

Onderzoek Meetstrategie en Bodemdynamiek

RWS zaaknummer 3153628

Deltares projectnummer 1203749

dr. T.A.G.P. van Dijk
dr. ir. C.F. van der Mark
drs. P.J. Doornenbal
P.J. Menninga, B.Sc.
ing. J.F. Keppel
dr. D. Rodriguez Aguilera
drs. V. Hopman
dr. G. Erkens

1203749-000

Titel

Onderzoek Meetstrategie en Bodemdynamiek
RWS zaaknummer 3153628
Deltares projectnummer 1203749

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat Waterdienst

Project

1203749-000

Kenmerk





1203749-000-BGS-0006

Pagina's

92

Trefwoorden

Bodemligging, morfodynamiek, zandgolven, baggeren, aanvaargebieden Rotterdam en IJmuiden, Waal

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
dec. 2011		dr. T.A.G.P. van Dijk		dr. A.J.F. van der Spek		dr. R.M. Hoogendoorn	
		dr. ir. C.F. van der Mark					
		drs. P.J. Doornenbal					
		P.J. Menninga, B.Sc.					
		ing. J.F. Keppel					
		dr. D. Rodriguez Aguilera					
		drs. V. Hopman					
		dr. G. Erkens					

Status

definitief

Titel

Onderzoek Meetstrategie en Bodemdynamiek
RWS zaaknummer 3153628
Deltares projectnummer 1203749

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Waterdienst	1203749-000	1203749-000-BGS-0006	92

Samenvatting (NL)

Voor veilige scheepvaart in gebieden met kritieke waterdiepten, zoals de aanvaargebieden in de Nederlandse Noordzee, is kennis over bodemdynamiek van belang. Hoe hoger de bodemdynamiek, des te vaker zal moeten worden gemonitord of de diepten nog op peil zijn. Uit de kwantificatie van de verticaal-dynamische trend van de Noordzeebodem volgt dat zandgolfmigratie de belangrijkste factor is in de verticale dynamiek. Migratiesnelheden bij Rotterdam zijn lager dan bij IJmuiden. Eerste resultaten van een PCA regressie geven een voorlopige verklaring van de verschillen in dynamiek, maar de verschillen binnen gebieden zijn te klein om deze analyse met zekerheid te kunnen interpreteren.

In de Noordzeegebieden waar gebaggerd wordt, is de algehele trend analyse niet nuttig. Hier zou het opsplitsen van de tijdseries moeten worden toegepast om de herstellend na een baggeringreep te kwantificeren.

Voor de Waal is gebleken dat de methode van de algeheel dynamische trend uit halfjaarlijkse peilingen wel tot een interessante kaart leidt, waarin wellicht lange-termijn dynamiek kan worden herkend, maar voor de analyse van hoog-dynamische rivierduinen zijn de halfjaarlijkse peiling niet frequent genoeg. De twee-wekelijkse metingen zijn hiervoor het meest interessant, maar zullen nog moeten worden geanalyseerd in detail.

Aanbevelingen voor verder onderzoek in het vervolg traject (KPP) worden voorgesteld.

Summary (ENG)

For shipping safety in areas of critical water depths, such as the approach routes to Rotterdam and IJmuiden in the Dutch North Sea, knowledge of seabed dynamics is crucial. The more dynamic the area is, the more often the bed will need to be surveyed to check whether water depths are still guaranteed. The quantification of vertical-dynamic trends of the sea bed showed that sand wave migration is the most important factor in offshore vertical seabed dynamics. Migration rates of sand waves are lower at Rotterdam than at IJmuiden. The initial results of a PCA regression provide a preliminary explanation of the spatial variation in dynamics, but the differences within the two study sites are too small to interpret these results with sufficient certainty.

In the offshore areas that are being dredged, the analysis of vertical trends in bed elevation are not useful. In these areas, the time series should be separated to calculate the dynamic trends of periods of recovery after dredging in stead.

From the analyses of the river Waal, it was shown that the time series of surveys that were done twice per year give a good overview of long-term dynamics, but do not represent the high dynamics due to the migration and change in shape of river dunes. Two-weekly surveys are being done and are probably the best data to analyse the dynamics of river dunes.

Recommendations for further research in the following KPP-project are given for both the North Sea areas and the Waal.

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Achtergrond	1
1.2	Projectdoel	1
1.3	Indeling van het rapport	2
2	Beschrijving van beschikbare data	3
2.1	Lodingen en metadata	3
2.1.1	Aanvaargebieden en –geulen naar Rotterdam en IJmuiden	3
2.1.2	Bodemligging van de Waal	5
2.2	Natuurlijke omgevingsparameters	7
2.2.1	Getijstroomsnelheden Noordzee	7
2.2.2	Golfhoogte van oppervlaktegolven en zandtransport Noordzee	8
2.2.3	Debietgegevens Waal	9
2.2.4	Korrelgroottegegevens	10
2.3	Baggergegevens	12
3	Beschrijving van gebruikte methoden	13
3.1	Digitale Terreinmodellen	13
3.2	Analyse verticale bodemdynamiek	15
3.3	Detailanalyses morfodynamiek van individuele bodemvormen	16
3.4	Onderzoek naar bepalende factoren	18
3.4.1	Het berekenen van de variabelen in de factorenanalyse	19
3.4.2	Principal Component Analyse en Regressie	20
4	Morfologie, bodemdynamiek en factoren van de Noordzeegebieden	21
4.1	Morfologie	21
4.2	Verticale bodemdynamiek	24
4.3	Morfodynamiek van bodemvormen (zandgolven)	27
4.3.1	Zandgolfmigratie	27
4.3.2	Vormverandering (asymmetrie)	28
4.4	Onderzoek naar factoren in de Noordzeegebieden	29
4.4.1	Natuurlijke omgevingsparameters	29
4.4.2	Bivariate vergelijking van parameters met zandgolflengte en zandgolfmigratie	31
4.4.3	Principal Component Analysis en Multivariate Regression	34
4.4.4	Baggeractiviteiten, hersteltijd en sedimentatiesnelheid	36
4.4.5	Verticale dynamiek, Goodness of Fit, positie op de zandgolf en ruimtelijke spreiding	41
5	Morfologie, bodemdynamiek en factoren van de Waal	49
5.1	Morfologie: globaal overzicht	49
5.2	Morfologie in relatie tot nautische monitoring	50
5.3	Verticale bodemdynamiek van de Waal: macro-schaal	53
5.4	Verticale temporele variatie in bodemligging en karakteristieke responstijd: meso-schaal	59

5.5	Verticale temporele variatie in bodemligging en karakteristieke responstijd: micro-schaal	60
5.6	Verkenning methoden van data-verwerking: statistisch versus individueel	62
6	Conclusies en advies meetstrategie	65
6.1	Gekwantificeerde bodemdynamiek Noordzee en rivier (vraag1)	65
6.2	Maat voor morfodynamiek (vraag 4)	66
6.3	Bepalende factoren van bodemdynamiek (vragen 2 en 3)	66
6.4	Advies meetstrategie (vraag 5)	67
6.4.1	Noordzeegebieden	67
6.4.2	Waal	68
6.5	Aanbevelingen voor verder onderzoek (KPP 2012)	70
7	Literatuur referenties	73
8	Bijlagen	77
8.1	Berekening van potentieel zandtransport aan de bodem door oppervlaktegolven (vooralsnog in het Engels)	77
8.2	Berekeningen van de 'Principal Component' Analyse en Regressie (vooralsnog in het Engels)	78
8.2.1	Principal Component Analysis	78
8.2.2	Interpretation of the principal components	80
8.2.3	Principal component regression	80
8.3	Zandgolfkam en –trog migratie Rotterdam (profiel 1)	82
8.4	Bodemligging Waal	87

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In gebieden van kritieke waterdiepte voor de scheepvaart is het van belang om een goed inzicht te hebben in de veranderlijkheid van zee- of rivierbodems. Dit geldt voor onder andere de aanvaarroutes naar de havens IJmuiden en Rotterdam en de rivieren. De veranderlijkheid van de diepteligging van een zee- of rivierbodem bepaalt hoe vaak die diepteligging gemonitord moet worden. Zowel zeebodems als rivierbodems zijn onderhevig aan een natuurlijke verandering van de bodemhoogte door omgevingsfactoren zoals stroming of golfwerking. Omdat de bodemligging in een dynamisch gebied binnen korte tijd na een meting weer kan veranderen, moeten deze gebieden vaker worden ingemeten. Anderzijds wordt er geconstateerd dat in gebieden met een hoge meetfrequentie vaak weinig bodemverandering wordt waargenomen. In deze gebieden zou de meetfrequentie omlaag kunnen, echter, een toename van de veiligheidsrisico's is niet wenselijk. Bij het bepalen van de monitoringsfrequentie speelt op dit moment bij Rijkswaterstaat (RWS) de gebiedskennis een doorslaggevende rol. Objectieve criteria op basis van een kwantitatieve analyse van de bodemdynamiek en inzicht in de bepalende factoren kunnen leiden tot een betere onderbouwing van de monitoringsstrategie. Rijkswaterstaat heeft Deltares gevraagd een onderzoek uit te voeren naar de morfodynamiek van de aanvaargebieden en de Waal.

Recent onderzoek door Deltares in opdracht van de Dienst der Hydrografie (HYD), Ministerie van Defensie, heeft geleid tot overzichtskaarten van de kwantitatieve zeebodemdynamiek en de gevaren op vastlopen voor de scheepvaart op het Nederlands Continentaal Plat (NCP) [Van Dijk et al., 2011]. Echter, dat project focuste op het NCP dieper dan 10 m en rivieren waren niet inbegrepen. Ook is de resolutie op NCP-schaal niet toereikend voor de doeleinden van de door RWS beheerde gebieden. Daarnaast waren van de meeste locaties op het NCP slechts 2 of 3 datasets aanwezig, wat onvoldoende is om variaties in dynamische trends vast te stellen. De bodemliggingsgegevens van RWS die voor dit project beschikbaar zijn, bestaan uit lange tijdseries over perioden tot 20 jaar met een groot aantal opnamen (1 tot 12 keer per jaar), die ieder bovendien een hogere ruimtelijke resolutie van datapunten hebben. Naar verwachting is een dergelijke tijdserie voldoende om eventuele variaties in bodemdynamiek te herkennen en de oorzaken van deze variaties te achterhalen.

1.2 Projectdoel

Het lange-termijn doel voor RWS is om te komen tot een efficiëntere en flexibele strategie voor de monitoring van de bodemhoogte op basis van de (bodem)dynamische eigenschappen van de aanloopgebieden en de Nederlandse rivieren. Hiertoe moeten er richtlijnen komen om de optimale meetfrequentie per gebied onder bepaalde omstandigheden te kunnen vaststellen. Uiteindelijk moet dit leiden tot een systeem van adaptieve monitoring, waarbij de inzet van metingen wordt gestuurd door de waargenomen bodemdynamiek per gebied. Dit valt nog niet onder de huidige opdracht.

Het projectdoel van deze onderzoeksopdracht is om tot objectieve criteria te komen voor de bepaling van de monitoringsfrequentie in de aanvaarroutes naar de IJ-geul en de Maasgeul en de vaargeul van de rivier de Waal. Het is daarvoor essentieel om meer inzicht te verkrijgen in de dynamiek van de bodemligging, wat moet leiden tot het adviseren van alternatieve monitoringsstrategieën, afgestemd op de dynamische eigenschappen van deze drie

gebieden. Hiertoe wordt de bodemdynamiek bepaald middels kwantitatieve analyses van tijdreeksen van hydrografische opnemingen. Om de contrasten (of overeenkomsten) in dynamiek te kunnen verklaren, zal een aantal mogelijk bepalende factoren worden onderzocht. In overleg tussen Deltares en RWS Waterdienst (WD), Noordzee (NZ) en Oost-Nederland (ON) zijn de volgende onderzoeksvragen opgesteld (Deltares offerte, dd. 26 april 2011, kenmerk 1202749-000-BGS-0001-cl en opdrachtbrief, d.d. 19 mei 2011, kenmerk RWS/WD-2011/1362):

Vraag 1: Geef een beschrijving van de bodemdynamiek in verschillende karakteristieke watersystemen door een analyse van meetreeksen voor deze gebieden. Hierbij moet gekeken worden naar de Noordzee, met name de aanloopgeulen naar de zeehavens, en de grote dynamische rivieren.

Vraag 2: Beschrijf de factoren die van belang zijn voor de bodemdynamiek en geef richtlijnen hoe deze tot een monitoringsplan kunnen leiden. Bekend zijn de effecten van stroming, extreme omstandigheden en hoog water en stormen.

Vraag 3: Prioriteer deze factoren.

Vraag 4: Definieer een maat voor bodemdynamiek.

Vraag 5: Geef advies over de manier waarop met bodemdynamiek kan worden omgegaan in de monitoring voor RWS NZ en RWS ON.

1.3 Indeling van het rapport

Na de inleidende hoofdstukken over het project (Hoofdstuk 1), de data en de methoden (Hoofdstukken 2 en 3), volgen de resultaten voor achtereenvolgens de Noordzeegebieden (Hoofdstuk 4) en de Waal (Hoofdstuk 5). Hierin zijn de analyse van de morfodynamiek en de factorenanalyse samengenomen. Daarmee worden de onderzoeksvragen 1 t/m 4, zoals gedefinieerd in de offerte (1202749-000-BGS-0001-cl), overeenkomend met projectfasen 2 en 3 in de opdrachtbevestiging (RWS/WD-2011/1632), behandeld, zie Tabel 1.1.

De conclusies en het advies voor de meetstrategie (Vraag 5, Fase 4) worden gegeven in Hoofdstuk 6. (Fasen 5 (project management en meetings) en 6 (rapportage) leidden tot dit rapport.)

Tabel 1.1: overzicht van onderzoeksvragen, projectfasen en hoofdstukken waarin deze worden gerapporteerd.

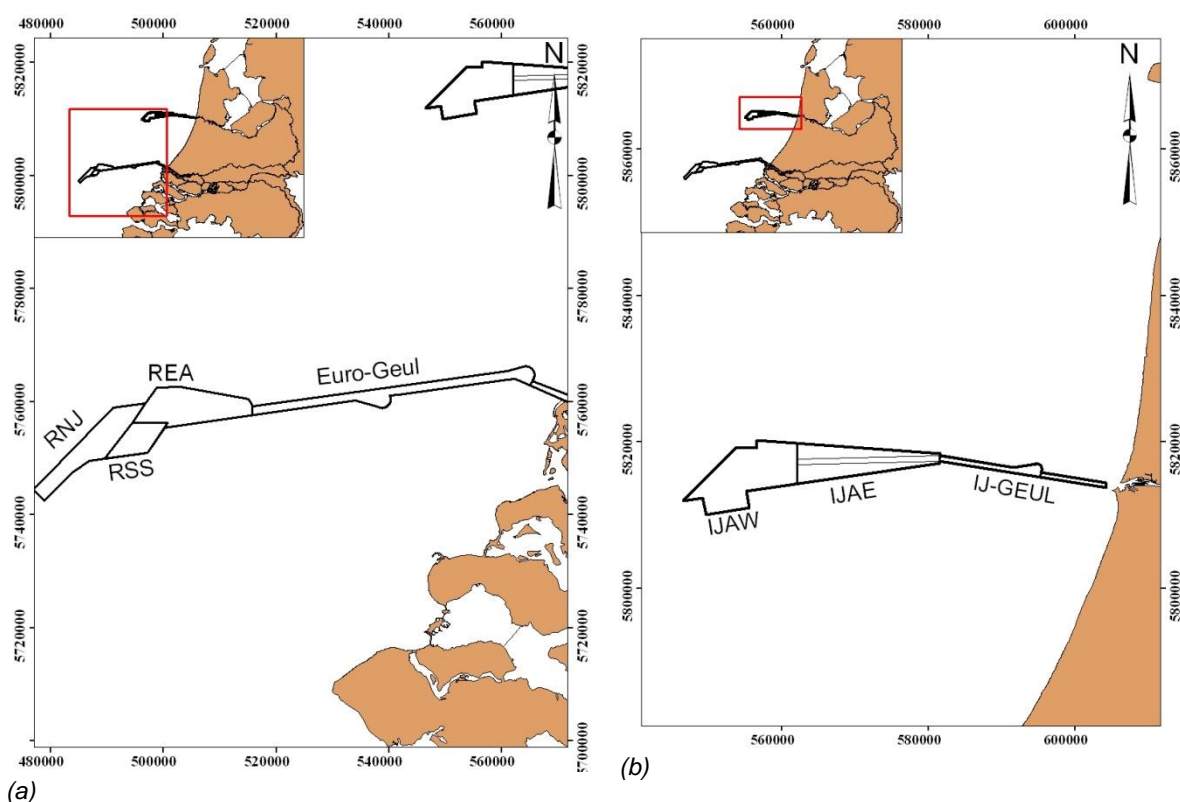
Hoofdstuk in rapport	Onderzoeksvraag (offerte)	Projectfase (opdrachtbevestiging)
H1: inleiding		
H2: data		Fase 1: data
H3: methoden H4: resultaten Noordzee H5: resultaten Waal	1: analyse bodemdynamiek 2: factoren en richtlijnen 3: prioritering van de factoren	Fase 2: analyse Fase 3: factoren
H6: conclusies en advies meetstrategie	4: maat voor bodemdynamiek 5: advies monitoring	Fase 4: meetstrategie
		Fase 5: management & overleg
		Fase 6: rapportage

2 Beschrijving van beschikbare data

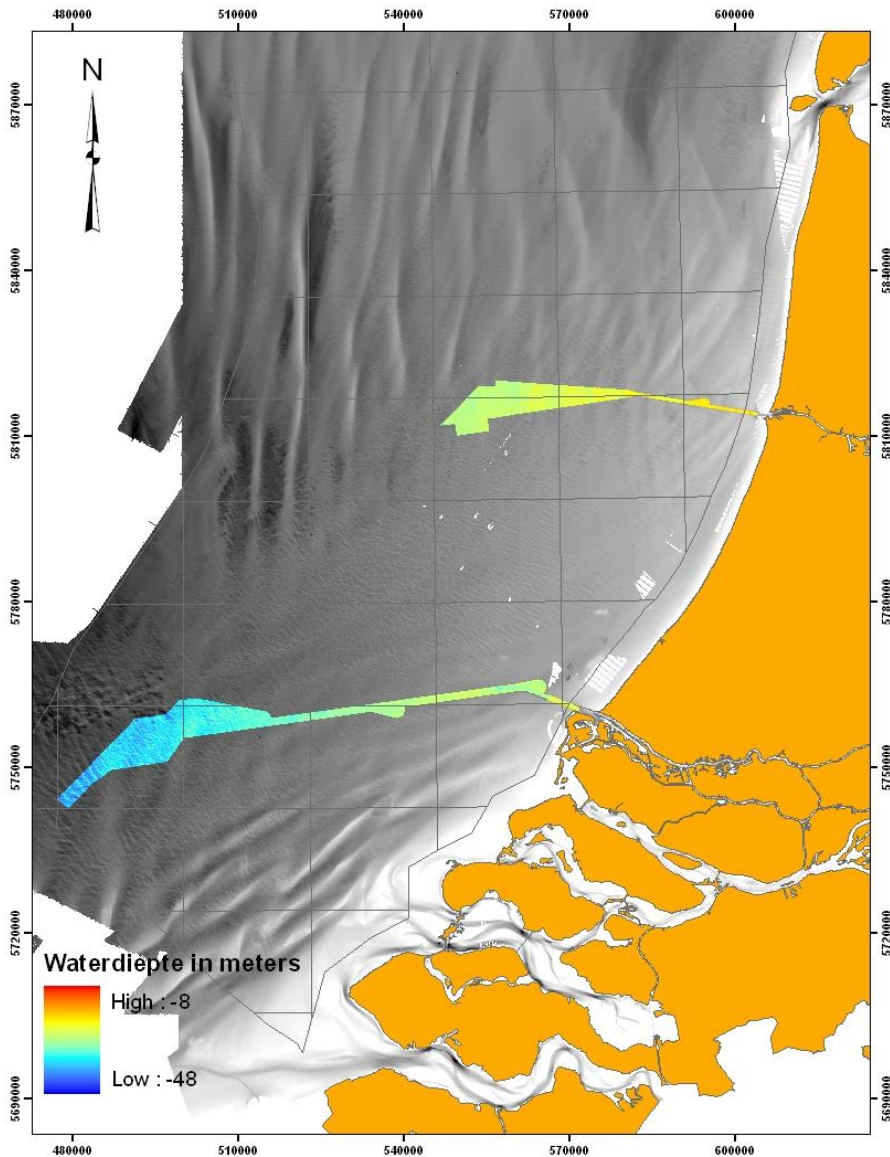
De data die ter beschikking staan van dit project zijn tijdseries van lodingen met bijbehorende metadata en data over omgevingsparameters (lokale condities), waaronder natuurlijke parameters, zoals stroomsnelheid, en baggerwerkzaamheden op de Noordzee.

2.1 Lodingen en metadata

2.1.1 Aanvaargebieden en –geulen naar Rotterdam en IJmuiden



Figuur 2.1 Locaties en namen van de Noordzeegebieden die worden geanalyseerd in dit project: (a) aanvaarroute naar Rotterdam. NB. De Maasgeul is het deel van de aanvaarroute naar Rotterdam ten oosten van de Euro-geul. (b) aanvaarroute naar IJmuiden.



Figuur 2.2 Bathymetrische gegevens van RWS die ter beschikking staan tot dit project (gekleurde gebieden) van de aanvaarroutes naar Rotterdam en IJmuiden, met op de achtergrond de meest recente bathymetrie (DEM) (grijs tinten) uit het ValHYD project. De gekleurde gebieden geven de bodemligging van 2009 in meters ten opzichte van LAT.

In de aanvaarroute naar Rotterdam beslaan de Maasgeul, Euro-geul en het aanloopgebied naar de Euro-geul (Figuur 2.1a; Figuur 2.2) in totaal ongeveer 175 km². De gebieden Noord Hinder en Twin zijn hierin niet inbegrepen. Het aanloopgebied omvat de deelgebieden Noord Hinder Junction (RNJ), Short Stay ankergebied (RSS) en het gebied grenzend aan de Euro-geul (REA). De Maasgeul van 0 tot 6 km wordt 12 maal per jaar gemeten. De aanloopgebieden worden sinds begin jaren '90 1 maal per jaar opgenomen (Tabel 2.1). Aanvankelijk werden deze gebieden opgenomen met een Single-Beam Echo Sounder (SBES), tot 1997 in RNJ en tot 1991 in RSS, daarna zijn de lodingen met een Multi-Beam Echo Sounder (MBES) verricht.

Tabel 2.1 Overzicht van de beschikbare data voor de aanvaarroute naar Rotterdam.

gebied	monitoring	Tijdserie SBES & MBES	No. datasets	Tijdserie enkel MBES	No. datasets
RNJ	1 x per jaar	1990-2009	16	1997-2009	11
RSS	1 x per jaar	1990-2009	14	1994-2009	13
REA	1 x per jaar	1992-2009	16	1992-2009	16
Euro-geul	1 à 5 x per jaar	1991-2009	17	1992-2009	16
Maasgeul	12 x per jaar	1996, 2001-2009	~100	1996, 2001-2009	~100

De IJ-geul en het aanloopgebied naar de IJ-geul (Figuur 2.1b; Figuur 2.2) beslaan in totaal ongeveer 110 km². Het aanloopgebied is onderverdeeld in een westelijk deel (IJAW) en een oostelijk deel (IJAE). IJAE is slechts 1 keer opgenomen door RWS (voorheen door de Dienst der Hydrografie, Koninklijke Marine; voor resultaten zie *Van Dijk et al., 2011*) en de geul binnen gebied IJAE (Figuur 2.1b; Tabel 2.2) in totaal 4 keer. De IJ-geul wordt 4 maal per jaar gemeten sinds begin jaren '90 en het aanloopgebied wordt 1 maal per jaar gemeten sinds 2006 (Tabel 2.2).

Tabel 2.2 Overzicht beschikbare data voor de aanvaarroute naar IJmuiden.

gebied	monitoring	Tijdserie alle MBES	No. datasets
IJAW	1 x per jaar	2006-2009	4
IJAE	1 x in totaal	2006	1
IJAE-geul	1 x per jaar	2006-2009	4
IJ-geul (west)	<4 x per jaar	1991-2009	30
IJ-geul (oost)	4 x per jaar	1994-2009	61

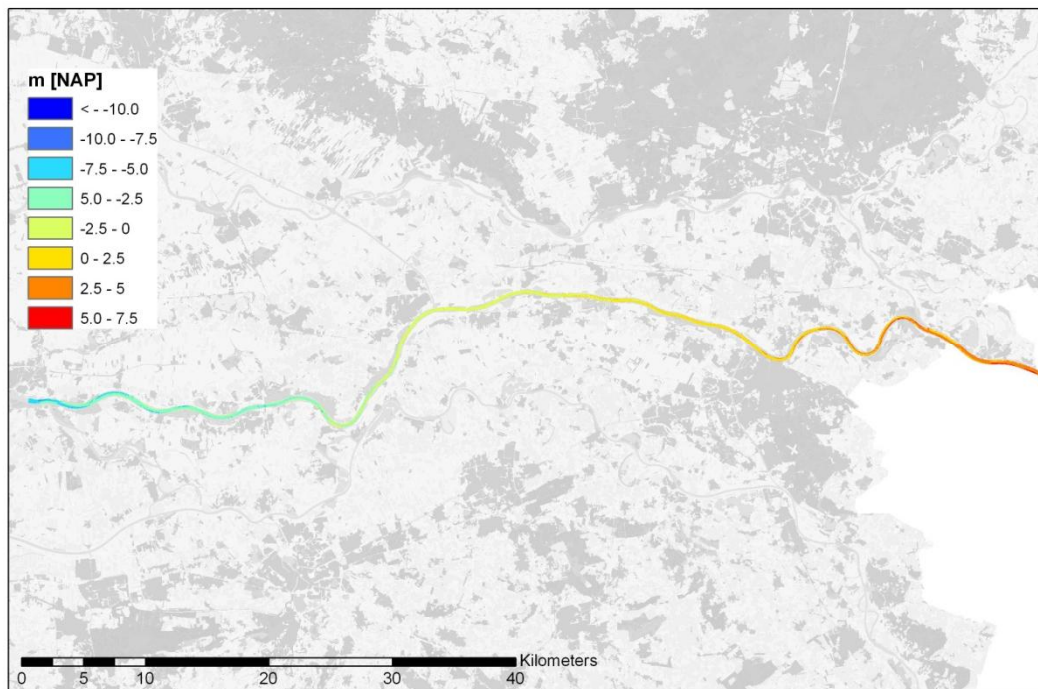
Tijdseries van bodemhoogtegegevens zijn aangeleverd door RWS Noordzee i.s.m. RWS-Data-ICT-Dienst (DID). De aangeleverde bathymetrische data (.dia files, zoals geëxtraheerd uit *Donar*) bevatten gecombineerde data van alle verschillende surveys in de tijd en van verschillende gebieden en zowel header-gegevens als *symbol-separated xyz*-gegevens. De metadata zijn afzonderlijk aangeleverd in tekst-files. XYZ-gegevens zijn uniform aangeleverd in UTM 31 ETRS89 coördinaten en bodemligging in centimeters t.o.v. LAT.

Voor alle analyses van **Noordzee**-data in de aanvaargebieden naar Rotterdam en IJmuiden in dit rapport, worden coördinaten gegeven in **UTM31 ETRS89** en de bodemhoogten in **meters** ten opzichte van Lowest Astronomical Tide (**LAT**).

De dataresolutie neemt toe van 6 m² per datapunt (0.17 obs/m²) vóór het jaar 2000 tot 2 m² per datapunt (0.5 obs/m²) na 2000.

2.1.2 Bodemligging van de Waal

Halfjaarlijkse peilingen (JMP) zijn aangeleverd van de Waal tussen Spijk (rkm 858) en Gorinchem (rkm 954) (Figuur 2.3). Data van deelgebieden buiten de normaallijnen, bijvoorbeeld tussen de kribben, zijn niet aangeleverd.



Figuur 2.3 De bodemligging in meters ten opzichte van NAP van de Waal tussen Spijk en Gorinchem in het voorjaar van 2010 (JMP) (enkel ter overzicht).

Voor het onderzoek naar de bodemdynamiek van de Waal zijn gegevens van juli 1999 tot en met mei 2011 beschikbaar. Voor de meeste jaren is er zowel in het voorjaar als ook in het najaar een meetcampagne geweest. In Tabel 2.3 zijn alle beschikbare datafiles weergegeven. Elke dataset is opgenomen in een periode van enkele weken tot enkele maanden (zie kolom start- en einddatum in de tabel). Meer gedetailleerde metadata is niet beschikbaar.

Tabel 2.3 Datasets van halfjaarlijkse peilingen (JMP) van de Waal met de start- en einddatum van de surveys (jjjmmdd).

Filenaam (jaartal)	startdatum	einddatum	seizoen	opm.
JMP Waal 1999.pts	19990712	19991014		
JMP Waal 2000.pts	20000526	20000703		
JMP Waal 2001.pts	20010313	20010426		
JMP Waal 2002-1.pts	20020403	20020523	voorjaar	
JMP Waal 2002-2.pts	20021023	20030213	najaar	2.5 x 2.5 m grid
JMP Waal 2003.pts	20030307	20030424	voorjaar	enkel westelijk deel
JMP Waal 2004-1.pts	20040315	20040429	voorjaar	
JMP Waal 2004-2.pts	20040928	20041214	najaar	
JMP Waal 2005-1.pts	20050308	20050412	voorjaar	
JMP Waal 2005-2.pts	20051012	20060123	najaar	
JMP Waal 2006.pts	20060327	20060427	voorjaar	
JMP Waal 2007.pts	20071206	20080202	najaar	
JMP Waal 2008-1.pts	20080512	20080606	voorjaar	
JMP Waal 2009-1.pts	20090423	20090527	voorjaar	
JMP Waal 2009-2.pts	20091117	20091216	najaar	
JMP Waal 2010-1.pts	20100420	20100604	voorjaar	
JMP Waal 2011-1.pts	20110420	20110531	voorjaar	

De databestanden zijn aangeleverd in een uniform format met xyz-kolommen zonder *headers* (.pts bestanden) in RijksDriehoek-coördinaten en bodemhoogten in meters t.o.v. NAP. De bodemhoogtegegevens vormen een grid van 1 x 1 m, met uitzondering van de najaarsmeting van 2002; deze heeft een resolutie van 2.5 x 2.5 m. De 2003-data beslaan enkel het westelijke deel van de Waal.

De beheerspeilingen (2.5 x 2.5 m grid voor ArcGis) en de jaarlijkse dwarspeilingen (JDP) zijn niet aangeleverd.

Naast de JMP datasets zijn ook tweewekelijkse peilingen aangeleverd van een klein traject op de Midden-Waal (alleen binnen de vaargeul), namelijk van grofweg rivierkilometer 893 t/m 907. Deze peilingen worden verricht door aannemers om de bodemligging te monitoren in het kader van baggeractiviteiten en 'prestatiecontracten'. Het betreft peilingen uit de jaren 2005 t/m 2011. De data bestaan uit niet-uniforme xyz-bestanden. De ruimtelijke meetdichtheid ligt in de orde van centimeters.

Voor alle analyses van **Waal**-data in dit rapport, zijn de coördinaten in Rijksdriehoek (**RD**) en alle bodemhoogten in **meters** ten opzichte van **NAP**.

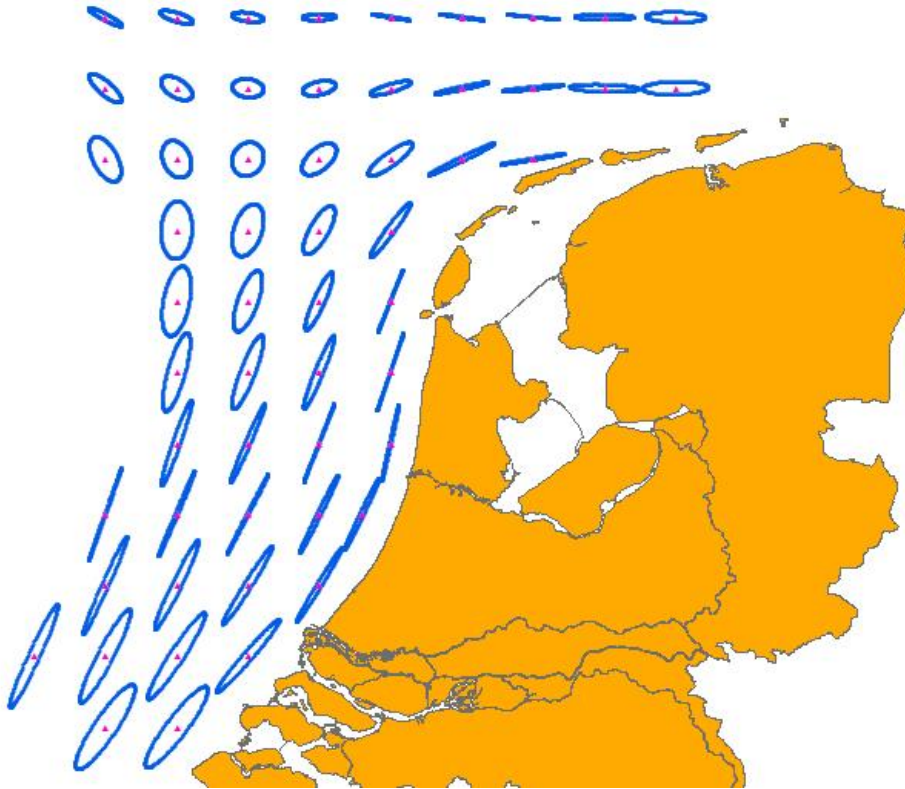
2.2 Natuurlijke omgevingsparameters

Zandgolven zijn mariene bodemvormen die worden gevormd door verticale residuele cellen als gevold van getijstroming [Hulscher, 1996] en worden door zowel getijde als golven beïnvloed, zo is de hypothese. In dit onderzoek zijn de volgende natuurlijke omgevingsparameters meegenomen: getijden (constituenten, stromingssnelheden, ellipticiteit, etc.) en oppervlaktegolven (door oscillerende stroming aan de bodem onder golven) voor de Noordzee en rivierafvoer voor de Waal. Verder zijn de omgevingsparameters waterdiepte en korrelgrootte van belang voor de dynamiek van bodemvormen [zie Buijsman and Ridderinkhof, 2008; Giri et al., 2008; Sterlini et al., 2009; Van Santen et al., 2011]. Niet-natuurlijke omgevingsparameters zijn o.a. baggerwerkzaamheden en suppleties [Sloff and Sieben, 2007] (zie paragraaf 2.3).

