Maasgeul op diepte te houden. Figuur 2.4 en Figuur 2.5 laten zien dat een onbalans tussen baggerinspanning en 'natuurlijke' sedimentatie leidt tot een gemiddelde verondieping van de Maasgeul van ongeveer 0,4 m, zoals waargenomen over de periode 2008-2013. De bevindingen stroken behoorlijk met de verwachting zoals berekend met het numerieke hydrodynamische model van Roelvink en Aarninkhof (2007). Zij voorspelden een toename in jaarlijks baggeronderhoud van ca. 2 tot 3 miljoen m^3, een verschil van 1 miljoen m^3. Hierbij dient wel te worden opgemerkt dat de diepte van de ontgrondingskuil door het model mogelijk met 50% wordt overschat. Deze ontgrondingskuil, onder invloed van de Tweede Maasvlakte in de loop van de tijd ontstaan, vormt de bron van het sediment dat voor aanzanding van de Maasgeul zorgt.



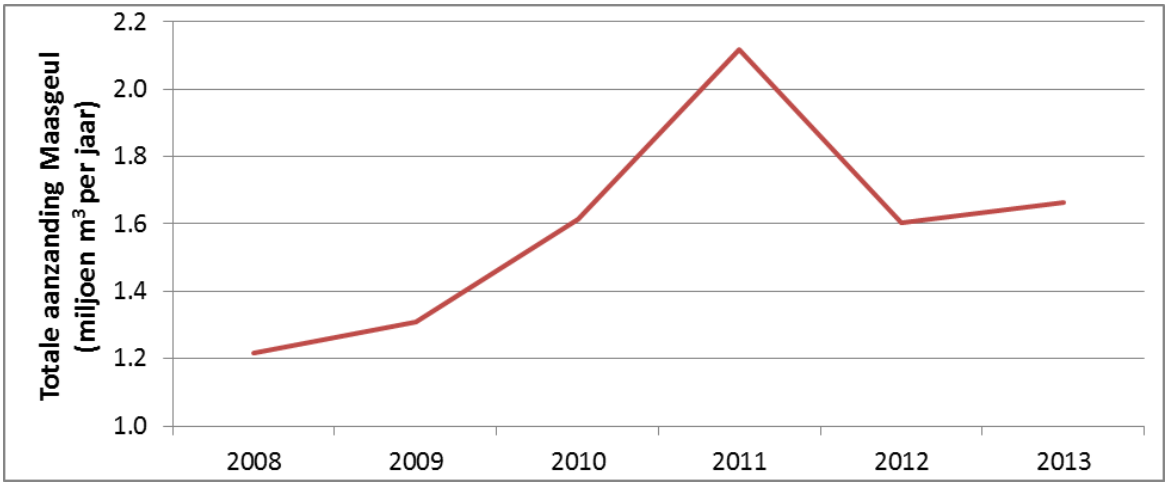
Figuur 2.10 Verticale bodemdynamiek tussen baggeringrepen, gemiddeld voor het jaar 2008 (boven) en 2009 (onder). De rechte, bijna verticale lijn links op de kaart van 2008 is het gevolg van data-artefacten.



Figuur 2.11 Verticale bodemdynamiek tussen baggeringrepen, gemiddeld voor het jaar 2010 (boven) en 2011 (onder).



Figuur 2.12 Verticale bodemdynamiek tussen baggeringrepen, gemiddeld voor het jaar 2012 (boven) en 2013 (onder).



Figuur 2.13 Totale aanzanding in de Maasgeul in de tijd, bepaald op basis van de trends tussen baggeringrepen. Na 2008 is een duidelijke toename te zien in de aanzanding, met een piek in 2011.

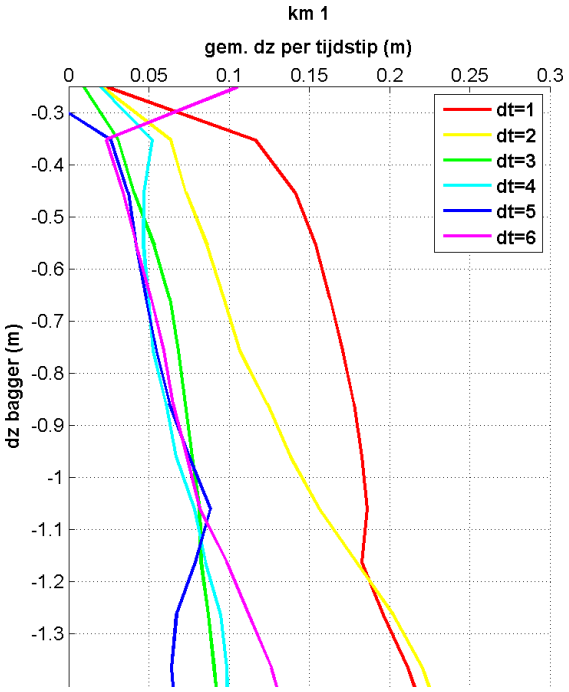
2.3.2 Effect van baggeringrepen

De gemiddelde verandering van de bodemligging direct na een baggeringreep is weergegeven in Figuur 2.14. In deze grafiek is voor km-vak 1 de gemiddelde verandering na een baggeringreep uitgezet tegen de verdieping veroorzaakt door de baggeringreep voor de eerste zes maanden. Alle maanden tonen een toename in bodemverandering naarmate de baggeringreep groter is geweest: de lijnen lopen diagonaal richting rechtsonder. Daarnaast is te zien dat de eerste twee maanden een duidelijk grotere bodemverandering tonen dan de maanden erna: ze liggen verder naar rechts. Hoe groter de verdieping van baggeringrepen, des te sterker en consistenter de afname van sedimentatiesnelheid in de tijd. De grafieken laten bij de ondiepe baggeringrepen een minder duidelijk beeld zien, waar lijnen elkaar kruisen en knikken in de lijnen zichtbaar zijn. De oorzaak hiervoor is dat voor deze ondiepe ingrepen het onderscheid tussen natuurlijke erosie en verdieping als gevolg van baggeren het moeilijkst is. Deze relaties worden waargenomen voor alle kilometervakken in de Maasgeul.

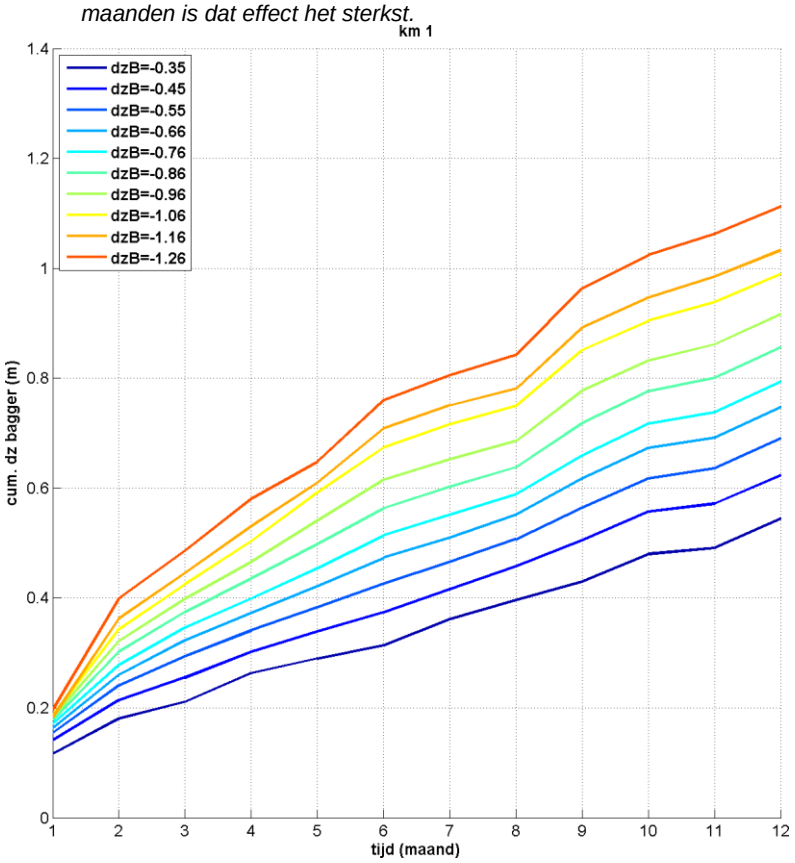
De grotere toename in de eerste maanden is ook te zien aan de *gemiddelde cumulatieve verandering* na een baggeringreep (Figuur 2.15). Deze gemiddelde cumulatieve verandering is bepaald door de gemiddelde verandering per maand na een baggeringreep op te tellen bij de gemiddelde verandering van de volgende maand. In de grafiek is de helling voor de eerste twee maanden steiler dan voor de overige maanden, welke worden gekenmerkt door een vrij constante helling. Deze omslag is het duidelijkst te zien bij de grootste door baggeringrepen veroorzaakte verdiepingen.

Hoe lang het duurt na een baggeringreep tot de bodemhoogte van vóór de ingreep weer is bereikt, is weergegeven in Figuur 2.16 voor km-vak 1. Na een baggeringreep van 0,4 m is de resulterende verdieping in gemiddeld 4,5 maanden weer opgevuld. Deze hersteltijd is langer bij een grotere baggeringreep: bij 1,0 m diep baggeren neemt de opvulling gemiddeld 7 maanden in beslag. De standaarddeviatie is ongeveer 2 maanden, wat naast de meetonzekerheid deels wordt veroorzaakt door verschillen in sedimentatiesnelheden binnen het km-vak.

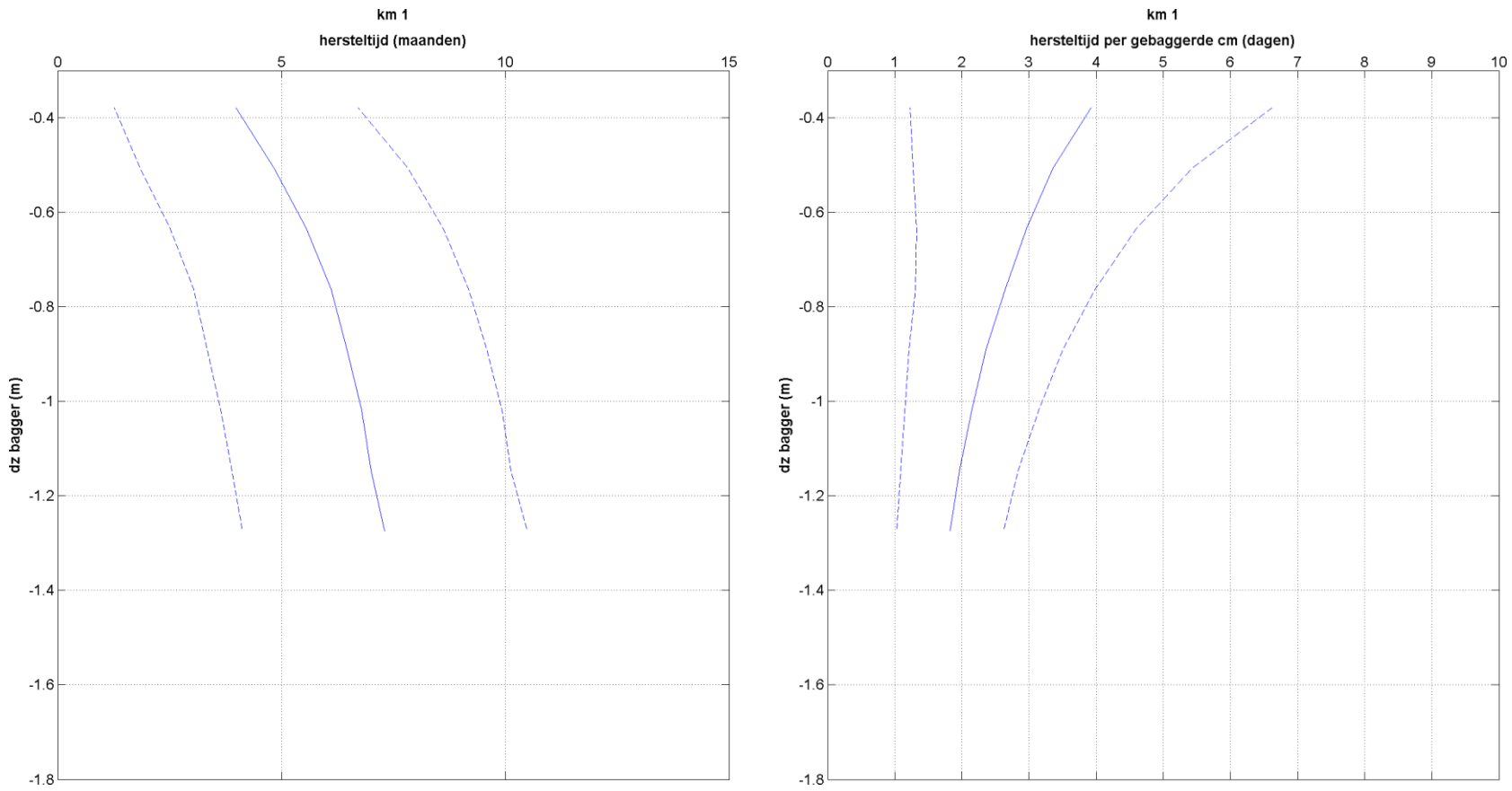
In Figuur 2.16 is de hersteltijd ook relatief tot de grootte van de ingreep weergegeven (in dagen per gebaggerde cm). Hieruit blijkt dat de gemiddelde sedimentatiesnelheid na een kleinere baggeringreep lager is dan na een grotere ingreep. Na een baggeringreep van 0,5 m is de hersteltijd gemiddeld 3 dagen per gebaggerde centimeter: dus 3*50=150 dagen (ca. 5 maanden). Na een baggeringreep van 1,0 m is de hersteltijd gemiddeld ca. 2 dagen per gebaggerde centimeter: dus 2*100=200 dagen (ca. 6,5 maanden).