2.2.1 Getijstroomsnelheden Noordzee

Getijstroming is medeverantwoordelijk voor sedimenttransport en dus voor de verandering van de bodemligging. Omdat gemeten stroomsnelheden schaars zijn, gebruiken we in dit project getijstroomsnelheden geëxtraheerd uit de database MATROOS (Multifunctional Access Tool foR Operational Ocean-data Services) in februari 2012. De getijstroomsnelheden in de MATROOS-database zijn gemodelleerd met complexe, niet-lineaire numerieke "engineering" modellen (gebaseerd op WAQUA en DELFT3D-FLOW) die diepte-gemiddeld de ondiep-water vergelijkingen oplossen. Deze database levert stroomsnelheden in de x- en y-richtingen van getijstroming voor het Noord-West Europees Continentaal Plat, gebaseerd op getijvoorspellingen en luchtdrukgebieden van KNMI's atmosferische HiRLAM model (ge-update versie op 22 x 22 km resolutie) [Verlaan et al., 2005]. De berekeningen houden ook rekening met windgedreven stroming en saliniteitsverschillen. Het zijn dus geen metingen, maar de modelresultaten worden gekalibreerd en zijn gevalideerd met gemeten waterstanden van meetstations langs de Engelse en Nederlandse kusten en op platforms in de Noordzee. Hiermee nemen we aan dat de modelresultaten realistische getijstroomsnelheden weergeven. De MATROOS database wordt beheerd door Deltares en modellen worden gevoed door data van RWS. Met deze

modelresultaten kunnen maximale stroomsnelheden en ellipticiteit van het getij (variatie in stromingsrichting over de getijcyclus) worden berekend [Van Santen, 2009] (Figuur 2.4).



Figuur 2.4 Een voorbeeld van getij-ellipsen van het dominante getij (M2) op het NCP gebaseerd op getijstroomsnelheden uit de MATROOS-database (2009 gegevens; Van Santen, 2009).

Voor de aanvaargebieden ver uit de kust worden gegevens uit het Dutch Continental Shelf Model (CSM8) gebruikt. Dit model geeft de hoogste resolutie die voor deze gebieden beschikbaar is, met een celgrootte van het sferische grid van $1/8^\circ$ bij $1/12^\circ$ (ongeveer 8×8 km). Voor de vaargeulen dicht bij de kust is het "hmnc_kustfijn" model beschikbaar, met een ruimtelijke resolutie die varieert van vierkante cellen van 300 tot 400 m dicht bij de kust, tot langgerekte cellen van 300 tot 800 m bij 2.5 km naar de randen van het model.

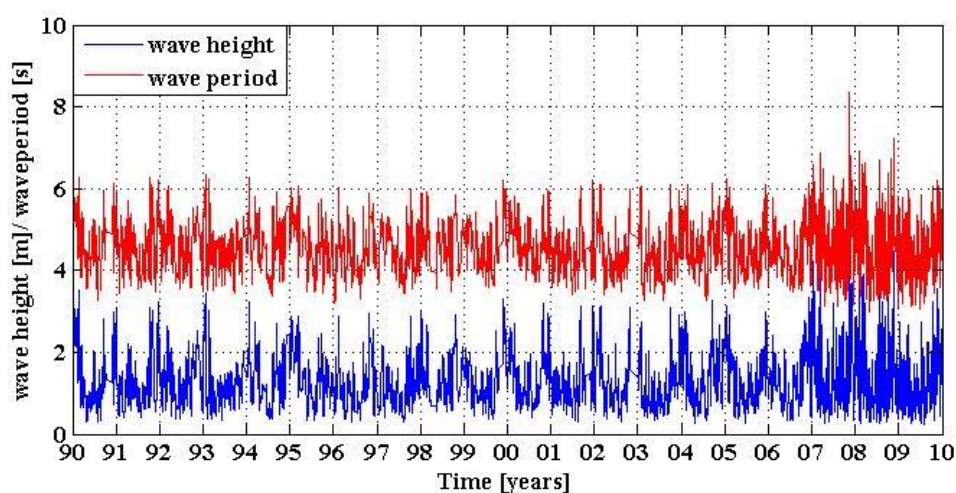
De MATROOS database bevat gegevens voor een periode van maximaal de voorgaande twee jaren. Omdat het modelleren van getijstroomsnelheden voor specifieke locaties voor de periode vanaf 1990 buiten het doel van dit project valt, wordt in dit project gewerkt met de gegevens van 1 mei – 1 juli 2011, om temporele variaties, zoals spring- en doortij, uit te middelen. De temporele resolutie van de stromingsgegevens is 1 minuut.

2.2.2 Golfhoogte van oppervlaktegolven en zandtransport Noordzee

Afhankelijk van de golflengte en waterdiepte, kunnen oppervlaktegolven doorwerken tot op de zeebodem en bevorderen daarmee sedimenttransport en dus de verandering van de morfologie van de zeebodem. Of golfrichting een bepalende factor is, is nog onbekend, maar een eerste onderzoek naar deze factor wijst in die richting [Sterlini *et al.*, 2011]. Echter, golfrichting is in dit onderzoek nog niet meegenomen.

De golfhoogten voor de te analyseren gebieden in de Noordzee zijn verkregen uit de Waterbase database van RWS (www.waterbase.nl; januari 2012). Dit zijn de gemeten significante golfhoogten (hoogste 1/3 deel van de gemeten golfhoogten) van golven met golfperiodes van 2 tot 33 s voor de periode van 1990 tot 2010 met een meetfrequentie van 1 per 30 minuten. Voor het aanloopgebied naar Rotterdam is gebruik gemaakt van gegevens van de meetlocatie 'Euro platform', 58 km uit de kust bij Rotterdam, en voor het aanloopgebied naar IJmuiden van de locatie 'IJmuiden Munitiestortplaats', 36 km uit de kust.

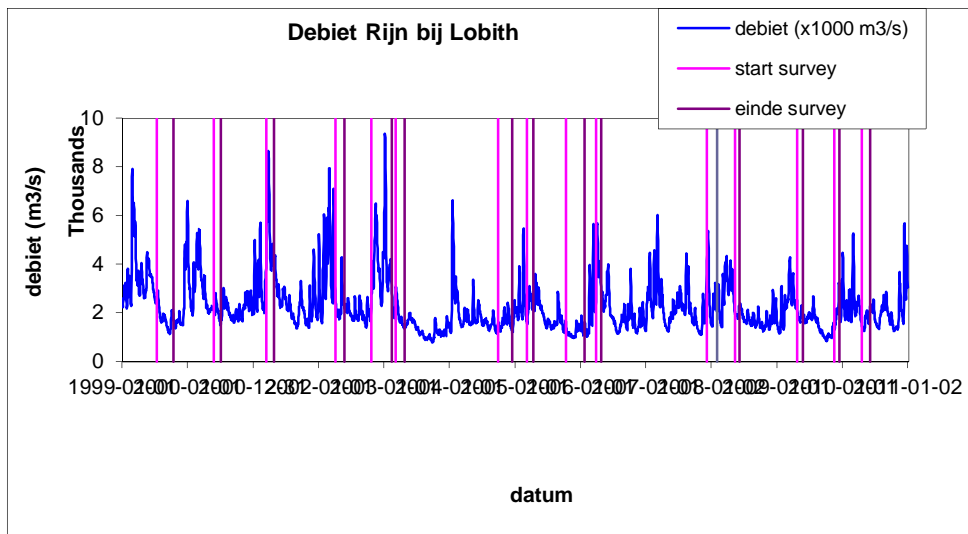
De significante golfhoogten voor beide meetstations zijn ongeveer gelijk met een gemiddelde hoogte van ongeveer 1.3 m; de gemiddelde golfperiode is 4.4 s voor Rotterdam en 4.6 s voor IJmuiden. In Figuur 2.5 worden de gegevens voor IJmuiden gegeven.



Figuur 2.5 Golfhoogten en –perioden voor IJmuiden Munitiestortplaats van 1990 tot 2010.

2.2.3 Debietgegevens Waal

Evenals stroomsnelheid in de Noordzee, is het debiet van de Waal (en de daaruit af te leiden stroomsnelheid) een factor die de bodemmorfolgie en –dynamiek voor de Waal kan beïnvloeden. De gemeten debieten, in m^3/s , zoals gemeten eens per etmaal bij Lobith, zijn aangeleverd door RWS-ON in een Excel worksheet. Daarnaast zijn de gemeten debieten bij Tiel gedownload van www.waterbase.nl (maart 2012).



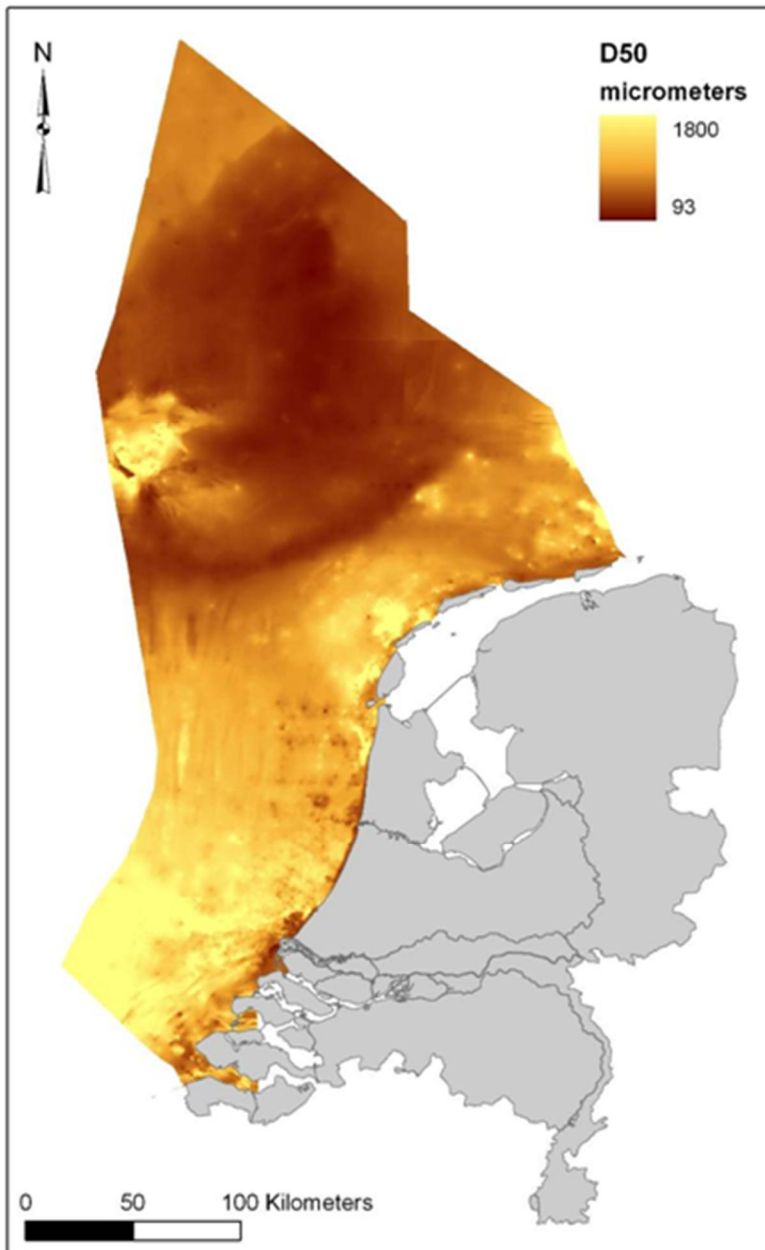
Figuur 2.6 Debiet van de Boven Rijn, gemeten 1 maal per etmaal bij Lobith tussen 1 januari 1999 en 24 december 2010, en de begin- (roze) en einddata (paars) van JMP peilingen.

2.2.4 Korrelgroottegegevens

Omdat de mate van sedimenttransport mede afhankelijk is van de korrelgrootte van het sediment, wordt deze als factor meegenomen in dit onderzoek. Als maat voor korrelgrootte, gebruiken we de mediane korrelgrootte (D50) van de zandfractie (63 – 2000 μm). De ruimtelijke verbreiding op het NCP wordt gegeven in een digitale kaart, zoals vervaardigd door TNO in 2007, met een ruimtelijke resolutie van 200 x 200 m (Figuur 2.7).

Deze kaart is gebaseerd op gemeten korrelgrootteverdelingen van zeebodemmonsters in de DINO-database (Data and Information of the Netherlands Subsurface) van TNO. Deze volledige korrelgrootteverdelingen zijn geïnterpoleerd in geavanceerde geostatistische software (Isatis), met gebruik van nauwkeurige definities van variogrammen, een anisotroop Krigingalgoritme (Kriging met 'external drift') en met het incorporeren van voorkennis, zoals bathymetrie [Maljers and Gunnink, 2007].

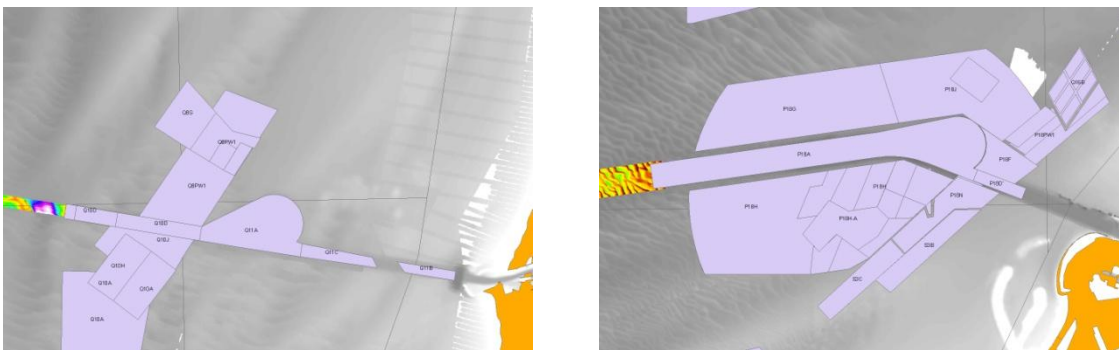
Gegevens van de korrelgrootte in de Bovenrijn en Waal komen uit een spreadsheet van Rijkswaterstaat waarin de korrelgroottes staan zoals gepresenteerd in *Ten Brinke* [1997].



Figuur 2.7 Mediane korrelgrootte (D50) in micrometer van de zandfractie (63 – 2000 µm) van zeebodemsedimenten op het Nederlands Continentaal Plat. Deze digitale kaart heeft een resolutie van 200 x 200 m en is beschikbaar op internet via Open Earth (<http://www.openearth.eu/>; <http://kml.deltares.nl/kml/tno/ncp/>Dz50>).

2.3 Baggergegevens

Om bij de interpretatie van de dynamiek van zee- en rivierbodems rekening te houden met morfologische veranderingen ten gevolge van baggeren en storten, worden baggeractiviteiten gekoppeld aan de vastgestelde bodemdynamiek. De baggergegevens (locatie, datum of periode, volume opgezogen of gestort) zijn door RWS aangeleverd voor de Noordzeegebieden. Locaties van zandwingegebieden hebben wij gedownload van het “Noordzeeloket” van Rijkswaterstaat (www.noordzeeloket.nl; 2010) als polyline shapefile (ETRS89 coördinaten) (Figuur 2.8). Echter, baggergegevens voor de Waal zijn op dit moment nog niet beschikbaar.



Figuur 2.8 Zandwin- en baggergebieden nabij IJmuiden (links) en Rotterdam (rechts).

3 Beschrijving van gebruikte methoden

Beschrijvingen van de bodemdynamiek van de twee aanloopgeulen in de Noordzee en de Waal worden gebaseerd op kwantitatieve analyses van tijdreeksen van bodemhoogtemetingen. De analyses gaan uit van Digitale Terreinmodellen (paragraaf 3.1). In deze analyses wordt onderscheid gemaakt tussen de verticale dynamiek (trends in bodemhoogte-veranderingen in de tijd, dz/dt) (paragraaf 3.2) en de migratiesnelheden en vormveranderingen van dynamische bodemvormen (paragraaf 3.3).

3.1 Digitale Terreinmodellen

Van de aangeleverde data worden digitale terreinmodellen (DTMs) vervaardigd middels interpolatie met het Inverse Distance algoritme in TNO-Deltares software, die speciaal ontwikkeld zijn om grote databestanden te kunnen verwerken [Van Dijk et al., 2011]. De aangeleverde databestanden worden volledig geautomatiseerd opgesplitst per gebied en per opname, en opgedeeld in blokken van 5 x 5 km (met daaromheen een rand van datapunten die nodig is om de interpolatie uit te voeren zonder bijeffecten) die afzonderlijk geïnterpoleerd worden.

Voor de Noordzeedata is in dit project een gridresolutie van 5 x 5 m aangehouden met een zoekradius (de straal van de cirkel waarbinnen de meetpunten worden meegenomen in de interpolatie) van 25 m. Deze resolutie geeft de grotere bodemvormen, zoals zandgolven, goed weer. Bij de keuze van celgrootte is uitgegaan van de ervaringen in het voorgaande project (25 x 25 m, radius 60 m) [Van Dijk et al., 2011] en de hogere datadichtheid van de aangeleverde datasets voor het huidige project. Er zijn geen extra tests uitgevoerd voor het effect van celgrootte en zoekradius op de kwaliteit bij het creëren van de DTMs.

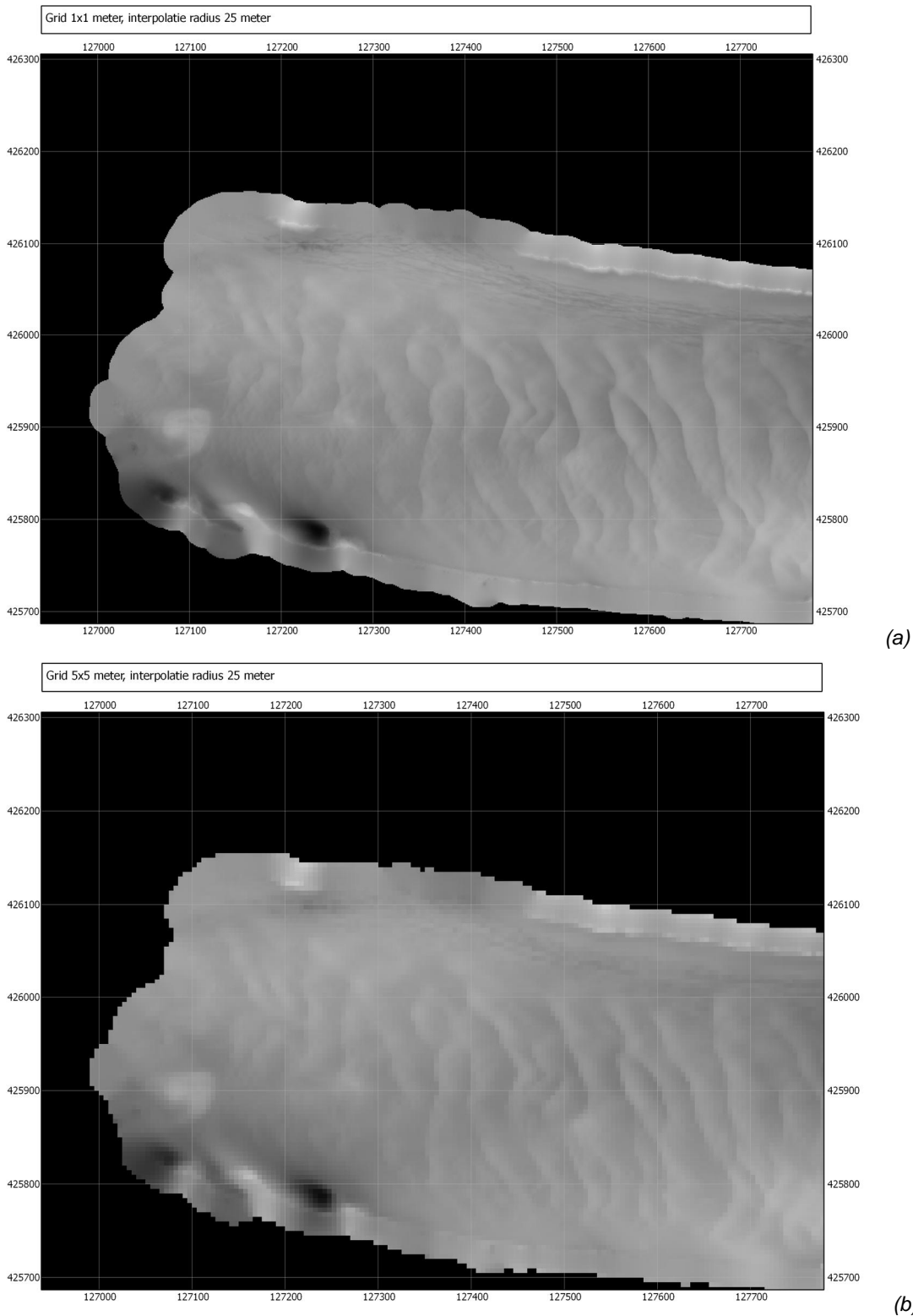
De representatie van megaribbels kan met een 5 m-resolutie minder zijn. Of het aantal opnamen (1 x per jaar voor aanvaargebieden) voldoende is om iets over de dynamiek van individuele megaribbels te kunnen zeggen, en of een gridresolutie van 5 x 5 m daarvoor geschikt is, valt buiten de scope van dit project. Een pilotstudy voor megaribbels zal worden uitgevoerd in het KPP2012-vervolgproject.

Voor de interpolatie van de Waal-data, is wel een resolutietest uitgevoerd om een idee te krijgen van de benodigde griddichtheid. Hiertoe zijn voor één dataset verschillende resoluties getest met verschillende zoekradii (zie Tabel 3.1). Doel van de vergelijking is om vast te stellen welke celgrootte voldoende detail geeft om de rivierduinen goed te kunnen analyseren. Het is een afweging tussen rekencapaciteit, rektijd en het gewenste detail.

Tabel 3.1 Instellingen voor de resolutietest voor de interpolatie van Waal lodingen

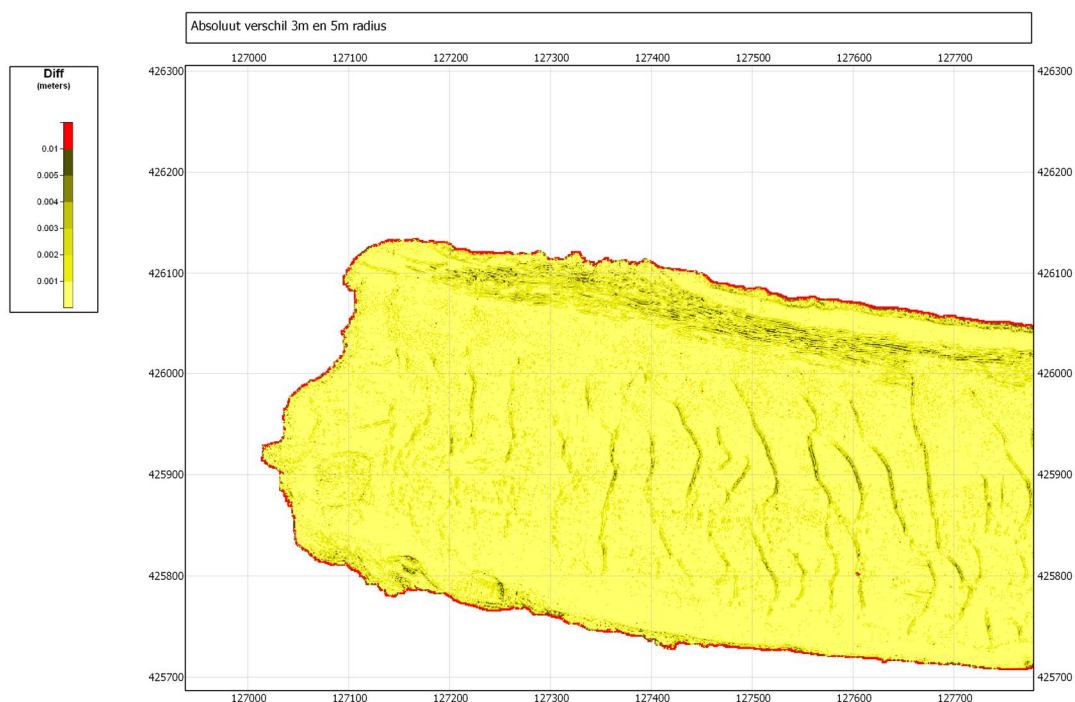
celgrootte	zoekradius
5 x 5 m	25 m
1 x 1 m	25 m
1 x 1 m	5 m
1 x 1 m	3 m

De 1 x 1 m resolutie geeft bodemvormen goed weer en is visueel beduidend beter op zicht dan de 5 x 5 m resolutie, die blokkig is (Figuur 3.1). Daarom wordt in dit onderzoek een resolutie van 1x1 m aangehouden.



Figuur 3.1 Digitale terreinmodellen voor het meest westelijk deel van de Waal-data. (a) 1 X 1 m resolutie, 25 m zoekradius. (b) 5x5 m resolutie, 25 m zoekradius. Het DTM op 1 x 1m resolutie is visueel veel beter dan het DTM op 5 x 5 m resolutie.

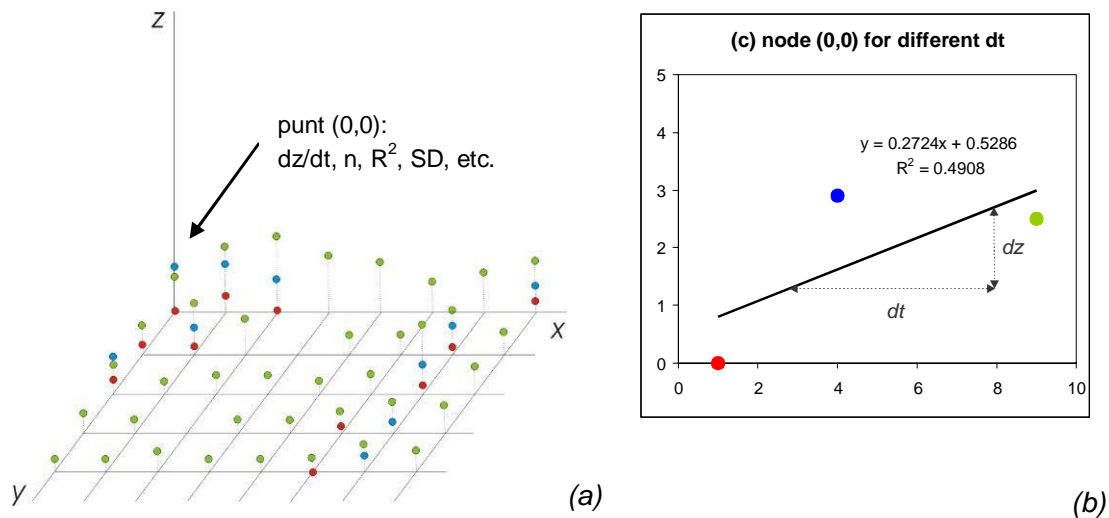
Een kleinere celgrootte was weinig zinvol, omdat de data op een 1 m resolutie zijn aangeleverd. Vervolgens is het effect van de zoekradius op de nauwkeurigheid van het DTM onderzocht. Hoe kleiner de zoekradius, des te beter de benadering van de meetpunten door het DTM. Ook al is het verticale verschil in bodemligging tussen DTMs met een zoekradius van 3 m en 5 m in de orde van millimeters (Figuur 3.2) en dus verwaarloosbaar, in dit onderzoek hebben wij een zoekradius van 3 m gebruikt.



Figuur 3.2 Verticale verschillen tussen twee DTMs met 1 x 1 m celgrootte en zoekradii van 3 m en 5 m zijn in de orde van millimeters. Grotere verschillen (tot 0.64 m) komen enkel aan de randen voor, door kleine verschillen in overlap tussen de datasets (en dus een artefact van de bewerking).

3.2 Analyse verticale bodemdynamiek

In de bepaling van de verticaal-dynamische trend in de bodemligging is gebruik gemaakt van de applicatie die is ontwikkeld in het ValHYD project [Van Dijk et al., 2011]. Hierin wordt – volledig geautomatiseerd – voor ieder gridpunt de verticale trend in m/jaar uitgerekend middels lineaire regressie door alle beschikbare bodemopnamen voor dat punt (Figuur 3.3). Aan ieder gridpunt in het DTM worden waarden toegekend, die naast de verticale trend ook andere labels kunnen zijn, zoals het aantal surveys, kwaliteitslabels, standaard deviatie, enz.



Figuur 3.3 Methode van het bepalen van de verticaal dynamische trends per gridpunt: (a) tijdserie van DTMs (in dit voorbeeld 3 surveys) in een gebied en (b) voorbeeld van het bepalen van de trend per gridpunt voor het punt (0,0) in figuur (a). In dit voorbeeld zou de verticale dynamiek 0.27 m/jaar zijn, met een waardelabel 'Goodness of Fit' van 0.49.

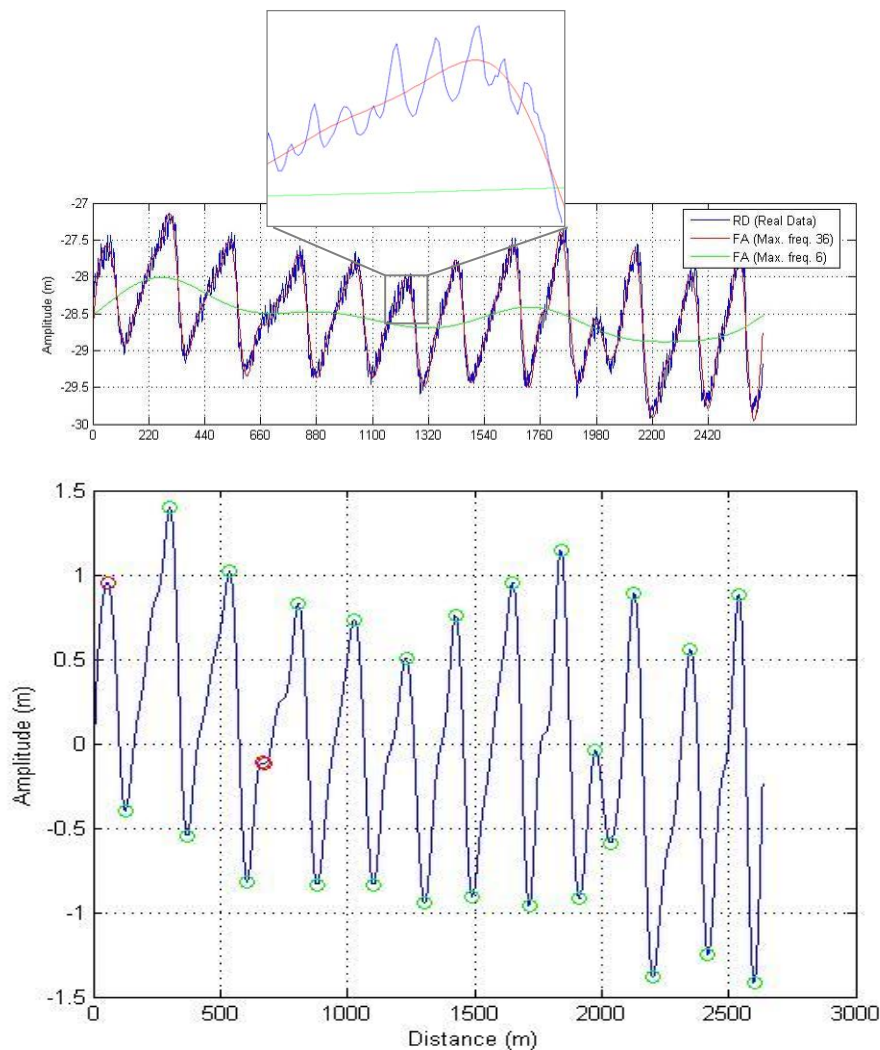
Voor dit project is de applicatie aangepast op de volgende punten:

- Om uit de aangeleverde .dia gegevens de lodingen afzonderlijk te kunnen gebruiken per gebied en per survey in de morfodynamische analyse, worden deze files ingelezen en geautomatiseerd opgesplitst per gebied en per opname.
- een hogere gridresolutie wordt toegepast, waarbij de celgrootte afhankelijk is van de resolutie van de datapunten. In de analyses voor de Noordzee is een 5 x 5 m grid aangehouden en voor de Waal 1 x 1 m. Hiervoor was het noodzakelijk om de code aan te passen om efficiënter te kunnen rekenen.
- Tijdreeksen van een groot aantal opnamen laten toe om de verticaal-dynamische trend te analyseren; deze trend is wellicht niet een rechte lijn over de gehele reeks, zoals wel werd aangenomen in het ValHYD-project offshore.
- Door verschillen in specificaties en nauwkeurigheid van gebruikte echoloden en plaatsbepalingsinstrumenten en -methoden zijn systematische afwijkingen in de data vaak niet te vermijden. Er zal worden onderzocht of het in de analyse nodig is om de tijdreeksen op te delen naar methoden van metingen, om bijverschijnselen zo veel mogelijk te voorkomen.

3.3 Detailanalyses morfodynamiek van individuele bodemvormen

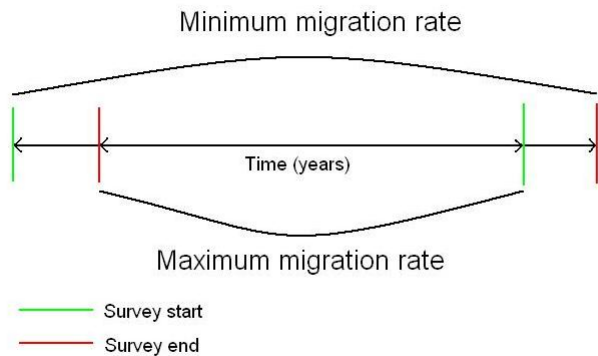
De detailanalyses van de tijdsreeksen van geselecteerde gebiedjes maken het mogelijk om de afmetingen, migratie en groei van individuele bodemvormen (zandgolven en rivierduinen) vast te stellen. Dit is relevant omdat de verandering in vorm of afmeting en de migratie van bodemvormen verandering in de bodemligging kunnen veroorzaken.

Bij de analyse van zandgolfdynamiek wordt een methode gebruikt die eerder bij Deltares is ontwikkeld, waarin de bathymetrische data in profielen middels een getrunkeerde spectraal analyse wordt gesepareerd in verschillende typen bodemvormen en waarvan de geometrie en de veranderingen geautomatiseerd kunnen worden berekend (Figuur 3.4) [voor details van deze methode, zie Van Dijk et al., 2008].



Figuur 3.4 Methode van detailanalyse van de morfologie en dynamiek van individuele bodemvormen zoals zandgolven en rivierduinen. In deze methode wordt het zandgolvensignaal gesepareerd uit het bathymetrisch signaal (profiel uit DTM). Op deze manier worden klein- en grootschalige vormen uitgefilterd. Boven: bathymetrische data (blauw) van een offshore zandgolvenveld; een getrunceerde Fourier approximatie voor uitfilteren van kleine bodemvormen (rood); de tweede truncatie geeft de overblijvende grootschalige morfologie (groen). Onder: resultaat van de semi-geautomatiseerde methode waarin de kam- en trogpunten worden bepaald uit het zandgolvensignaal.

De migratiesnelheden van individuele zandgolfkammen en -trokken in dit onderzoek zijn bepaald op twee manieren: door een lineaire regressie en de berekening van het gemiddelde van migratiesnelheden per interval. De regressiecoëfficiënt van de lijn door de posities van kam- en trogpunten geeft de migratiesnelheid (in m/jaar) en een richting voor de gehele tijdserie. De berekening voor aparte intervallen geeft zowel informatie over de variatie van migratiesnelheid per periode als inzicht in de onnauwkeurigheid in de migratieresultaten door de lengte van de opnameperiode van de datasets (Figuur 3.5).



Figuur 3.5: Illustratie van de berekening van de minimum en maximum migratiesnelheden tussen twee opnamen, die ieder een periode van opname beslaan. 'Survey start' staat voor het begin van de opnameperiode en 'Survey end' staat voor het eind van de opnameperiode.

Deze methode is niet toegepast op de peilingen in de Waal voor de rivierduinen. De methode die is toegepast op de Waal wordt beschreven in Hoofdstuk 5.

3.4 Onderzoek naar bepalende factoren

In het onderzoek naar bepalende factoren in het gedrag van zandgolven, wordt onderscheid gemaakt tussen natuurlijke omgevingsfactoren en niet-natuurlijke factoren, zoals baggeren. Deze paragraaf beschrijft de methode die is ingezet voor het identificeren en het bepalen van de belangrijkheid van de natuurlijke factoren. De baggeractiviteiten worden vergeleken met de resultaten van bodemdynamiek (zie Hoofdstuk 4).

In dit project focussen wij op de volgende natuurlijke factoren:

- voor kustwateren: golfhoogte van windgolven, pieksnelheid van de getijstroming (incl. wind-gedreven stroming), waterdiepte en korrelgrootte, en
- in de Waal: rivierdebiet, laterale en longitudinale locatie in de rivier en korrelgrootte.

In eerste instantie worden deze factoren afzonderlijk vergeleken met de vastgestelde dynamiek en zandgolf lengte, door de variabelen in bivariate plots uit te zetten (gehypothetiseerde oorzaken en gevolgen, want onderlinge relaties en schijnrelaties kunnen niet uit deze plots worden onderscheiden). Bijvoorbeeld de schuifspanning aan de bodem door golven is afhankelijk van golfhoogte, waterdiepte en korrelgrootte, terwijl deze elkaar onderling ook beïnvloeden [Varfaillie et al., 2006].

Vervolgens is in dit onderzoek – enkel voor de Noordzeegebieden – een eerste aanzet gemaakt tot het toepassen van de statistische methode 'multivariate factorenanalyse' om de relatie tussen de verschillende omgevingsfactoren en het gedrag van de zeebodem te kunnen vaststellen. In deze methode worden variabelen eerst opnieuw gedefinieerd, zodat de variabelen onafhankelijk worden. Hierbij dient echter in beschouwing te worden genomen, dat het aantal en de verbreiding van de (twee) gebieden en de variatie daarbinnen (profielen) ontoereikend kunnen zijn voor een dergelijke verklaring. Eerdere studies hebben aangetoond dat een groot aantal gebieden nodig is voor het identificeren van relaties tussen omgevingsparameters en bodemdynamiek [Van Dijk et al., 2011; Van Santen et al., 2011].

De methode die zal worden toegepast is een vergelijk van de onderlinge afhankelijkheden tussen de bodemdynamiek en de afzonderlijke parameters. Hierbij is de kennis van deskundigen ingezet en wordt gebruik gemaakt van modelresultaten uit voorgaande onderzoeken. Voor empirische data is een statistische onderbouwing het meest geschikt. Het is echter nog onzeker of de aantallen kwantitatieve gegevens en de contrasten in omgevingsparameters in deze studie dat toelaten.

3.4.1 Het berekenen van de variabelen in de factorenanalyse

In het gedrag van zandgolven, spelen verschillende getij-constituenten een rol. Het getij kan worden opgesplitst in constituenten, zoals het M2-getij, een door de Maan veroorzaakt getij met twee hoog waters en twee laag waters per dag (semi-diurnal). Het M2-getij is in de Noordzee het dominante getij. Een andere constituent is bijvoorbeeld S2, een door de zon veroorzaakt semi-diurnal getij-constituent. In ondiep water en kustgebieden treden ook constituenten van hogere orde op: van het M2-getij zijn dit de zogenoemde M4 of M6 getijden, met een frequentie die respectievelijk twee en drie maal hoger is dan die van het M2 getij. Deze hogere orden van getij worden veroorzaakt door de interactie van getijgolven onderling. Van de getijstroming spelen de M2 en M4 constituenten de belangrijkste rol voor het gedrag van zandgolven [Besio et al., 2004].

Ook het faseverschil tussen de M2- en M4-getijden speelt een rol bij de richting van zandgolfmigratie. Door het faseverschil wordt in de superpositie van de M2- en M4-getijden de asymmetry van de getijstroming – die verantwoordelijk is voor zandgolfmigratie – bepaald: als beide constituenten in fase zijn (gelijktijdig hoog water), dan is het opgetelde getij vloedgedomineerd; als beide constituenten uit fase zijn, dan kan het opgetelde getij ebgedomineerd zijn. Deze factor kan verklaren wat de migratierichting van zandgolven is.

De getijstroomsnelheden uit MATROOS (paragraaf 2.2.1) zijn opgesplitst in M2 en M4 componenten aan de hand van een harmonische analyse [Van Santen, 2009]. Uit deze afzonderlijke componenten zijn de maximale stroomsnelheid, ellipticiteit en de oriëntatie van de M2- en M4-ellipsen berekend, alsook het faseverschil tussen het M2- en M4-getijden en de reststroom van het dominante M2-getij. De maximale stroomsnelheid is de lange as van de M2-of M4-ellips, de ellipticiteit is de ratio tussen de lange en de korte as. De residuele stroming is berekend als het netto effect van verschillen in de maximale eb- en vloedstroomsnelheden van het getij over één getijcyclus.

Het effect van oppervlaktegolven wordt in de factoren meegenomen als een maat voor potentieel zandtransport aan de bodem, uitgedrukt als percentage van de tijd (van de 20-jarige tijdserie) dat zandtransport door oppervlaktegolven mogelijk is. Oppervlaktegolven genereren een orbitale beweging van waterdeeltjes in de waterkolom, die in ondiep water kan doorwerken tot op de bodem. Aan de bodem wordt een horizontale heen-en-weergaande stroming veroorzaakt, die sedimenttransport in gang zet, enkel wanneer de schuifspanning aan de bodem (of eigenlijk Shields mobiliteitsparameter) de kritieke schuifspanning (Shields parameter) overschrijdt. Zo kunnen golven bijdragen door mobilisatie van het sediment, dat door de stroming aan de bodem door golven en/of getij kan worden getransporteerd. De details van deze berekening worden gegeven in Bijlage 8.1. Omdat ieder profiel in deze studie een eigen combinatie van korrelgrootte en waterdiepte heeft, krijgt ieder profiel een eigen waarde.

De korrelgrootte die aan een profiel wordt toegekend is de gemiddelde waarde van de mediane korrelgroottes die voorkomen op de kaart (paragraaf 2.2.4) langs het gehele profiel.

De waterdiepte is simpelweg de gemiddelde waterdiepte langs het gehele profiel.

3.4.2 Principal Component Analyse en Regressie

Voor het bepalen van de correlatie tussen variabelen is een voorlopige Principal Component Analysis (PCA) uitgevoerd. Deze analyse transformeert de variabelen die onderling afhankelijk kunnen zijn in een nieuwe set van onafhankelijke variabelen. Deze analyse maakt inzichtelijk in welke mate de nieuwe variabelen bijdragen aan de spreiding van de data punten. Voor het vaststellen van de volgorde van belangrijkheid van de beïnvloedende factoren (oorzaak-gevolg) is een eerste aanzet tot het toepassen van een multivariate Principal Component Regression (PCR) uitgevoerd. De details van deze methode worden gegeven in Bijlage 8.2.

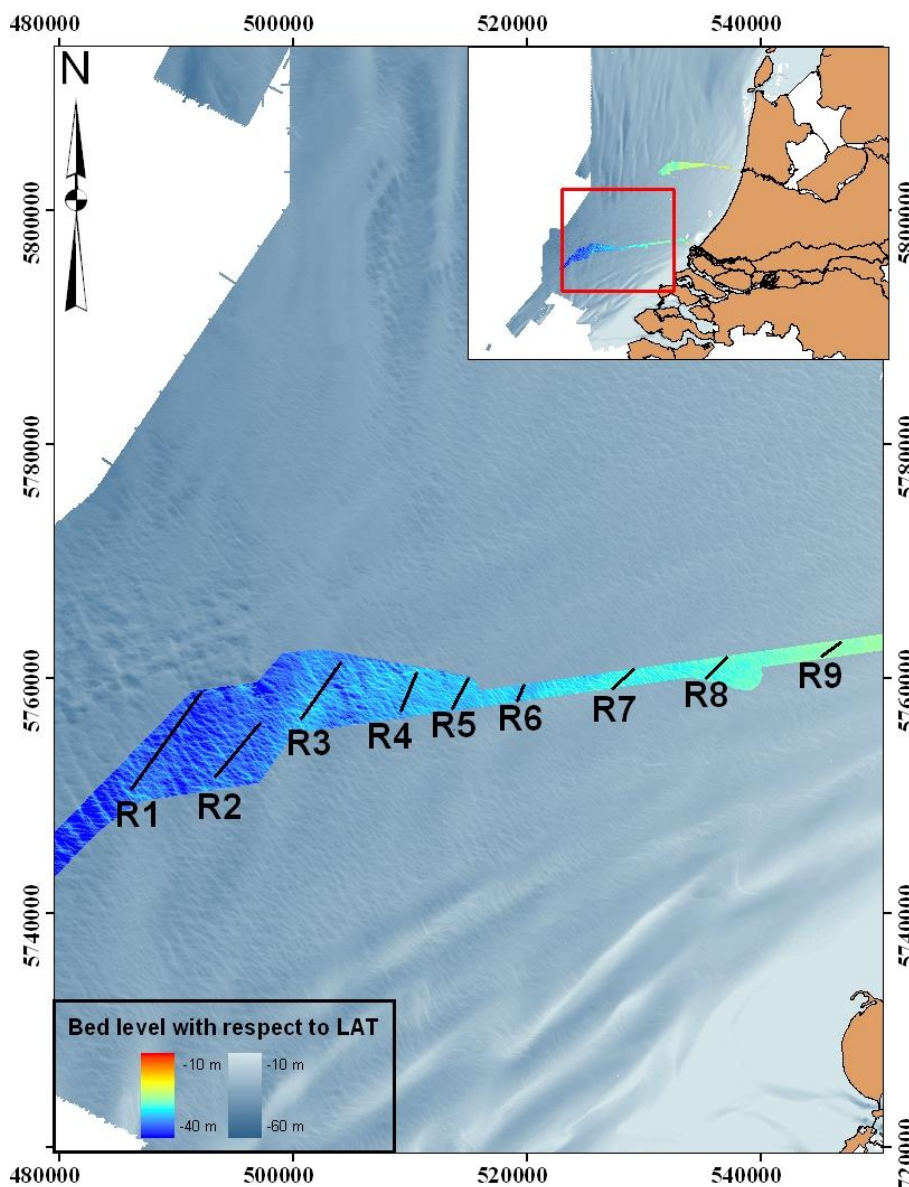
3.5 Analyse bodemmonsters

Voor het vaststellen van verschillen in samenstelling van het sediment is speciaal bemonsterd in de aanvaargebieden naar IJmuiden en Rotterdam op kammen en in troggen van zandgolven. Het betreft hapmonsters genomen met een Van Veen happer door de Dienst der Hydrografie in maart 2012. De monsters zijn geanalyseerd in het laboratorium van de Vrije Universiteit in Amsterdam op korrelgrootte (laser diffractie voor de fractie <2mm) en carbonaat- en organische stofgehalte. Het materiaal groter dan 2 mm (grind of schelpfragmenten) is uitgezeefd. De korrelgroottebepalingen zijn uitgevoerd op voorbehandelde monsters met enkel een standaard H₂O₂ methode tegen aggregatie, en op duplo monsters met zowel H₂O₂ als HCl behandeling (tevens ontkalkt). De waarden gepresenteerd in dit rapport zijn de waarden van de ontkalkte monsters.

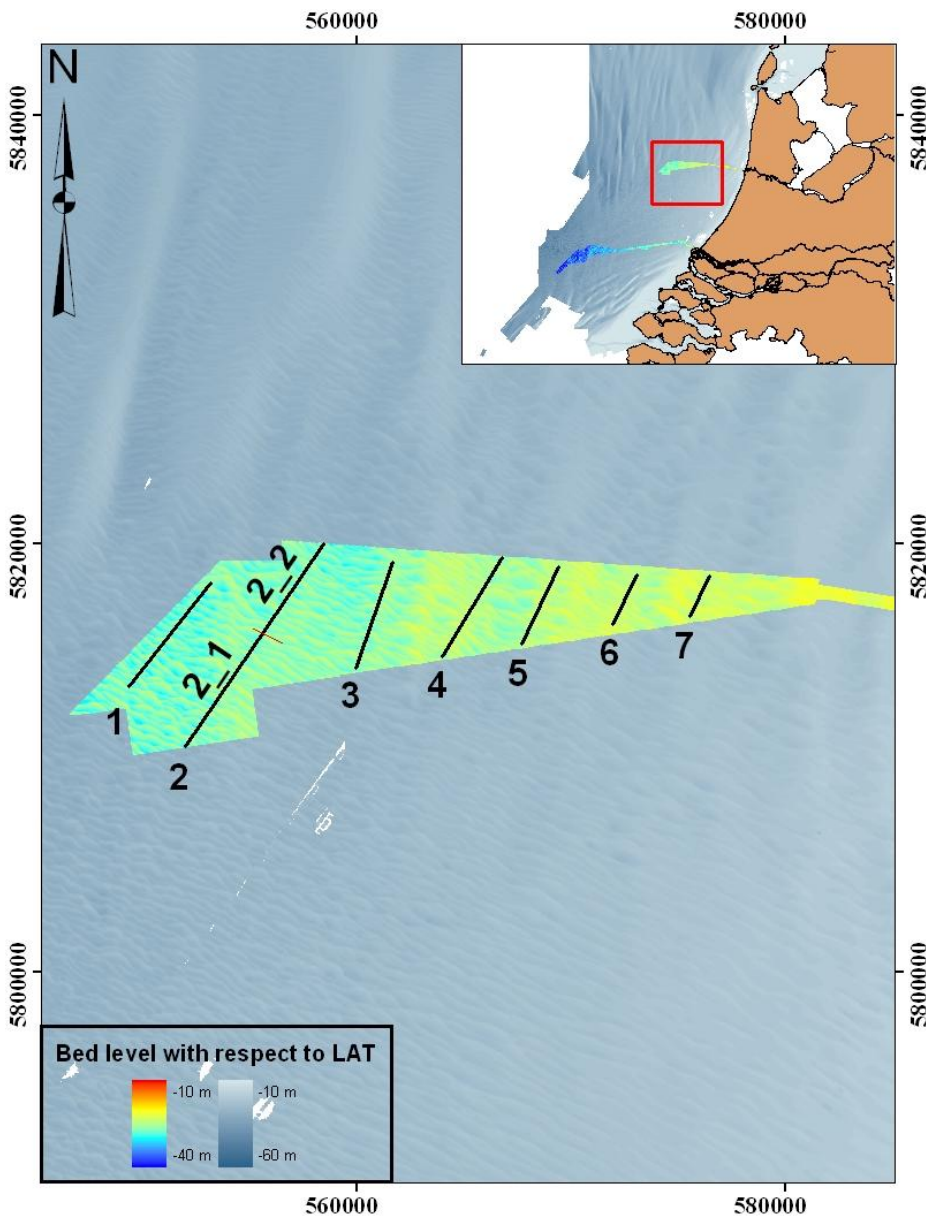
4 Morfologie, bodemdynamiek en factoren van de Noordzeegebieden

4.1 Morfologie

De zeebodem in de vaargeulen en aanvaargebieden van Rotterdam en IJmuiden is gekenmerkt door zandgolven met een kamoriëntatie ongeveer haaks op de dominante stromingsrichting, en dus ongeveer haaks op de kust. Op de zandgolven zijn al dan niet megaribbels gesuperponeerd. Deze zandgolven zijn weer gesuperponeerd op grotere, onderliggende zandbanken welke een ZZW-NNO oriëntatie hebben (Figuur 4.1 en Figuur 4.2 voor respectievelijk Rotterdam en IJmuiden).

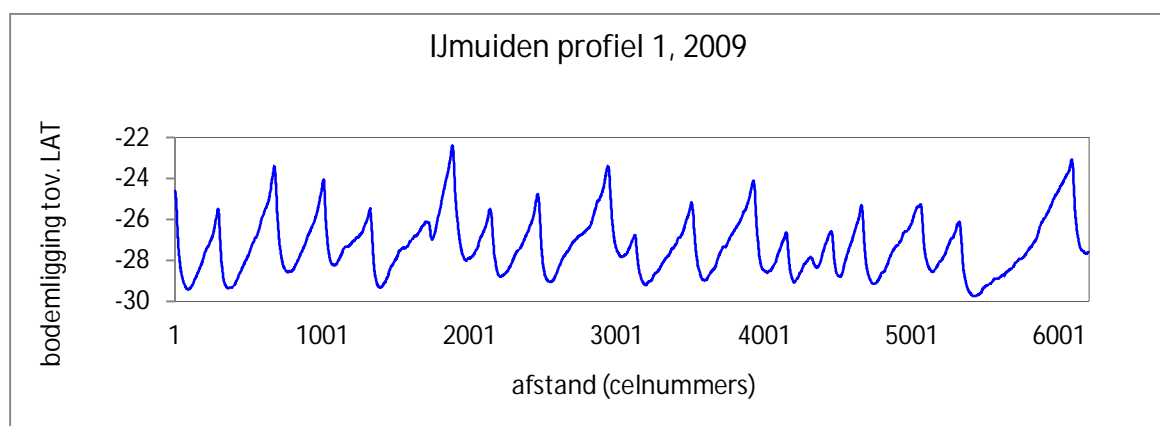


Figuur 4.1 De bathymetrie van het aanvaargebied naar Rotterdam laat een patroon zien van bodemvormen, waarin zandbanken, long bed waves en zandgolven zijn gesuperponeerd. Megaribbels zijn op deze schaal niet zichtbaar. Heldere kleuren geven de bodemligging in meters ten opzichte van LAT voor RWS data. De 9 profielen die in deze studie zijn geanalyseerd zijn weergegeven.



Figuur 4.2 De bathymetrie van de aanvaarroute naar IJmuiden laat een patroon van gesuperponeerde zandgolven op lage zandbanken zien. De heldere kleuren geven de bodemligging in meters ten opzichte van LAT van de RWS data. De profielen die in dit onderzoek geanalyseerd zijn, zijn weergegeven.

De vormen van de zandgolven variëren in lengte, hoogte en symmetrie. De dwarsdoorsnede van zandgolven gegeven in Figuur 4 dient enkel ter voorbeeld.



Figuur 4.3 Karakterisering van de zandgolven in dwarsdoorsnede in het westelijke deel van het aanvaargebied naar Ijmuiden. Het profiel loopt van zuidwest naar noordoost (zie Figuur 4.1 voor de locatie).

De analyses van de 7 profielen en de gehele tijdserie in het aanvaargebied naar Ijmuiden resulteren in zandgolf lengten van 175 - 755 m met een gemiddelde lengte voor het gehele gebied van 418 m. Deze waarden zijn de minimum en maximum golflengte per individuele zandgolf, alle gemiddeld over verscheidene opnamen in de tijd (Tabel 4.1). De zandgolfhoogten reiken van 0.9 m tot 5.0 m, met een gemiddelde hoogte voor het gehele gebied van 2.5 m (Tabel 4.1).

Tabel 4.1 Zandgolf lengten en -hoogten in het aanvaargebied van Ijmuiden, gemiddeld over de profielen en minimale/maximale waarden van individuele zandgolven per profiel. Onderaan staan de algehele gemiddelden van alle profielen in het gebied en de standaarddeviaties.

Profiel	Profiel lengte [m]	aantal zandgolven	L gemiddeld [m]	L min-max [m]	H gemiddeld [m]	H min-max [m]
1	6200	16	380	175 – 740	3.4	1.9 – 5.0
2	10000	24	395	185 – 670	3.3	1.8 – 4.9
2_1	5000	12	365	185 – 635	3.2	1.8 – 4.9
2_2	5000	11	430	220 – 685	3.4	2.5 – 4.7
3	5300	11	450	255 – 760	3.4	2.0 – 4.6
4	5000	11	428	175 – 740	2.6	1.2 – 3.6
4 short	787	2	260	230 - 300	1.9	1.0 – 2.8
5	4000	9	395	210 – 560	2.3	1.0 – 3.4
5 short	740	1	400	-	2.5	-
6	2600	7	310	210 – 365	1.5	0.9 – 2.2
6 short	746	2	245	205 – 285	1.7	1.7 – 1.8
7	2100	2	615	470 – 755	2.8	2.8 – 2.9
Gemiddeld (std dev)			418 ($\sigma=84$)		2.5 ($\sigma=0.65$)	

De zandgolven offshore Rotterdam zijn korter en hoger. De zandgolven in het aanvaargebied naar Rotterdam hebben een golflengte tussen 100 en 480 m, met een gemiddelde golflengte voor het gehele gebied van 249 m. De zandgolfhoogten liggen tussen 1.0 en 7.6 m voor individuele zandgolven over verschillende opnamen, met een gemiddelde voor het gehele gebied van 3.4 m. In het zuidwestelijke deel van het aanvaargebied van Rotterdam komen

ook *long bed waves* voor (te herkennen in Figuur 4.1). Dit zijn langere bodemvormen, met een golflengte van 1500 m en hoogten van ongeveer 5 m, die een oriëntatie hebben van ongeveer 60° ten opzichte van de dominante stromingsrichting [Knaapen et al., 2001].

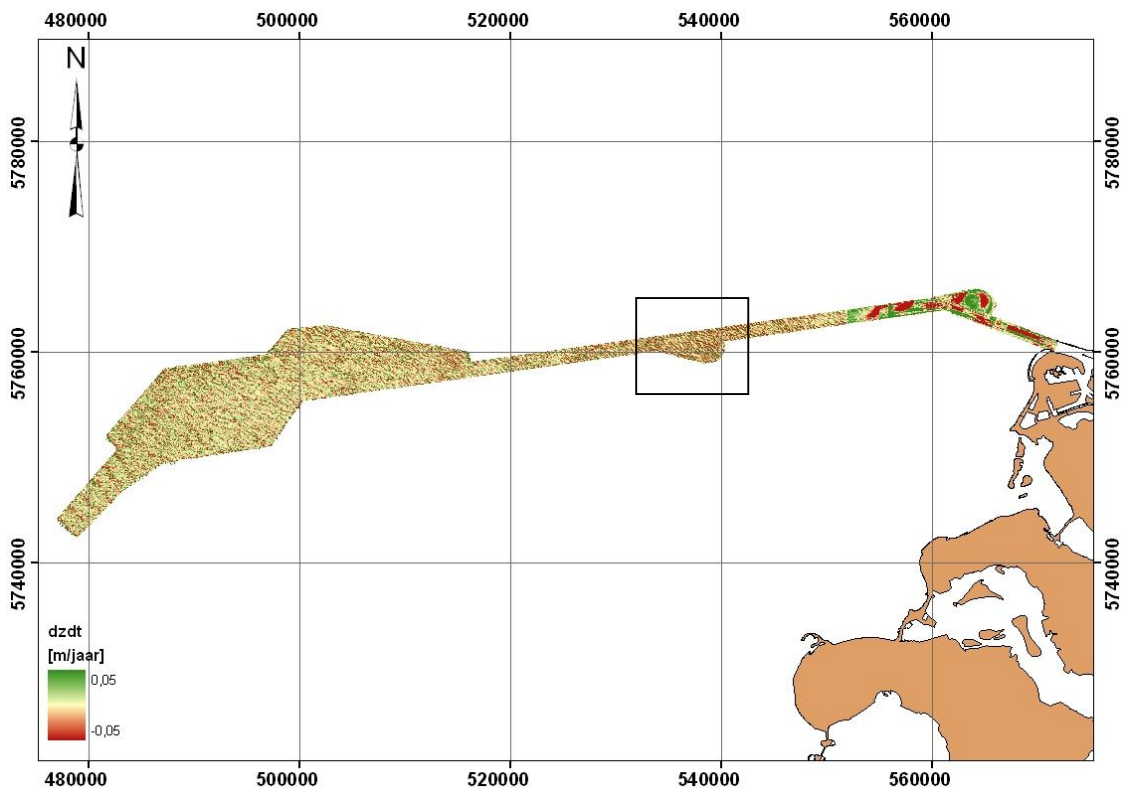
Tabel 4.2 Zandgolflengten en –hoogten in het aanvaargebied van Rotterdam, gemiddeld over de profielen en minimale/maximale waarden van individuele zandgolven per profiel. Onderaan staan de algehele gemiddelden van alle profielen in het gebied en de standaarddeviaties.

Profiel	Profiel lengte [m]	aantal zandgolven	L gemiddeld [m]	L min-max [m]	H gemiddeld [m]	H min-max [m]
1	10200	38	315	185 – 440	4.0	1.5 – 7.5
2	6000	27	200	100 – 355	3.2	1.1 – 6.1
3	5800	21	270	125 – 480	4.1	1.3 – 7.6
4	3500	15	220	100 – 365	3.5	1.7 – 6.5
5	2950	12	205	105 – 330	3.1	1.0 – 4.3
6	1450	5	225	145 – 345	3.3	2.6 – 4.2
7	2450	8	245	175 – 375	3.6	1.8 – 4.9
8	2150	8	250	170 – 335	3.3	2.2 – 4.0
9	2000	6	315	185 – 440	2.1	1.7 – 2.7
Gemiddeld (std dev)			249 ($\sigma=36$)		3.4 ($\sigma=0.67$)	

4.2 Verticale bodemdynamiek

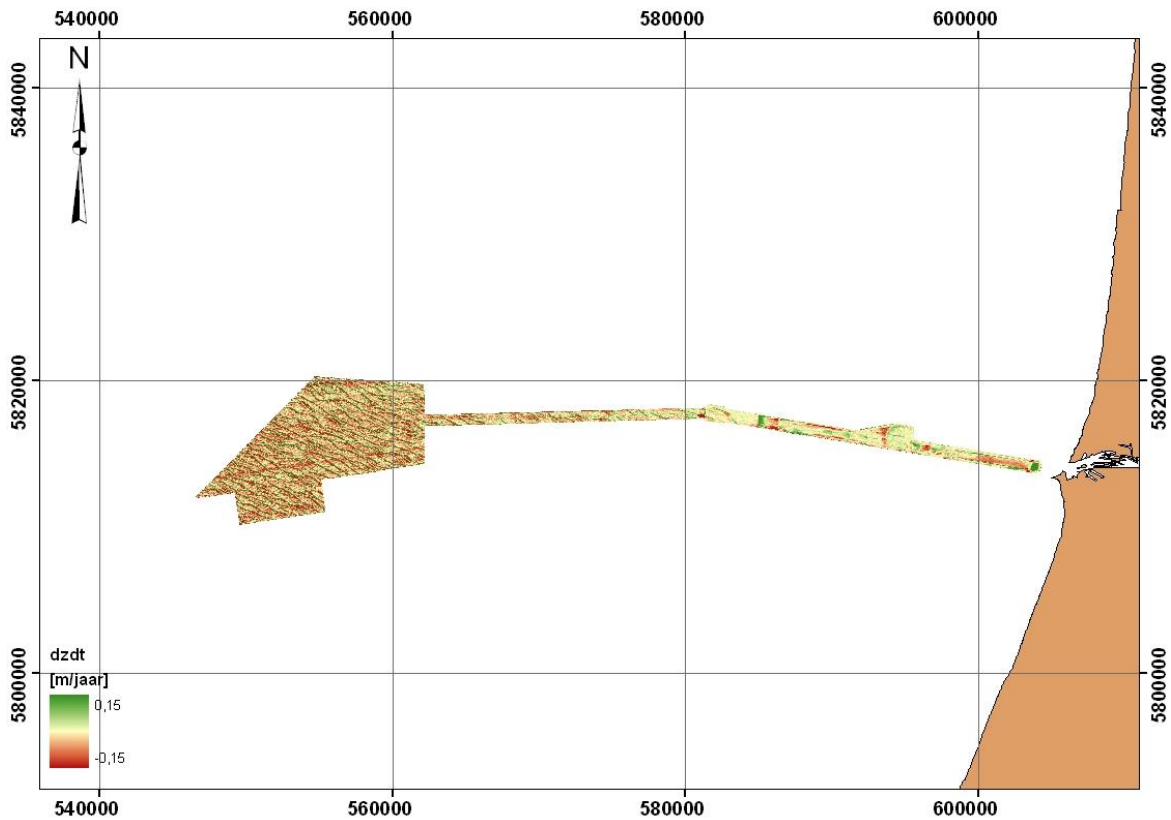
De geautomatiseerde analyse van de verticaal-dynamische trends per gridpunt resulteert in de kaarten gepresenteerd in Figuur 4.4 voor Rotterdam en Figuur 4.5 voor IJmuiden. De tegenstelling tussen zandgolfgebieden (offshore) en gebaggerde gebieden (nabij de kust) is duidelijk te zien in het patroon.

Voor het aanvaargebied naar Rotterdam liggen de trendwaarden van de natuurlijke verticale dynamiek grotendeels tussen -0.05 en +0.05 m/jaar, met extreme waarden van -0.37 en 0.42 m/jaar. Verder offshore, maar ook in de oostelijke Euro-geul nabij het gebaggerde gebied, is de dynamiek iets lager (te zien aan grotere zones met licht-geel tint in Figuur 4.4). Een hogere dynamiek wordt waargenomen (1) nabij het draaigebied in het midden van de Euro-geul (donkerdere rood- en groentinten) aangegeven door de rechthoek in Figuur 4.4, waar het minder diep is, en (2) in een patroon dat overeenkomt met het patroon van *long bed waves* in het meest zuidwestelijke deel van het aanvaargebied. In het gebaggerde deel van de geul komen waarden voor van -6 m tot +3 m, maar deze trends zeggen op dit moment nog niet zoveel (zie paragraaf 4.4.4).

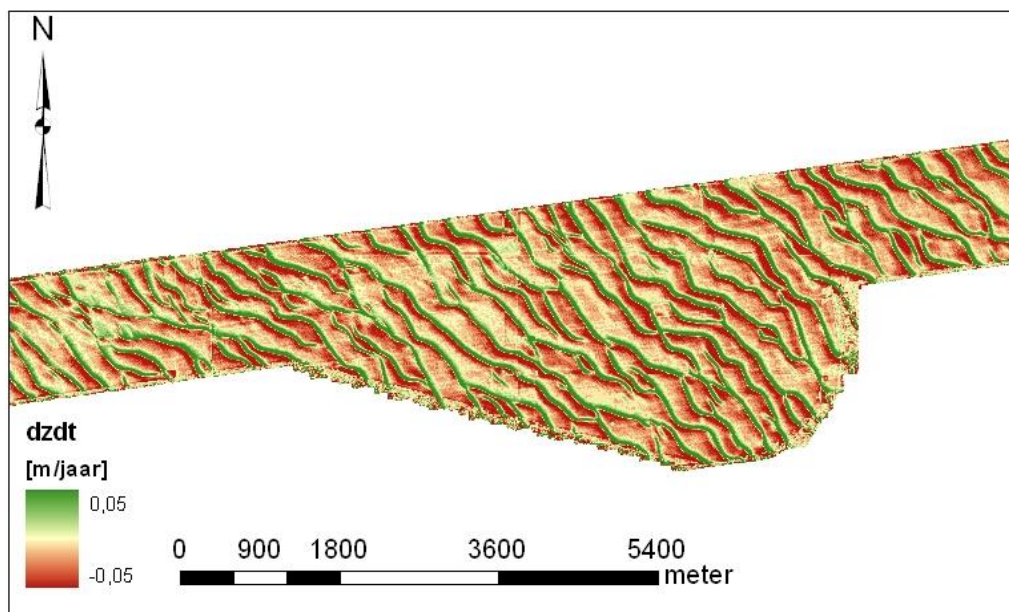


Figuur 4.4 Verticaal-dynamische trends (dz/dt) per gridpunt op een 5 x 5 m resolutie voor het aanvaargebied naar Rotterdam over de periode van 1990 – 2009. Voor visualisatie loopt de schaal van -0.05 tot 0.05 m/jaar waarbij extremen zijn ingesloten; positieve waarden (groen) geven aan waar de zeebodemtrend omhoog is (aggradatie; afnemende waterdiepten) en negatieve waarden (rood) geeft aan waar de trend omlaag is (erosie; toenemende waterdiepten). Het zwarte kader is uitvergroot in Figuur 4.6.