Figuur 2.14 Gemiddelde verandering na een baggeringreep (x-as) uitgezet tegen de voorafgaande verdieping als gevolg van die baggeringreep (y-as), per maand weergegeven voor de eerste zes maanden (dt=1-6) voor km-vak 1. Alle maanden laten een grotere toename zien als de baggeringreep groter is. Voor de eerste twee maanden is dat effect het sterkst.



Figuur 2.15 Cumulatieve gemiddelde verandering na een baggeringreep in de tijd, weergegeven per diepte-klasse van de baggeringreep (dzB) voor km-vak 1.



Figuur 2.16 Hersteltijd (in maanden) na een baggeringreep (boven), en bijbehorende gemiddelde sedimentatiesnelheid gedurende het herstel (in dagen per gebaggerde cm, onder), voor km-vak 1 uitgezet tegen de grootte van de baggeringreep voor km-vak 1, uitgedrukt in maanden (boven) en relatief tot de grootte van de ingreep (in dagen per gebaggerde cm, onder). De stippellijnen geven de standaarddeviatie.

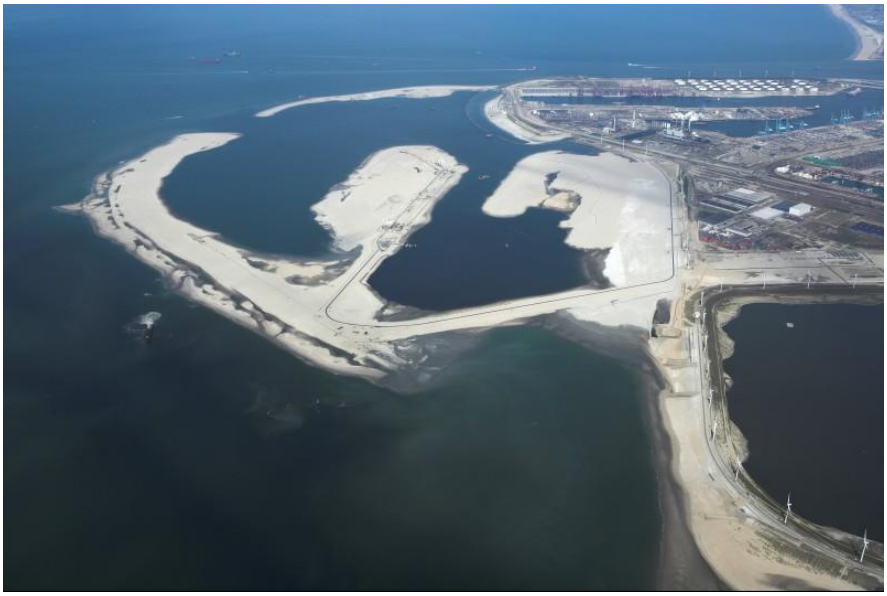
2.4 Interpretatie en discussie

In paragrafen 2.4.1 en 2.4.2 wordt de interpretatie van de hierboven gepresenteerde resultaten gemaakt. Paragraaf 2.4.3 is een aanvullende analyse waarin de dynamiek rondom de Maasgeul is onderzocht.

2.4.1 'Natuurlijke' dynamiek

De ontwikkelde nieuwe methodes om de 'natuurlijke' dynamiek in de Maasgeul te kwantificeren geven betere resultaten dan de oorspronkelijke methode om door de gehele meetserie een lineaire trend te fitten. Dit blijkt niet alleen uit de betere visuele fit aan de meetdata in *t-z* grafieken, maar ook uit de kaartbeelden van de trend. De nieuwe methodes leveren patronen op die goed kunnen worden verklaard aan de hand van de hydrodynamica van het gebied. Het meeste sediment zal bijvoorbeeld terechtkomen langs de zuidelijke rand van de geul doordat hier vloed de dominante getij-richting bepaalt.
In 2008, nog vóór het begin van de aanleg van de Tweede Maasvlakte, reikte de Eerste Maasvlakte verder zeewaarts dan de rest van de kust. Ter hoogte van deze uitstulping van de kust nam de getijstroming in snelheid toe. Deze toename zorgde voor meer sedimenttransport en -aanvoer, en daarmee voor snellere sedimentatie ter hoogte van de Maasvlakte, met name in km-vak 1. De kaart van de trend in 2008 sluit aan bij dit beeld.
Door verdere zeewaartse uitbreiding met de Tweede Maasvlakte (Figuur 2.17) zijn de contractie van het getij en daarmee de sedimenttransporten en sedimentatiesnelheden verder toegenomen. Binnen de Maasgeul zorgt dit voor een verschuiving in zeewaartse richting van de zone van maximale sedimentatie. Zowel de toename in sedimentatie als de verschuiving in zeewaartse richting is terug te zien in de kaarten van de trends van 2009 tot en met 2013.

Uit deze jaarlijkse trends blijkt dat de 'natuurlijke' dynamiek in de tijd duidelijk verandert. De toegepaste gebroken trend analyse berekent echter één trend voor de gehele periode, en negeert daarmee temporele veranderingen. Deze methode zal daarom niet op deze manier gebruikt kunnen worden bij het maken van voorspellingen. Hoewel de trends tussen de baggeringrepen de verandering in trend laten zien door de jaren heen, worden ook in deze methode temporele effecten niet volledig meegenomen. Tussen baggeringrepen in wordt immers slechts één trend bepaald, terwijl ook in die periode sterke veranderingen kunnen optreden. Hoe korter de periode tussen twee baggeringrepen, hoe kleiner de kans dat de berekende trend ver afwijkt van de werkelijke, meer variabele verandering. De onzekerheid van de trend wordt echter wel groter als er minder meetpunten zijn, zoals bij een kortere periode. Hierdoor zullen in gebieden waar erg weinig is gebaggerd temporele veranderingen minder goed zijn meegenomen in deze methode dan in gebieden waar vaker is gebaggerd. Waar echter zeer vaak wordt gebaggerd is de onnauwkeurigheid van de trends wel weer groter.



Figuur 2.17 Aanleg van de Tweede Maasvlakte in april 2010. Bron: https://www.maasvlakte2.com/

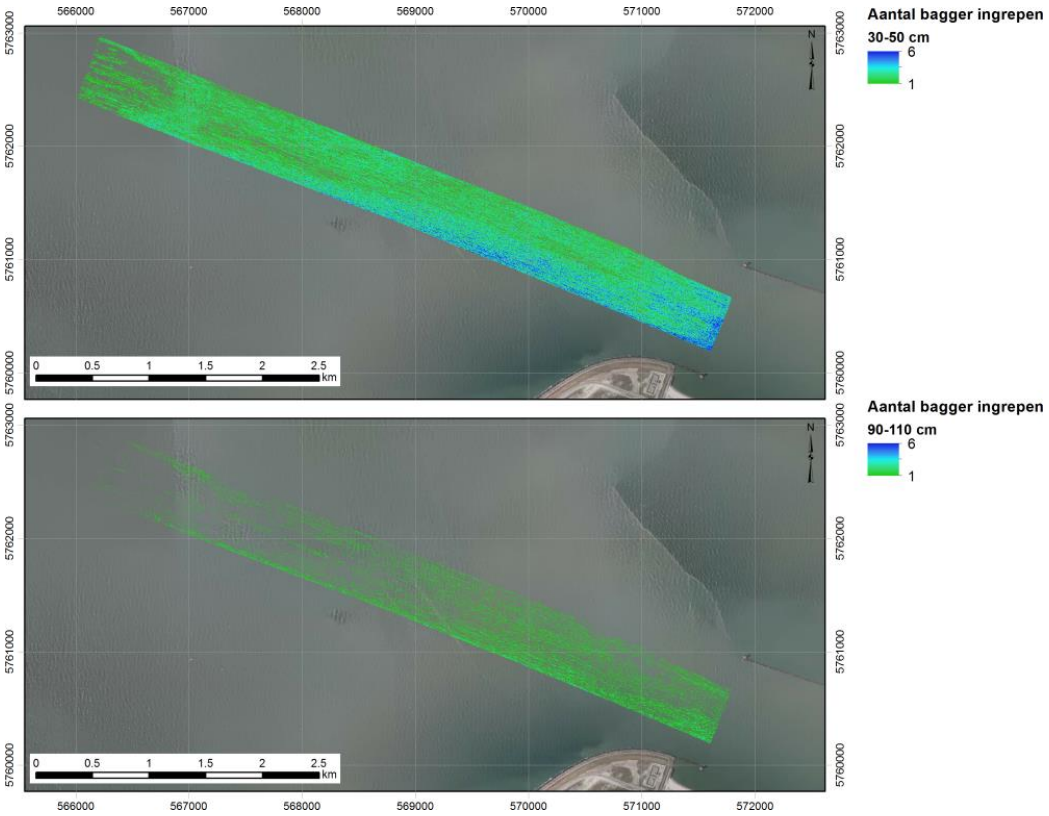
2.4.2 Effecten van baggeringrepen

Aan de basis van de analyses naar de effecten van baggeringrepen ligt de automatische herkenning van de baggermomenten. De nu gehanteerde ondergrens van 25 cm sluit alle baggeringrepen die kleiner zijn uit voor de analyses. Kleinere veranderingen vallen echter in de onnauwkeurigheid van de bodemopnames en zijn met de huidige informatie het niet te onderscheiden. Hierdoor is het nu niet mogelijk om die mee te nemen in de analyses.
Verdiepingen van meer dan 25 cm kunnen echter ook door onnauwkeurigheden of (meet)fouten zijn veroorzaakt. Dit aantal zal echter relatief laag zijn, waardoor voor een groter gebied het effect hiervan op de resultaten gering zal zijn. Mogelijk kan hier enige verbetering worden behaald door te analyseren hoe waarschijnlijk het is dat een verandering door een baggeringreep is veroorzaakt. Hierin kan de baggerinformatie uit MARS in bijdragen.

In de resultaten van de analyse naar het hersteleffect na baggeringrepen is een verschil zichtbaar tussen de eerste twee maanden en de daarop volgende maanden. Het hersteleffect wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat het gebaggerde gebied dieper is komen te liggen dan de directe omgeving, waardoor het als een '*sediment trap*' fungeert. De sedimentatie in het gebaggerde gebied gaat het snelst direct nadat een baggeringreep is uitgevoerd. Het verschil tussen de diepte van het gebaggerde gebied en de directe omgeving wordt door deze sedimentatie snel kleiner, waardoor de '*sediment trap*' minder efficiënt wordt en het hersteleffect met de tijd afneemt.
De bodemopnames waarop de berekeningen zijn gebaseerd zijn maandelijks uitgevoerd, terwijl de baggeringrepen gedurende de hele maand plaatsvinden. Hierdoor kan een baggeringreep bij een eerstvolgende bodemopname van een maand tot een dag daarvoor zijn uitgevoerd. Doordat het hersteleffect direct na een baggeringreep het grootste is, zal dit in een ingreep die tot een maand voor de bodemmeting is uitgevoerd veelal minder duidelijk te zien zijn. Hierdoor is te verwachten dat het hersteleffect groter is dan blijkt uit de resultaten in dit onderzoek. Ook zal het verschil tussen de sedimentatie direct na een baggeringreep en de 'natuurlijke' sedimentatie groter zijn dan hier bepaald.

De analyse van de herstelperiodes suggereert dat diepere baggeringrepen relatief minder efficiënt zijn dan ondiepere baggeringrepen. De herstelperiode is echter bepaald per gebied waarbinnen de 'natuurlijke' dynamiek niet uniform is. Mogelijk zijn de diepe baggeringrepen

vooral uitgevoerd in de delen waar snelle sedimentatie optreedt en de ondiepe ingrepen in delen met langzamere sedimentatie. In dat geval is de herstelperiode een representatie van de verschillen in dynamiek en niet een effect van de diepte van een baggeringreep. Om hier zicht op te krijgen is het totaal aantal baggeringrepen tussen 2008 en 2013 per diepte-klasse van de ingreep op kaart weergegeven (Figuur 2.18). Zowel de ondiepe als de diepe ingrepen zijn vaker uitgevoerd in de delen met de hoogste sedimentatiesnelheden (de zuidelijke geulrand en nabij de Maasvlakte). Beide laten geen verdere samenhang zien met de sedimentatie maar zijn over de gehele geul uitgevoerd en niet alleen langs de zuidrand. Deze observatie vormt geen reden tot verwerping van de hypothese dat de diepere baggeringrepen inderdaad relatief inefficiënt zijn.