In het aanvaargebied naar IJmuiden is de dynamiek van de bodemvormen groter. Waarden van verticaal-dynamische trends in het offshore zandgolvengebied liggen grotendeels tussen -0.15 en 0.15 m/jaar. De extreme waarden bedragen -0.40 en 0.53 m/jaar. Ook hier is het zandgolvenpatroon te herkennen. Bij IJmuiden lijkt het offshore gebied dynamischer dan het gebied in de geul, maar deze waarneming is gebaseerd op een korte tijdserie (2006-2009) en een zeer smal gebied (enkel de IJ-geul, omdat daarbuiten slechts 1 dataset beschikbaar is). In het gebaggerde gebied zijn geen zandgolven meer te herkennen.



Figuur 4.5 Verticaal-dynamische trends (dz/dt) per gridpunt op een 5×5 m resolutie voor het aanvaargebied naar IJmuiden over de periode 2006 – 2009. Anders dan in Figuur 4.4, loopt deze schaal van -0.15 tot 0.15 m/jaar (bodenvormen bij IJmuiden zijn dynamischer); positieve waarden (groen) geven aan waar de zeebodemtrend omhoog is (aggradatie; afnemende waterdiepten) en negatieve waarden (rood) geeft aan waar de trend omlaag is (erosie; toenemende waterdiepten).



Figuur 4.6 Detail van de verticaal-dynamische trends in de aanvaarroute naar Rotterdam. Het zandgolvenpatroon is duidelijk zichtbaar in stroken van aggradatie en degradatie.

4.3 Morfodynamiek van bodemvormen (zandgolven)

4.3.1 Zandgolfmigratie

Uit de kaarten met verticaal-dynamische trends van de Noordzeegebieden volgt dat **zandgolfmigratie** het belangrijkste dynamisch effect is voor de verticale bodemdynamiek in de Noordzee.

De migratiesnelheden van individuele zandgolven voor de aanvaargebieden van IJmuiden en Rotterdam, zoals vastgesteld met de regressiemethode (paragraaf 3.3), worden gegeven in onderstaande tabellen. Ter illustratie is de migratie van alle kam- en trogpunten in profiel 1 bij Rotterdam weergegeven in Bijlage 8.3, met in de legenda de vergelijkingen van de regressielijnen per individuele kam of trog. In deze vergelijkingen is het getal vóór de T de richtingscoëfficiënt van de regressielijn, die de migratiesnelheid in m/jaar aangeeft (een positieve waarde betekent migratie naar noordoost; een negatieve waarde naar zuidwest). Uit de goede fit van de regressielijnen blijkt dat de migratie van kam- en trogpunten ieder een duidelijke lineaire trend volgen. (De waarden van de 'Goodness of Fit', R^2 , liggen tussen 0.15 en 0.78 met een gemiddelde van 0.33; de R^2 geeft aan in hoeverre er een trend in de data te onderscheiden is in combinatie met de benadering van de datapunten door het lineaire regressiemodel. Het lineaire regressiemodel is in staat de locatie van de kam- en trogpunten te benaderen tot afstanden tussen 0.001 m en 28 m met een gemiddelde van 2.4 m (dat is 0.76% van de zandgolflengte)).

De zandgolven op dit profiel offshore Rotterdam zijn matig mobiel, met migratiesnelheden tussen -0.9 en 1.2 m/jaar. De migratie van de kampunten vertoont een regelmatiger verloop dan die van de trogpunten. Ook is de fit van de regressielijnen beter voor de surveys van ná het jaar 2000. Dit suggereert dat de migratieresultaten op basis van multibeam data nauwkeuriger zijn dan de migratieresultaten op basis van singlebeam data (vóór 1996). Dit verschil is met name herkend in de data van IJmuiden en de gebieden RNJ en RSS voor Rotterdam.

De migratiesnelheden van individuele kam- en trogpunten van zandgolven op alle profielen voor Rotterdam is -0.9 m/jaar (naar zuidwest) tot 3.0 m/jaar (naar noordoost), met een gemiddelde verplaatsing voor het hele gebied van 0.8 m/jaar naar het noordoosten (Tabel 4.3). Migratie naar het zuidwesten komt enkel voor in de meest zeewaartse profielen 1 t/m 4. In de profielen dicht bij de kust is de migratie altijd naar het noordoosten. Over het algemeen neemt de migratiesnelheid naar de kust toe.

Tabel 4.3 Gemiddelde migratiesnelheden van kam- en trogpunten voor het aanvaargebied van Rotterdam.

Profiel	Profiel lengte [m]	Aantal zandgolven [-]	Gemiddelde migratie [m/yr]	Min-max Migratie [m/yr]
1	10200	38	-0.1	-0.9 – 1.2
2	6000	27	0.0	-0.9 – 1.3
3	5800	21	0.3	-0.6 – 1.1
4	3500	15	0.6	-0.7 – 1.1
5	2950	12	0.9	0.2 – 1.6
6	1450	5	0.7	0.3 – 0.9
7	2450	8	1.2	0.5 – 3.0
8	2150	8	0.9	0.6 – 1.6
9	2000	6	2.1	1.6 – 2.6
Gemiddeld (std dev)			0.8 ($\sigma=0.7$)	

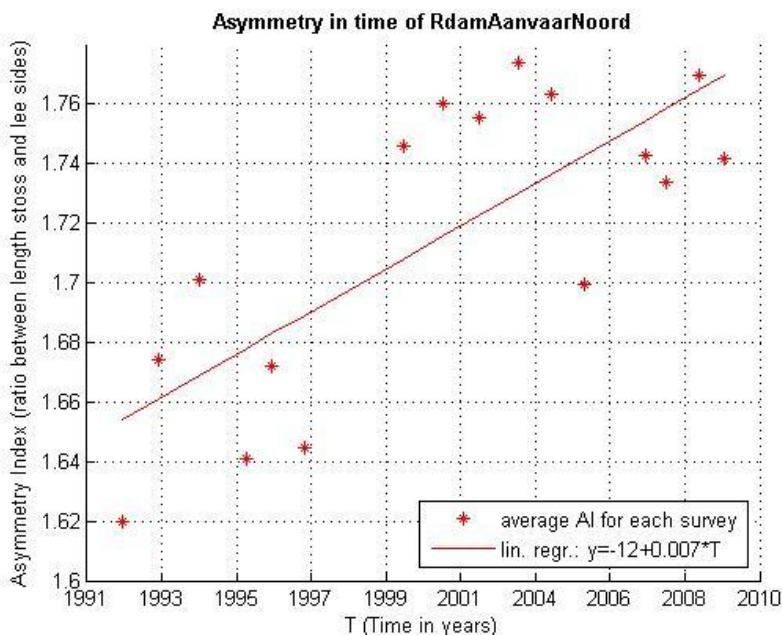
Voor het aanvaargebied naar IJmuiden variëren de migratiesnelheden van individuele zandgolven van 0.4 tot 3.1 m/jaar, in alle gevallen naar het noordoosten (Tabel 4.4). De gebiedsgemiddelde migratiesnelheid is bij IJmuiden hoger dan bij Rotterdam, namelijk 1.4 m/jaar. Een toename in migratiesnelheid in kustwaartse richting is herkenbaar in de minimale en maximale snelheden van individuele punten, al wijken de profielgemiddelde waarden voor profielen 1 en 7 hiervan af.

Tabel 4.4 Gemiddelde migratiesnelheden van kam- en trogpunten voor het aanvaargebied van IJmuiden.

Profiel	Profiel lengte [m]	aantal zandgolven [-]	Gemiddelde migratie [m/yr]	Min-max Migratie [m/yr]
1	6200	16	1.3	0.5 - 2.3
2	10000	24	1.1	0.4 - 1.7
2_1	5000	12	1.2	0.7 - 1.6
2_2	5000	11	1.0	0.6 - 1.3
3	5300	11	1.4	1.0 - 2.3
4	5000	11	1.6	0.8 - 2.6
5	4000	9	1.9	0.9 - 3.1
6	2600	7	2.1	1.6 - 2.8
7	2100	2	1.5	1.2 - 1.8
Gemiddeld (std dev)			1.4 ($\sigma=0.4$)	

4.3.2 Vormverandering (asymmetrie)

Ook al is het een zeer subtiel verschil, de asymmetrie van zandgolven offshore Rotterdam lijkt toe te nemen in de tijd. Een toename van de asymmetrie in de tijd suggereert dat – bij gelijke golflengte en golfhoogte - de loefzijde vlakker wordt en de lijzijde steiler wordt, wat wijst op non-lineair gedrag van zandgolven. Of deze bevinding systematisch is voor zandgolven in de Noordzee of slechts lokaal, en of deze kleine toename betekenis heeft, moet nog verder worden onderzocht.



Figuur 4.7 Asymmetrie van zandgolven in het aanvaargebied van Rotterdam ('profiel 3') in de tijd. De asymmetrieindex is de lengte van de loefzijde gedeeld door de lengte van de lijzijde. De resultaten laten een subtiel toename zien.

4.4 Onderzoek naar factoren in de Noordzeegebieden

4.4.1 Natuurlijke omgevingsparameters

De natuurlijke omgevingsparameters zoals afgeleid uit de data (zie paragrafen 2.2 en 3.4.1) worden opgesomd in Tabel 4.5 voor het aanloopgebied naar IJmuiden en Tabel 4.6 voor het aanloopgebied naar Rotterdam. De lokale condities variëren sterker bij Rotterdam dan bij IJmuiden. Zo is het maximale verschil in de profielgemiddelde waterdiepte 9.4 m bij Rotterdam en slechts 3.4 m bij IJmuiden en de spreiding in de mediane korrelgrootte 144 μm voor Rotterdam en slechts 51 μm voor IJmuiden. Een andere maat hiervoor is ook de standaard deviatie van de parameters in de onderstaande tabellen.

Tabel 4.5 Omgevingsparameters voor het aanloopgebied naar IJmuiden per profiel: profielgemiddelde waterdiepte, maximale stroomsnelheid van het M2-getij (U_{maxM2}), ellipticiteit van het M2-getij ($\epsilon M2$), maximale stroomsnelheid van het M4-getij (U_{maxM4}), ellipticiteit van het M4-getij, relatief faseverschil tussen de M4 en M2 getijden (Φ_{M4-M2}), residuele stroomsnelheid van het getij (Z0), mediane korrelgrootte van de zandfractie (D_{50}) en de relatieve tijd dat golven bijdragen aan sediment transport (Tq). De onderste regel geeft de standaard deviatie (σ) van de parameters aan.

Profiel	diepte [m]	U_{maxM2} [m/s]	$\epsilon M2$ [-]	U_{maxM4} [m/s]	$\epsilon M4$ [-]	Φ_{M4-M2} [°]	Z0 [m/s]	D_{50} [μm]	Tq [%]
1	27.0	0.66	0.018	0.047	0.51	339	0.019	309	16.8
2	26.5	0.66	0.009	0.047	0.54	342	0.018	308	18.4
2_1	26.5	0.66	0.006	0.046	0.55	338	0.019	317	18.9
2_2	26.6	0.65	0.012	0.047	0.54	345	0.018	300	17.7
3	26.0	0.65	0.001	0.046	0.58	346	0.019	288	19.0
4	24.5	0.64	0.006	0.046	0.62	352	0.018	278	23.5
5	24.3	0.64	0.011	0.045	0.64	355	0.017	268	23.7
6	23.8	0.63	0.012	0.043	0.67	354	0.022	271	25.9
7	23.6	0.63	0.005	0.041	0.76	361	0.029	266	26.5
σ	1.4	0.011	0.0049	0.0018	0.080	7.8	0.0036	20	3.7

Tabel 4.6 Omgevingsparameters voor het aanloopgebied naar Rotterdam per profiel: profielgemiddelde waterdiepte, maximale stroomsnelheid van het M2-getij ($U_{max}M2$), ellipticiteit van het M2-getij ($\epsilon M2$), maximale stroomsnelheid van het M4-getij ($U_{max}M4$), ellipticiteit van het M4-getij, relatief faseverschil tussen de M4 en M2 getijden (Φ_{M4-M2}), residuele stroomsnelheid van het getij (Z0), mediane korrelgrootte van de zandfractie (D_{50}) en de relatieve tijd dat golven bijdragen aan sediment transport (Tq). De onderste regel geeft de standaard deviatie (σ) van de parameters aan.

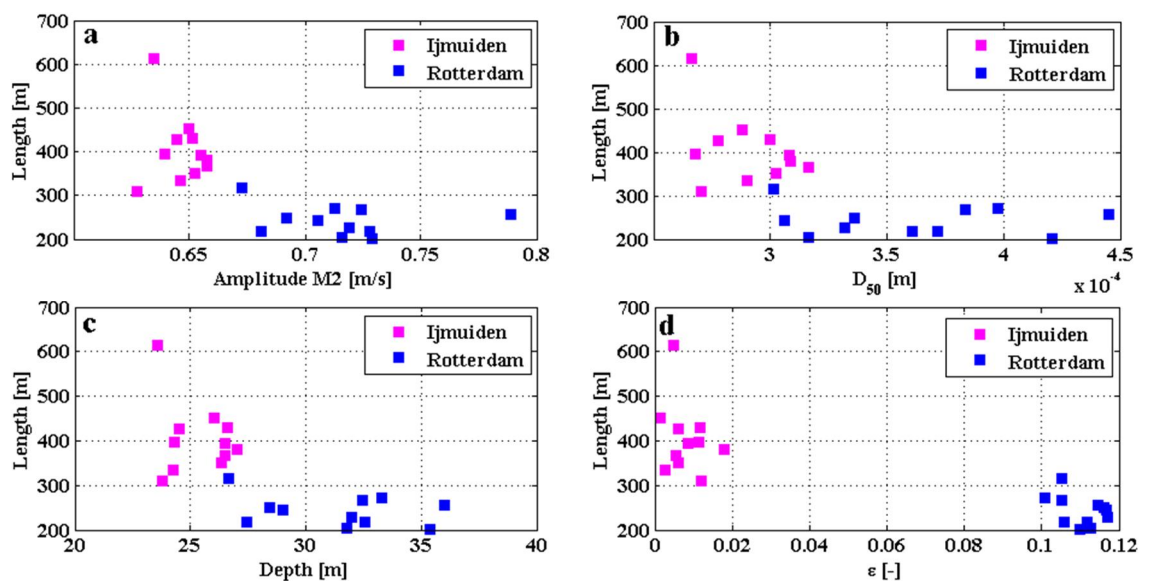
Profiel	diepte [m]	$U_{max}M2$ [m/s]	$\epsilon M2$ [-]	$U_{max}M4$ [m/s]	$\epsilon M4$ [-]	Φ_{M4-M2} [°]	Z0 [m/s]	D_{50} [µm]	Tq [%]
R1	36.0	0.79	0.11	0.060	0.07	115	0.019	445	2.5
R2	35.4	0.73	0.11	0.053	0.09	130	0.040	421	2.5
R3	33.3	0.71	0.10	0.054	0.11	124	0.044	398	3.9
R4	32.6	0.73	0.11	0.057	0.16	122	0.041	372	4.2
R5	31.8	0.72	0.11	0.056	0.19	121	0.039	317	4.2
R6	32.0	0.72	0.12	0.057	0.21	120	0.039	332	4.1
R7	29.0	0.71	0.12	0.057	0.25	116	0.039	306	7.9
R8	28.4	0.69	0.12	0.058	0.27	110	0.034	336	10.0
R9	26.6	0.67	0.11	0.059	0.27	102	0.034	301	12.8
σ	3.2	0.032	0.0059	0.0021	0.078	8.3	0.0074	53	3.6

De M2 stroming is sterker voor Rotterdam dan voor IJmuiden, met een maximum van 0.79 m/s voor Rotterdam versus 0.66 m/s voor IJmuiden. In beide gebieden neemt de stroomsnelheid af in kustwaartse richting. De afname is groter voor Rotterdam (evenals diepte, die hangen met elkaar samen).

De ellipticiteit van de getijdenellipsen is in beide gebieden klein, wat duidt op een vooral heen-en-weergaande getijstroming. Bij IJmuiden zijn de ellipsen van het M2 getij sterker unidirectioneel dan bij Rotterdam. Overigens zijn de getij-ellipsen binnen het aanvaargebied van IJmuiden nagenoeg parallel aan elkaar, terwijl deze bij Rotterdam in kustwaartse richting draaien naar een meer oostelijke richting (zie Figuur 2.4). Het faseverschil tussen het M2 en het M4 getij is per gebied min of meer constant, maar verschilt meer dan 200° tussen beide gebieden. Uit de berekening van het potentieel zandtransport door oppervlaktegolven (zie Bijlage 8.1) blijkt dat de invloed van oppervlaktegolven bij IJmuiden groter is dan bij Rotterdam. Voor de gebieden als geheel, kunnen golven bij IJmuiden voor eenvijfde van de tijd bijdragen aan zandtransport, en bij Rotterdam voor eentwintigste van de tijd.

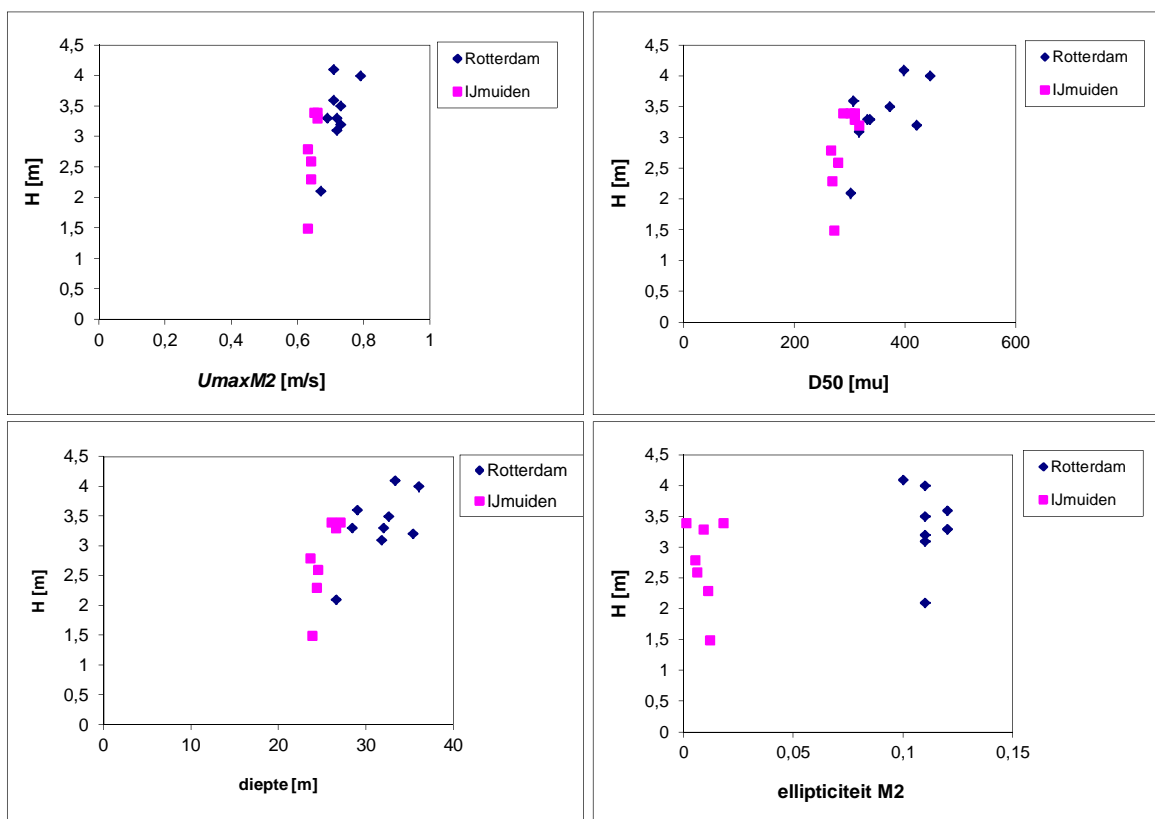
4.4.2 Bivariate vergelijking van parameters met zandgolflengte en zandgolfmigratie

Wanneer de omgevingsparameters worden geplot tegen de zandgolflengten (Figuur 4.8), zandgolfhogten (Figuur 4.9) en zandgolfmigratiesnelheden (Figuur 4.10), vormen de observaties van IJmuiden en Rotterdam twee duidelijk gescheiden groepen. Zowel de zandgolflengten als de lokale condities zijn verschillend. De grotere variatie in omgevingsparameters bij Rotterdam, die al bleek uit de tabellen, is ook duidelijk in de plots. Deze plots suggereren dat langere zandgolven voorkomen bij lagere stroomsnelheden, fijner sediment en kleinere waterdiepten.



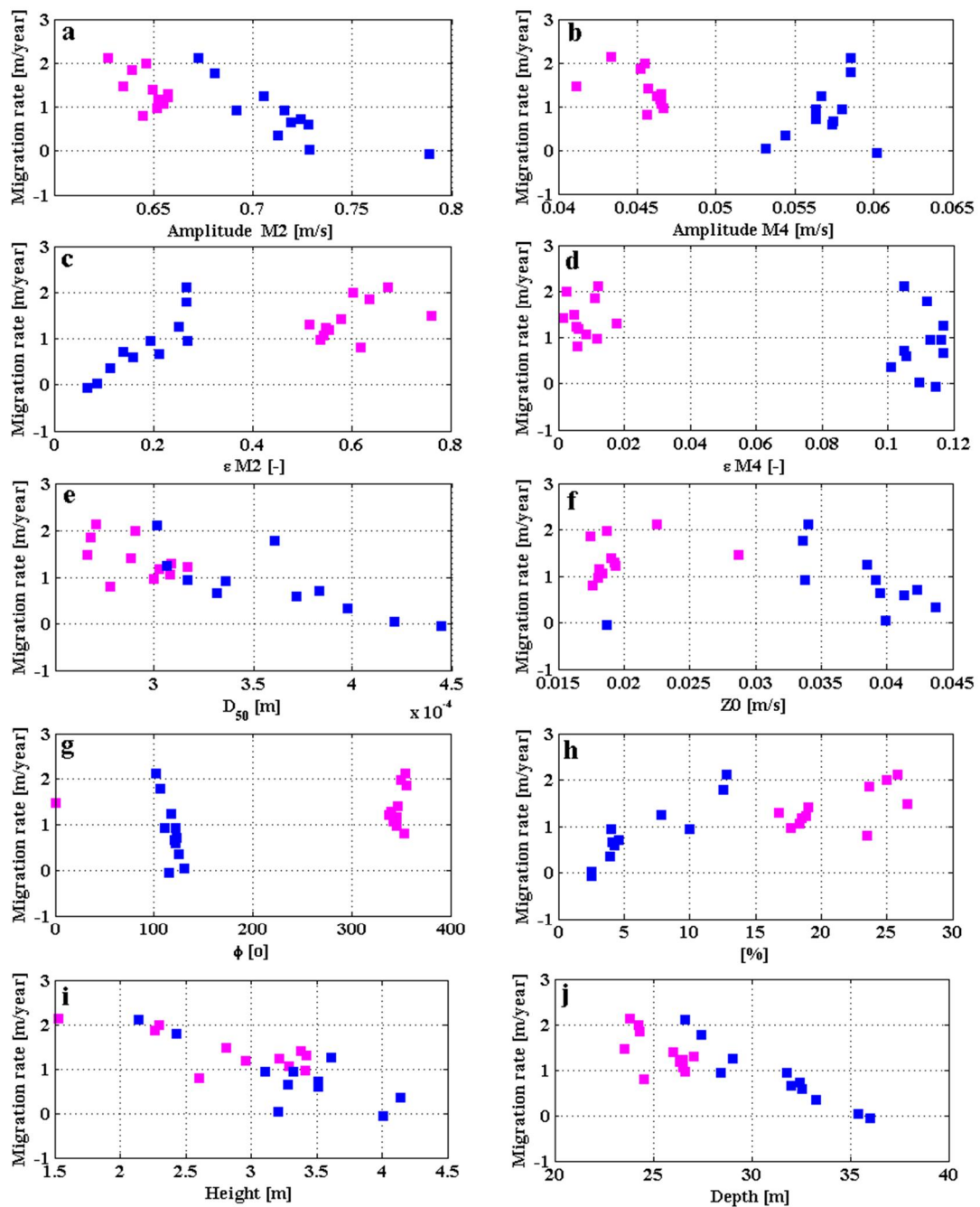
Figuur 4.8 Bivariate plots van omgevingsfactoren versus zandgolflengte voor Rotterdam (blauw) en IJmuiden (roze); (a) maximale stroomsnelheid van het M2-getij, (b) mediane korrelgrootte (in 10^{-4} m), (c) waterdiepte, en (d) ellipticiteit van het M2-getij.

Plots van dezelfde parameters versus zandgolfhogte (Figuur 4.9) suggereren een positieve correlatie met waterdiepte en korrelgrootte. Er is geen correlatie tussen zandgolfhogte en de stroomsnelheid van het M2-getij of de ellipticiteit.



Figuur 4.9 Bivariate plots van omgevingsfactoren versus zandgolfhoogte voor Rotterdam (blauw) en IJmuiden (roze); (a) maximale stroomsnelheid van het M2-getij, (b) mediane korrelgrootte (in 10^{-6} m), (c) waterdiepte, en (d) ellipticiteit van het M2-getij.

Een groter aantal omgevingsparameters is geanalyseerd op correlatie met snelheid van zandgolfmigratie (Figuur 4.10). De spreiding van de migratiesnelheden voor Rotterdam is groter dan voor IJmuiden; de variatie binnen het aanvaargebied naar IJmuiden is te klein om correlaties te kunnen onderscheiden. Beide gebieden tesamen geven een beter beeld. De negatieve correlaties, die de bivariate plots laten zien, zouden wijzen op een lagere migratiesnelheid bij toenemende stroomsnelheid van het M2-getij, toenemende mediane korrelgrootte, toenemende zandgolfhoogte en toenemende waterdiepte. De potentiële bijdrage door oppervlaktegolven correleert zwak positief: hoe hoger de bijdrage van oppervlaktegolven, des te hoger de migratiesnelheid. Eigenschappen die niet lijken te correleren met migratiesnelheden zijn de stroomsnelheid van het M4-getij, de ellipticiteiten van zowel het M2- als het M4-getij, en het faseverschil. De plots voor deze parameters laten variatie in de migratiesnelheid zien voor een nagenoeg gelijke waarden van de parameters. Voor deze parameters vormen Rotterdam en IJmuiden duidelijke clusters, wat enkel wijst op grote verschillen in condities tussen de gebieden. Verder lijkt de residuele stroming geen rol te spelen in de migratiesnelheden, omdat een wolk van migratiesnelheden voorkomt over een groot bereik van verschillende reststroomsnelheden (0.015 – 0.045 m/s). Dit is opmerkelijk, omdat theoretisch de residuele stroming verantwoordelijk zou zijn voor zandgolfmigratie [Németh et al., 2007].



Figuur 4.10 Bivariate plots van omgevingsfactoren versus zandgolfmigratiesnelheid voor Rotterdam (blauw) en IJmuiden (roze); (a) maximale stroomsnelheid van het M2-getij, (b) maximale stroomsnelheid voor het M4-getij, (c) ellipticiteit van het M2-getij (d) ellipticiteit van het M4-getij, (e) mediane korrelgrootte (in 10^{-4} m), (f) residuele stromingssnelheid Z_0 , (g) relatieve faseverschil tussen het M2 en M4-getij, (h) relatieve bijdrage van oppervlaktegolven aan sedimenttransport, (i) hoogte van de zandgolven zelf en (j) waterdiepte.

De afzonderlijke clusters van Rotterdam en IJmuiden laten zien dat voor de meeste parameters, de verschillen in zandgolfmigratie en lokale condities groter zijn tussen de aanvaargebieden en -geulen bij Rotterdam en IJmuiden dan binnen beide gebieden. De verschillen binnen de gebieden voor Rotterdam zijn groter dan die bij IJmuiden; en grotere verschillen kunnen leiden tot beter te identificeren relaties van oorzaak en gevolg.

Deze bivariate plots suggereren slechts mogelijke relaties, maar verklaren niet welke factoren werkelijk een rol spelen in de migratie van zandgolven, ten eerste omdat werkelijke relaties niet met zekerheid uit deze plots volgen, en ten tweede omdat we met deze spreiding van punten een zeer klein bereik beslaan en dus generieke relaties anders kunnen uitpakken. De multivariate principal component analyse (paragraaf 4.4.3) kwantificeert de nieuw gedefinieerde (onafhankelijke) variabelen en stelt een mate van belangrijkheid vast.

4.4.3 Principal Component Analysis en Multivariate Regression

Omdat de toepassing van de Principal Component Analysis op zandgolven een eerste aanzet is en nog beter getest moet worden, en omdat de methode beter presteert voor grote datasets (terwijl de in totaal 16 profielen in twee gebieden een zeer kleine dataset vormen), moeten de resultaten als voorlopig beschouwd worden. De Principal Component Analysis (PCA) en de multivariate regressie (PCR) van de hoofdcomponenten (factoren) zijn nadrukkelijk nog onderdeel van lopend onderzoek. Dit onderdeel zal verder worden uitgewerkt in het KPP2012-project.

Voorlopige resultaten van de PCR voor IJmuiden en Rotterdam laten zien dat 2 hoofdcomponenten 80% van de spreiding in de migratie kunnen bepalen en dat 3 hoofdcomponenten nodig zijn voor 90% van de spreiding in de migratie van zandgolven. Overige componenten dragen zo weinig bij dat deze zijn weggelaten uit de voorlopige analyse. Het meenemen van slechts 3 principal components wil zeggen dat 3 assen rond welke de variabelen zijn georiënteerd [Jolliffe, 2002]) worden meegenomen, maar nog steeds alle input variabelen (Tabel 4.5; Tabel 4.6) op correlatie worden onderzocht.

De PCR-resultaten voor zowel migratiesnelheid als zandgolflengte voor de gebieden IJmuiden, Rotterdam en beide gebieden gecombineerd, staan in Tabel 4.7. De grootte van de regressiecoëfficiënten van de parameters geeft de relatieve bijdrage van de verschillende omgevingsparameters aan. Dit is de prioritering van factoren (onderzoeksvraag 3). Een grotere absolute waarde van de coëfficiënten geeft aan dat deze parameters een grotere rol spelen in de migratiesnelheid en/of de lengte van zandgolven. Een kleine waarde betekent dat een parameter nauwelijks een rol speelt. Het teken van de coëfficiënten bepaalt de aard van de relatie: een positieve regressiecoëfficiënt geeft dat migratiesnelheid of zandgolflengte toenemen met de grootte van de omgevingsparameter, een negatieve coëfficiënt geeft het omgekeerde aan. Op deze manier worden de correlaties tussen migratiesnelheid of zandgolflengte en de omgevingsparameters gekwantificeerd. De "Goodness of Fit", R^2 , geeft aan dat de combinatie van beide gebieden de beste resultaten oplevert (Tabel 4.7).

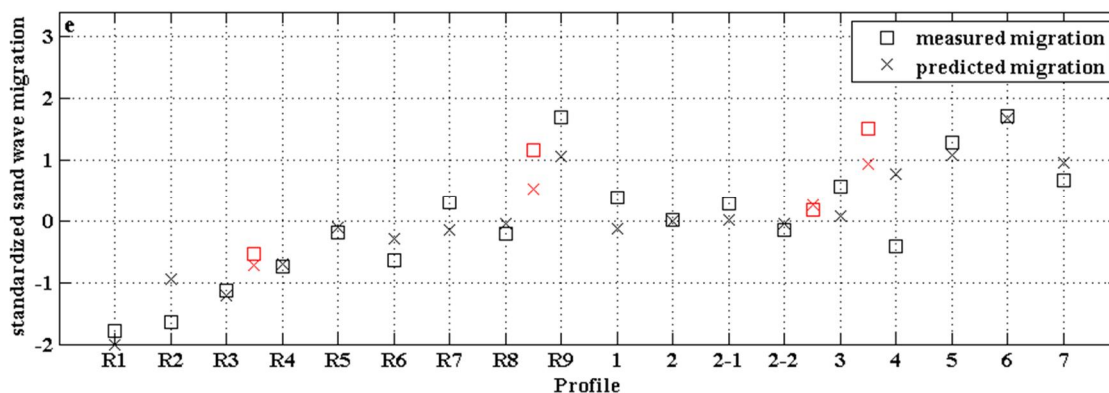
Voor de zandgolven bij IJmuiden en Rotterdam, verklaren de parameters zandgolfhoogte, mediane korrelgrootte en waterdiepte 90% van de variatie in de migratiesnelheid (de variabelen die het meest bijdragen zijn onderstreept in tabel 4.7, kolom migratie onder 'gecombineerd'). Factoren die ook bijdragen maar ondergeschikt zijn, zijn de maximale stroomsnelheid van het M2-getij, de residuele stromingssnelheid (Z0) en de potentiële bijdrage aan zandtransport door oppervlaktegolven. Overige variabelen dragen nauwelijks bij aan de verklaring van de migratie.

NB. Dit zijn de resultaten van een eerste, niet-definitieve analyse.

Tabel 4.7 Voorlopige regressiecoëfficiënten van de PCR. De componenten die samen 90% van de dataspreiding verklaren, zijn geselecteerd. De onderstreepte getallen zijn geïnterpreteerd als factoren die een dominante rol spelen in de lengte en migratiesnelheid van zandgolven. Het kwaliteitslabel R^2 , de Goodness of Fit, geeft aan dat de combinatie van Rotterdam en IJmuiden betere resultaten oplevert. Let op: dit zijn voorlopige resultaten. Omdat de PCR onderdeel is van lopend onderzoek, kunnen deze resultaten nog niet als definitief worden beschouwd.

Parameter	IJmuiden		Rotterdam		Gecombineerd	
	Migratie	Lengte	Migratie	Lengte	Migratie	Lengte
	n PC's =3	n PC's =2	n PC's =3	n PC's =3	n PC's =3	n PC's =3
Constante	-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Diepte	<u>-0.0933</u>	-0.1017	<u>-0.1709</u>	<u>-0.1764</u>	<u>-0.1898</u>	-0.0537
$U_{max M2}$	<u>-0.1498</u>	-0.0261	<u>-0.1642</u>	<u>-0.3914</u>	-0.1528	0.0157
ε_{M2}	<u>0.2972</u>	<u>-0.4560</u>	-0.0930	<u>-0.2419</u>	0.0686	<u>-0.7270</u>
$U_{max M4}$	-0.0578	-	0.0454	-	0.0364	-
ε_{M4}	0.0458	-	<u>0.1336</u>	-	0.0653	-
Φ_{M4-M2}	0.0460	-	<u>-0.1563</u>	-	-0.0662	-
Z_0	0.0242	-	0.0215	-	0.1225	-
D_{50}	<u>-0.0935</u>	-0.081	<u>-0.1202</u>	0.1547	<u>-0.2463</u>	-0.1246
Tq	<u>0.0924</u>	-	<u>0.1868</u>	-	0.1093	-
Hoogte	<u>-0.2020</u>	-	<u>-0.1527</u>	-	<u>-0.4128</u>	-
R^2	0.5175	0.2845	0.9356	0.2903	0.7998	0.7189

Deze regressiecoëfficiënten leveren een modelvergelijking die in het algemeen de migratie van de zandgolven zou kunnen beschrijven. Om de voorspellende waarde van het model te testen, wordt de migratiesnelheid in 4 nieuwe profielen (2 voor IJmuiden en 2 voor Rotterdam) voorspeld met het opgestelde regressiemodel (de rode kruisjes in Figuur 4.11). In Figuur 4.11 worden zowel de empirische zandgolfmigratie, zoals geanalyseerd uit de meetdata, als de door dit model voorspelde migratie per raai weergegeven.

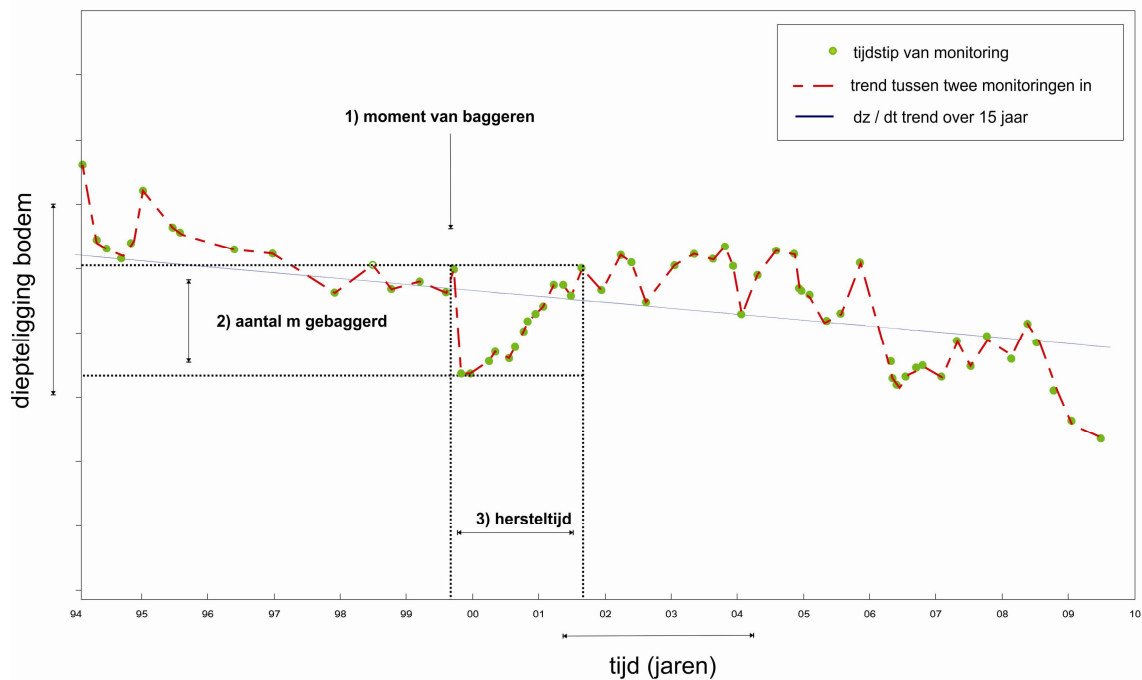


Figuur 4.11 Voorspelde migratiesnelheden voor nieuwe profielen (rood) op basis van het empirische regressiemodel geanalyseerd uit de profielen bij Rotterdam en IJmuiden (zwarte punten).

Deze voorspelde waarden kunnen worden vergeleken met nieuwe analyses van de zandgolfmigratie in deze 4 (nieuwe) profielen. De voorspellingen van de westelijke profielen (Rotterdam tussen profielen 3 en 4; IJmuiden tussen 2 en 3) zijn het best. De migratiesnelheden voor kustnabije profielen worden minder goed voorspeld, maar de afwijking tussen voorspelling en meting is niet groter dan de afwijkingen voor de oorspronkelijke raaien (zwarte punten).

4.4.4 Baggeractiviteiten, hersteltijd en sedimentatiesnelheid

De berekende verticale trends zijn lineaire trends gefit door de bathymetrische opnames in de tijd. Echter, de aanname van een lineaire trend is alleen acceptabel bij een onveranderlijke trend of een zeer beperkt aantal waarnemingen in de tijd [Van Dijk et al., 2011]. Langere tijdseries laten het toe meer variabiliteit te herkennen, dus bij meer waarnemingen moet het verloop van de trend eerst onderzocht worden. Zo worden door baggeren (zie Figuur 4.12) veranderingen in bodemligging veroorzaakt die groter zijn dan de natuurlijke variatie. Deze niet-natuurlijke veranderingen beïnvloeden de berekening van de verticaal-dynamische trend negatief. In dynamische gebieden treedt er na het baggeren een periode op van sedimentatie. De hersteltijd wordt hier gedefinieerd als de tijd die een gebied nodig heeft om weer de diepte van vóór het baggeren te bereiken.



Figuur 4.12 Voorbeeld van het effect van baggeren op de bodemligging voor 1 puntlocatie. Na het moment van baggeren (1) waarbij een aantal meters is gebaggerd (2) treedt herstel op (hersteltijd, 3). Uit (1) en (2) is de sedimentatiesnelheid te berekenen.

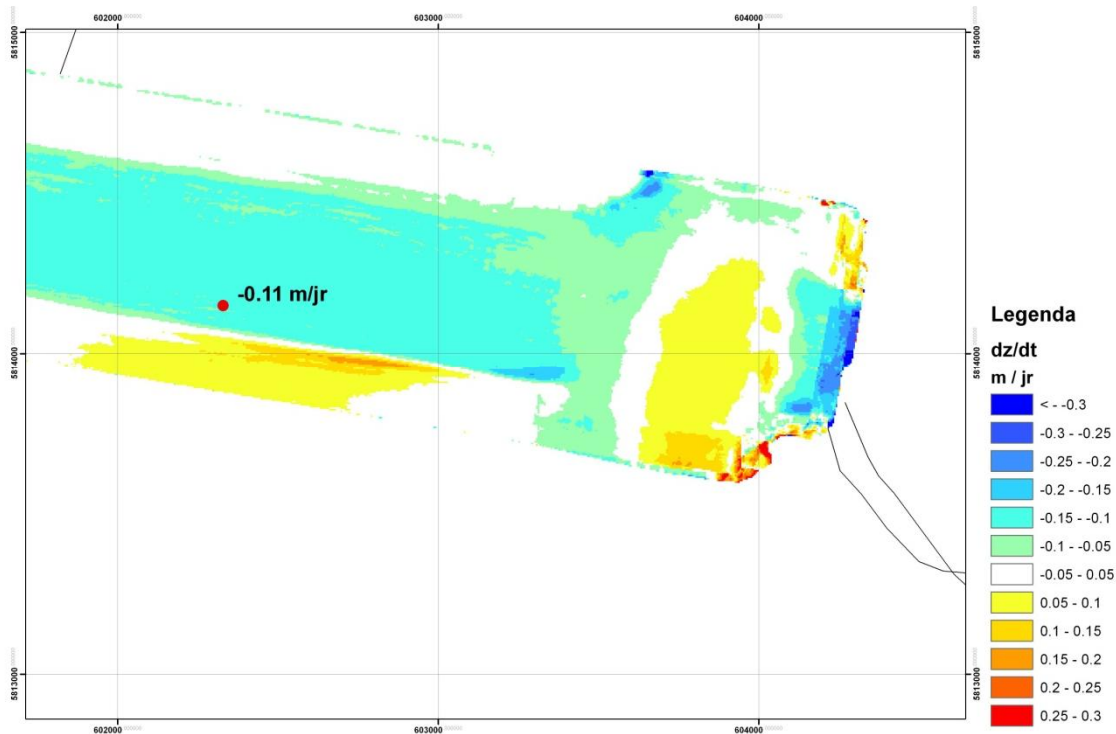
De sedimentatie snelheid (S_v) voor een puntlocatie in het gebaggerde gebied kan uitgerekend worden met de formule

$$S_v = dz / dt$$

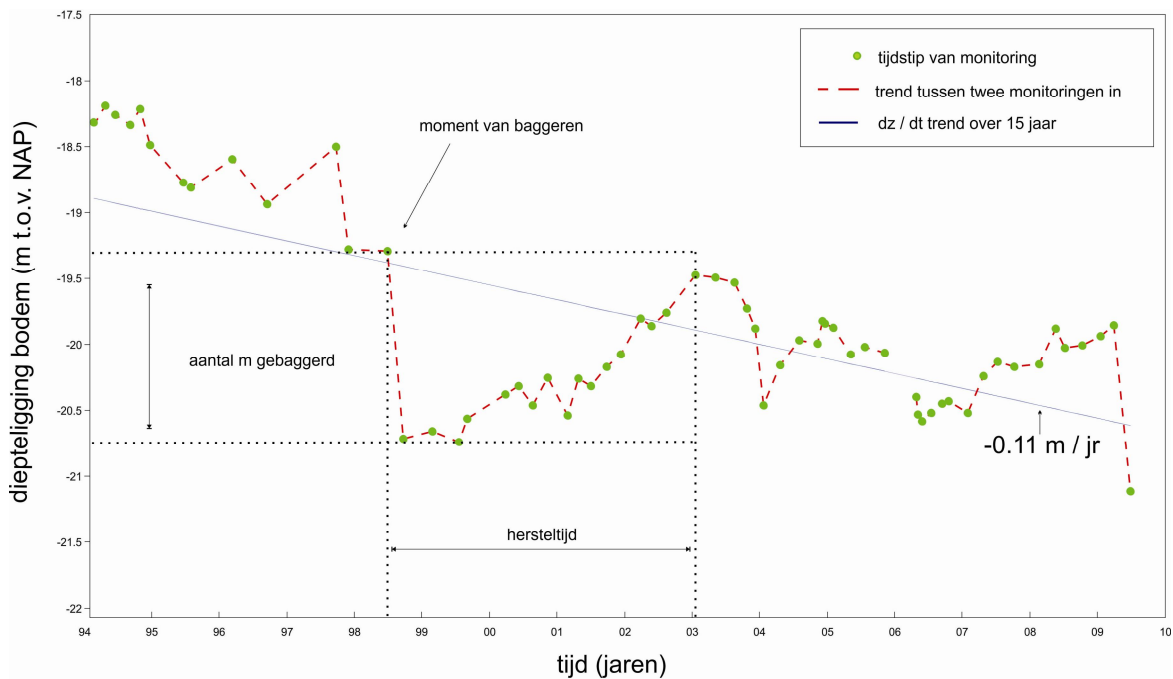
waarin dz het aantal meters weggebaggerd sediment is en dt de tijd die het gebied nodig heeft om te herstellen tot aan de waterdiepte van vóór de baggeringreep. Wanneer men inzicht heeft in de periode van herstel na het baggeren kan men hiermee de meetstrategie aanpassen (Hoofdstuk 6). Er zijn dan minder monitoringspeilingen nodig om de verondieping in de gaten te houden.

Sedimentatiesnelheid aanvoergeul voor de kust van IJmuiden

Om de geuldiepte voor de scheepvaart te garanderen wordt er in de IJ-geul regelmatig gebaggerd. De verticaal-dynamische trend voor een punt in de ondiepe geul is -0.11 m/jaar (Figuur 4.13 en Figuur 4.14).

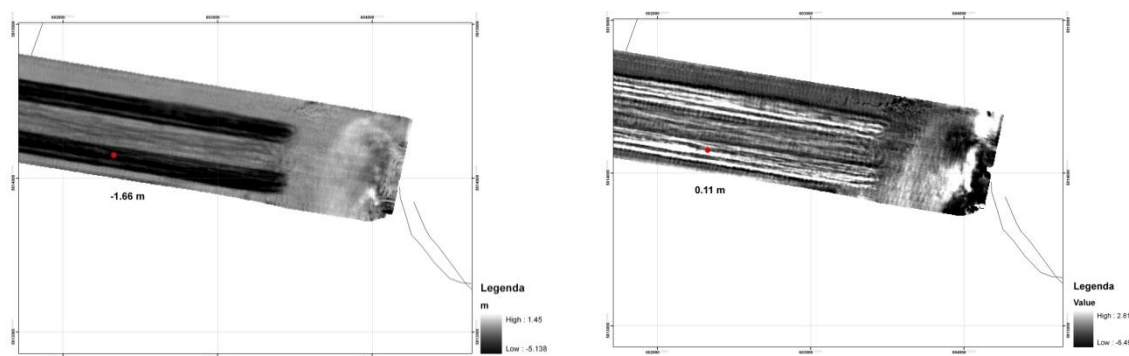


Figuur 4.13 Verticaal-dynamische trends voor een deel van de IJ-geul laten verdieping (blauwtinten) in de vaargeul zien en verondieping (geel/rood) in de havenmond.



Figuur 4.14 Bodemligging in de tijd op het punt in de IJ-geul met een verticaal-dynamische trend van -0.11 m/jaar in Figuur 4.13. Baggeren zorgt voor plotseling grote verschillen in bodemligging en daarmee voor periodes van verschillende verticaal-dynamische trends. Deze figuur toont aan dat de aanname van een lineair verloop (blauwe trendlijn) niet waar is voor de herstelperiode. De hersteltijd is zo'n 3 a 4 jaar; in deze periode na de baggerwerkzaamheden is de verticaal-dynamische trend $+0.38$ m/jaar.

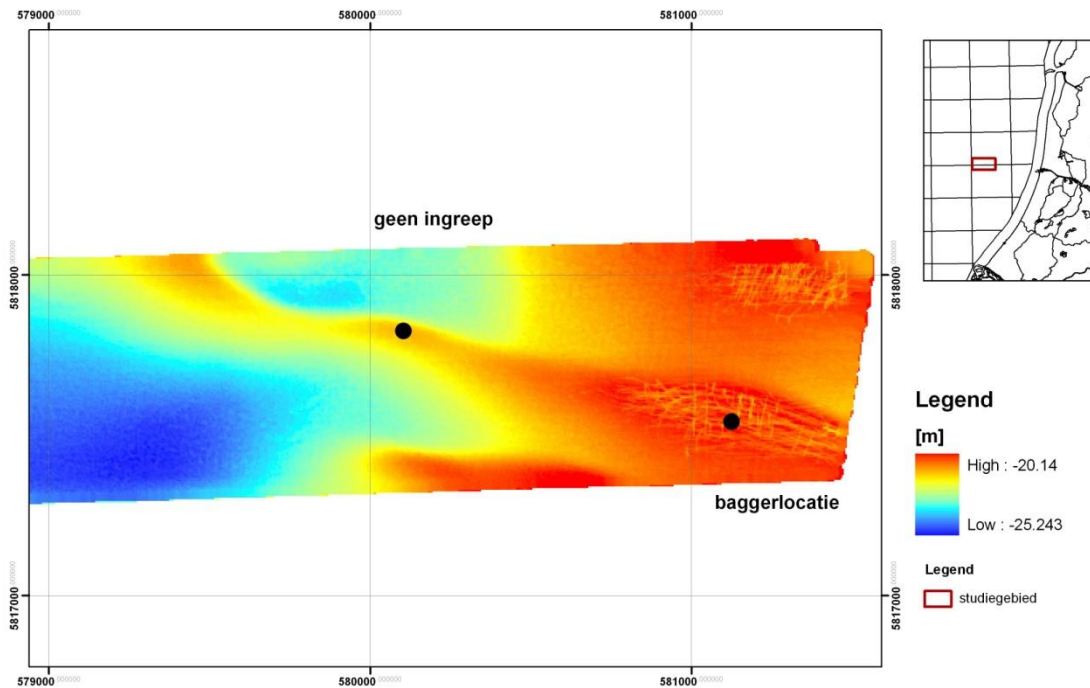
Deze verticaal-dynamische trend (-0.11 m/jaar) is berekend op basis van 60 opnamen in 15 jaar. Als alleen van deze waarde wordt uitgegaan dan zou de conclusie getrokken worden dat hier een eroderende trend heerst en er minder gemonitord hoeft te worden om de veiligheid te garanderen, maar het is onzeker in welke mate deze trend door baggeren wordt beïnvloed. Bijvoorbeeld, zou deze trend hetzelfde zijn geweest als er niet gebaggerd was? Het kan in sommige gebieden lastig zijn om de trend na baggeren (hersteltijd) te onderscheiden van de trend waarin baggeren niet meer doorwerkt. Ook kan het lastig zijn om de hersteltijd vast te stellen als het effect langer doorwerkt dan uit de lengte van de dataserie af te lezen valt. In vervolgonderzoek moet het voorbeeld voor 1 punt moeten worden uitgebreid naar een ruimtelijke analyse. Een ruimtelijk beeld van gebaggerde gebieden en het herstel na baggeren is terug te zien in de verschilgrids in Figuur 4.15. Tussen 30 juni en 21 september 1998 (Figuur 4.15a) is op de locatie van het punt 1.66 m weggebaggerd. Vervolgens treedt er in de geul sedimentatie op (zie Figuur 4.14 en Figuur 4.15b). De monitoringsopname van 21 januari 2003 laat zien dat de oorspronkelijke diepte van voor het baggeren weer bereikt is. In een periode van 4 jaar en 4 maanden is dus 1.66 m sediment afgezet (Figuur 4.14). Invullen van deze waarden in de formule geeft een sedimentatiesnelheid van 0.38 m/jr.



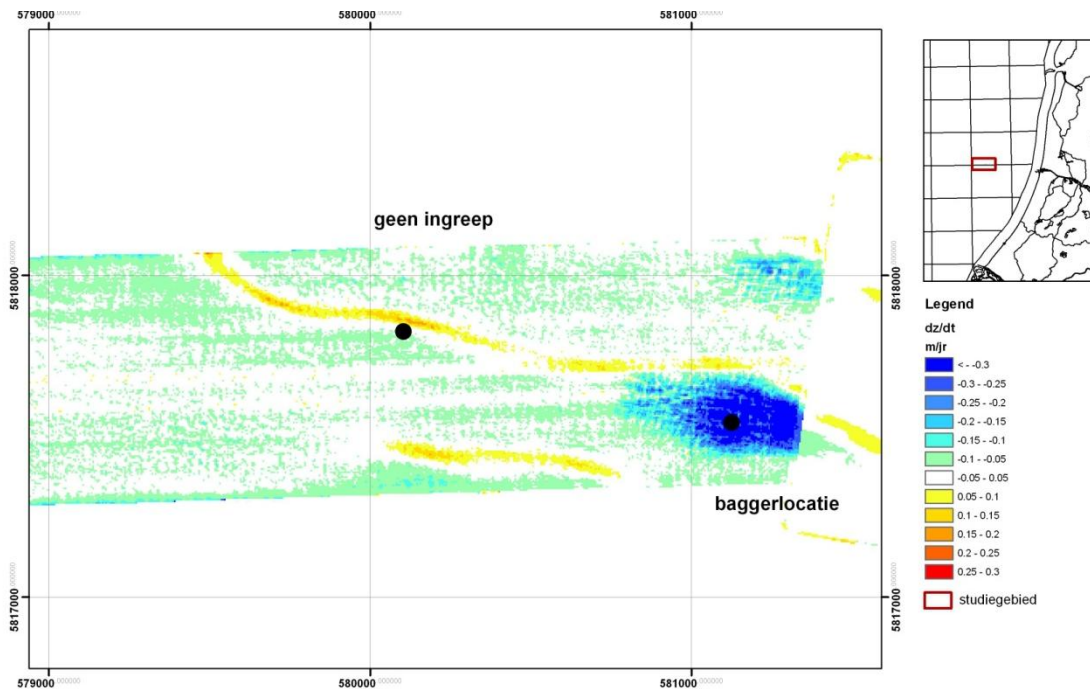
Figuur 4.15 Verschilgrids van (a) 30 juni – 21 september 1998 en (b) 21 september 1998 – 25 februari 1999 laten erosie (zwart) en depositie (wit) zien. Tussen juni en september 1998 is gebaggerd. Voor het rode punt is dat -1.66 m. In de volgende periode treedt 0.11 m depositie op.

Effect van baggeren op een zandgolfkam in de IJgeul

In deze paragraaf worden de diepteveranderingen in de tijd van een zandgolf in de westelijk aanloopgeul naar IJmuiden geanalyseerd. In deze geul is de waterdiepte 20 m tot 29 m. In de geul zijn verscheidene zandgolven aanwezig. De top van een zandgolf in de geul is verlaagd om de waterdiepte te kunnen garanderen voor de scheepvaart (Figuur 4.16). Twee analyse punten zijn geselecteerd: beide op de kam van een zandgolf, waarvan één in het gebaggerde deel en één in het niet-gebaggerde deel (Figuur 4.16).

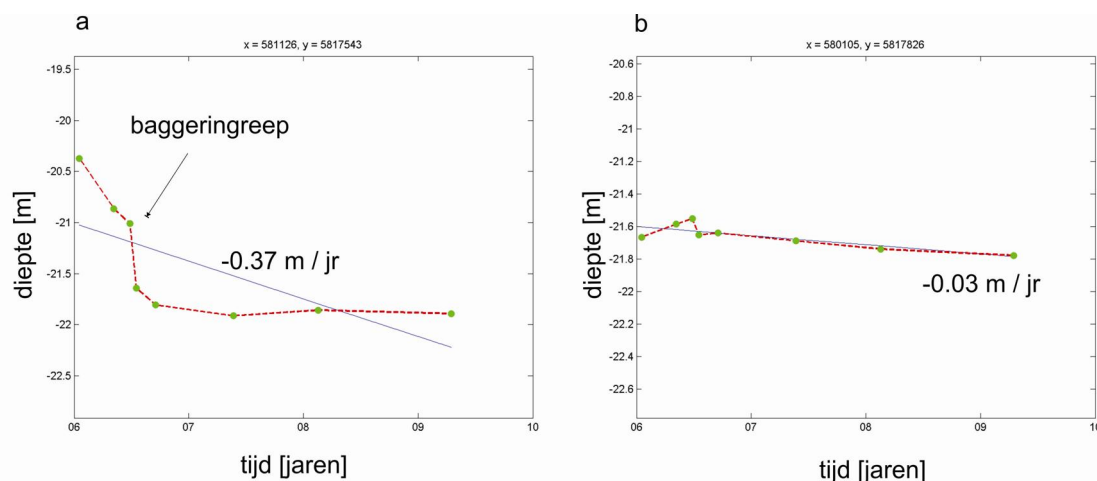


Figuur 4.16 Bathymetrie van een deel van de westelijke IJgeul. Op de zandgolftoppen rechts zijn baggersporen zichtbaar. Waterdiepten reiken van 20 m (rood) tot 25 m (blauw). De twee punten waarvoor de bodemligging plotjes worden gegeven (Figuur 4.18), zijn aangegeven.



Figuur 4.17 Verticaal-dynamische trends per gridpunt van het gebied in Figuur 4.16. Op de gebaggerde zandgolf is de trend meer dan -0.3 m/jaar (blauw). Op de onverstoorde zandgolfkam en lijkzijde links zijn er trends berekend van +0.3 m/jaar (rood).

Voor het punt op de baggerlocatie van de zandgolftop is een verticale trend berekend van -0.37 m/jaar (Figuur 4.18a). Voor de zandgolftop waar geen ingreep heeft plaats gevonden is een verticale trend berekend van -0.03 m/jr (Figuur 4.18b). De periode is echter te kort om aan te geven hoe het gebied zich verder zal ontwikkelen.

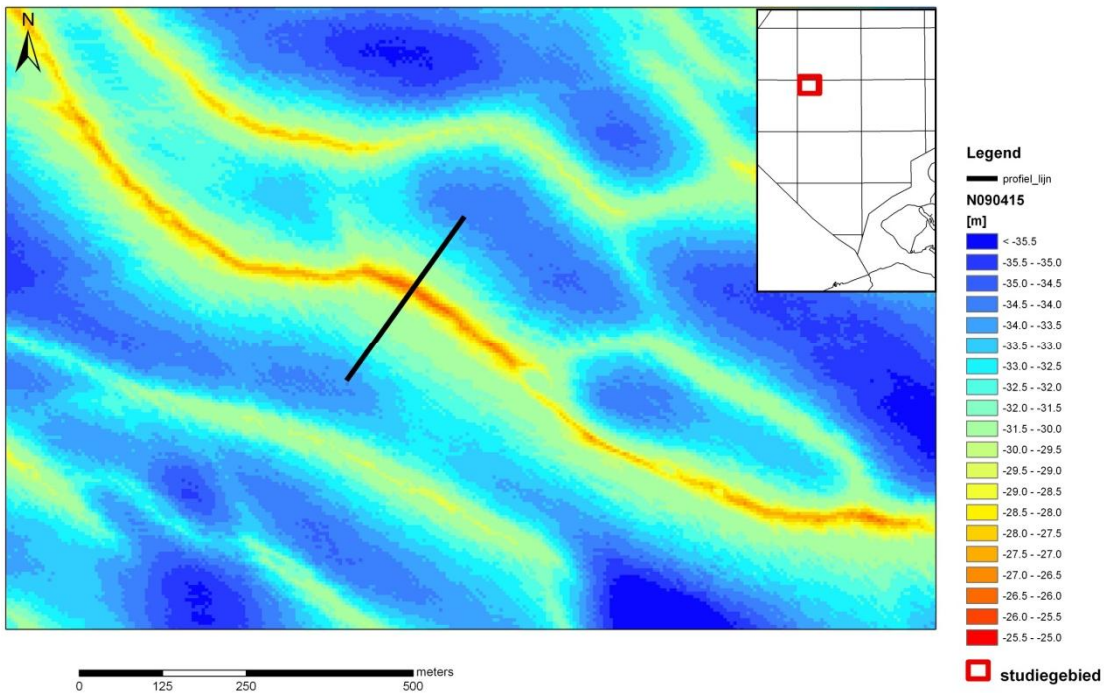


Figuur 4.18 Bodemligging in de tijd en verticaal-dynamische trends voor (a) 1 punt op de gebaggerde zandgolftop, en (b) 1 punt op een zandgolftop buiten het gebaggerde gebied.

4.4.5 Verticale dynamiek, Goodness of Fit, positie op de zandgolf en ruimtelijke spreiding

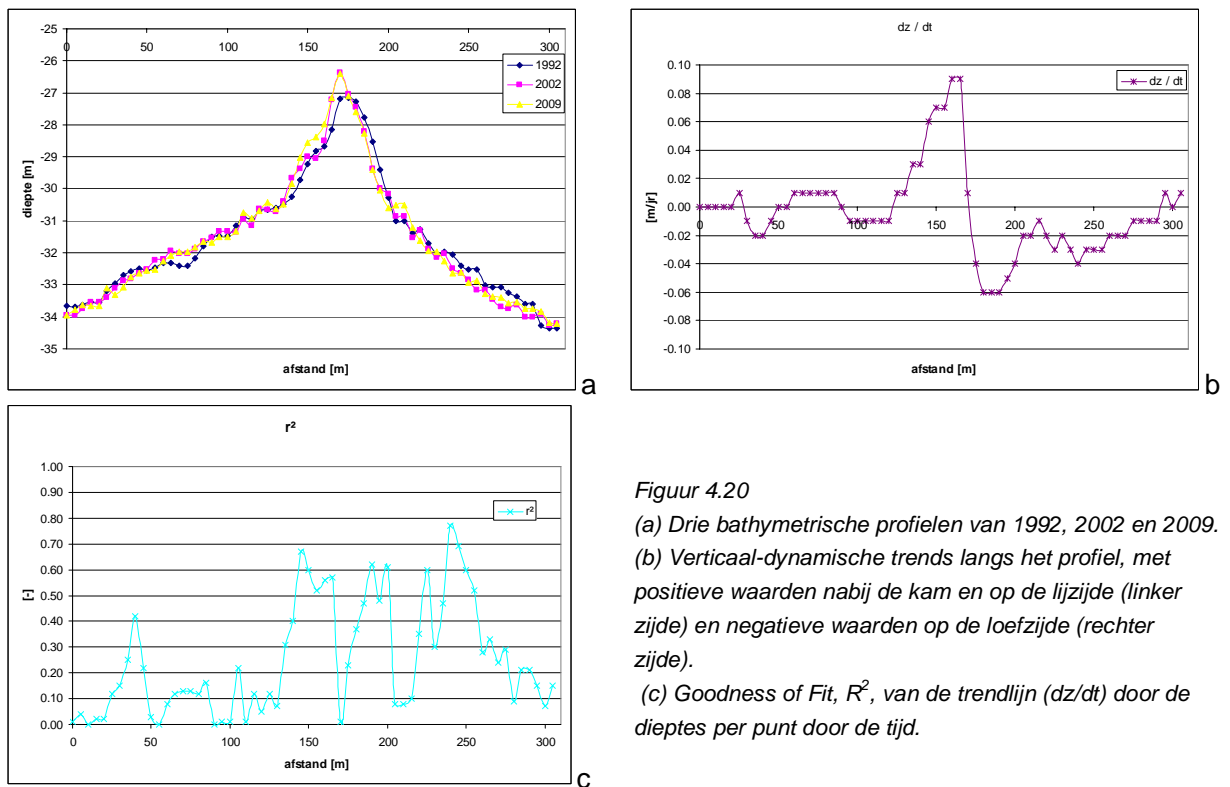
De verschillen in verticaal-dynamische trends en de *Goodness of Fit* (R^2) van deze trends in een zandgolfgebied worden in deze paragraaf geanalyseerd. De details van analyse worden in paragraaf 3.2 uitgelegd. De *Goodness of Fit* is een maat voor in hoeverre er een lineaire trend in de datapunten zit en hoe goed deze trend door de opnamen (bodemligging) fit. Een lage R^2 waarde betekent een slechte fit en/of kleine trend; een hoge R^2 waarde betekent een goede fit en/of grote trend. Na analyse van de verticale dynamische trends en de R^2 in dit gebied is het wellicht mogelijk een advies te geven over de meetstrategie of advies te geven over het vervolgonderzoek.

Er is gekozen voor een zandgolf gebied in de zuidwestelijke Noordzee, de Rotterdam Noordhinder Junction (RNJ) (Figuur 4.19; zie ook Figuur 2.1). Eerst zullen de dz/dt trend en de bijbehorende R^2 over een profiel worden geanalyseerd. Vervolgens wordt naar de ruimtelijke spreiding van de dz/dt trends en R^2 gekeken om te bepalen of de conclusies die gelden voor één profiel ook gelden voor een groter gebied.



Figuur 4.19 Bathymetrische kaart (2009) van een deel van het Rotterdam Noordhinder Junction zandgolvengebied offshore Rotterdam met de locatie van het profiel dat wordt geanalyseerd in Figuur 4.20.

De zandgolfkam heeft een diepte van 26.4 m en de zandgolftroggen een diepte van ongeveer 34 m. De oriëntatie van de zandgolfkammen is noordwest – zuidoost. De zandgolf lengte is 305 m en de vorm van de zandgolf is symmetrisch (zie Figuur 4.19 en Figuur 4.20a). De golfkam laat de grootste dynamiek zien, waarbij de trend aan de zuidwestelijke zijde van de zandgolfkam positief (tot max 0.1 m/jaar) is en aan de noordoostelijke zijde negatief (tot max -0.06 m/jaar) (Figuur 4.20b). De zandgolftroggen laten een lagere dynamiek zien (-0.01 tot 0.01 m/jaar). The Goodness of Fit (Figuur 4.20c) varieert over de punten op dit profiel.



Figuur 4.20

(a) Drie bathymetrische profielen van 1992, 2002 en 2009.

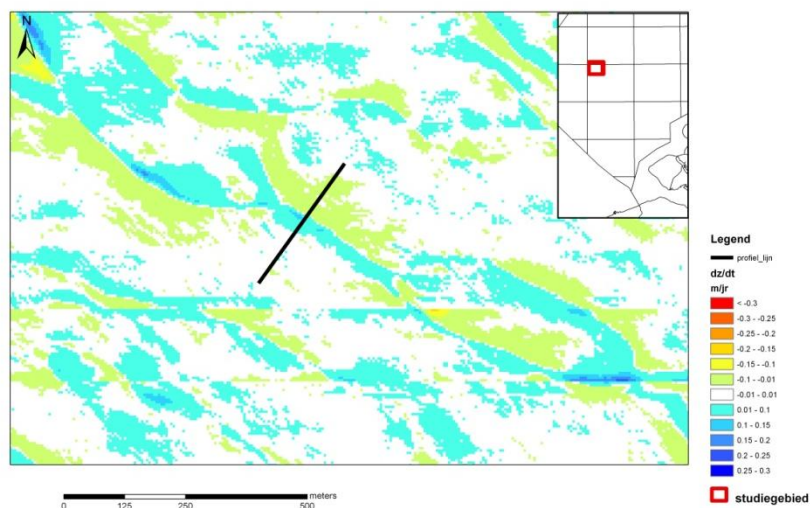
(b) Verticaal-dynamische trends langs het profiel, met positieve waarden nabij de kam en op de lijzijde (linker zijde) en negatieve waarden op de loefzijde (rechter zijde).

(c) Goodness of Fit, R^2 , van de trendlijn (dz/dt) door de dieptes per punt door de tijd.

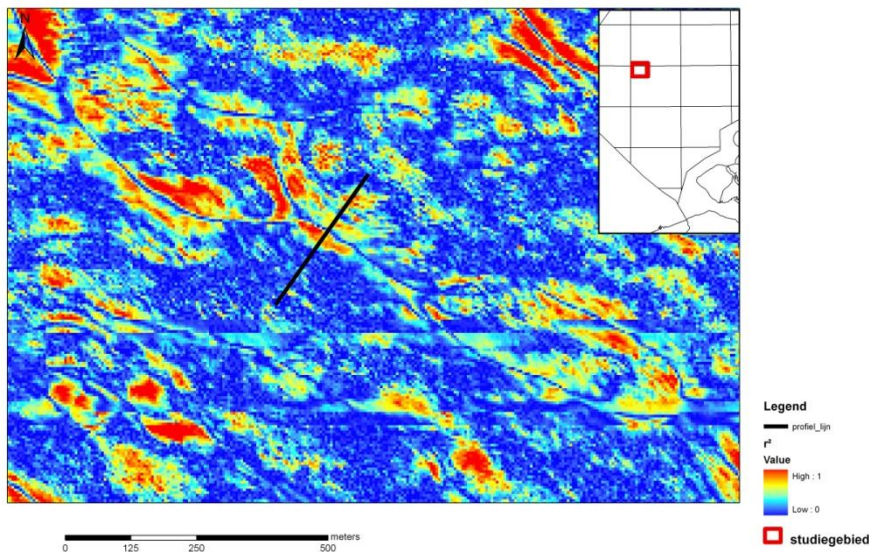
Ruimtelijke dz/dt trends en R^2

Een groot deel van de zandgolven in dit gebied hebben dezelfde oriëntatie (noordwest-zuidoost). De ruimtelijke dz/dt trends laten in dit zandgolfgebied (Figuur 4.19) een patroon zien dat niet eenduidig is (Figuur 4.21). De dz/dt trend is niet steeds negatief aan de zuidwestelijke zijde en positief aan de noordoostelijke zijde. In de troggen komt over het algemeen een lage verticale dynamiek voor.