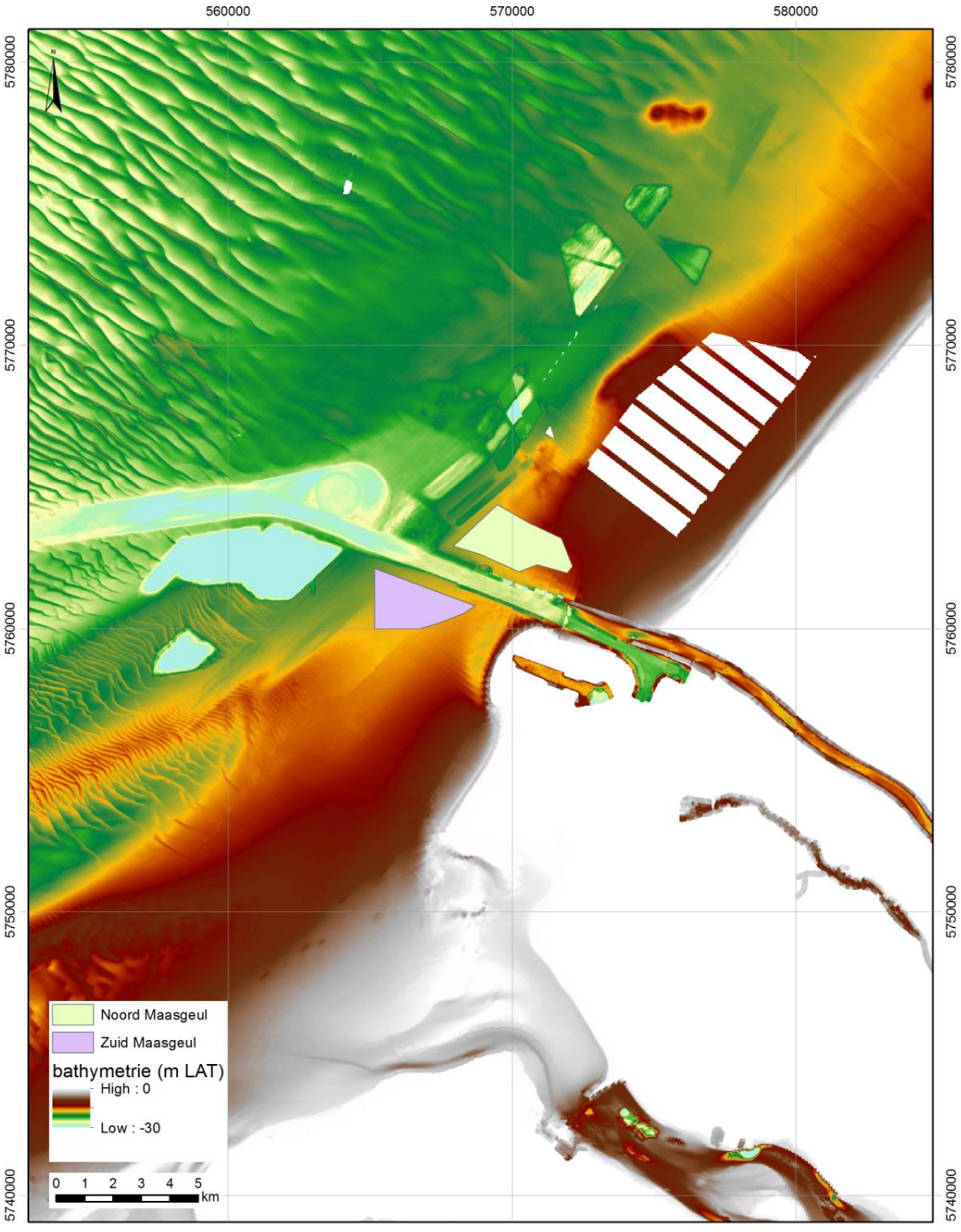


Figuur 2.18 Aantal uitgevoerde baggeringrepen in de periode 2008-2013 met een grootte van 30-50 cm (boven) en 90-110 cm (onder).

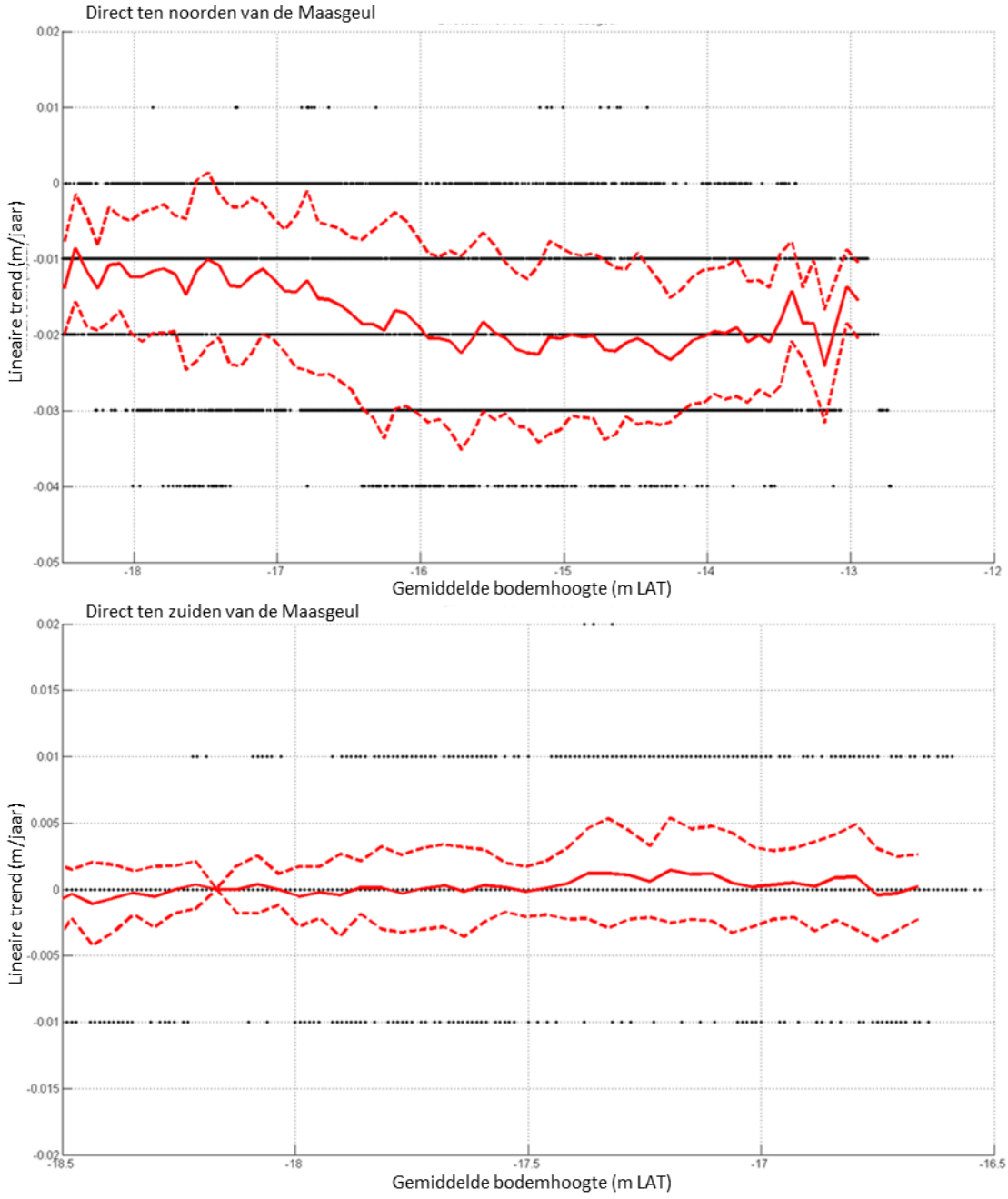
2.4.3 Trends in verticale bodemdynamiek (*dz/dt*) ten noorden en ten zuiden van de Maasgeul

Het gebied van de maandelijkse survey van de Maasgeul beperkt zich logischerwijs tot de Maasgeul en bijbehorende bermen. Voor dat gebied zijn de bagger- en sedimentatiepatronen in detail geanalyseerd (dit rapport en Hijma en Vermaas, 2013). De hoeveelheid sedimentatie in de Maasgeul wordt merendeels bepaald door de hoeveelheid sediment die aangevoerd wordt vanuit zuidwestelijke richting door de noord-gedomineerde kustlangse stroming. Numerieke modellering geeft aan dat vóór de aanleg van de Tweede Maasvlakte ongeveer 1,5 miljoen m^3/jaar binnenkwam in km 0-3,3 en 0,45 miljoen m^3/jaar in km 3,3-5,5 (Roelvink en Aarninkhof, 2007). In beide gebieden verliet in die situatie ongeveer 0,3 miljoen m^3/jaar de Maasgeul, met als gevolg aanzienlijke sedimentatie ter plaatse van de geul. Uit deze sedimentbalans kan worden afgeleid dat er direct ten noorden van de Maasgeul relatief minder sedimenttransport plaatsvond dan ten zuiden van de Maasgeul (0,3 miljoen *versus* 0,45-1,5 miljoen m^3/jaar). Zowel vóór als na de aanleg van de Tweede Maasvlakte is te verwachten dat het sedimenttransport ten noorden van de Maasgeul wel snel weer toeneemt, hetgeen noodzakelijkerwijs leidt tot netto sedimentopname (erosie) van de zeebodem ter plaatse. Om deze hypothese te toetsen zijn de netto bodemhoogteveranderingen over de laatste tientallen jaren voor de gebieden ten noorden en ten zuiden van de Maasgeul (Figuur 2.19) geanalyseerd. Hiervoor zijn digitale bathymetrische datasets van de Dienst der Hydrografie gebruikt (voor een uitgebreide beschrijving van de werkwijze wordt verwezen naar hoofdstuk 3). Figuur 2.20 geeft de verticale trend in bodemhoogte en laat inderdaad zien dat er ten noorden van de Maasgeul netto erosie is opgetreden. De erosie is met circa 0,02 m/jaar het sterkst in water ondieper dan 16 m. Naar dieper water neemt de netto erosie af tot 0,01 m/jaar. Het gemiddelde van de maximale range in bodemhoogteverandering in dit gebied schommelt rond de 0,4-0,5 m (Figuur 2.21). Deze maximale range is berekend door per pixel het verschil tussen de minimale en maximale bodemhoogte uit te rekenen. De range zou verklaard kunnen worden door migrerende bodemvormen van vergelijkbare hoogte. Uit het streperige, ruimtelijke patroon van de verticale trends (Figuur 2.22; van noordwest naar zuidoost) lijkt inderdaad naar voren te komen dat het patroon gekoppeld is aan migrerende bodemvormen.

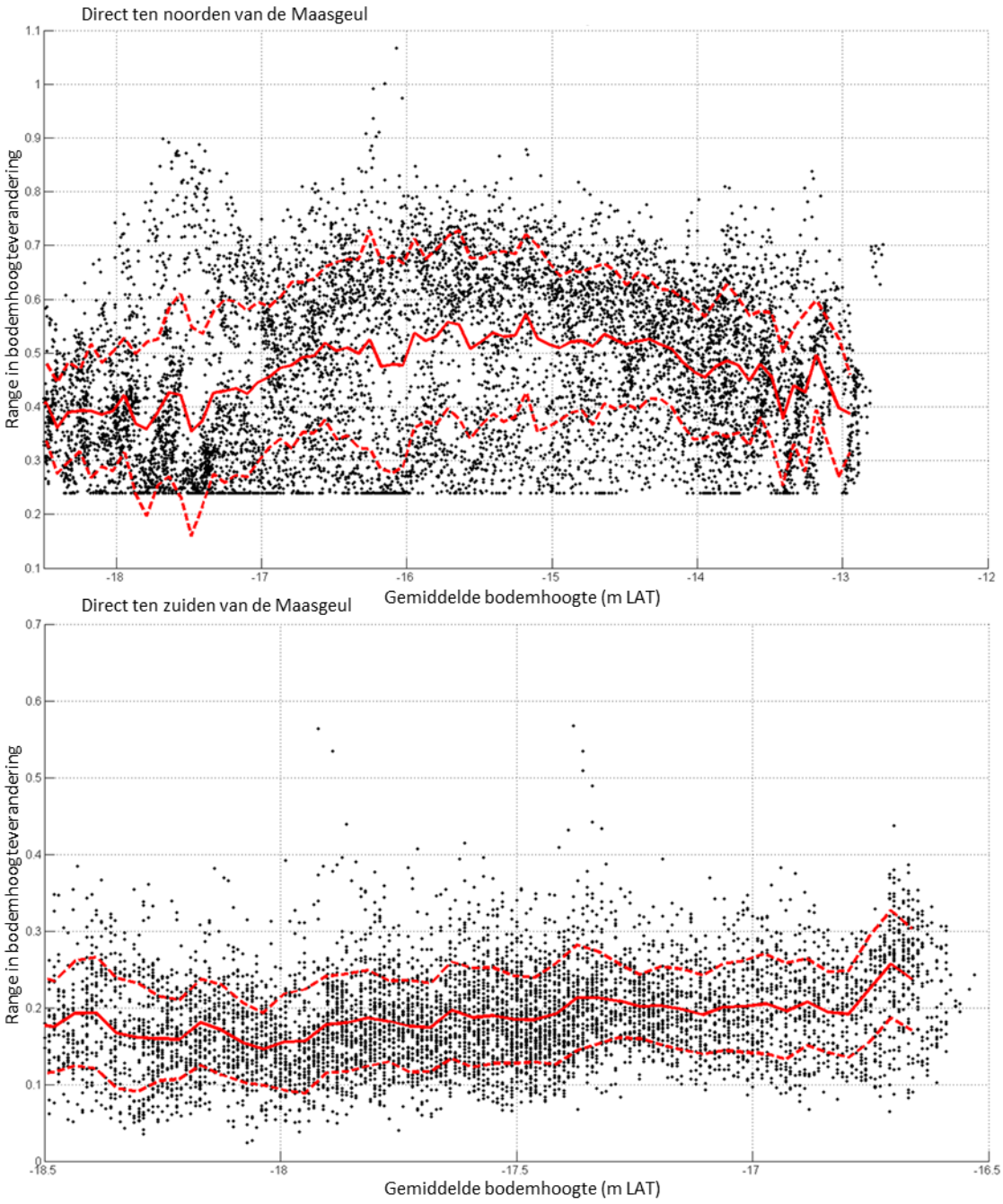
Ten zuiden van de Maasgeul vinden netto geen bodemhoogteveranderingen plaats. De range van bodemhoogteveranderingen in dit gebied is zeer gering en gemiddeld in de orde van enkele decimeters (Figuur 2.21). De kleine range kan een weerspiegeling zijn van migrerende, lage bodemvormen. Aangezien de meetnauwkeurigheid van de opnames ook in de orde van 2 decimeter is (zie bijvoorbeeld Hijma en Vermaas, 2013), bestaat ook de mogelijkheid dat de gevonden range (deels) een weerspiegeling is van de meetnauwkeurigheid. Een ruimtelijk beeld van de trends in verticale bodemdynamiek (Figuur 2.22) laat voor het zuidelijke gebied geen opvallend patroon zien, en weinig ruimtelijke variabiliteit. Alleen aan de westkant ligt een deelgebied dat duidelijk afwijkt en gekenmerkt wordt door een sterk negatieve trend.