De spreiding van R^2 in het gebied (Figuur 4.22) laat zien dat de meeste variatie ten opzichte van de trend en/of de kleinste trends optreden in de zandgolftroughen (Figuur 4.22).



Figuur 4.21 Verticaal-dynamische trend per gridpunt voor het gebied met duidelijke tegenstellingen tussen loef- en lijzijden van zandgolven, indiceren een variabele migratierichting voor verschillende zandgolven.

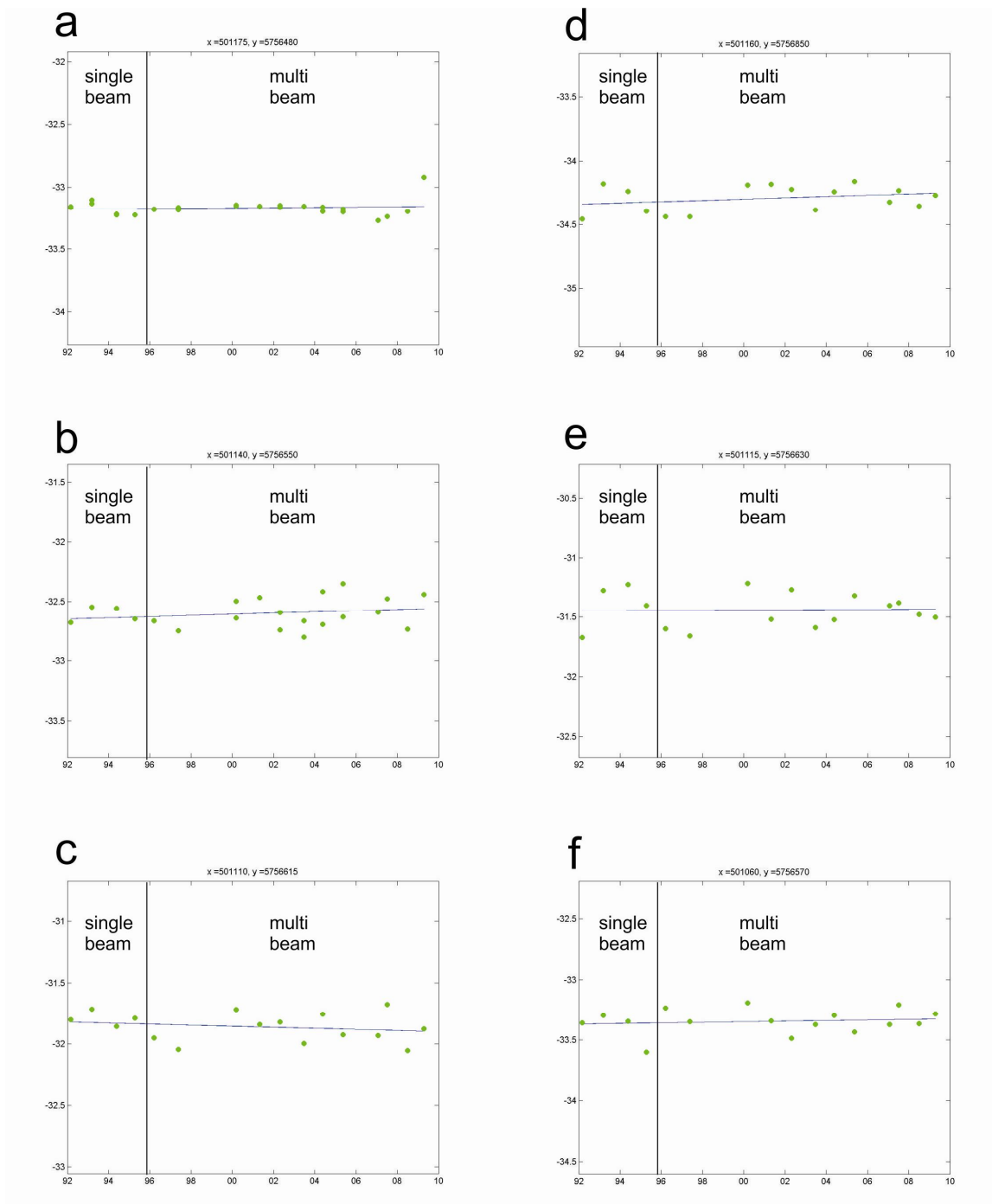


Figuur 4.22 Goodness of Fit, R^2 , van de verticale dynamische trends voor het zandgolvengebied in Figuur 4.19 geeft aan dat de fit in trend van de regressielijnen per gridpunt varieert van slecht (blauw) in de troggen en precies op de zandgolfkammen tot goed (rood) in de delen aan weerszijden van de kammen.

Single-beam versus multibeam opnamen

In deze paragraaf wordt een analyse beschreven van het effect van singlebeam versus multibeam opnamen op de berekende dz/dt trend. In theorie kan de lagere horizontale resolutie van single-beam opnamen effect hebben op de Goodness of fit van de verticaal-dynamische trends. De analyse moet nagaan of er een verschil is in de afwijking van de datapunten ten opzichte van de berekende verticale trend.

In de Rotterdam Noordhinder Junction is van 1990 tot en met 1995 met singlebeam echosounders de bodem ingemeten. Er zijn 6 locaties geselecteerd (Figuur 4.23) met een lage dynamiek (dz/dt valt binnen -0.01 en 0.01 m/jaar) om zo zeker te zijn dat de berekende verticale trend niet beïnvloed wordt door morfologische veranderingen. Na analyse van de bodemopnamen van de 6 locaties valt het op dat er geen trendbreuk of verbetering in de regressie zichtbaar is tussen de single-beam en multibeam opnamen. Voor de migratiesnelheden werd dit wel herkend, wat suggereert dat de verschillen in dataresolutie doorwerken in de methode. Een complete test van precisie door SBES versus MBES methoden kan worden uitgevoerd door de gehele puntdataset te beoordelen. Hieruit zou kunnen volgen dat het waardevoller is om enkel MBES data te gebruiken of niet.

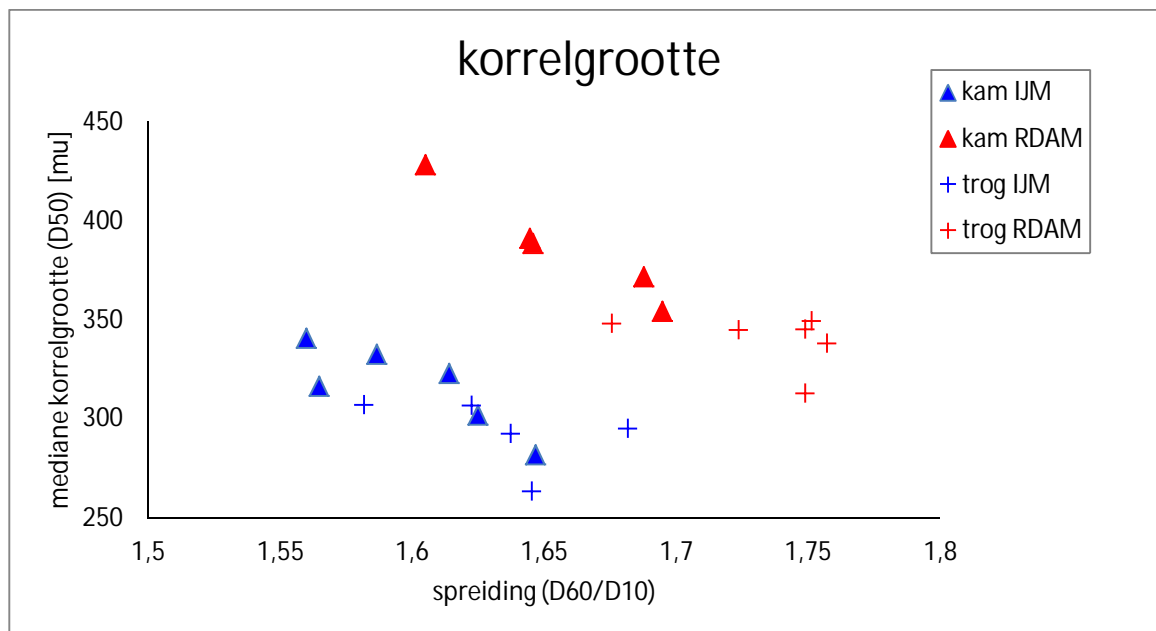


Figuur 4.23 Voor zes locaties zijn de regressielijnen met de lodingen vergeleken voor singlebeam opnamen (tot en met 1995) en multibeam opnamen. Deze initiële test laat geen verschillen in mate van benadering zien enkel door de methoden.

4.5 Analyseresultaten bodemmonsters

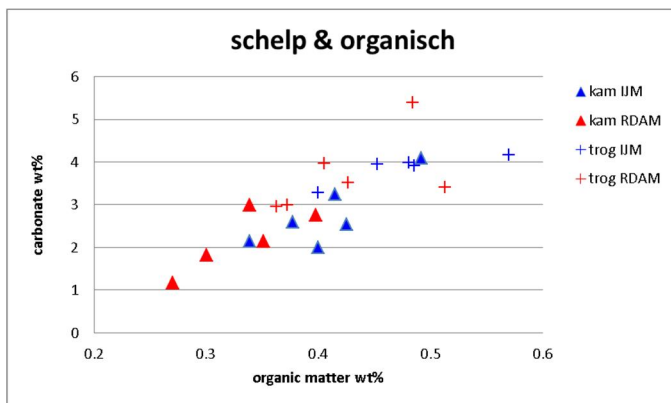
Voor de korrelgrootte analyses van de bodemmonsters op kammen en troggen van in het gebied IJmuiden en Rotterdam is het materiaal grover dan 2 mm (grind of schelpfragmenten) uitgezeefd. Het gehalte grover dan 2 mm was laag (0 – 0.17 %), en voor Rotterdam in het bijzonder. Ook is het grindgehalte op de zandgolfkammen lager dan in de troggen.

In Figuur 4.24 is de mediane korrelgrootte, D50 (de korrelgrootte op 50% van het gewicht van het monster), uitgezet tegen de spreiding van het sediment (ratio D60/D10; hoe groter deze ratio des te slechter gesorteerd). De mediane korrelgrootte (D50) is groter, d.w.z. het sediment op de zeebodem is grover, voor Rotterdam dan voor IJmuiden. Ook is het sediment iets slechter gesorteerd. Het korrelgrootteverschil tussen de gebieden is gemiddeld 70 μm voor de kammen en 50 μm voor de troggen. Ook is het sediment per gebied over het algemeen grover en beter gesorteerd op de kammen dan in de troggen: het D50-verschil is gemiddeld 20 μm voor IJmuiden en 50 μm voor Rotterdam.

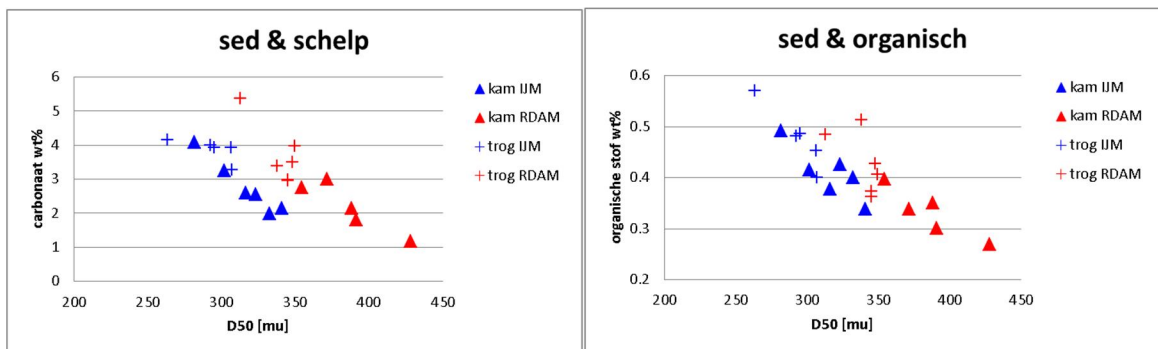


Figuur 4.24 : Mediane korrelgrootte (D50) tegen spreiding van de korrelgrootte voor bodemmonsters op de kammen (▲) en in troggen (+) van zandgolven nabij IJmuiden (blauw) en Rotterdam (rood).

Het carbonaatgehalte (schelpfragmenten kleiner dan 2 mm) en het organisch stofgehalte laten een positieve correlatie zien (Figuur 4.25), dus waar het carbonaatgehalte hoger is, is ook het organisch stof gehalte hoger. Met de mediane korrelgrootte laten beide gehalten een negatieve correlatie zien (Figuur 4.26): dus hoe grover het sediment des te lager het carbonaat- en organische stofgehalte. Verder is het schelp- en organisch stofgehalte hoger in de fijnkorrelige troggen dan op de grovere kammen van zandgolven in beide gebieden.



Figuur 4.25: Carbonaatgehalten tegen organische stofgehalten voor bodemmonsters op de kammen (▲) en in troggen (+) van zandgolven nabij IJmuiden (blauw) en Rotterdam (rood).

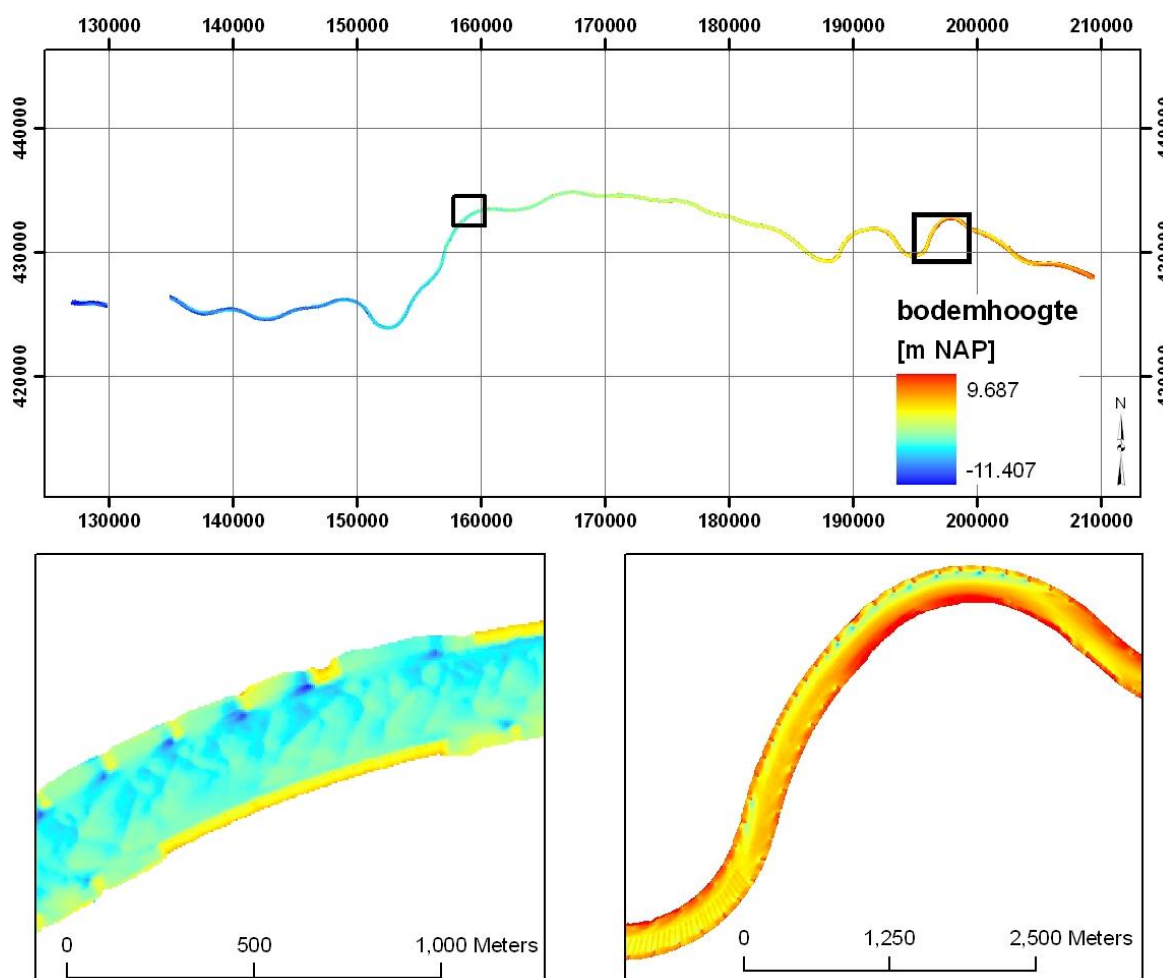


Figuur 4.26: Carbonaat- en organische stofgehalten tegen mediane korrelgrootte voor bodemmonsters op de kammen (▲) en in troggen (+) van zandgolven nabij IJmuiden (blauw) en Rotterdam (rood).

5 Morfologie, bodemdynamiek en factoren van de Waal

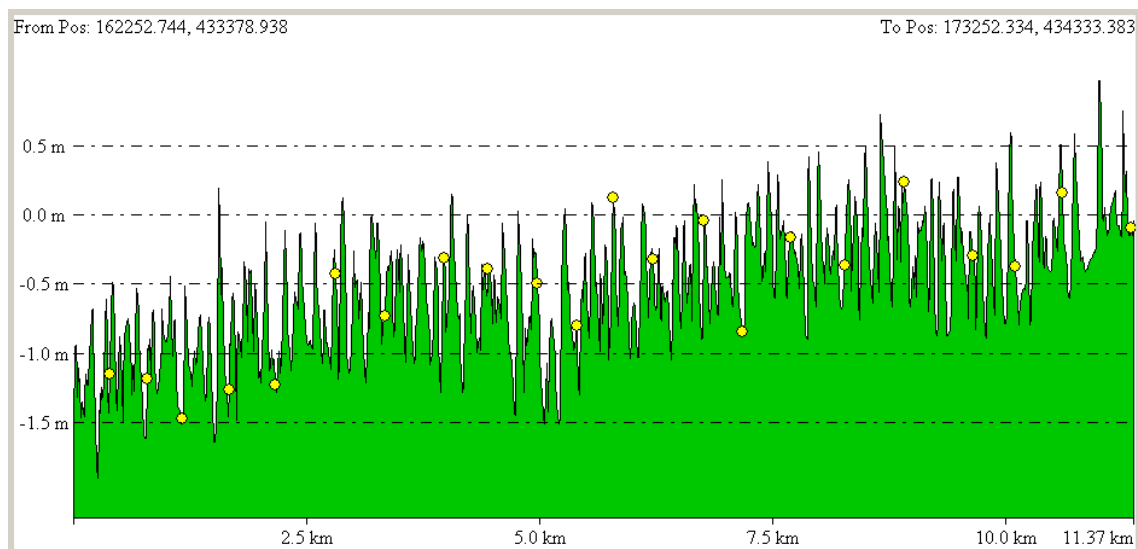
5.1 Morfologie: globaal overzicht

De bodemmorfologie van de Waal laat grote verschillen zien langs de rivier, variërend van een nagenoeg vlakke bodem tot bodemvormen van meer dan 1 m hoog. In vergelijking tot de afmetingen van zandgolven op zee is de hoogte van bodemvormen in de Waal relatief hoog, tot ca. 20% van de waterdiepte. Data geven aan dat een hoogte van bodemvormen van 1 m mogelijk is in waterdiepte van ca. vijf meter. Figuur 5.1 geeft een overzicht van het verloop van de rivierbodembodem en is voorzien van twee voorbeelden die representatief zijn voor de variatie van de rivierbodembodem; (a) duidelijk aanwezige en relatief hoge bodemvormen en (b) nagenoeg vlakke bodem.

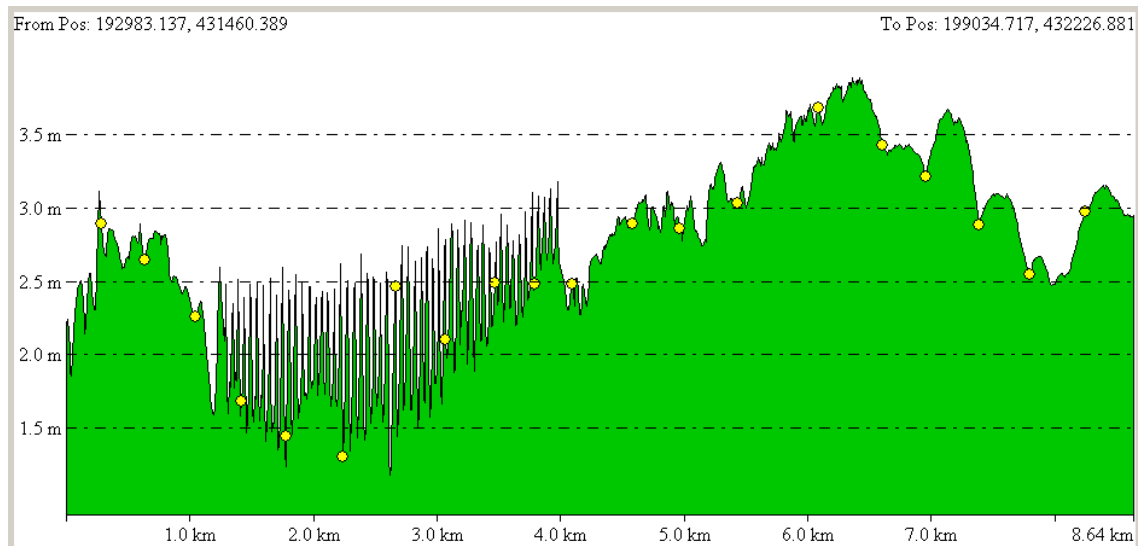


Figuur 5.1 Bodemmorfologie van de Waal (a) tussen Spijk en Gorinchem ter overzicht; laat vooral het verval zien (b) detail nabij Tiel als voorbeeld van bodemvormen, en (c) nabij Gendt als voorbeeld van rivierbodembodem waar bodemvormen afwezig zijn.

De langsprofielen geven een indicatie van de bodemligging en zijn indicatief voor de aanwezigheid van bodemvormen (Figuur 5.2 en Figuur 5.3). De bodemmorfologie is niet alleen een effect van de natuurlijke processen, e.g. stroomsnelheid en beschikbaarheid van sediment maar wordt sterk beïnvloed door menselijke ingrepen in de rivier, bijvoorbeeld kribben en de vaste lagen bij Nijmegen en Sint Andries. In Figuur 5.3 zijn de bodemschermen bij Erlecom zichtbaar. Zie ook Bijlage 8.4.



Figuur 5.2 Langsprofiel van west naar oost ongeveer in het midden van de rivier. Het profiel is karakteristiek voor de vormen op de rivierbodembodem in de Midden-Waal.



Figuur 5.3 Langsprofiel van west naar oost ongeveer in het midden van de rivier. Het profiel toont de bodemligging voor een deel van de oostelijke Waal. De bodemschermen bij Erlecom zijn zichtbaar tussen km 1 en 4.

5.2 Morfologie in relatie tot nautische monitoring

Waarnemingen laten zien dat morfologische veranderingen in de rivier zich op verschillende tijdschalen en ruimtelijke schalen manifesteren. In deze paragraaf wordt een onderscheid

gemaakt in processen die op drie verschillende tijdschalen, de macro-, meso-, en micro-schaal, optreden.

Ten eerste zijn er geleidelijke, grootschalige trends waarbij de bodemligging over tientallen kilometers langzaam verandert (macro-schaal). Door grote wijzigingen in het rivierensysteem, zoals de aanleg van stuwen en kribben, grootschalig baggerwerk of bochtafsnijdingen in de vorige eeuw, is de bodem van de Bovenrijn en de Waal langzaam aan het dalen (zogenaamde autonome daling van de rivierbodem). Jaarlijkse of halfjaarlijkse metingen van de bodemligging, gemiddeld over trajecten van bijvoorbeeld 1 kilometer, maken deze lange-termijn trends inzichtelijk.

Daarnaast is er sprake van 'event'-gedreven morfologische veranderingen, bijvoorbeeld door lokale depositie van sediment in de vaargeul onder invloed van hoge rivierafvoeren. Deze veranderingen hebben vaak een tijdelijk karakter. Een aanzanding na een hoogwater vlakt langzaam uit doordat sediment zich benedenstrooms beweegt. Dergelijke processen spelen zich af gedurende dagen of weken over honderden meters (meso-schaal). Zie voor 'event'-gedreven processen ook bijvoorbeeld *Sieben* [2001], waarin morfologische effecten, tijdschalen en kennisbehoeften tijdens een hoogwater worden behandeld.

Tenslotte zijn er lokaal ontwikkelende variaties zoals de groei en migratie van rivierduinen of meer plaatsvastе ontgrondingskuilen bij kribkoppen en vaste lagen. Duinen verplaatsen zich met ordegröötte 1 tot tientallen meter per dag (micro-schaal) [zie e.g. *Sieben*, 2008; *Frings*, 2005; *Wilbers*, 2004], afhankelijk van de locatie in de rivier en de rivierafvoer. Om inzicht te krijgen in de migratiesnelheid van individuele duinen is praktisch iedere dag een meting nodig, zodat deze gevolgd kunnen worden.

Belangrijk voor de scheepvaart zijn vooral (1) de ondieptes die in de vaargeul ontstaan tijdens een periode van hoog water (meso-schaal) en (2) de ontwikkeling van de rivierduinen (micro-schaal), aangezien de top van de duin een obstakel voor scheepvaart kan zijn. De meso- en micro-schalen vormen dus vooral knelpunten voor de scheepvaart (aanzandingen); de lange-termijn morfologische veranderingen (macro-schaal) zijn voor scheepvaart echter ook van belang, zij het niet zo zeer vanwege aanzandingen, maar vanwege harde constructies / niet-erodeerbare trajecten die niet meedalen met de bodem en daardoor een knelpunt kunnen gaan vormen.

Op dit moment is voor de Bovenrijn en Waal vrij goed bekend welke locaties nautische problemen geven door ondieptes. Het betreft bepaalde binnenbochten, en benedenstrooms van de vaste lagen bij Nijmegen en Sint Andries. Achterloopse kribben hebben in het verleden ook tot meer aanzanding geleid. De verwachting is dat toekomstige ingrepen zoals aanleg van nevengeulen of kribverlaging een negatief effect zullen hebben op de waterdiepte.

Het huidige nautische baggerbeleid voor de Bovenrijn en Waal is door Rijkswaterstaat vormgegeven via een baggercontract met aannemers. In dit contract is een prestatiebestek vastgelegd; waardoor de aannemer zelf kan bepalen waar en wanneer hij in een zeker meetvak baggert en terugstort, zolang wordt voldaan aan de opgelegde prestatie-eisen. Op dit moment wordt zodanig gebaggerd dat wordt voldaan aan een minimale diepte in de gehele vaargeul ten opzichte van OLR (overeengekomen lage rivierstand). Vermoedelijk zal dit uitgebreid worden met een eis aan de gemiddelde diepte (gemiddeld over de breedte van de vaargeul). Omdat goed bekend is waar zich de knelpunten bevinden, is een gericht monitoringsbeleid mogelijk; vaker monitoren op de knelpunten (binnenbochten), minder vaak op de rest van de rivier.

Om te weten waar nautisch gebaggerd moet worden, dient te worden gemeten. De frequentie van meten is gebaseerd op de bestaande ervaring en kennis van processen. Peilingen zijn nodig enerzijds om te weten wanneer en waar gebaggerd moet worden, en anderzijds om kennis op te doen over de processen die relevant zijn voor de morfodynamiek. Het ontstaan van ondieptes en de ontwikkeling van rivierduinen spelen zich af op meso- en micro-schalen, en data dienen met regelmaat ingewonnen te worden. Op dit moment wordt door aannemers iedere twee weken de vaargeul van de Bovenrijn en Waal gepeild (één van de prestatie-eisen). Het is de vraag of de benodigde inzichten die relevant zijn voor het nautisch baggeren en de morfodynamiek verkregen worden met behulp van deze peilingen. Daarmee is het niet mogelijk om te evalueren of er frequenter of minder frequent gegevens van de bodemligging ingewonnen moeten worden.

Voor het nautisch monitoren / baggeren zijn de volgende inzichten van belang:

- a) Wat is voor een specifieke locatie de variatie in bodemligging als gevolg van fluctuaties in de rivierafvoer?
- b) Welke morfologische processen zijn lokaal actief en wat is de tijdschaal of karakteristieke responstijd van deze morfologische processen?

Ad a)

De (maximale) bodemhoogte op een locatie is relevant voor scheepvaart, aangezien een minimale waterdiepte voor scheepvaart nodig is en gegarandeerd wordt door de geulbeheerder. De maximale bodemhoogte kan geschat worden door een aanzanding die is ontstaan na een hoogwaterperiode te meten, en/of door een aanwezigheid van extreem hoge rivierduintoppen te meten.

Ad b)

Na een hoogwater vlakt de ontstane aanzanding vaak weer wat uit. Als X dagen na een hoogwater een periode van lage waterstanden optreedt, moet deze aanzanding zijn afgevlakt tot een bepaalde hoogte. Inzicht in de snelheid waarmee het uitvlakken plaatsvindt is nodig, zodat kan worden geschat of een aanzanding moet worden weggehaald, middels baggeren, of dat er dissipatie is van de aanzanding door natuurlijk processen.

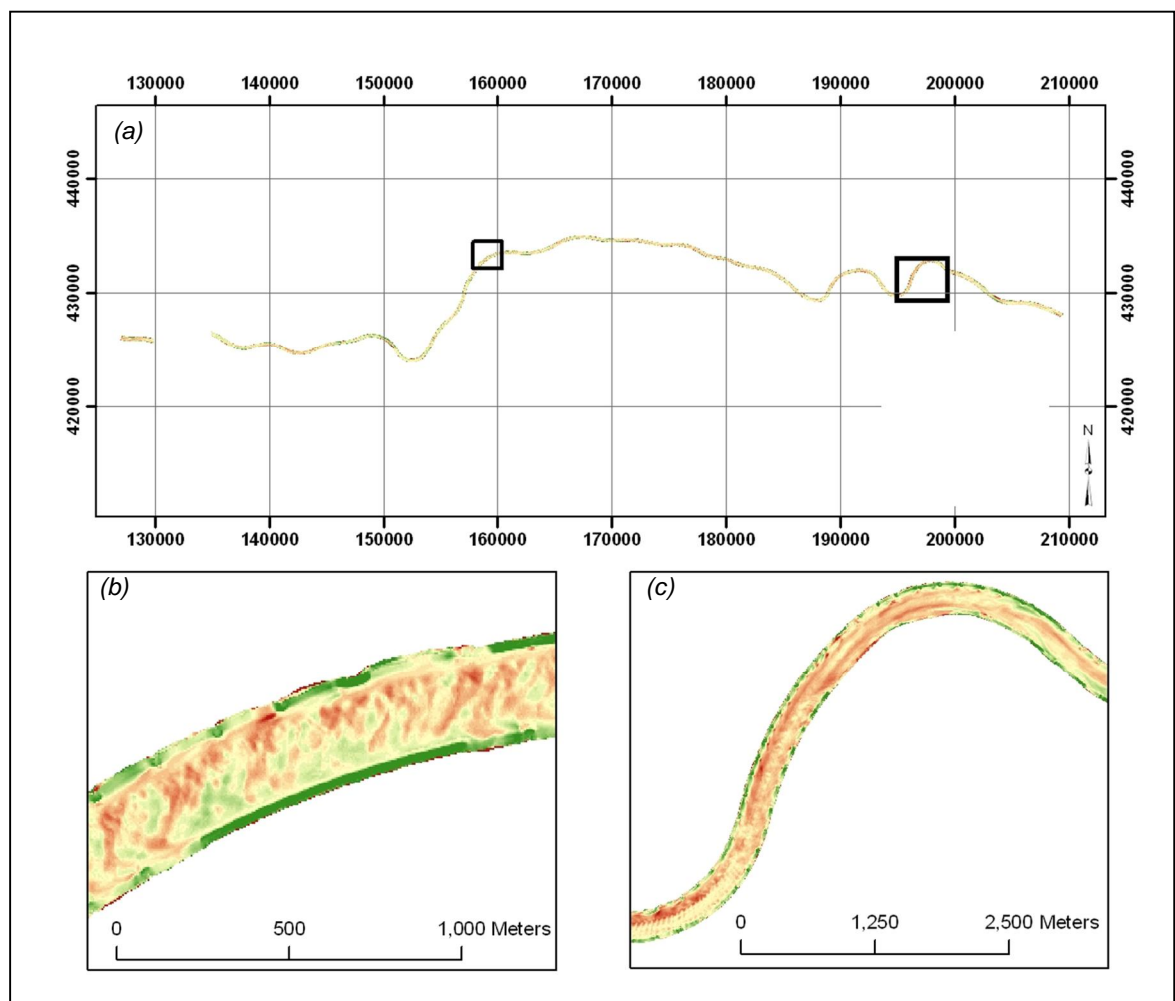
Hetzelfde geldt voor de duintoppen. In het algemeen geldt dat duinen toe- en afnemen in hoogte met toe- en afnemende afvoer¹. Inzicht in de snelheid waarmee de duinhoogte afneemt nadat een hoogwater is opgetreden (afbraaksnelheid) is relevant voor de noodzaak om te baggeren. De "groeisnelheid" is ook van belang, hieronder verstaat men de snelheid waarmee een afgevlakte duintop (vooral door de mens), weer teruggroeit naar een evenwicht situatie, die hoger is dan gewenst.