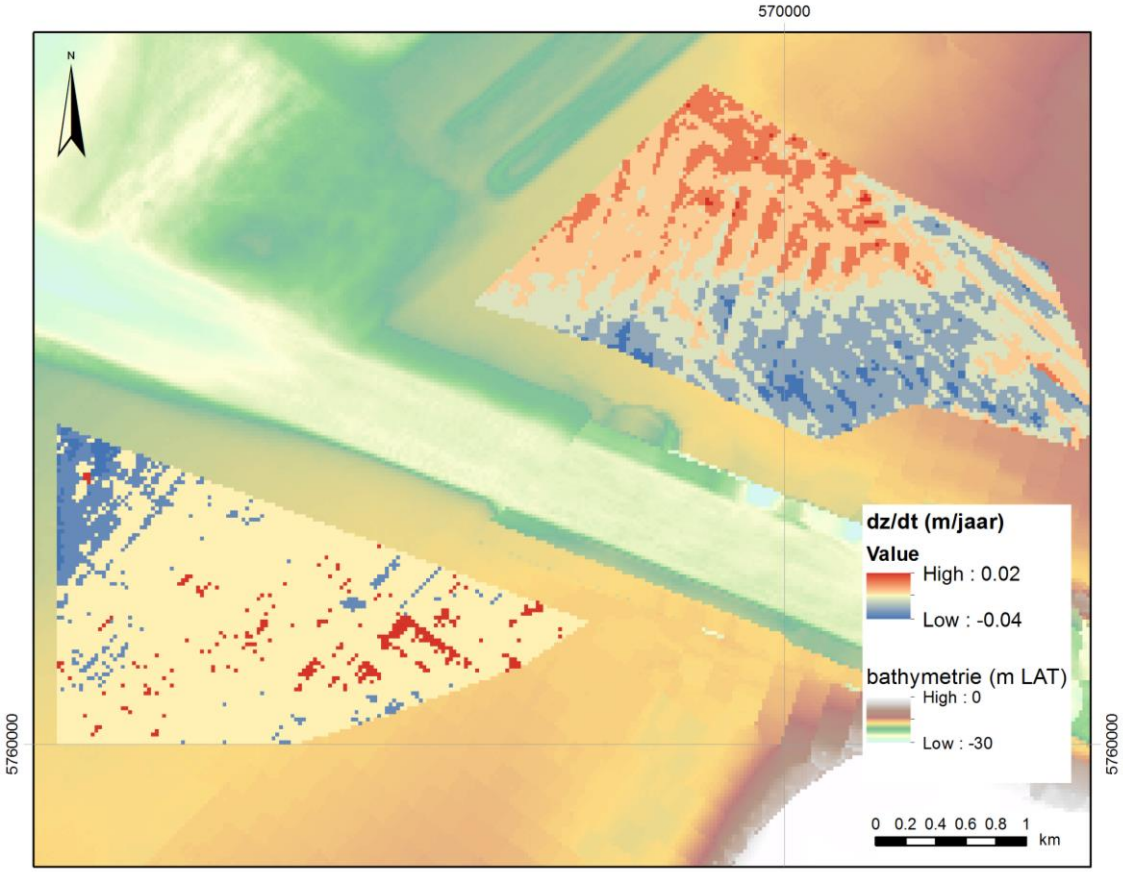
Figuur 2.19 Ligging van de geanalyseerde gebieden direct ten zuiden en ten noorden van de Maasgeul. De gebieden zijn zo gekozen dat ze geen zandwin- of loswalgebieden omvatten en niet binnen de directe invloedssfeer van de Maasvlakte liggen.



Figuur 2.20 De verticaal-dynamische bodemhoogtetrends in meters per jaar voor de gebieden direct ten noorden en ten zuiden van de Maasgeul. De zwarte stippen geven de trendwaarden per pixel (op 1 cm nauwkeurig, oftewel afgerond op 2 decimalen); de rode doorgetrokken lijn geeft de gemiddelde waarde per waterdiepte en de gestreepte rode lijnen de standaarddeviatie. Ten zuiden van de Maasgeul is er geen tot vrijwel geen netto verandering in bodemhoogte. Ten noorden van de Maasgeul treedt overal, maar vooral in het ondiepere bereik, netto erosie op.



Figuur 2.21 De maximale range in bodemhoogte voor de gebieden direct ten noorden en ten zuiden van de Maasgeul. In het zuidelijke gebied is de gemiddelde, maximale range ongeveer 0,2 m, ten noorden 0,4 tot 0,5 m. In het noordelijke gebied zijn de grootste ranges gerelateerd aan erosie.



Figuur 2.22 Verticale trends in bodemhoogte (dz/dt) voor de gebieden ten zuiden en ten noorden van de Maasgeul.

2.5 Conclusies

De uitgevoerde analyses geven zowel in de 'natuurlijke' dynamiek in de Maasgeul als in het effect van baggeringrepen op deze dynamiek waardevolle nieuwe inzichten. Aan de hand hiervan kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Het automatisch herkennen van baggeringrepen op basis van verschilkaarten van de maandelijkse bodemopnames maakt het kwantificeren van realistische 'natuurlijke' trends mogelijk. De 1x1m pixels kunnen niet worden geïdentificeerd als baggeringrepen uit MARS, dat bedoeld is voor objectieve verrekening van de baggeractiviteiten van de aannemer. De nieuwe methode beschreven in dit rapport maakt de automatische herkenning van baggermomenten mogelijk.
- De oorspronkelijke berekening van een lineaire trend door de gehele meetserie, zoals uiteengezet in Van Dijk et al. (2011), houdt geen rekening met baggeringrepen. De hier ontwikkelde nieuwe methoden, waarin trends van 'natuurlijke' verticale bodemdynamiek worden berekend tussen de baggeringrepen, blijken goede resultaten te geven voor een gebied als de Maasgeul waar baggeringrepen worden uitgevoerd.
- Zowel lineaire trends tussen baggeringrepen in, als gebroken trends geven een realistisch ruimtelijk beeld van de 'natuurlijke' dynamiek in de Maasgeul. De eerste van de twee methodes beschouwt ook temporele variaties in de dynamiek door de gehele tijdreeks, waardoor ook effecten van de aanleg van de Tweede Maasvlakte te zien zijn. De gebroken trend analyse berekent één opgelegde trend voor iedere lijn in de gehele tijdreeks en beschouwt dus geen temporele variaties. Deze methode is daarom minder geschikt voor gebruik bij voorspellingen.

- Er is een verschil in de 'natuurlijke' trend vóór en na de aanleg van de Tweede Maasvlakte. Na de aanleg sediment er jaarlijks 30% meer materiaal dan voor de aanleg.
- In de eerste twee maanden na een baggeringreep is een effect daarvan op de natuurlijke dynamiek te zien: in deze maanden ligt de sedimentatie hoger dan in de maanden daarna. Dit *hersteleffect* is groter na een grotere (diepere) baggeringreep.
- De *herstelperiode* na een baggeringreep, de tijd totdat het bodemniveau van vóór de ingreep is overschreden, wordt groter naarmate de baggeringreep groter is. Relatief tot de gebaggerde hoeveelheid is de herstelperiode echter langer voor ondiepe baggeringrepen dan diepe. Op basis van deze herstelperiode is het vaker uitvoeren van ondiepe baggeringrepen dus efficiënter dan minder vaak uitvoeren van diepe baggeringrepen. Overige beleidsmatige beslissingen, zoals financiën of inzetbaarheid schepen, zijn hierin niet overwogen.
- Ten zuiden van de Maasgeul vinden er geen netto bodemhoogteveranderingen plaats, in tegenstelling tot het gebied ten noorden van de Maasgeul waar gemiddeld netto bodemerosie optreedt. Dit kan worden verklaard doordat de Maasgeul veel sediment invangt en er ten noorden van de Maasgeul daarom veel sedimentopname zou kunnen plaatsvinden.

2.6 Stappen tot implementatie

De resultaten en conclusies van dit onderzoek vormen een belangrijke bouwsteen om te gebruiken bij het optimaliseren van het opnemingsbeleid van de Maasgeul. Een aantal vervolgstappen die nog nodig zijn om dit op een juiste manier te doen, worden hieronder genoemd:

- Trendberekening verbeteren om veranderingen in sedimentatiesnelheden tussen opeenvolgende baggeringrepen beter in beeld te brengen: de tot nu toe gebruikte methodes gaan ten onrechte uit van lineaire trends. Wanneer de snelheid van aanzanding in de tijd varieert, zoals de monitoring tussen 2008 en 2013 laat zien, kan dit niet meer correct worden weergegeven door één lineaire trend. Gebruik van lineaire trends voor dergelijke situaties kan leiden tot onderschatting van de snelheid van verondieping, waardoor voorspellingen ter onderbouwing van het baggerbeleid niet betrouwbaar zullen zijn. Het is van essentieel belang om te toetsen hoe een verandering in de tijd het best kan worden beschreven (bijvoorbeeld door meerdere lineaire trends, of door een non-lineaire vergelijking).
- Ontwikkeling van een stochastisch voorspellend model: op basis van de verbeterde trends kan een stochastisch model worden ontwikkeld dat de tijd bepaalt tot een pixel niet meer voldoet aan een voor bijbehorende locatie vereiste minimale diepte. In dit model wordt een onzekerheidsmarge berekend waarin onder andere de meetonnauwkeurigheden zijn meegenomen. Een mogelijke manier om deze resultaten in de praktijk te kunnen toepassen is het weergeven van de voorspelde overschrijdingsdatum van elke pixel in één kaart.
- Analyse van de invloed van externe factoren zoals golven, getij, andere menselijke ingrepen in de omgeving: het beter begrijpen van deze factoren en hun invloed op de aanzanding in de Maasgeul helpt om een beter morfodynamisch model te maken. Deze factoren kunnen op meerdere manieren geanalyseerd worden, onder andere door ze te kwantificeren en te correleren met de veranderingen in de Maasgeul of hun potentiele invloed te toetsen aan de hand van hydrodynamische modellen.

3 Koppeling Kust en Zee

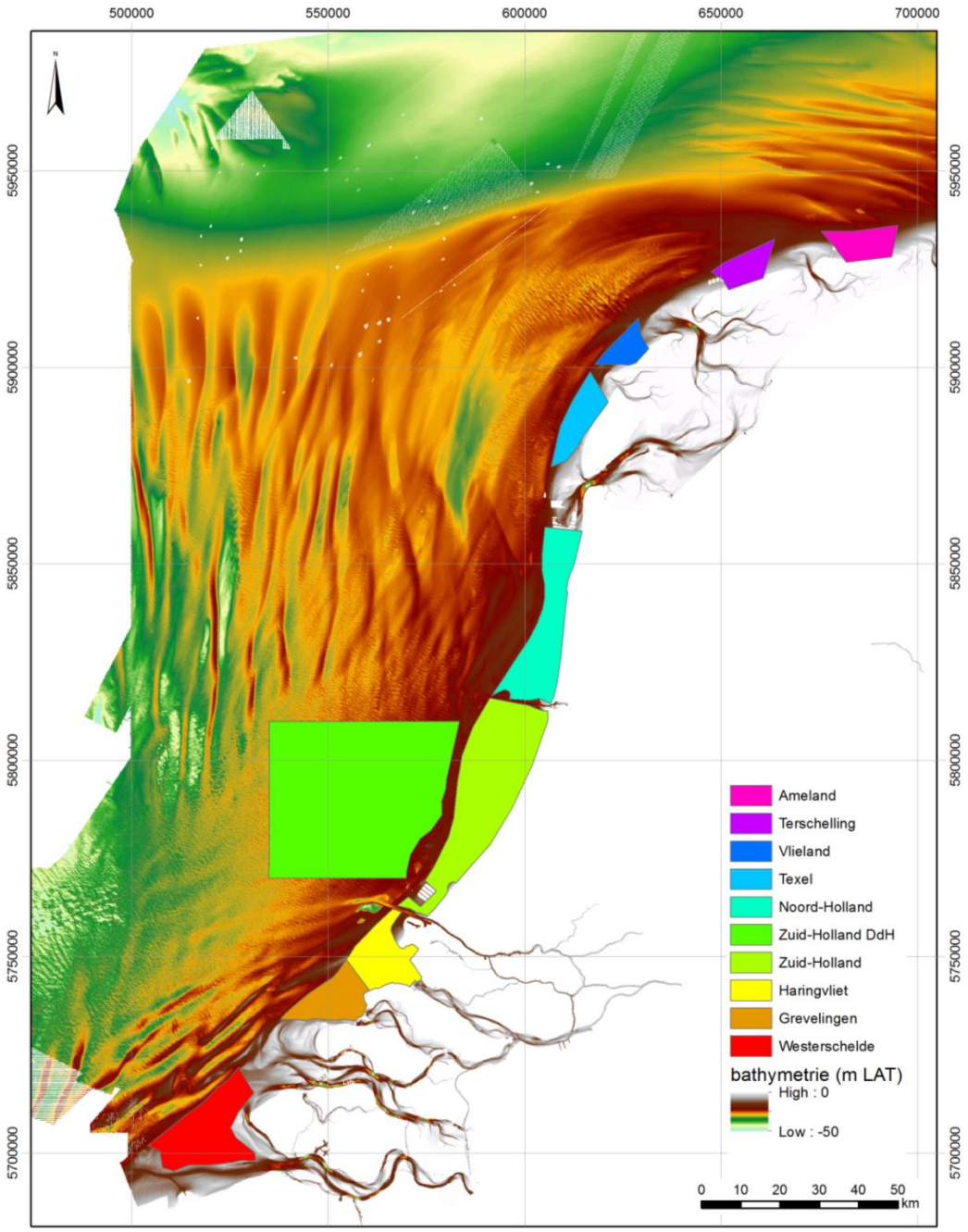
Een deel van het suppletieprogramma van Rijkswaterstaat bestaat uit het onderhouden van het kustfundament. Het kustfundament is gedefinieerd als de zone tussen de -20 m NAP dieptelijn en de binnenduinrand. De -20 m NAP dieptelijn is gekozen omdat aangenomen wordt dat over deze dieptelijn zeker geen significant netto zandtransport meer plaatsvindt tussen de kustzone en de diepere delen van de zee. De *closure depth*, de zone waarin het kustdwarse zandtransport zo minimaal is geworden dat het geen effect meer heeft op de morfologie (Bruun, 1962), is een geschikte maat voor de basis van het kustfundament. De *closure depth* wordt met name bepaald door de significante golfhoogte en varieert dus met de tijd (Hallermeier, 1983). Uit onderzoek is al bekend dat de *closure depth* langs de Nederlandse kust waarschijnlijk een stuk hoger ligt dan de -20 m NAP (bijv. Koomans, 2000; Hinton en Nicholls, 2007). Deze studies, uitgevoerd voor delen van de Nederlandse kust, gebruikten in de tijd opeenvolgende kustdwarse diepteprofielen om voor die locaties de gemiddelde *closure depth* te schatten voor een tijdschaal van 20-25 jaar. Genoemde studies toonden aan dat voor die tijdschaal de *closure depth* in veel gevallen zelfs hoger dan -10 m NAP ligt. Dit jaar is binnen het onderhavige KPP-project een start gemaakt om dit grootschaliger aan te pakken en op basis van langjarige bathymetrische datasets voor vrijwel de gehele Nederlandse kust de netto kustdwarse bodemhoogteverandering te bepalen. Hierbij zijn zowel de datasets van de Dienst der Hydrografie (DdH) als de vaklodingen van Rijkswaterstaat gebruikt. De datasets zijn complementair en deels overlappend: de DdH meet op diep water tot in de kustzone, terwijl de vaklodingen meestal tot de -20 m NAP dieptelijn gaan. De gebruikte dataset omspant een periode van 20-40 jaar en de berekende waarden zijn dus geldig voor een tijdschaal vergelijkbaar met Koomans (2000) en Hinton en Nicholls (2007). Deze tijdschaal is korter dan de tijdschaal van 50-200 jaar waarvoor een vastgestelde *closure depth* van het kustfundament zou moeten gelden.

De resultaten van deze *pilot* kunnen de aanzet geven voor een uitgebreider onderzoek in de komende jaren en als voer dienen voor de discussie over de grootte en basis van het kustfundament. Dit is niet triviaal, aangezien het product van het oppervlak van het kustfundament en de zeespiegelstijging voor een deel bepaalt hoeveel zand er jaarlijks gesuppleerd wordt. Als het oppervlak van het kustfundament kleiner wordt, leidt dit tot een aanzienlijk besparing betekenen op het suppletiekosten. Ter illustratie: als de basis van het kustfundament niet op de -20 m, maar op de -18 m NAP dieptelijn wordt gelegd, neemt het oppervlak van het kustfundament, en daarmee het benodigde volume aan suppletiezand, met circa 10% af, voor -16 m NAP met 20% en voor -14 m NAP met 27%. Een punt van aandacht is dat de meetnauwkeurigheid van de lodingsdata tijdens de *pilot* niet is meegenomen in de analyses en de onzekerheid rondom de gevonden trends niet is uitgerekend. Dit zal in een vervolgstudie wel gebeuren. Hieronder wordt eerst de gebruikte methode besproken, gevolgd door de resultaten en een discussie.

3.1 Data en methoden

De methode gebruikt alle beschikbare digitale datasets van Rijkswaterstaat en de DdH (1960 tot heden). De vaklodingen bestaan uit singlebeam opnames langs kustdwarse raaien met een onderlinge afstand van 1000 m. De tussenliggende ruimte wordt door Rijkswaterstaat vlakdekkend geïnterpoleerd tot een grid van 20x20 m. Voor de data van de DdH geldt dat voorheen singlebeam werden gebruikt, maar nu wordt gemeten met multibeam echosounders. De methode is eerst getest op alleen de vaklodingen. Hierbij is het kustnabije gebied opgedeeld in verschillende deelgebieden (Figuur 3.1). De deelgebieden zijn zo geselecteerd dat ze geen grote getijdengeulen omvatten en geen vaargeulen, zandwin- en/of

loswalgebieden. Hiervoor is gekozen omdat de veranderingen in bodemhoogte door verplaatsing van de getijdengeulen en/of menselijk ingrijpen erg groot kunnen zijn, waardoor een analyse naar kustdwarse veranderingen in bodemhoogte gecompliceerd zou worden. Per gebied zijn vervolgens voor elke pixel (gridcel) apart het verschil tussen de minimale en maximale bodemhoogte (de 'range'), de verandering in bodemhoogte in de tijd (*dz/dt*), de gemiddelde bodemhoogte en het aantal datapunten per pixel uitgerekend. De *dz/dt* is berekend door een lineaire trend te trekken door de beschikbare datapunten, zoals uitgebreid besproken in Van Dijk et al. (2011).



Figuur 3.1 Ligging van de geanalyseerde deelgebieden. Afgezien van het deelgebied 'Zuid-Holland DdH' waarvoor data van de DdH gebruikt zijn, betreft het gebieden waarvoor vaklodingen zijn gebruikt.

Een nadeel van de methode is dat, zeker over langere tijdschalen, de bodemhoogte veelal niet lineair verandert, maar volgens het profiel van migrerende bodemvormen. Dit probleem wordt enigszins ondervangen doordat per pixel gerekend wordt. Dit betekent dat er voor elk deelgebied vele tienduizenden *dz/dt*-waarden worden uitgerekend. Door vervolgens te kijken naar de gemiddelde verandering over het gehele gebied wordt de afwijking die geïntroduceerd wordt door met lineaire trendlijnen te werken uitgemiddeld. Daarnaast wordt per pixel ook het verschil tussen de minimale en maximale bodemhoogte uitgerekend. Tezamen met de *dz/dt* geven de berekende waarden ('ranges') een goed beeld van de dynamiek in de deelgebieden. In een volgende stap worden per deelgebied de *dz/dt*-waarden en de ranges uitgezet tegen de gemiddelde bodemhoogte. Voor de vaklodingen worden alleen die pixels gebruikt waarvoor minimaal 6 datapunten beschikbaar waren over een periode van minimaal 15 jaar.

In een parallelle stap is dezelfde methode toegepast op de data van de DdH voor het deelgebied Zuid-Holland DdH. Het deelgebied waarbinnen deze data zijn geanalyseerd eindigt zeewaarts rond de -30 m LAT dieptelijn en ligt direct ten westen van het deelgebied waarbinnen de vaklodingen geanalyseerd zijn (Figuur 3.1). Aangezien rond de -20 m LAT dieptelijn verschillende zandwingebieden liggen, is daar een strook niet meegenomen in de analyse. Het gemiddelde aantal meetmomenten per pixel is voor de DdH data veel geringer dan voor de vaklodingen. In sommige gevallen is een pixel maar 1 of 2 keer ingemeten. Pixels waarvoor dat geldt, zijn niet meegenomen in de analyse; alleen pixels met minimaal 3 gemeten waarden zijn gebruikt. Het maximale aantal meetmomenten per pixel is 10. De oudste gebruikte opname dateert van 1969 en de meest recente van 2012. Ook voor de DdH-data zijn de range en de *dz/dt* uitgezet tegen de gemiddelde bodemhoogte. De gebruikte software voor de berekening van de lineaire trends voor de DdH-data rondt de getallen af op hele centimeters. In toekomstige berekeningen zal deze afronding aangepast worden, zodat net als bij de analyse van de vaklodingen kan worden afgerond op millimeters. In figuren waarin zowel de Rijkswaterstaat- als de DdH-data getoond worden, zijn de vaklodingen geconverteerd van m NAP naar m LAT.

3.2 Resultaten

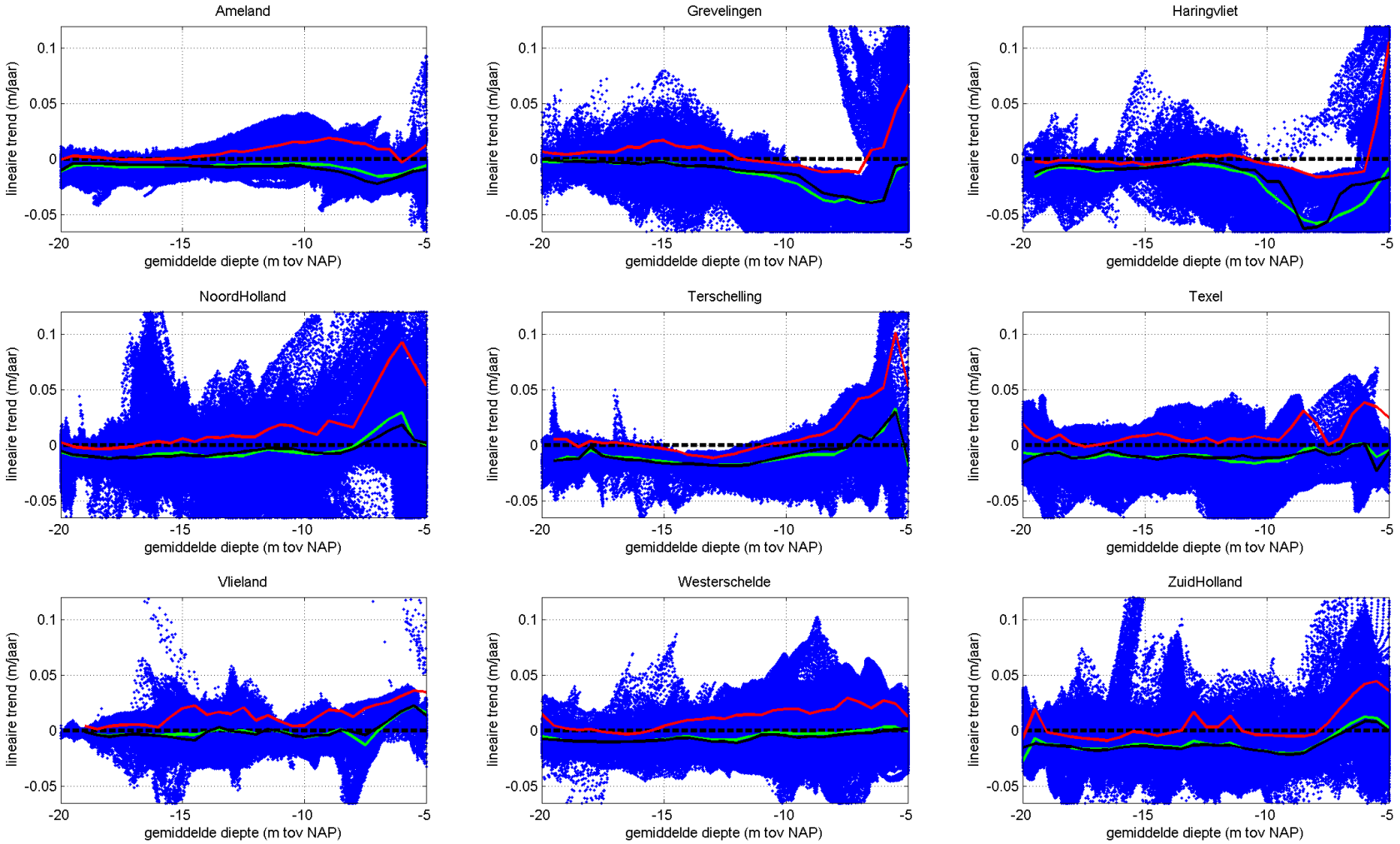
3.2.1 Vaklodingen

Figuur 3.2 laat de lineaire verticale trend zien voor de vaklodingsgebieden (Figuur 3.1). De grootste variatie tussen de deelgebieden is te vinden in relatief ondiep water. Voor water dieper dan 10 m lijken de trends sterk op elkaar en zijn deze alle licht negatief (erosie). In ondieper water is een onderscheid te maken tussen deelgebieden met een negatieve trend (Ameland, Grevelingen, Haringvliet), een positieve trend (Noord-Holland, Terschelling, Vlieland, Zuid-Holland) en netto weinig verandering (Texel, Westerschelde). Figuur 3.3 toont de maximale range in bodemhoogte per pixel. Deze range is een indicatie voor de dynamiek in de verschillende gebieden. In vrijwel alle gebieden neemt de range sterk af tussen -5 en -10 m NAP. In dieper water is de range veelal constant.