De analyses die gepresenteerd worden in dit hoofdstuk zijn gericht op de vraag of nieuwe inzichten met betrekking tot de morfodynamiek afgeleid kunnen worden uit de beschikbare peil data (2-wekelijks en halfjaarlijks). Aangezien de databestanden groot zijn (orde GB), is tevens aandacht besteed aan hoe de data efficiënt verwerkt kan worden (Sectie 5.6), zodat de analyse mogelijk is voor grote riviertrajecten en voor langere perioden. De data-analyse heeft een verkennend karakter, aangezien de 2 wekelijkse peilingen pas laat in het project beschikbaar waren.

¹ NB, bewust wordt "algemeen" gebruikt, aangezien hiernaar nog onderzoek wordt verricht. Duinen kunnen ook afvlakken bij hoge afvoer, en er is een vertraging of time-lag aanwezig tussen de piek van het hoogwater en de maximale duinhoogte.

5.3 Verticale bodemdynamiek van de Waal: macro-schaal

Dezelfde methode als voor de Noordzeegebieden voor het bepalen van de verticale bodemdynamiek met behulp van lineaire regressie per gridpunt (paragraaf 3.2) is in de Waal op basis van de halfjaarlijkse peilingen en de gehele tijdserie toegepast. Deze dynamische trends geven wel de trends in de autonome bodemdynamiek op macro-schaal (op lange termijn), maar het gedrag van de rivierduinen kan hiermee niet worden bepaald, omdat de dynamiek van de rivierduinen daarvoor te hoog is. De grootschalige trends van de verticale bodemdynamiek zijn vastgesteld per gridpunt voor de gehele Waal (Figuur 5.4).

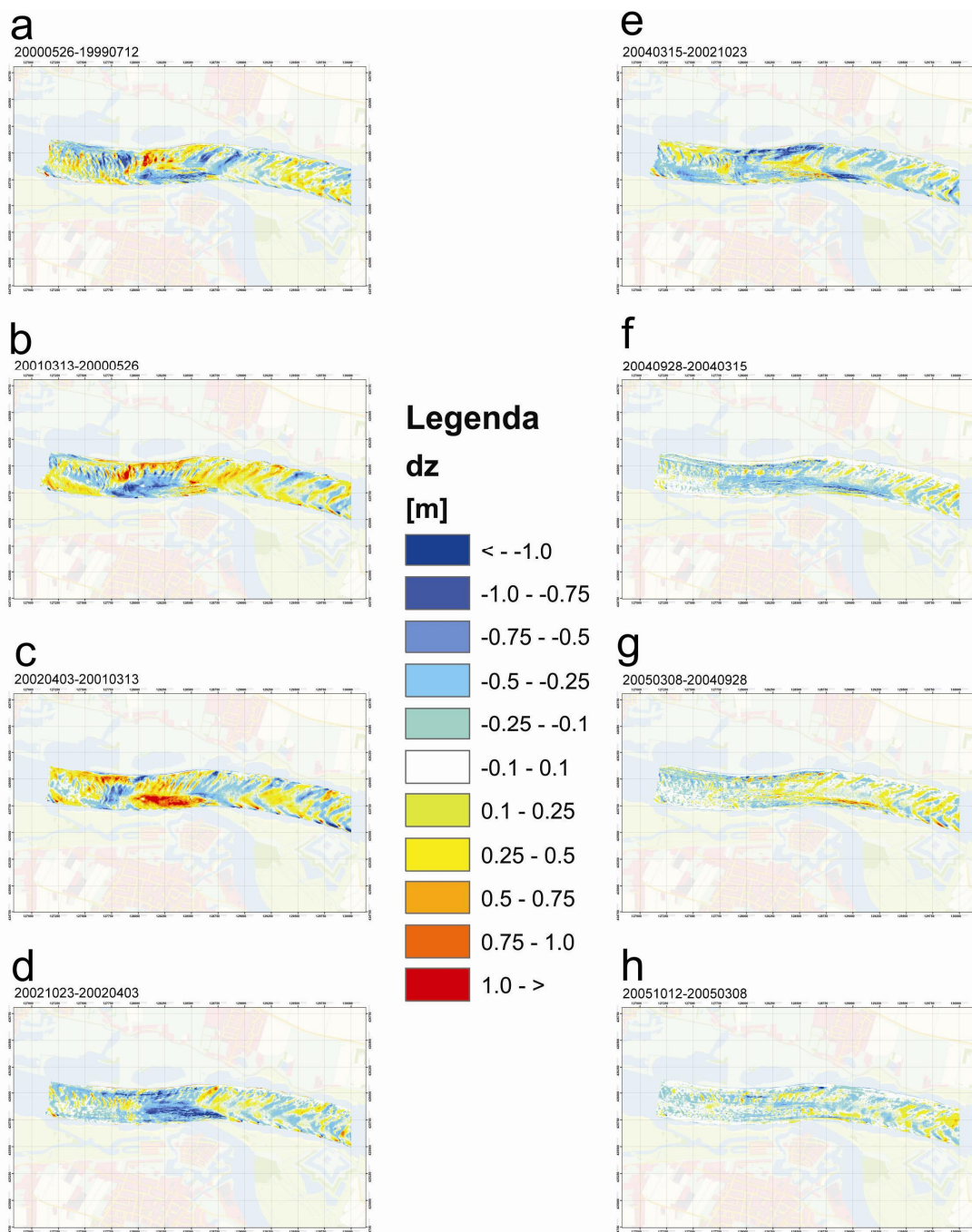


Figuur 5.4 Verticaal dynamische trends (m/jaar) per gridpunt (1 x 1 m) voor de Waal op basis van alle JMP-datasets in de gehele tijdserie van juli 1999 t/m mei 2011. (a) overzicht dynamische trend van de Waal tussen Spijk en Gorinchem, (b) detail bij Tiel en (c) detail bij Gendt.

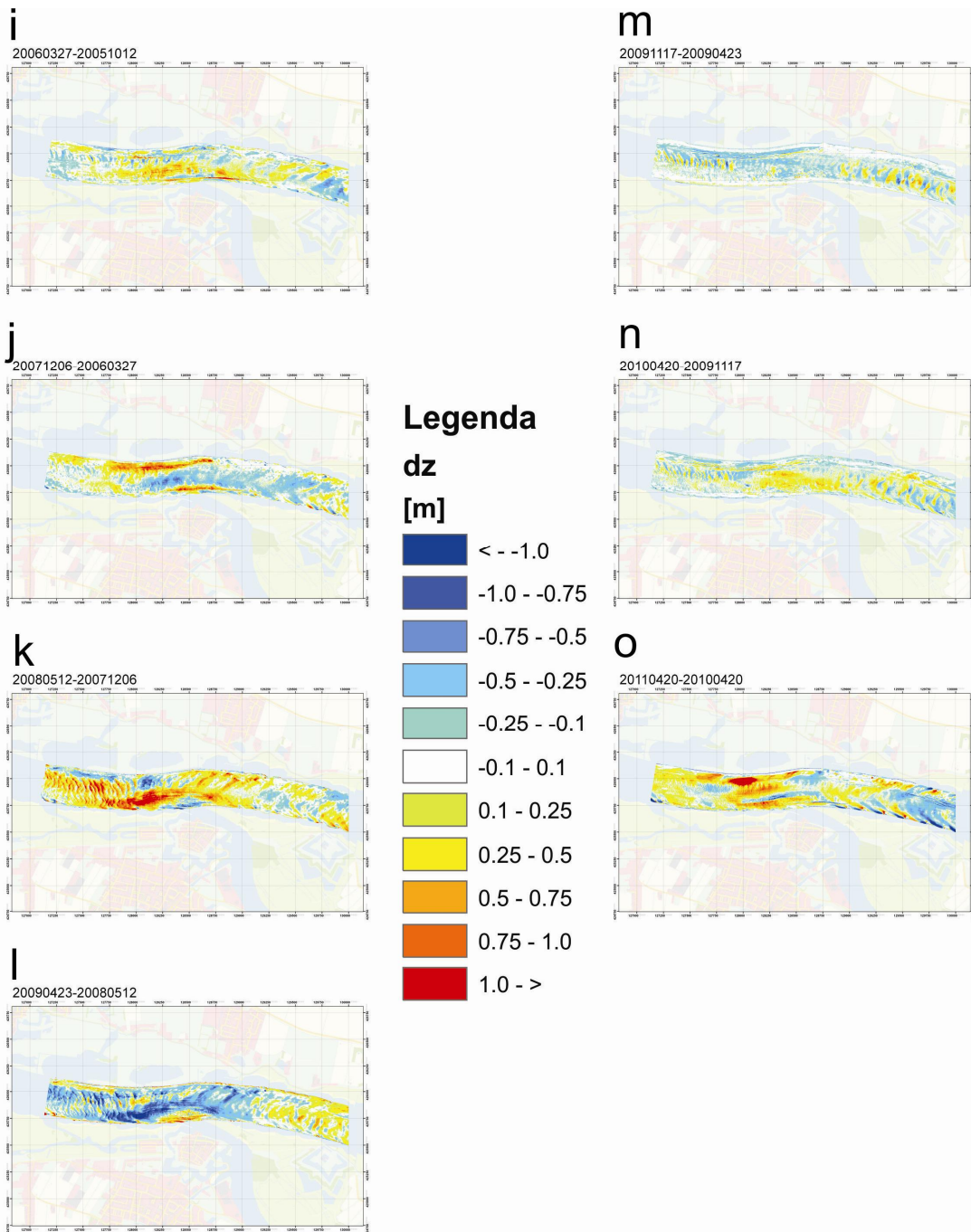
De resultaten laten duidelijk zien dat verschillende delen van de rivier dynamischer zijn dan andere gebieden en dat zowel aggradatie als degradatie plaatsvindt, bijvoorbeeld per bocht stroomafwaarts (Figuur 5.4a: bocht bij x-coördinaat 150000 is een zone van aggradatie; bocht bij 140000 is degradatie). Sommige bochten tonen degradatie in de buitenbocht en aggradatie in de binnenbocht en ook de dynamiek in het patroon van bodemvormen (bijvoorbeeld Figuur 5.4b), welke kenmerkend zijn voor natuurlijke morfodynamische processen.

Door de dynamiek te koppelen aan natuurlijke en niet-natuurlijke factoren, zullen deze patronen in dynamiek mogelijk worden verklaard.

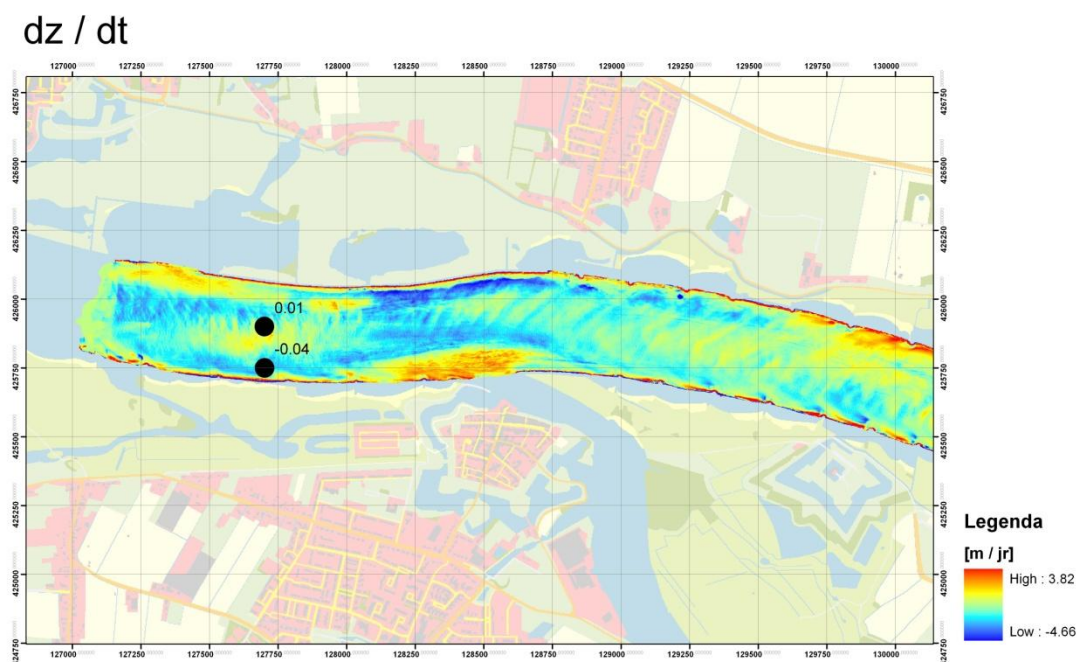
Deze lange-termijn trends in verticale dynamiek zijn gebaseerd op de gehele tijdserie. Het is voor het begrip van het systeem en het vergelijken met natuurlijke en niet-natuurlijke factoren van belang om de tussenliggende ontwikkelingen (de variatie in verticale dynamiek) te analyseren, door naar verschillen in verticale bodemligging tussen twee opeenvolgende peilingen te kijken. Een voorbeeld van een dergelijke analyse voor het deel van de Waal tussen Vuren en Gorinchem wordt gegeven in Figuur 5.5 en Figuur 5.6.



Figuur 5.5 Verschillen in verticale bodemligging (in m) voor verschillende perioden (a t/m h; 1999 t/m 2005), hier gepresenteerd voor het deel van de Waal tussen Vuren en Gorinchem. De perioden zijn weergegeven als 20000526-19990712, wat betekent het verschil tussen 12 juli 1999 en 26 mei 2000. De uniforme kleurenschaal maakt de verschillen per periode direct inzichtelijk. Verticale verschillen in bodemligging van -1.0 m tot 0.75 m zijn waargenomen in één periode als gevolg van het migreren van rivierduinen.

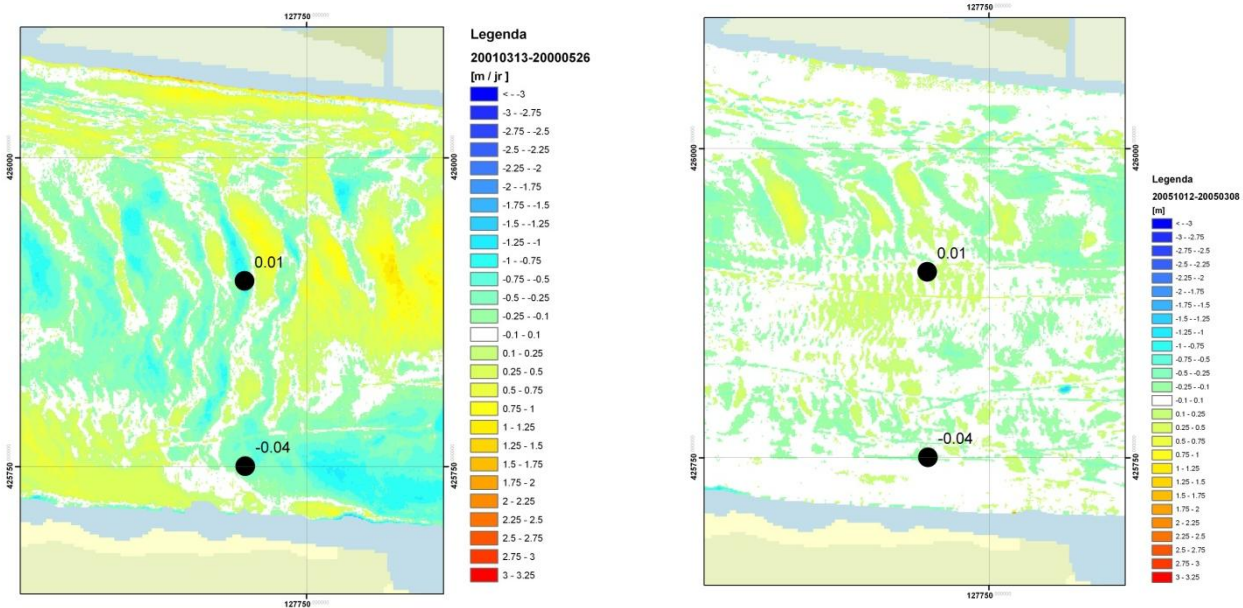


Figuur 5.6 Verschilgrids voor de periode 2005 tot 2011 (i t/m o; vervolg van *Figuur 5.5*). De rivierduinen laten variaties in bodemligging zien van -1.0 tot 0.75 m tussen opeenvolgende peilingen. Wanneer ingezoomd wordt, zoals bijvoorbeeld in *Figuur 5.8*, is te zien dat het (willekeurige) moment van baggeren van grote invloed is op het verschil in bodemligging.



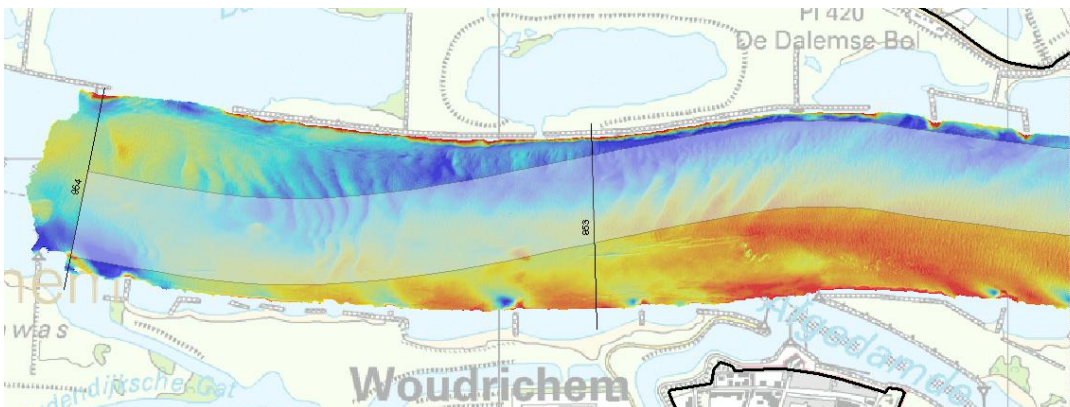
Figuur 5.7 Verticaal-dynamische trends (hele tijdserie, in m/jaar) voor de Waal tussen Vuren en Gorinchem. Het patroon van rivierduinen is zichtbaar alsook dwarsverschillen in de rivier tussen negatieve (blauw) en positieve trends (rood) waar de afgedamde Maas de Waal instroomt.

De lange-termijn trends in de verticale dynamiek tussen Vuren en Gorinchem (dz/dt ; Figuur 5.7) laten in het midden van de rivier een patroon zien waarin rivierduinen te herkennen zijn. In de buitenbochten zijn negatieve trends zichtbaar die duiden op erosie. Bij de monding van de afgedamde Maas in de Waal is een positieve trend zichtbaar, dat hier depositie plaats vindt is conform de verwachting. Ook de kuilen en aanzandingen rond de kribben zijn zichtbaar in de geanalyseerde data. Voor het punt midden in de Waal met een dz/dt -waarde 0.01 m/jaar in Figuur 5.7 zijn er variaties in bodemligging van -1.0 tot +0.75 m tussen twee opeenvolgende opnames. Deze verschillen hebben te maken met het (willekeurige) moment dat de opnames van de bodem gemaakt zijn. Op het verschilgrid tussen 26 mei 2000 en 13 maart 2001 (Figuur 5.8a) is een hoogte verschil van -0.8 m zichtbaar, terwijl een andere periode in de tijd (Figuur 5.8b) dit punt een positief hoogte verschil laat zien. Dit wordt zeer waarschijnlijk veroorzaakt door het migreren van rivierduinen. Een identificatie van het aantal rivierduinen staat deze analyse niet toe; daarvoor is de frequentie van de metingen te laag.



(a) **Figuur 5.8** Verschilgrids (in m) van twee perioden (a) van 26 mei 2000 tot 13 maart 2001 en (b) van 8 maart 2005 tot 12 oktober 2005. De waarden 0.01 m/jaar en -0.04 m/jaar zijn de (algehele) verticale trends voor de gehele tijdserie op deze punten.

Voor het punt in de buitenbocht met een waarde -0.04 m/jaar zijn er verschillen in bodemligging van -0.3 m tot 0.5 m tussen de opnamen in. Het valt op dat er een streperig patroon zichtbaar is. De mogelijke oorzaak van deze sporen is vooralsnog onduidelijk. De suggestie dat het baggersporen zijn lijkt onwaarschijnlijk omdat het gebied buiten de vaargeul ligt (Figuur 5.9). Alternatieve verklaring is dat het een schip of anker zou kunnen zijn geweest die de grond heeft geraakt.



Figuur 5.9 Bathymetrie van de Waal met daarop de vaargeul geprojecteerd. De vaargeul is indicatief voor de uitgevoerde baggerwerken.

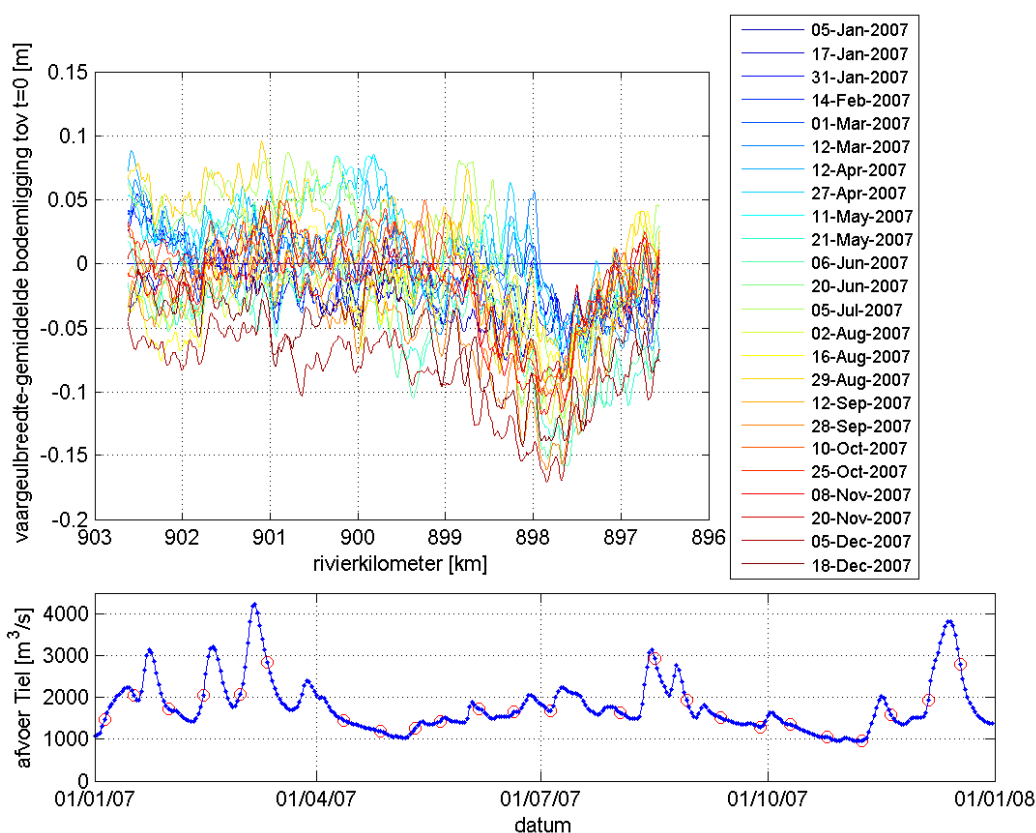
Op basis van alleen de verticaal-dynamische trends, zonder achtergrondinformatie over de locatie van een bodemvorm, het moment van opnamen (voor of na hoogwater) en/of menselijke ingrepen (bijvoorbeeld baggeren), is de verticaal-dynamische trend op een langetermijn tijdschaal niet voldoende als maat voor de verticale dynamiek met als doel het verbeteren van de monitoringsstrategie. Hiervoor zijn de verticale variaties in bodemligging op de meso- en micro-schalen essentieel.

5.4 Verticale temporele variatie in bodemligging en karakteristieke responstijd: meso-schaal

De variatie in bodemligging binnen een jaar als gevolg van fluctuaties in de rivierafvoer is bepaald met de data van de tweewekelijkse peilingen van het jaar 2007. De bodemligging is gemiddeld over de vaargeulbreedte; in langsricting van de rivier is een lopend gemiddelde met een venster van 1 km toegepast. De schommelingen in bodemligging zijn het gevolg van dit lopend gemiddelde.

Uit Figuur 5.10 kan worden afgeleid dat de variatie in de orde van decimeters ligt. De bodem komt lokaal hoger te liggen tijdens en na afloop van de hoogwaterperiode. Na analyse van de data lijken de aanzandingen zich met enkele honderden meters per maand stroom afwaarts te verplaatsen. Als gevolg van de beperkte verticale variatie die is waargenomen voor de processen op meso schaal zijn deze processen van ondergeschikt belang voor het kwantificeren van de morfodynamiek. Belangrijk om op te merken is dat het niet bekend is, en daarom niet meegenomen in de analyse, wanneer en waar gebaggerd of geplogd is.

Het bestaande morfologische Delft3D-model van de Waal [Deltares, 2010] laat eveneens een variatie binnen een jaar in de orde van decimeters zien. Hierbij dient opgemerkt te worden dat het model gekalibreerd is op trends over meerdere jaren (met behulp van de jaarlijkse JMP peilingen), en niet op trends in een jaar.



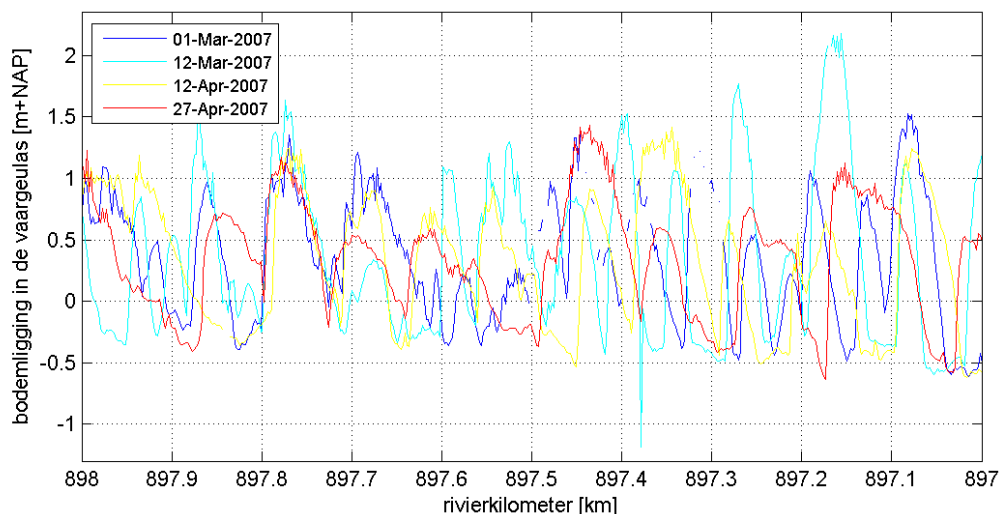
Figuur 5.10 Variatie in bodemligging (gemiddeld over de vaargeul) in jaar 2007 van een klein traject van de Waal ten opzichte van de eerste meting in het jaar (boven), en het afvoerverloop gedurende het jaar, met de meetmomenten aangegeven in rode cirkels (onder).

5.5 Verticale temporele variatie in bodemligging en karakteristieke responstijd: micro-schaal

Groei en migratie van duintoppen kunnen hinder opleveren voor de scheepvaart. Met behulp van de data van de 2-wekelijkse peilingen zijn de duinen en topniveaus beschouwd voor verschillende afvoeren. Figuur 5.11 toont rivierduinen voorafgaand aan (1 maart) en na afloop van een relatief hoge afvoer (12 maart, 12 en 27 april). Uit dit figuur kan worden afgeleid dat de duinen het hoogst zijn na afloop van de piekafvoer, en daarna afnemen in hoogte. Daarnaast valt op dat er weinig variatie in de trogniveaus is. Dit zou kunnen worden veroorzaakt door een laag relatief grof sediment, die verhindert dat duinen zich dieper insnijden [e.g. *Blom et al.*, 2003]. Bij hogere afvoeren kan een dergelijke grove laag mogelijk wel eroderen. Benedenstrooms zal de erosiegevoeligheid van de rivierbodem toenemen. Omdat het beschermende effect van een grove laag afneemt, aangezien de gemiddelde korrelgrootte van het sediment in stroomafwaartse richting afneemt (Figuur 5.12).

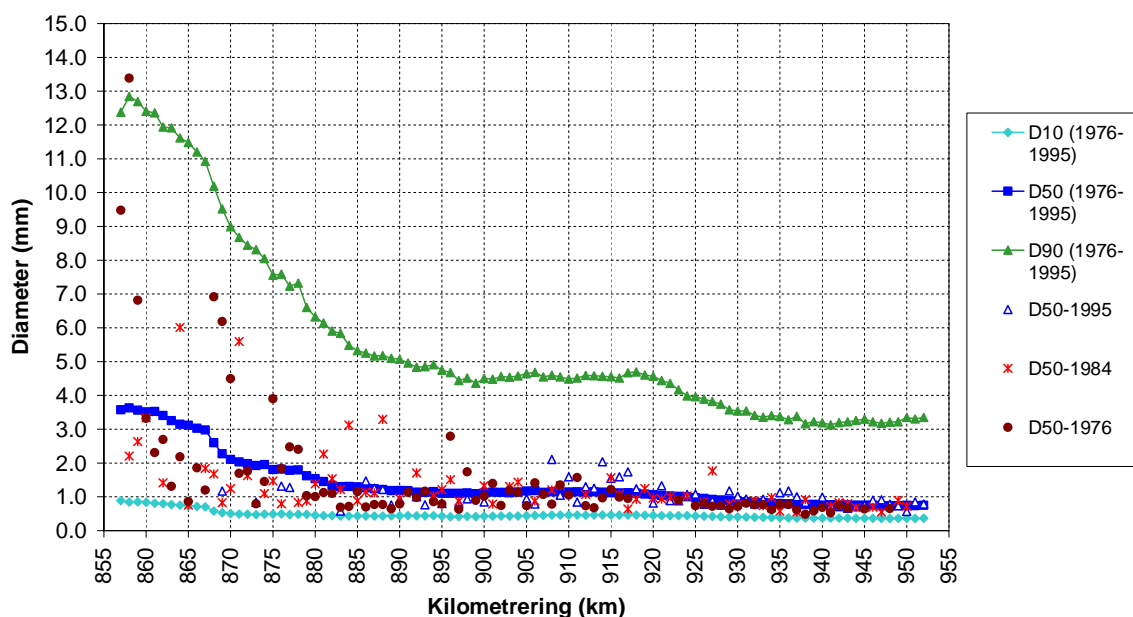
Doordat de trogniveaus gelimiteerd lijken te worden (in ieder geval op het beschouwde traject en gedurende de beschouwde periode), kan de hoogte van duin toenemen bij een hoogwater "event". Dit is te zien in Figuur 5.11. Hoewel het onmogelijk is om te voorspellen waar een extreem hoge top zal optreden, als gevolg van de natuurlijke variabiliteit in duinhoogtes. *Van der Mark et al.* [2008] laten zien dat de standaardafwijking en extremen (95- en 98-percentiel) van het niveau van de duintop gerelateerd kan worden aan het gemiddelde topniveau. De exacte locatie van een extreem hoge top kan dan niet voorspeld worden, wel kan een inzicht verkregen worden in de verwachte hoogte van een extreme top voor een gebied.

De migratiesnelheid van individuele duinen kan moeilijk worden afgeleid uit de 2-wekelijkse peilingen (zie bijvoorbeeld Figuur 5.11). Vanuit de literatuur is bekend dat duinen migreren met snelheden van 1 tot tientallen meters per dag, afhankelijk van de stromingscondities. Zelfs als de rivierafvoer laag is, is het lastig om individuele duinen te volgen, omdat duinen van vorm veranderen, of spontaan lijken te ontstaan en verdwijnen (vergelijk bijvoorbeeld 12 april en 27 april in Figuur 5.11). Om de migratiesnelheid te bepalen uit metingen, zijn metingen met een hogere frequentie nodig. Echter, voor het nautisch monitoren/baggeren is niet zo zeer inzicht nodig in de migratiesnelheid, maar eerder in de snelheid waarmee grote duinen (met hinder voor scheepvaart) in hoogte afnemen (tot geen hinder meer voor scheepvaart) en vice versa, hoe snel duinen in hoogte kunnen toenemen. Eerste analyse van de data doet ons voorlopig concluderen dat inzicht in de dynamiek van rivierduinen kan worden bepaald met de data van de 2-wekelijkse peilingen. Vaker peilen lijkt daarom niet nodig voor het verkrijgen van inzichten over verticale en horizontale veranderingen van rivierduinen.



Figuur 5.11 Bodemplugging in de as van de vaargeul voor verschillende tijdstippen.

Korrel diameter Boven-Rijn en Waal



Figuur 5.12 Karakteristieken van korrelgrootteverdelingen van bodemsedimenten in Bovenrijn en Waal (Ten Brinke, 1997).