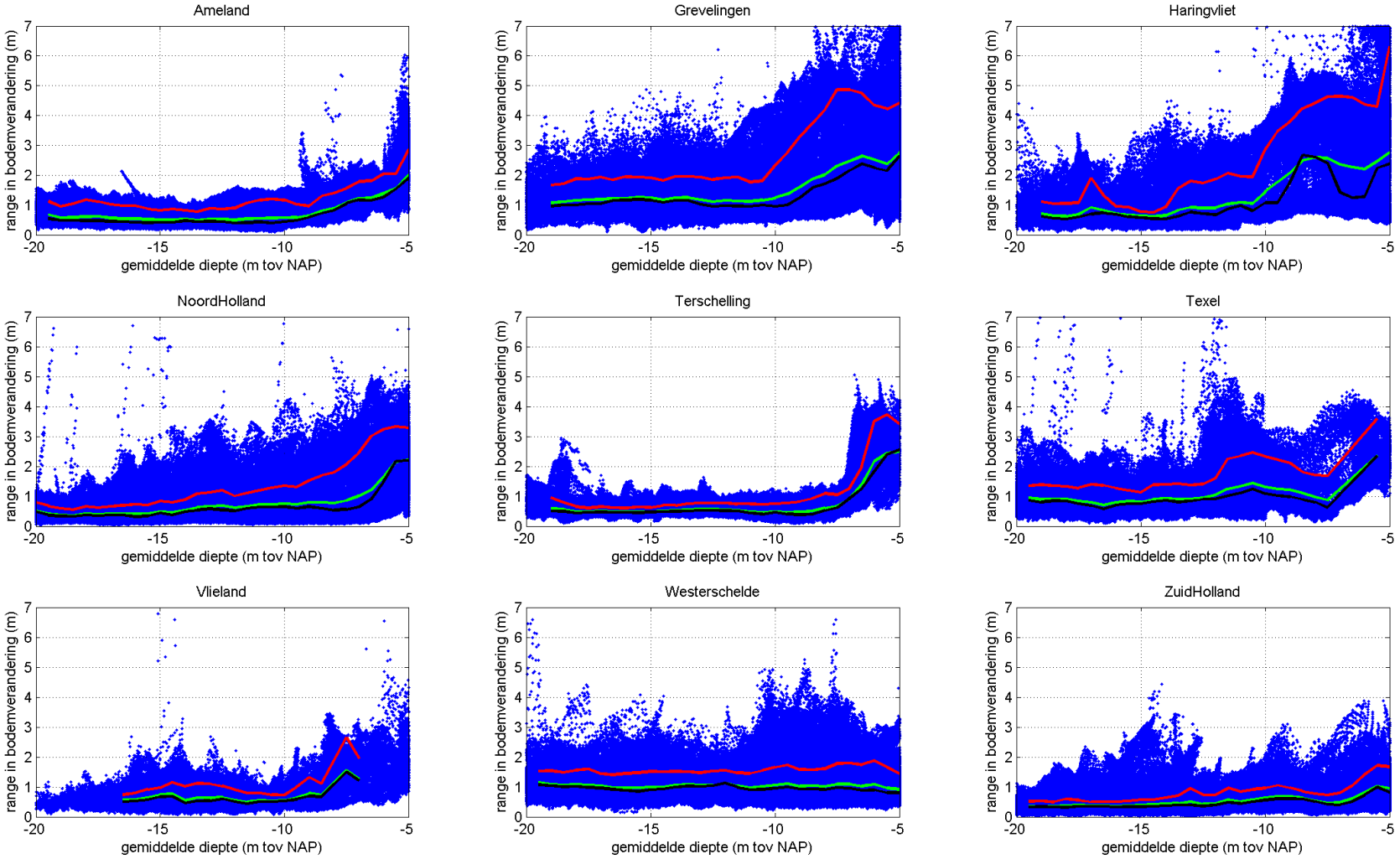
3.2.2 Gecombineerde datasets voor Zuid-Holland

Figuur 3.4 geeft de lineaire trend weer voor de gecombineerde Rijkswaterstaat- en DdH-data. Wat direct opvalt is dat de lineaire trends van beide datasets nagenoeg naadloos op elkaar aansluiten: in beide datasets is de lineaire trend licht negatief beneden de -10 m NAP, een indicatie voor bescheiden erosie. Daarnaast valt op dat de spreiding in de lineaire trend veel groter is in de DdH-data dan in de vaklodingen. Figuur 3.5 laat de range in bodemhoogte zien voor beide datasets. Hetzelfde patroon als voor de lineaire trend is zichtbaar: de gemiddelde ranges sluiten goed op elkaar aan, maar de spreiding in de DdH-data is veel groter. De

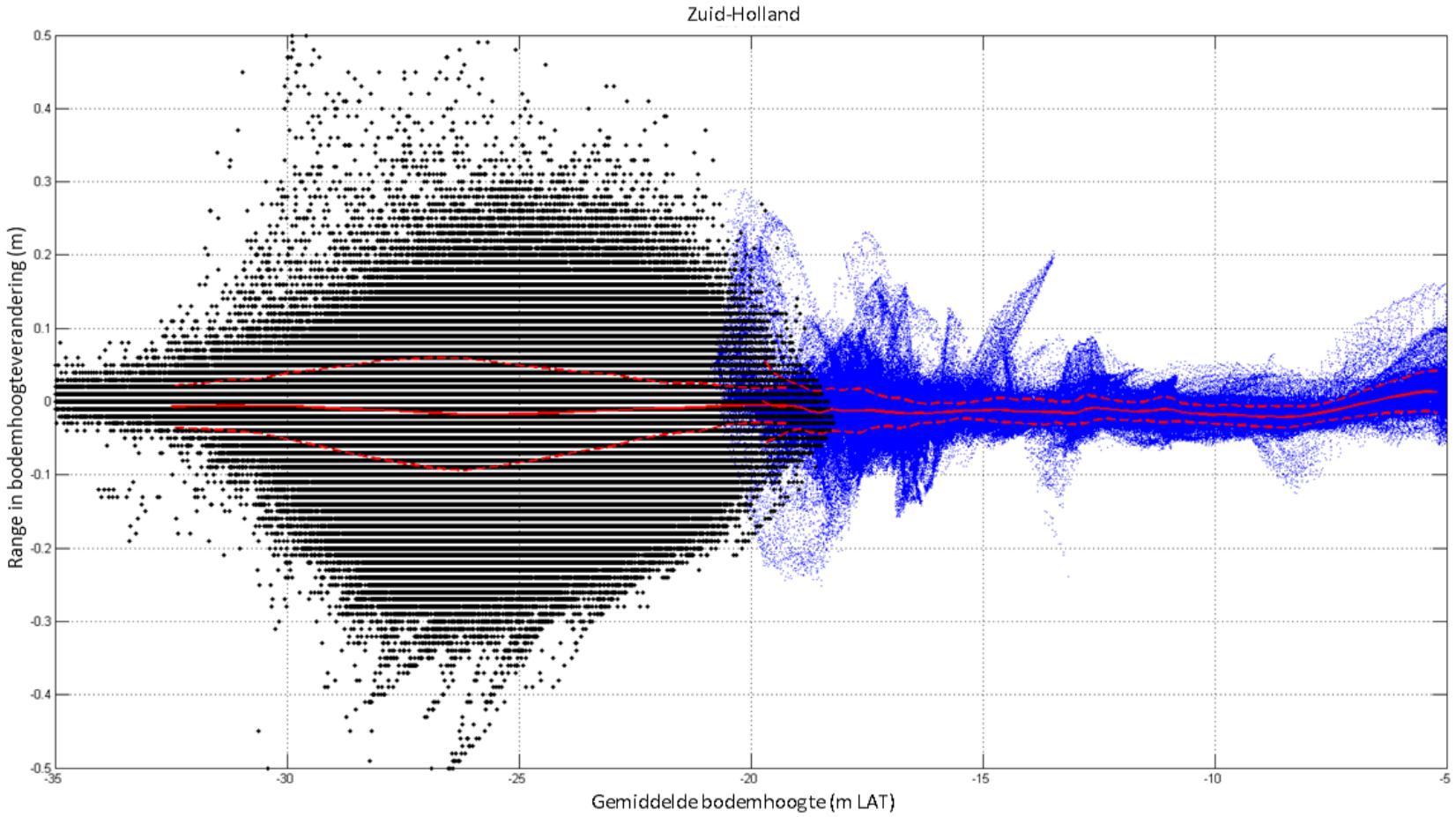
gemiddelde range in DdH-data neemt toe tot dieptes van ongeveer -27 m LAT en wordt daarna weer kleiner.



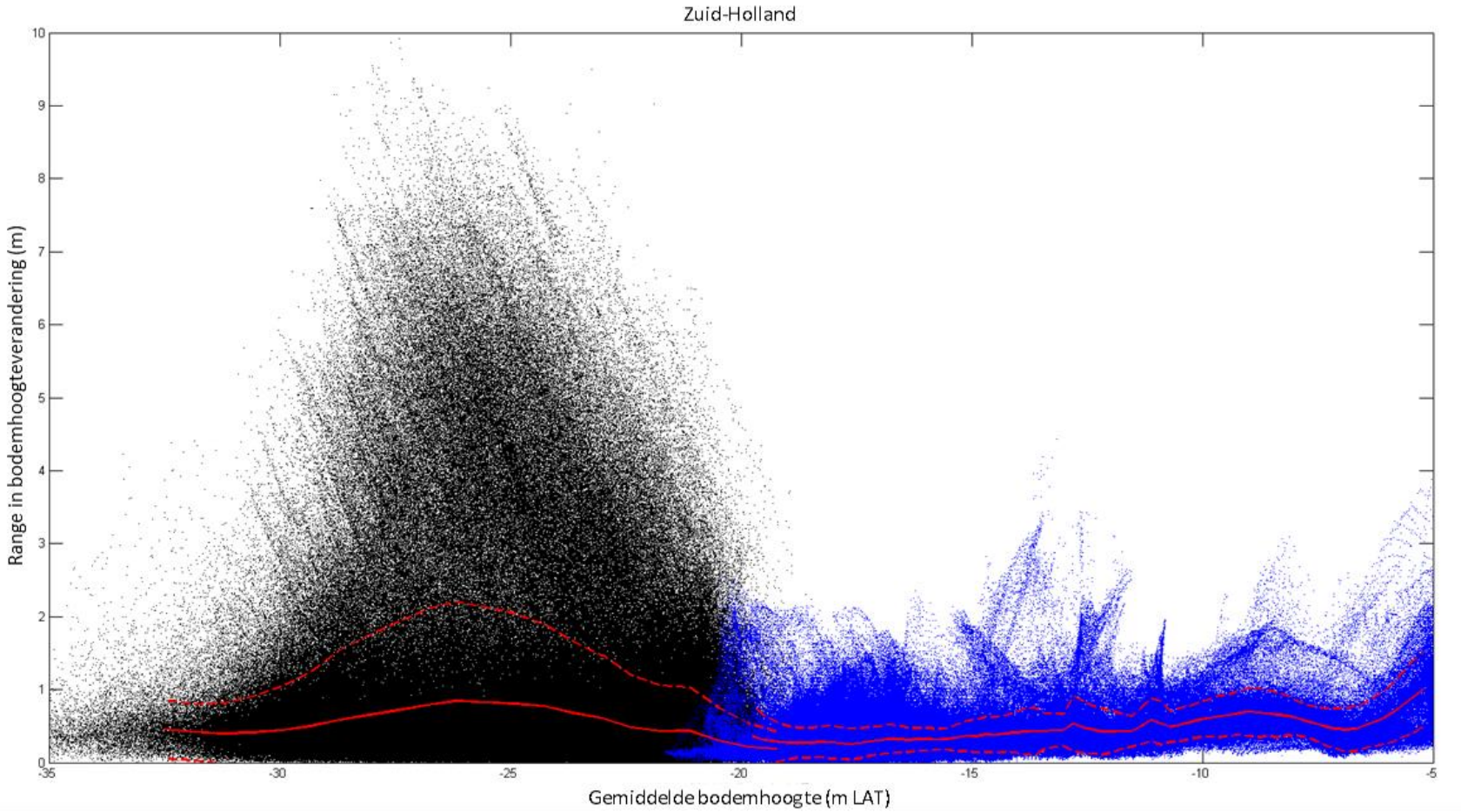
Figuur 3.2 De lineaire trend in meters per jaar voor de geanalyseerde vaklodingsgebieden. In de meeste gevallen neemt de lineaire trend sterk af voor water dieper dan -7 à -10 m NAP, tot een licht negatieve trend. Groene lijn: gemiddelde waarde; zwarte doorgetrokken lijn: mediane waarde; rode lijn: het 90ste percentiel.



Figuur 3.3 De maximale range in bodemhoogteverandering voor de vaklodingsgebieden. Voor water dieper dan 10 m schommelt de range rond de 0,5-1 m. Naar ondieper water neemt de range in de meeste gevallen toe tot 1-2 m. Groene lijn: gemiddelde waarde; zwarte doorgetrokken lijn: mediane waarde; rode lijn: het 90ste percentiel.



Figuur 3.4 De lineaire trend in bodemhoogte voor het gecombineerde vaklodingen- (blauwe stippen) en DdH-waarnemingen (zwarte stippen) voor de kust van Zuid-Holland. De rode doorgetrokken lijnen tonen apart voor elke dataset het gemiddelde. Rond de -20 m LAT dieptelijn sluiten deze lijnengoed op elkaar aan. De rode gestreepte lijnen geven de standaarddeviatie rond het gemiddeld weer. Deze is voor de DdH dataset veel groter, omdat een aantal singlebeam bestanden een grote afwijking van het gemiddelde heeft. Deze afwijking is naar verwachting onnatuurlijk van aard en kan in een vervolgstap worden genegeerd door de betreffende bestanden te verwijderen. Hetzelfde geldt voor de getoonde DdH data in Figuur 3.5. De vaklodingen data zijn voor dit figuur geconverteerd naar LAT.



Figuur 3.5 De maximale range in bodemhoogteverandering voor het gecombineerde vaklodingen- (blauwe stippen) en DdH-waarnemingen (zwarte stippen) voor de kust van Zuid-Holland. De rode doorgetrokken lijnen tonen apart voor elke dataset het gemiddelde. Ook hier sluiten de beide datasets goed op elkaar aan. De rode gestreepte lijnen geven de standaarddeviatie rond het gemiddeld weer. De toename in range rond de -25 à 26 m LAT dieptelijn kan natuurlijk zijn, maar wordt wellicht deels veroorzaakt door singlebeam data van slechtere kwaliteit. Dit zou in een vervolgstap verder onderzocht kunnen worden. De vaklodingen data zijn voor dit figuur geconverteerd naar LAT.

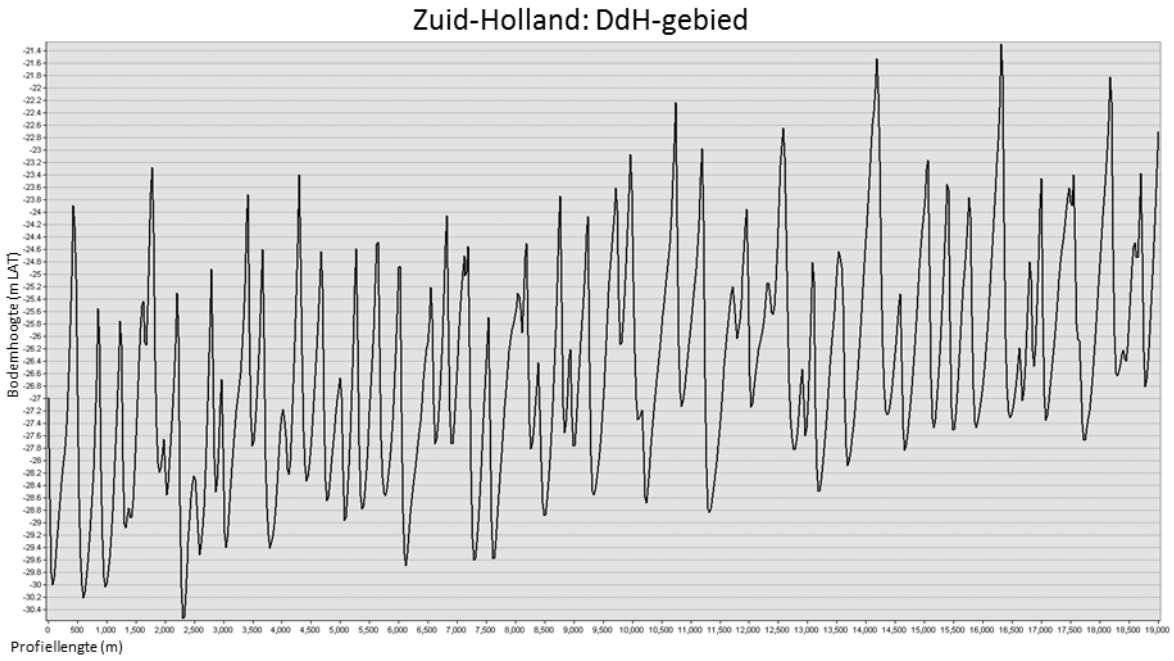
3.3 Interpretatie

3.3.1 Vaklodingen

De lineaire trends per pixel laten zien dat voor sommige pixels de trend in bodemhoogte negatief is en voor sommige pixels positief. Dit reflecteert het migreren van bodemvormen, met bodemverlaging vertegenwoordigt in sommige pixels en bodemverhoging in andere. Een opvallend verschijnsel is de structureel negatieve trend in water dieper dan ongeveer 10 m. Een deel van de negatieve trend, die vaak kleiner dan 10 mm/jaar is, kan verklaard worden door relatieve zeespiegelstijging. Voor de Nederlandse kust is deze de laatste decennia ongeveer 1,5 à 2,5 mm/jaar geweest (De Ronde et al., 2014). Het effect van zeespiegelstijging is voor alle datasets vergelijkbaar en dit past dus goed bij een structurele negatieve trend. Zeespiegelstijging verklaart echter maar ongeveer 25% van de gemiddelde bodemverandering. Daarnaast worden de vaklodingen ingemeten ten opzichte van NAP, waardoor zeespiegelstijging geen directe invloed heeft op de gemeten bodemhoogte. De verklaring voor de overige 75% zal gezocht moeten worden in lokale processen en de onzekerheid rondom de trend. Ook veranderingen in data-inwinning door de tijd heen of andere data-gelieerde aspecten (software, rekenregels) kunnen een rol spelen. De bijdrage van lokaal veroorzaakte erosie en sedimentatie zijn op basis van deze eerste analyse niet uit de data af te leiden.

In ondieper water zijn de verschillen in lineaire trend tussen de gebieden veel groter. In ondiep water is de bodemdynamiek nog veel groter en dominanter t.o.v. van bijvoorbeeld de uniforme zeespiegelstijging, en daarnaast hebben menselijke ingrepen, zoals bijvoorbeeld suppleties en de Deltawerken, grote invloed gehad. Om de verschillende patronen binnen en tussen de gebieden te verklaren, is het noodzakelijk om in detail te kijken naar wat er in de verschillende gebieden is gebeurd in de laatste decennia. Dit is voor de huidige studie niet gedaan.

De range in bodemhoogte per pixel laat voor alle gebieden hetzelfde patroon zien, namelijk een toename van de range in landwaartse richting. In dieper water heersen relatief gelijkmatige condities en is het stromingsregime relatief constant. De bodemvormen hebben zich hieraan aangepast en de range in bodemhoogte weerspiegelt in hoofdlijnen de hoogte van de bodemvormen. In de geselecteerde vaklodingsgebieden zijn de bodemvormen gemiddeld 0,5-1 m hoog. Hierbij moet niet vergeten worden dat het vlakdekkende vaklodingengrid gebaseerd is op een interpolatie tussen raaien die 1 km uit elkaar staan. Voor pixels die enkele honderden meters van deze raaien liggen, is de betrouwbaarheid van de berekende range dus zeer beperkt. Desalniettemin blijkt uit multibeamdata van de DhH in het vaklodingengebied van Zuid-Holland dat de bodemvormen inderdaad een gemiddelde hoogte van 0,5-1 m hebben. In de ondiepere delen zijn de wind- en/of getijgedreven stromingen veel sterker. Daardoor is in ondieper water de schuifspanning aan de bodem groter dan in dieper water, en vindt er dus relatief meer sedimenttransport plaats. De range in bodemhoogte in ondieper water ligt tussen de 1-3 m, met uitschieters tot meer dan 7 m. Aangezien de vorm van de gebieden zo is gekozen dat grote getijdengeulen niet meegenomen zijn, zal de range vooral bepaald worden door verplaatsingen van zandbanken en muien. De grootste verplaatsingen mogen verwacht worden tijdens krachtige stormen. Het effect hiervan wordt gedempt meegenomen in de vaklodingendata, aangezien er in de meeste gevallen een aanzienlijke tijdsperiode zal zitten tussen de opname en de storm. Een door de storm ontstaan kustdwars profiel zal in de tussenliggende tijd al weer meer op het mooiweerprofiel zijn gaan lijken.



Figuur 3.6 Bodemhoogteprofiel langs een willekeurig transect in gebied Zuid-Holland DdH (zie Figuur 2.19 voor de ligging van het gebied). De waargenomen morfologie weerspiegelt zandgolven van ongeveer 5 m hoog.

3.3.2 Gecombineerde datasets voor Zuid-Holland

De licht negatieve lineaire trend is ook zichtbaar in de DdH-data voor Zuid-Holland. Dit lijkt te duiden op een sturend mechanisme dat over grote gebieden en onafhankelijk van de bodemhoogte invloed uitoefent. De gemiddelde range in bodemhoogten in de DdH-data is vergelijkbaar met die in de vaklodingendata en schommelt rond de 0,5-0,75 m. Er is wel veel meer spreiding binnen de DdH-data, en de ranges kunnen in sommige gevallen oplopen tot meer dan 8 m. Figuur 3.6 laat zien dat de bodemvormen in gebied Zuid-Holland inderdaad hoogtes hebben van meerdere meters en veelal van 5 m. Het relatief lage gemiddelde in het gebied zal veroorzaakt worden door de relatief langzame verplaatsing van de bodemvormen waardoor een willekeurige grootschalige bodemvorm niet volledig voorbij alle pixels gemigreerd zal zijn gedurende de periode van monitoring. Naarmate de tijdspanne die de dataset bestrijkt toeneemt, zal het gemiddelde van de range zal stijgen. Een vergelijk met de vaklodingendata laat verder zien dat de hoogte van de bodemvormen toeneemt met de waterdiepte.

3.4 Discussie en implicaties

Bovenstaande analyse van de morfodynamiek op basis van de gecombineerde datasets van Rijkswaterstaat en de DdH heeft nog niet eerder plaatsgevonden. De datasets zijn complementair en sluiten goed op elkaar aan, waardoor de analyse verhelderende inzichten geeft. Zo lijkt duidelijk, op basis van alleen de vaklodingen, dat langs de Nederlandse kust vanaf bodemhoogtes dieper dan circa -10 m NAP geen veranderingen optreden in de netto bodemhoogteveranderingen. Met andere woorden, vanaf die diepte wordt de netto bodemverandering constant (licht negatief). Eenzelfde beeld komt uit de uitgevoerde *pilot* voor de Zuid-Hollandse kust waarbij beide datasets gekoppeld zijn. De analyse kan uitstekend gebruikt worden om een discussie te starten over de diepte van het kustfundament. Een belangrijk discussiepunt hierbij is of de overgang naar een constante netto bodemhoogteverandering gezien kan worden als de *closure depth* en dus of de *closure depth* op -10 m NAP gelegd kan worden. De gevonden trend is tenslotte licht negatief en dus

kan er feitelijk niet gesteld worden dat er geen netto kustdwars transport plaatsvindt beneden de -10 m NAP. Structurele erosie van meerdere mm/jaar zou betekenen dat er enorme hoeveelheden zand verplaatst worden naar dieper óf naar ondieper water. De onzekerheid rondom de trendlijn speelt hierbij natuurlijk een belangrijke rol en deze zal in een geplande vervolgstudie berekend worden.

Los van deze discussie over de *closure depth*, kan wel gesteld worden dat uit deze eerste *pilot* de -20 m NAP dieptelijn niet als een dieptelijn naar voren komt waarlangs een trendbreuk in morfodynamiek te zien is. De trendbreuk ligt duidelijk een stuk hoger, rond -10 m NAP, en indien de basis van het kustfundament bepaald zou worden door de dynamiek van de diepe vooroever, lijkt er aan de hand van deze *pilot* geen direct bezwaar te zijn om de basis van het kustfundament hoger te leggen. Echter, deze analyse beslaat een tijdserie van 20-40 jaar, terwijl de basis van het kustfundament gebaseerd is op de veronderstelde *closure depth* voor een langere termijn van 50-200 jaar. Aangezien de *closure depth* afhankelijk is van de significante golfhoogte, neemt de *closure depth* in het algemeen toe bij een vergroting van de tijdschaal. Voor grotere tijdschalen wordt de kans dat een extreem hoge significante golfhoogte optreedt namelijk groter. Het verleggen van de basislijn zou verstrekkende gevolgen kunnen hebben voor het suppletiebeleid, aangezien er dan jaarlijks minder gesuppleerd hoeft te worden ter compensatie van de zeespiegelstijging. Ook voor het winnen van zand op de Noordzee zou het gevolgen kunnen hebben, omdat er in dat geval dichter bij de kust gewonnen kan worden. Uiteraard moeten verschillende veiligheidsafwegingen hierbij ook een rol spelen. Gezien de belangen is het sterk aan te bevelen de uitgevoerde *pilot*-studie uit te breiden tot een bredere en meer omvangrijke studie, waarbij ook de praktische gevolgen en gevaren van het aanpassen van de basis van het kustfundament tegen het licht worden gehouden.

3.5 Conclusies

Deze *pilot*-studie laat zien dat langs de Nederlandse kust beneden de -10 m NAP de netto bodemhoogteveranderingen constant (licht negatief) worden voor een tijdschaal van 20-40 jaar. Dit zou betekenen dat jaarlijks veel sediment richting dieper óf ondieper water getransporteerd wordt. De betrouwbaarheid van de gevonden trend is echter nog niet goed bekend en wordt in een vervolgstudie nader beschouwd. De analyse laat ook zien dat voor deze tijdschaal op basis van de dynamiek van de vooroever de -20 m NAP dieptelijn als basis van het kustfundament niet onderbouwd kan worden. Indien de basis van het kustfundament bepaald zou worden door de dynamiek van de diepe vooroever, lijkt er aan de hand van deze *pilot* geen direct bezwaar te zijn om de basis van het kustfundament hoger te leggen. Dit zou verstrekkende gevolgen hebben voor het suppletie- en zandwinbeleid: er hoeft dan minder gesuppleerd te worden en er kan dichter bij de kust zand gewonnen worden. Om hierover een gefundeerde beslissing te nemen is het noodzakelijk de huidige *pilot*-studie uit te breiden naar een volledige studie, waarbij, naast een gedetailleerde analyse van de bodemhoogteveranderingen, ook de gevolgen en gevaren van een landswaartse verschuiving van de basis van het kustfundament worden meegenomen. Er moet bijvoorbeeld onderzocht worden of een landwaartse verschuiving van het kustfundament en een aanpassing van het suppletiebeleid niet leidt tot een versteiling van het kustprofiel. Daarnaast moet beschouwd worden hoe de resultaten van deze *pilot,* die geldig zijn voor een tijdschaal van 20-40 jaar, zich verhouden tot de tijdschaal van 50-200 jaar waarover het kustfundament stabiel moet zijn. Verder is het nuttig om per kustdwarse strook te kijken of de licht negatieve trend voor dieper water qua volume wordt gecompenseerd door de positieve trend in het kustnabije bereik. Met andere woorden: is er sprake van herverdeling binnen de zogenaamde '*coastal tract*' (Cowell et al., 2003).

4 Samenvatting en vooruitkijk 2015

4.1.1 Effect van baggeren op de bodemdynamiek in de Maasgeul (onderzoeksvragen 1 en 2)

De methode voor kwantificatie van de verticale bodemdynamiek is noodzakelijkerwijs uitgebreid naar een methode die toepasbaar is in gebaggerde gebieden. Hiermee worden baggeringrepen geautomatiseerd geïdentificeerd en wordt de verticale bodemdynamiek berekend tussen de baggeringrepen voor ieder gridpunt (1x1m) in de Maasgeul. Uit dit nieuwe onderzoek blijkt dat gemiddelde trends berekend op basis van de gehele tijdreeks in de uitgangsmethode de bodemdynamiek inderdaad onderschatten. De bodemverandering tussen baggermomenten is aanzienlijk groter dan voorheen is bepaald en gaat het snelst in de eerste twee maanden na een baggeringreep (het “hersteleffect”).

Aanzanding is het sterkst aan de zuidrand van de Maasgeul, gevoed door de snelste aanvoer van sediment in het noordwaartse getij. Sinds de aanleg van de Tweede Maasvlakte is het gebied van maximale aanzanding verschoven van km-vak 1 naar de meer zeewaartse km-vakken 2 en 3.

4.1.2 Advies Monitoringstrategie (onderzoeksvraag 3)

De uitbreiding van de methode voor de kwantificatie van de bodemdynamiek in gebaggerde gebieden is een belangrijke bouwsteen voor het optimaliseren van opnemingsbeleidsplannen in o.a. de Maasgeul. De vervolgstappen die noodzakelijk zijn om dergelijke plannen te finaliseren en implementeren zijn (1) het voorspellen van toekomstige waterdieptes op basis van de berekende bodemdynamiek en (2) het ontwikkelen van een stochastisch model om vast te stellen wanneer de voorspelde waterdieptes door sedimentatie niet meer zullen voldoen aan de vereiste waterdiepte in de Maasgeul. Om de monitoringstrategie risico-gestuurd te maken naar de wens van Rijkswaterstaat, zullen deze factoren in het in de *Roadmap* genoemde ‘morfologisch model’ moeten worden opgenomen en zal het morfologisch model aan een scheepvaartrisico-model moeten worden gekoppeld.

4.1.3 Advies Baggerstrategie (onderzoeksvraag 3)

De in dit rapport beschreven relatie tussen de dieptetoename veroorzaakt door de baggeringreep en berekende trends van de verticale bodemdynamiek (sedimentatie) bevestigt de hypothese van “het hersteleffect”: een periode van versnelde sedimentatie direct na een baggeringreep. Voor ieder van de 6 kilometervakken in de Maasgeul is de bevinding dat de eerste twee maanden een significant hogere aggradatie laat zien. De relatie tussen de diepte van een baggeringreep en “de hersteltijd” (de periode na een baggeringreep tot het overschrijden van de bodemhoogte van vóór de ingreep) geeft mogelijk een maat voor de efficiëntie van de baggeringrepen in de Maasgeul: hieruit zou volgen dat een ondiepere baggeringreep efficiënter is dan een diepere baggeringreep.

Alvorens dergelijke bevindingen te kunnen implementeren in een baggerstrategie, zal eerst de ruimtelijke variatie van hersteltijden moeten worden onderzocht in gebieden gekenmerkt door hoge en lage sedimentatiesnelheden.

4.1.4 Koppeling Kust en Zee (onderzoeksvraag 4)

Tot nu toe werden de kustnabije morfologie en de zeewaarts daarvan gelegen offshore morfologie meestal nog in aparte onderzoeken gemonitord en geanalyseerd, met uitzondering van het dynamiekproject ValHYD in 2011. In het huidige KPP-project zijn de Noordzeedata en de kustdata – ondanks een aparte initiële analyse – voor het eerst gecombineerd in de interpretatie van kustdwarse morfo- en sedimentdynamiek. De datasets blijken complementair te zijn en sluiten goed op elkaar aan. De *pilot* koppelt voor het eerst de

KPP-projecten “B&O Kust” en “Bodemdynamiek”, welke laatste een onderdeel is van KPP Efficiënte Monitoring.
Uit de analyse blijkt dat langs de Nederlandse kust beneden de -10 m NAP de netto bodemhoogteveranderingen constant (licht negatief) worden voor een tijdschaal van 20-40 jaar. De analyse laat ook zien dat voor deze tijdschaal op basis van de dynamiek van de vooroever de -20 m NAP dieptelijn als basis van het kustfundament niet onderbouwd kan worden. Indien de basis van het kustfundament bepaald zou worden door de dynamiek van de diepe vooroever, lijkt er aan de hand van deze *pilot* geen direct bezwaar te zijn om de basis van het kustfundament hoger te leggen. Dit zou verstrekkende gevolgen hebben voor het suppletie- en zandwinbeleid: er hoeft dan minder gesuppleerd te worden en er kan dichter bij de kust zand gewonnen worden. Om hierover een gefundeerde beslissing te nemen is het noodzakelijk de huidige *pilot*-studie uit te breiden naar een volledige studie, waarbij ook de gevolgen en gevaren van een landswaartse verschuiving van de basis van het kustfundament worden meegenomen. Daarnaast moet beschouwd worden hoe de resultaten van deze *pilot,* die geldig zijn voor een tijdschaal van 20-40 jaar, zich verhouden tot de tijdschaal van 50-200 jaar waarover het kustfundament stabiel moet zijn.

4.1.5 2015

De KPP *requirements* voor 2015 zijn gericht op de hieronder beschreven onderdelen in de *Roadmap*, die is opgesteld tijdens een gezamenlijke workshop in maart 2014 om te komen tot implementatie van efficiënte strategieën voor de monitoring van bodemhoogte. Ten eerste zal er ondersteuning zijn vanuit Deltares bij risico- en stakeholderinventarisaties en kosten-batenanalyse van Rijkswaterstaat. Voor het onderdeel ‘Toegepast onderzoek bodemdynamiek’ zijn de belangrijkste stappen voor monitoring- en baggerstrategieën in de Maasgeul de voorspelling van waterdieptes en de bepaling van overschrijdingstijden van minimaal vereiste dieptes.
Een prominente component in de risico-gestuurde aanpak is het meenemen van omgevingscondities (factoren in het morfologisch model), dat deels in het SMARTSEA project valt en deels in KPP Bodemdynamiek zou moeten worden opgenomen. Bijvoorbeeld, wat is het effect van stormen op verschillende waterdiepten, van offshore tot aan de kust?
De koppeling van de morfodynamiek in volmariene en kustnabije gebieden zoals beschreven in dit rapport is waardevol gebleken. In de *requirements* van zowel KPP Bodemdynamiek als KPP B&O Kust zal in 2015 de analyse van mariene en kustmorfologie worden opgenomen om meer inzicht te verkrijgen in de dynamiek van de diepe vooroever.

Soortgelijke plannen voor een koppeling van KPP Bodemdynamiek met KPP Rivieren worden besproken tussen de projectleider Rivieren van Deltares en de *counterpart* van Rijkswaterstaat. Het raakvlak tussen KPP Bodemdynamiek en KPP Rivieren is het KPP Rivieren-onderdeel ‘duurzame vaardiepte’, waarin vanuit KPP Rivieren gekeken wordt naar de interactie tussen stroming en schepen en het op diepte houden van de bodem. De utibreiding van kennis van bodemdynamiek in relatie tot variaties in rivierafvoer kan hieraan een waardevolle bijdrage leveren. De kennis van oorzakelijke factoren voor bodemdynamiek en vaardiepte die in deze synergie zal worden opgedaan, zal o.a. ten goede komen aan Rijkswaterstaatprojecten zoals ‘Langsdammer Waal’ en ‘Suppletie Boven-Rijn’.

Referenties

Bruun, P. (1962). Sea-level rise as a cause of storm erosion. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Waterways and Harbors Division 88 (WW1), 117-130.

Cowell, P.J., M.J.F. Stive, A.W. Niederoda, D.J.P. Swift, H.J. De Vriend, M.C. Buijsman, R.J. Nicholls, P.S. Roy, G.M. Kaminsky, J. Cleveringa, C.W. Reed & P.L. De Boer (2003). The coastal-tract (part 2): Applications of aggregated modelling of lower-order coastal change. Journal of Coastal Research 19 (4), 828-848.

De Ronde, J.G., F. Baart, C.A. Katsman & V. Vuik (2014), Zeespiegelmonitor. Rapport 1208712-000-ZKS-0010. Deltares, pp.

Hallermeier, R.J., 1983. Sand Transport Limits in Coastal Structure Design, Coastal Structures '83, American Society of Civil Engineers: 703-716.

Hijma, M.P. & T. Vermaas (2013), Sedimentbudget van de Maasgeul, Noordzee - Baggeren en sedimentatie. Rapport 1207730-002. Deltares, Utrecht, Nederland: 40 pp.

Hinton, C.L. & R.J. Nicholls (2007). Shoreface morphodynamics along the Holland Coast. Geological Society, London, Special Publications 274, 93-101.

Koomans, R.L. (2000), Sand in motion. Effects of density and grain size. Ph.D.-thesis, Groningen University: 220 pp.

Naqshband, S., J.S. Ribberink, D. Hurther & S.J.M.H. Hulscher (2014). Bed load and suspended load contributions to migrating sand dunes in equilibrium. Journal of Geophysical Research: Earth Surface 119, 1043-1063.

Roelvink, J.A. & S.G.J. Aarninkhof (2007), Onderbouwend onderzoek MER Maasvlakte-2. Onderdeel Morfologie. Update van oktober 2005. Rapport Z3959. WL Delft, Nederland, 101 pp.

Van Dijk, T.A.G.P. & M.G. Kleinhans (2005). Processes controlling the dynamics of compound sand waves in the North Sea, Netherlands. Journal of Geophysical Research 110 (F04S10),

Van Dijk, T.A.G.P., R.C. Lindenbergh & P.J.P. Egberts (2008). Separating bathymetric data representing multi-scale rhythmic bedforms: a geostatistical and spectral method compared. Journal of Geophysical Research 113 (F04017),

Van Dijk, T.A.G.P., C. Van der Tak, W.P. De Boer, M.H.P. Kleuskens, P.J. Doornenbal, R.P. Noorlandt & V.C. Marges (2011), The scientific validation of the hydrographic survey policy of the Netherlands Hydrographic Office, Royal Netherlands Navy. Rapport 1201907-000-BGS-0008. Deltares, Utrecht, Nederland: 165 pp.

Van Dijk, T.A.G.P., C.F. Van der Mark, P.J. Doornenbal, P.J. Menninga, J.F. Keppel, D. Rodriguez Aguilera, V. Hopman & G. Erkens (2012), Onderzoek Meetstrategie en Bodemdynamiek. 1203749-000-BGS-0006. Deltares, 93 pp.

A Beschikbare bodemopnames

	Begin opname	Eind opname
1	20080128	20080128
2	20080218	20080218
3	20080306	20080306
4	20080327	20080328
5	20080422	20080423
6	20080526	20080528
7	20080630	20080701
8	20080725	20080728
9	20080818	20080819
10	20080910	20080910
11	20081008	20081009
12	20081104	20081104
13	20081201	20081202
14	20090106	20090107
15	20090202	20090203
16	20090303	20090304
17	20090330	20090331
18	20090423	20090424
19	20090528	20090528
20	20090623	20090624
21	20090721	20090721
22	20090818	20090818
23	20090917	20090917
24	20091013	20091014
25	20091109	20091112
26	20091208	20091208
27	20100106	20100106
28	20100203	20100203
29	20100303	20100304
30	20100407	20100407
31	20100506	20100507
32	20100531	20100601
33	20100707	20100707
34	20100802	20100803
35	20100906	20100906
36	20101004	20101005
37	20101101	20101102

38	20101208	20101208
39	20110105	20110106
40	20110201	20110201
41	20110328	20110401
42	20110404	20110405
43	20110503	20110504
44	20110530	20110530
45	20110704	20110705
46	20110801	20110802
47	20110914	20110915
48	20111003	20111004
49	20111102	20111102
50	20111212	20111212
51	20120119	20120119
52	20120201	20120201
53	20120327	20120328
54	20120404	20120405
55	20120501	20120502
56	20120604	20120605
57	20120703	20120704
58	20120730	20120731
59	20120904	20120905
60	20121003	20121004
61	20121129	20121130
62	20121203	20121205
63	20130108	20130109
64	20130211	20130212
65	20130304	20130305
66	20130403	20130404
67	20130501	20130502
68	20130604	20130605
69	20130808	20130808
70	20130903	20130904
71	20131003	20131003
72	20131107	20131108
73	20131204	20131204