Er zijn in het verleden diverse duinhoogte-voorspelmodellen ontwikkeld. Vanuit de literatuur is bekend dat duinhoogte wordt beïnvloed door sedimenteigenschappen (korrelgrootte) en de stroomcondities (afvoer, stroomsnelheid, waterdiepte, rivierbreedte). Sieben [2008] laat zien dat de duinhoogte in de Waal redelijk goed schaal met de Shields-parameter (waarin sedimenteigenschappen en stromingscondities zijn opgenomen). Sieben [2008] toont verder aan dat de duinhoogte in de Waal redelijk goed voorspeld kan worden met de duinhoogte-model van Fredsøe [1982], in combinatie met de sedimenttransportformule van Meyer-Peter-

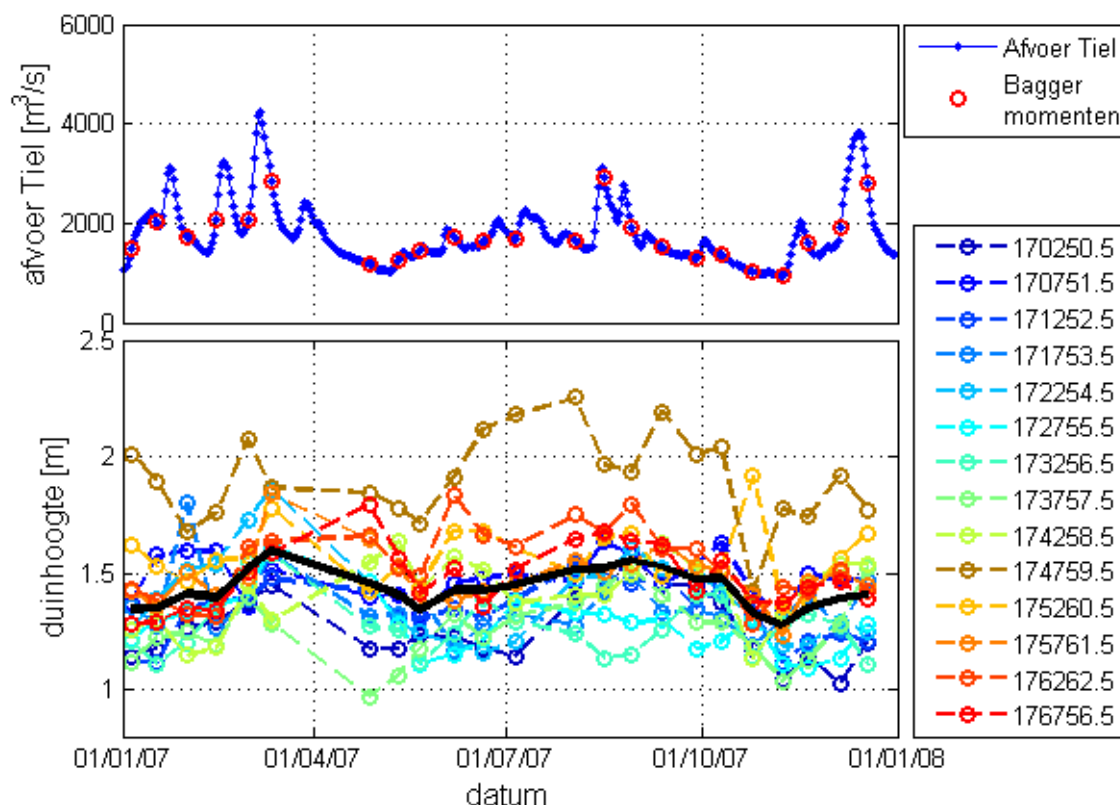
Müller [*Meyer-Peter & Müller*, 1948]. Dit model wordt ook toegepast in het morfologische Delft3D-model van de Waal.

5.6 Verkenning methoden van data-verwerking: statistisch versus individueel

Het bepalen van de hoogte (van top tot trog) van iedere individuele duin is tijdrovend en deels subjectief. Tijdrovend omdat de data eerst vertaald moet worden naar meerdere langspromen over de breedte. Deze langspromen moeten berekend worden uit zeer grote bestanden, dit kost veel processing tijd. Subjectief omdat keuzes moeten worden gemaakt [e.g. *Van der Mark & Blom*, 2007] zoals hoe wordt de raai vastgesteld, loodrecht op de duinkammen of parallel aan de rivieras of vaargeul. Wanneer is een bodemvorm een ribbel en wanneer een duin, hoe wordt omgegaan met grootschaligere variatie in langspromen ("de trends"), en hoe wordt een duinafmeting gedefinieerd. Er zijn tools beschikbaar om individuele toppen en troggen te selecteren en duinafmetingen te bepalen [e.g. *Van Dijk et al.*, 2008; *Van der Mark & Blom*, 2007; *Wesseling & Wilbers*, 2000; *Wilbers*, 2001].

Om inzicht in duinhoogtes en afbraaktijd te krijgen is het niet per definitie noodzakelijk om op het detailniveau van afzonderlijke duinen te kijken. *Sieben* [2008] presenteert een elegante methode waarbij de standaardafwijking in bodemligging als maat voor de duinhoogte wordt genomen. Er wordt uitgegaan van het gegeven dat voor een driehoekig rivierduin geldt dat de duinhoogte gelijk is aan de standaardafwijking maal $\sqrt{12}$.

Deze statistische methode is op de 2-wekelijkse peilingen toegepast. De keuze van de vlakken is belangrijk. In *Sieben* [2008] worden meerdere vlakken over de breedte gekozen. Bij de analyse in dit rapport is 1 vlak over de breedte gebruikt, aangezien de data alleen de vaargeul beslaat (lagere of hogere bodemligging tussen vaargeullijn en normaallijn speelt een kleine rol, bijvoorbeeld kuilen bij kribben, aanzandingen nabij kribvakken). In de lengterichting dienen de vlakken zo lang te zijn dat er een aantal duinen in het vlak liggen. Figuur 5.13 toont het verloop in duinhoogte in de tijd voor vlakken van circa 500 m lang.



Figuur 5.13 Verloop van duinhoogte over het jaar voor vlakken van circa 500 m, bepaald met de statistische methode zoals beschreven in Sieben (2008). De zwarte lijn geeft de gemiddelde duinhoogte weer over alle vlakken. De rode cirkels in het bovenste figuur geven aan wanneer de baggeraars de bodem gepeild hebben.

- Op basis van deze eerste verkenning naar methoden zijn de volgende bevindingen gedaan:
- Omdat rivierduinen een driedimensionaal karakter hebben maakt het vaststellen van raaien loodrecht op duinkammen lastig voor het bepalen van verticale en horizontale migratie. De statistische methode heeft als groot voordeel dat deze onafhankelijk is van de geometrie van de duinen. Waarbij wel rekening gehouden moet worden met de aanname dat de duinen in deze analyse worden beschouwd als driehoek-vormig.
 - De statistische methode is erg gevoelig voor meetfouten. De data gebruikt in deze analyse bevatten meetfouten, enkele punten met zeer afwijkend bodemniveau. Ondanks dat het aantal fouten beperkt was, is het resultaat heel gevoelig voor deze fouten. De data moeten daarom altijd eerst geïnspecteerd worden, en dienen gefilterd te worden.
 - De duinhoogtes zoals bepaald met de statistische methode zijn van dezelfde orde grootte als de duinhoogte die kan worden afgelezen uit langsprofielen zoals Figuur 5.11. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de analyses beperkt is tot 1 jaar (2007) en een beperkt aantal vakken. De gevoeligheid van de keuze van de vakken en de meet sequenties uit 2007 vraagt nog om verdere analyse.
 - Een significante trend in de ontwikkeling van duinhoogte bij toe- of afnemende afvoer is niet terug te zien in de resultaten van de statistische methode (Figuur 5.13). Het is onduidelijk of dit te maken heeft met de methode (bv keuze vlakken) of dat dit gedrag gewoon niet goed af te leiden is uit de beschikbare data.

Om te bepalen of de 2-wekelijkse data frequent genoeg is voor succesvolle analyse van rivierduindynamiek en om te testen of de kruis-correlatie methode en Fourier analyse, zoals toegepast op marine zandgolven, ook geschikt is voor hoog-dynamische bodemvormen in de rivier, is het nog interessant om de kruis-correlatie en Fourier analyse toe te passen op rivierduinen.

6 Conclusies en advies meetstrategie

6.1 Gekwantificeerde bodemdynamiek Noordzee en rivier (vraag1)

De kwantitatieve analyse van verticale bodemdynamiek uit alle beschikbare tijdseries levert trends voor ieder gridpunt met een resolutie van 5 m voor de Noordzee en een resolutie van 1 m voor de Waal.

Voor de dynamiek van de Noordzeegebieden worden drie duidelijke conclusies getrokken:

- 1 Zandgolfmigratie is de belangrijkste factor in de verticaal-dynamische trends voor de Noordzeebodem. Voor de Noordzeegebieden liggen de verticaal-dynamische trends grotendeels tussen -0.05 en 0.05 m/jaar voor de aanvaargebieden naar Rotterdam (met extremen van -0.37 tot 0.42 m/jaar) en tussen -0.15 en 0.15 m/jaar voor de aanvaargebieden naar IJmuiden (met extremen van -0.40 tot 0.53 m/jaar). Offshore laat de morfodynamiekaart een zandgolvenpatroon zien, omdat de grootste dynamiek van de zeebodem veroorzaakt wordt door zandgolfmigratie. Voor het handhaven van de diepte in de aanvaargebieden is groei (verandering van hoogte) de belangrijkste maat, en niet enkel migratie.
- 2 Voor zandgolven worden de verschillen tussen Rotterdam en IJmuiden vooral gevonden in afmetingen en migratiesnelheid. Bij Rotterdam zijn zandgolven gemiddeld 249 m lang en 3.4 m hoog. Bij IJmuiden zijn zandgolven gemiddeld 418 m lang en 2.5 m hoog. Gemiddelde migratiesnelheden van individuele zandgolven zijn 0.8 m/jaar voor Rotterdam en 1.4 m/jaar voor IJmuiden. Netto migratie is naar het noordoosten, maar de meest westelijke profielen bij Rotterdam laten voor sommige kam- en trogpunten ook migratie naar het zuidwesten zien. De kam- en trogpuntmigratie tonen grotere verschillen onderling in migratiesnelheid bij IJmuiden dan bij Rotterdam. Dichter bij de kust, in de IJ-geul en de Eurogeul, wordt de morfodynamiek overheerst door baggeringrepen.
- 3 Waar de verticale bodemdynamiek wordt gedomineerd door menselijke ingrepen, zoals baggeren, hebben de trendwaarden over de gehele serie minder betekenis. Uit de analyses van dit project volgt dat de herstelperioden na baggeren een dynamische trend geven die tegenovergesteld kan zijn aan de algemene trend: aggradatie na baggermomenten tegen degradatie als de algemene trend. Om de hersteltijd te kwantificeren, moeten perioden tussen baggeringrepen afzonderlijk worden geanalyseerd.

Voor de Waal liggen de dynamische trends grotendeels tussen -0.2 en 0.2 m/jaar, met hogere waarden tot absoluut 0.4 m/jaar met name rond peilers van bruggen, nabij kribben en in sommige bochten, voornamelijk door menselijke ingrepen. (Extremen lopen op tot enkele meters per jaar). De verticale trends over de gehele tijdserie voor de Waal op basis van de halfjaarlijkse metingen (JMP) geven enkel inzicht in de autonome bodemdynamiek (macro-schaal). De dynamiek van individuele bodemvormen in de rivier, die ook terugkomt in de dynamiekaart, kan met deze analyse niet worden vastgesteld, omdat de dynamiek van rivierduinen zo hoog is dat individuele duinen niet meer herkenbaar zijn. De migratiesnelheden van duinen in de Waal uit de literatuur liggen in de orde van grootte één tot tientallen meters per dag. Veranderingen op meso-schaal (binnen het jaar door bijvoorbeeld variaties in debiet) en micro-schaal (bijvoorbeeld migratie van duinen) kunnen worden geanalyseerd uit 2-wekelijkse metingen. De variatie is in de orde van decimeters (door enkel

migratie niet hoger dan de duinhoogte). Duinhoogten liggen rond 1.5 m met enkele uitschieters tot iets meer dan 2 m.

6.2 Maat voor morfodynamiek (vraag 4)

In veel voorgaande maar toch recente onderzoeken wordt bodemdynamiek geanalyseerd aan de hand van verschilkaarten, en daarmee in de eenheid: meter. Voor studies waarin lange tijdseries worden gebruikt worden meestal de minimum en maximale waarden van bodemligging op gridpunten gegeven. Omdat van verschillende studiegebieden vaak verschillende tijdseries gebruikt worden, wordt met de eenheid 'meter' geen inzicht verkregen in de trends in de tijd en worden gebieden met verschillende data-tijdseries onvergelijkbaar. In onze onderzoeken gebruiken wij de eenheid m/jaar. Hiermee wordt een verandering in bodemligging in de tijd weergegeven in waarden die vergelijkbaar zijn, ongeacht het aantal datasets en de periode die de tijdserie beslaat. Om dezelfde reden gebruiken we ook voor de horizontale migratie de eenheid voor snelheid: m/jaar.

De tegenstellingen in morfodynamiek van de Noordzeegebieden en de Waal zijn groot, niet alleen voor de verticaal-dynamische trends, maar zeker voor de migratiesnelheden van bodemvormen (klein aantal m/jaar op zee versus enkele meters per dag in de rivier). Dat wil zeggen dat in de Noordzeegebieden de morfodynamische macro-schaal een lange tijdschaal heeft, zeker in vergelijking met die van monitoringsprogramma's. De meso-schaal (afmetingen en dynamiek van zandgolven) lijkt de meest relevante schaal. Of de micro-schaal (megaribbels en korte termijn variaties) kleiner zal zijn dan de termijn van monitoringsprogramma's moet nog nader worden getest, bijvoorbeeld door de pilot study naar de dynamiek van megaribbels in het KPP2012-project (paragraaf 6.5). Daarentegen voor de Waal, zijn zowel de macro, meso- en microschaal van belang voor veilige monitoring.

6.3 Bepalende factoren van bodemdynamiek (vragen 2 en 3)

In het onderzoek naar verklarende factoren van bodemdynamiek, is een eerste aanzet gemaakt in het toepassen van de kwantitatieve "Principal Component" analyse en multivariate regressie op natuurlijke omgevingsparameters en zandgolven in de Noordzeegebieden. De regressiecoëfficiënten van de parameters geven de relatieve bijdrage van de omgevingsparameters. Dit is de prioritering van factoren (onderzoeksvraag 3). Een grotere absolute waarde van de coëfficiënten geeft aan dat deze parameters een belangrijkere rol spelen in de migratie of afmetingen van zandgolven. Een kleine waarde zegt dat deze parameter nauwelijks een rol speelt. Voorlopige resultaten wijzen uit dat voor de Noordzeegebieden de zandgolfhoogte, mediane korrelgrootte en waterdiepte het meest bepalend zijn voor de migratiesnelheid. Al deze correlaties zijn negatief, dat wil zeggen een lagere migratiesnelheid bij grotere waarden voor de parameters. Factoren die ook bijdragen maar ondergeschikt zijn, zijn de maximale stroomsnelheid van het M2-getij (negatief), de residuele stromingssnelheid (Z_0) (positief) en de potentiële bijdrage aan zandtransport door oppervlaktegolven (positief).

De bivariate plots veronderstellen in grote lijnen dergelijke correlaties, maar ook enkele andere. Uit de plots lijken zandgolfmigraties lager te zijn voor toenemende zandgolfhoogte, toenemende mediane korrelgrootte, toenemende waterdiepte, en ook voor toenemende stroomsnelheid van het M2-getij. De potentiële bijdrage door oppervlaktegolven correleert zwak positief: hoe hoger de bijdrage van oppervlaktegolven, des te hoger de migratiesnelheid. Dit is een aanwijzing dat tijdens stormen de migratiesnelheden van

zandgolven zouden kunnen toenemen voor de waterdiepten waarbij golven een impact op de bodem hebben. In tegenstelling tot de regressie-resultaten, blijkt er uit de plots geen correlatie tussen de reststroomsnelheden en migratie. Dit is opmerkelijk, omdat theoretisch de residuele stroming verantwoordelijk is voor zandgolfmigratie. Uit de plots kan geen mate van belangrijkheid worden gehaald, terwijl die wel volgt uit de kwantitatieve resultaten van de principal component regressie.

Opgemerkt moet worden dat deze resultaten niet als definitief kunnen worden beschouwd, omdat het onderzoek nog loopt en zowel de toepassing als interpretatie nog verder verfijnd moet worden en dit dus enkel de voorlopige resultaten zijn. Het onderzoek naar factoren zal worden voortgezet in het KPP2012-project.

Voor de Waal is een dergelijke methode niet toegepast, omdat de migratiesnelheden van duinen niet konden worden bepaald uit de halfjaarlijkse peilingen (zie paragraaf 6.5). In de Waal speelt de grootte van het debiet een rol in de hoogte van de ribbels en de mate van aanzanding.

Verder blijken baggeractiviteiten (tot meer dan 1 meter hoogteverschil per actie in de aanvaargeulen) een grote rol te spelen in de dynamiek. In de huidige analyses van verticale bodemdynamiek zijn zowel natuurlijke als niet-natuurlijke 'evenementen' meegenomen. De analyse van de dynamische trends voor de baggergebieden zou moeten worden opgesplitst in perioden, omdat dit onderzoek aantoont dat de algehele verticaal-dynamische trend negatief kan zijn, terwijl in de herstelperioden na een baggeringreep de trend positief kan zijn (-0.11 m/jaar versus +0.38 m/jaar in het geanalyseerde punt).

Uit een initiële test voor methodeverschillen (single beam versus multibeam opnamen), datadichtheidsverschillen en de doorwerking daarvan in de analyseresultaten, bleek geen trendbreuk zichtbaar voor de verticale dynamiek per gridpunt tussen singlebeam en multibeam opnamen. In de resultaten van de migratiesnelheden van zandgolven, lijken de migratiesnelheden meer te variëren rond de regressielijn dan de latere multibeamopnamen welke een hogere dataresolutie hebben. Voor de Waal zijn enkel multibeamopnamen ontvangen, met gelijke datadichtheid.

Eerdere tests met resolutie hebben uitgewezen dat een lage resolutie van de DTMs kan resulteren in onderschatting van de zandgolfhoogten. Dit wil zeggen dat een toename in zandgolfhoogte in de tijdserie veroorzaakt kan worden door verbeterde dataresolutie van recentere multibeamopnamen ten opzichte van oudere singlebeamopnamen en niet noodzakelijkerwijs een werkelijke trend is.

6.4 Advies meetstrategie (vraag 5)

6.4.1 Noordzeegebieden

De bodemdynamiek in de aanvaargebieden van IJmuiden en Rotterdam wordt hoofdzakelijk veroorzaakt door zandgolfmigratie. De migratiesnelheden zijn beperkt in deze gebieden (overigens niet in andere gebieden zoals Texel), zodat de dynamische trend nog steeds als lineair kan worden aangenomen over de periode van de beschikbare tijdseries (1990-2009). Als migratiesnelheden hoger zouden liggen, of tijdseries langer worden, verplaatsen de zandgolven zich meer dan een kwart van de lengte en zullen trends omdraaien in teken (pos/neg).

Baggeractiviteiten in de IJ-geul en Euro-geul, daarentegen veroorzaken grote verschillen in de verticale dynamiek die niet in een lineaire regressie kunnen worden opgenomen. De lange tijdseries beschikbaar in dit onderzoek maken het mogelijk om het effect van baggeren te kwantificeren. Een betere analyse van bodemdynamiek in gebaggerde gebieden zou zijn als in de huidige volautomatische methode, de analyse wordt opgesplitst in perioden na een baggeringreep (de herstelperiode, waarin bodemaggradatie plaatsvindt) en perioden die overeenkomen met de algehele trend (die naar huidige inzichten niet meer beïnvloed worden door de baggeringreep). In gebieden waar lange tijdreeksen van een groot aantal bodemopnamen beschikbaar zijn (soms wel tot 12 opnemingen per jaar), is het mogelijk inzicht te krijgen in de hersteltijd van een gebied. Met dit inzicht is het mogelijk het advies voor de monitoringsfrequentie aan te passen.

Voorlopige bevindingen van bepalende factoren zijn nog niet voldoende om concrete uitspraken te doen over korte termijn bodemdynamiek na variaties in omgevingsparameters, zoals stormen. Richtlijnen voor de aanpassing of verfijning van de huidige meetstrategie kunnen nog niet worden gegeven op basis van de huidige inzichten.

6.4.2 Waal

In deze rapportage gaat de aandacht uit naar nautische monitoring. Morfologische veranderingen zijn niet alleen van belang voor scheepvaart, maar ook voor een aantal andere aspecten. Te denken valt aan de invloed van ontwikkelingen op het maatgevend hoogwater (MHW), de stabiliteit van keringen en constructies, brugpijlers, voldoende dekking op kabels en leidingen. Hiervoor dienen met zekere regelmaat metingen te worden uitgevoerd. Bovendien zijn metingen van belang voor kalibratie en validatie van modellen. Voor het opstellen of aanpassen van een meetstrategie voor de Bovenrijn en Waal dienen naast scheepvaart ook de andere aspecten te worden beschouwd.

De halfjaarlijkse peilingen (JMP) zijn niet frequent genoeg om de dynamiek, o.a. migratiesnelheden, van individuele rivierduinen te bepalen. De dynamiek van rivierduinen is zo hoog, dat zelfs voor de 2-wekelijkse metingen het lastig is om individuele duinen te herkennen.

Er is veel internationaal onderzoek verricht naar factoren die rivierduinen beïnvloeden, waarmee voorspellers zijn afgeleid voor duinafmetingen. Tevens heeft Rijkswaterstaat veel analyse gedaan naar morfologische ontwikkelingen in de Rijntakken, en is globaal goed bekend hoe de Rijntakken zich morfologisch gedragen. Dit inzicht komt met name tot stand uit analyses van de jaarlijkse multibeampeilingen. In deze rapportage heeft de aandacht zich niet zozeer gericht op herhalen van bestaande kennis en analyse, maar op morfologische ontwikkelingen die zich afspelen op tijdschalen korter dan een jaar (waarvoor de jaarlijkse peilingen niet toereikend zijn).

Morfologische ontwikkelingen die van belang zijn voor het nautisch baggeren en het monitoren met nautisch doel zijn aanzandingen in de vaargeul die ontstaan door seizoensvariaties in de rivierafvoer en de snelheid van groei en afbraak van rivierduinen, omdat de toppen van de duinen tot hinder kunnen leiden. In dit onderzoek is verkend of deze morfologische ontwikkelingen kunnen worden onderzocht met behulp van de beschikbare 2-wekelijkse peilingen. Er is geconcludeerd dat de volgende parameters uit de data kunnen worden afgeleid:

- Seizoensvariaties in de vaargeulbreedte-gemiddelde bodemligging (en daarmee inzicht in een extreme of maximale bodemligging);
- Snelheid waarmee een aanzanding afneemt na een hoogwater;

- Duinhoogtes en topniveaus;
- Snelheid waarmee duinhoogtes of topniveaus toenemen en afnemen.

Uit de hoge dynamiek van rivierduinen volgt dus dat de twee-wekelijkse peilingen met name zeer interessant zijn voor de analyse van bodemdynamiek voor een veilige scheepvaart. De meetfrequentie van 2 weken is geschikt enerzijds om op tijd op nautische knelpunten te reageren en anderzijds om kennis op te doen over morfologische ontwikkelingen die relevant zijn voor de scheepvaart. Geadviseerd wordt om met deze frequentie te blijven peilen. Deze peilingen zijn dus ook relevant voor Rijkswaterstaat zelf. Het zou goed zijn inspanningen te stoppen in het bruikbaar opslaan van deze data. Deze datasets zijn van belang voor bovengenoemde analyses, die rivierkundig inzicht vergroten.

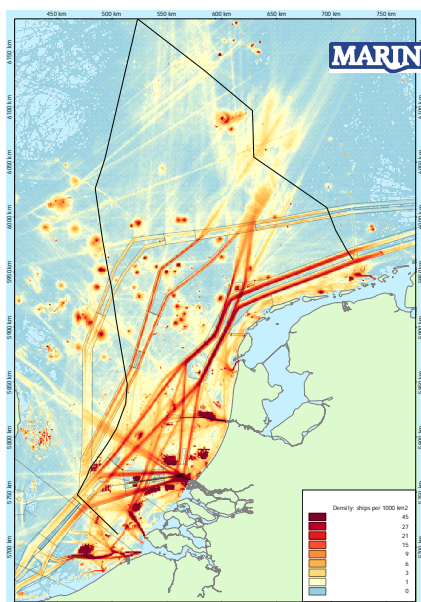
Er zijn meerdere methoden geschikt om de data te verwerken, een methode waarbij individuele duinen worden geselecteerd en waarbij statistiek in bodemligging wordt gebruikt om duinhoogte te bepalen. In een eerste verkenning lijken beide methoden vergelijkbare resultaten voor de duinhoogte te geven, al is een uitgebreide vergelijking nog niet uitgevoerd. Zo moet de toepassing van de kruis-korrelatie analyse en Fourier analyse nog worden getest.

6.5 Aanbevelingen voor verder onderzoek (KPP 2012)

6.5.1 Noordzeegebieden

- Om de invloed van baggeren in de aanvaargeulen naar IJmuiden en Rotterdam op de verticaal-dynamische trends aan te tonen, is er één locatie beschreven. Omdat er duidelijke perioden van dynamiek te onderscheiden zijn, zou de volautomatische analyse van bodemdynamiek moeten worden uitgebreid, zodat de tijdseries van gebaggerde gebieden kunnen worden opgesplitst. De deze manier kan ruimtelijke informatie per gridpunt voor de gehele gebieden worden vastgesteld. Hieruit volgt het onderscheid tussen de trends in bodemdynamiek in de herstelperiode na een baggeringreep en de trends in de periode die niet meer door de baggeringreep beïnvloed wordt. Hiervoor is het wel noodzakelijk volledige informatie over baggeractiviteiten te hebben.
- Wat betreft de omgevingsparameters, moeten het toepassen van de Principal Component analyse (PCA) en regressie (PCR) meer worden doorgrond. Pas dan kunnen de resultaten dienen als basis om een monitoringsstrategie aan te passen. De PCA methode kan ook worden gebruikt om de spreiding door onzekerheid van variabelen af te wegen tegen de precisie van lodingen, zodat kan worden gerelativeerd welke monitoringseisen aan precisie, dichtheid, frequentie etc. gesteld moeten worden. Deze toepassing moet nog worden uitgezocht. Overigens is golfrichting in deze studie nog niet meegenomen, terwijl deze wel wordt gezien als variabele die effect op dynamiek zandgolven kan hebben.
- Een grondige test van het effect van dataresolutie op de hoogtebepaling van bodemvormen is nuttig om een inschatting te kunnen maken of veranderingen in bodemligging geïntroduceerd worden door de data of werkelijk zijn. Dit laatste geldt met name voor de Noordzeegebieden, waar zowel singlebeam als multibeamopnamen worden gebruikt. De methode hiervoor is het statistisch analyseren van de eigenschappen van de lodingen als puntenwolven (point clouds).
- Een pilotstudie naar de dynamiek van megaribbels en of de data de analyse daarvan toelaten is voorgesteld als onderdeel van het KPP-vervolgproject. Megaribbels zijn veel dynamischer dan zandgolven, dus analyse ervan kan een hogere frequentie van monitoring vragen. Een toepassing van de kruis-korrelatie techniek kan worden getest om te kijken of de patroonveranderingen van zowel megaribbels hiermee kunnen worden vastgesteld.
- Omdat de veiligheid van de scheepvaart het belangrijkste doel is van de monitoring van de bodemligging, zouden de gevaren op vastlopen voor de scheepvaart kunnen worden meegenomen in het advies voor de meetstrategie. Doorvaartdiepten in de aanvaargeulen nabij de kust zijn gering (kritiek) voor de diepgang van de schepen. Andersom kan scheepvaart – net als baggeren – een effect hebben op de bodemdynamiek. Gedurende het voorgenoemde Deltares-project 'ValHYD' heeft MARIN analyses uitgevoerd van scheepvaartintensiteit en zijn diepgang gegevens beschikbaar [Van Dijk et al., 2011] (Figuur 6.1). Deze zijn gebaseerd op gegevens van het jaar 2009 uit de maritieme database AIS (Automatic Identification System). De verfijning van deze berekeningen is noodzakelijk voor de aanvaargebieden (met name

toevoegen van getijde, het verkleinen of aanpassen van de celgrootte van het model en het toestaan van verschillende vaarsnelheden zoals bijvoorbeeld in de ankergebieden).



Figuur 6.1 Scheepvaartdichtheid van alle schepen in de Nederlandse Noordzee op basis van AIS-data van 2009.

Met de gevaren voor de scheepvaart en voorspelde bodemhoogten op basis van geanalyseerde bodemdynamiek, kan in een GIS overlay methode een kaart worden gemaakt die aangeeft welke meetfrequenties bij de situatie passen. Detail analyses van de verandering in hoogte (groei) van zandgolven kunnen worden gebruikt om de gevaren voor de scheepvaart te bepalen en te valideren.

- Het advies voor het efficiënter maken van een meetstrategie is een typisch optimalisatieprobleem. In het vervolgproject (op de langere termijn na 2012) zal aandacht worden besteed aan de wiskundige oplossing van een dergelijk generiek probleem.

6.5.2 Waal

- Om een goede afwegingen te kunnen maken voor verbetering van meetstrategieën voor veilige monitoring is het van belang om de groei- en afbraaksnelheid van rivierduinen en aanzandingen in de Waal af te leiden, met gebruik van data over meerdere jaren en grotere trajecten dan nu gedaan. Om dit te kunnen doen, moet gekozen worden welke methode van data-verwerking hiervoor het meeste geschikt is.
- Met name de analyse van de 2-wekelijkse peilingen is interessant om te analyseren. Omdat de rivierduindynamiek hoog is, zouden deze data als enige uitkomst kunnen geven voor de analyse van dynamiek van de bodemvormen in de rivier. Hiervoor zouden data moeten worden opgevraagd en opgeslagen. Een kruis-korrelatie analyse zou de individuele rivierduinen kunnen identificeren als de frequentie van opname aansluit bij de migratiesnelheid van de duinen. Deze acties zouden kunnen worden gekoppeld aan KPP Rivieren.

- De precisie van de analyses voor de Waal kan verhoogd worden door aanlevering van precieze metadata.

7 Literatuur referenties

- Besio, G., Blondeaux, P. & Vittori, G. (2006). On the formation of sand waves and sand banks. *Journal of fluid mechanics*, 557, pp. 1-27.
- Besio, G., Blondeaux, P., Brocchini, M. & Vittori, G. (2004). On the modeling of sand wave migration. *Journal of geophysical research*, 109, C04018, doi:10.1029/2002JC001622.
- Blom, A., J.S. Ribberink, & H.J. De Vriend (2003). Vertical sorting in bed forms: Flume experiments with a natural and a trimodal sediment mixture. *Water Resour. Res.*, 39 (2), 1025, doi:10.1029/2001WR001088.
- Blondeaux, P. & Vittori, G. (2011). A parameterization of the wavelength of tidal dunes. *Earth Surface Processes and Landforms*, DOI: 10.1002/esp.2137.
- Borsje, B. W., De Vries, M. B., Bouma, T. J., Besio, G., Hulscher, S. J. M. H., Herman, P. M. J. (2009). Modeling bio-geomorphological influences for offshore sandwaves. *Continental Shelf Research*, Volume 29, pp. 1289-1301.
- Borsje, B. W., Roos, P. C., Kranenburg, W. M. & Hulscher, S. J. (2011). *Modelling sandwave formation in a numerical shallow water model (Delft 3D)*. s.l., Presentation RCEM, personal communication.
- Buijsman, M.C. and Ridderinkhof, H. (2008). Long-term evolution of sand waves in the Marsdiep inlet, II: relation to hydrodynamics. *Continental Shelf Research*, 28, 1202-1215.
- Davis, J. C. (1986). *Statistics and data analysis in geology*. 2 ed. New York: John Wiley & Sons, Inc..
- Deltares (2010), Voorspelinstrument Duurzame Vaardiepte Rijndelta; DVR-model update 2010 (DVR-2010). Rapport nr 1202433-000, M.F.M. Yossef, S. Giri, & C.F. van der Mark.
- Desta Fekedulegn, B., Colbert, J. J., Hicks, Jr., R. R. & Schuckers, M. E. (2002). *Coping with Multicollinearity: An example on Application of Principal Components Regression in Dendroecology*, Delaware: USDA Forest Services.
- Dorst, L. L. (2009). *Estimated sea floor dynamics in the southern North Sea to improve bathymetric survey planning*. Enschede, Netherlands: Published Ph.D. thesis, University of Twente.
- Fredsøe, J. (1982). Shape and dimensions of stationary dunes in rivers. *Journal of Hydraulic Engineering Div.*, 108 (HY8), 932 - 947.
- Frings, R.M. (2005). Sedimenttransport op de Merwedekop tijdens de hoogwaterperiode van 2004. Rapport nr ICG 05/03, ISBN: 09-77079-20-3 Universiteit Utrecht, Nederland.
- Giri, S., Van Vuren, S., Ottevanger, W., Sloff, K. and Sieben, A. (2008). A preliminary analysis of bedform evolution in the Waal during 2002-2003 flood event using Delft3D. Conference Proceedings Marine and River Dune Dynamics (MARID2008), Leeds, UK.
- Haan, C. T. (1977). *Statistical Methods in Hydrology*. Ames: The Iowa State University Press.
- Hulscher, S. J. M. H. (1996). Tidal-induced large-scale regular bed form patterns in a three-dimensional shallow water model. *Journal of Geophysical Research*, 101(9), pp. 20727-20744.
- Jolliffe, I. T. (2002). *Principal Component Analysis, Second Edition*. 2nd ed. Aberdeen, UK: Springer.
- Knaapen, M. A. F. (2005). Sandwave migration predictor based on shape information. *Journal of Geophysical Research*, Volume 110, F04S11, doi:10.1029/2004JF000195.
- Knaapen, M. A. F., Hulscher, S. J. M. H., De Vriend, H. J. & Stolk, A. (2001). A new type of sea bed waves. *Geophysical research letters*, 28(7), pp. 1323-1326.

- Maljers, D. and Gunnink, J. (2007). Interpolation of measured grain-size fractions. <http://www.searchmesh.net/pdf> : *Imares_Interpolation of measured grain-size fractions.pdf*
- Meyer-Peter, E., & R. Müller (1948). Formulas for bed-load transport. in Proc. 2nd IAHR congress, vol. 2, pp. 39-64, Stockholm, Sweden.
- Németh, A.A., Hulscher, S.J.M.H. and Van Damme, R.M.J. (2007). Modelling offshore sand wave evolution. *Continental Shelf Research*, 27, 713-728.
- Passchier, S. & Kleinhans, M. (2005). Observations of sand waves, megaripples, and hummocks in the Dutch coastal area and their relation to currents and combined flow conditions. *Journal of Geophysical Research*, 110, F04S15, doi:10.1029/2004JF000215.
- Prandle, D. (1982). The vertical structure of tidal currents and other oscillatory flows. *Continental shelf research*, 1(2), pp. 191-207.
- Sieben, J. (2001). Hoogwatereffecten in het zomerbed; verkenning kennis en kennisbehoefte. Rijkswaterstaat RIZA Werkdocument nr 2001.142x.
- Sieben, J. (2008). Taal van de rivierbodem; parameters voor morfodynamiek in rivieren. Waterdienst Rapport nr WD 2008-049, 13 juni 2008.
- Sloff, C.J. and Sieben, J. (2007). Model assessment of sediment nourishment in rivers with graded sediment. Conference proceedings, 5th IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics (RCEM2007), Taylor & Francis, University of Twente, Enschede, Netherlands.
- Soulsby, R., 1997. *Dynamics of marine sands: a manual for practical applications*. London: Telford.
- Sterlini, F.M., Hulscher, S.J.M.H. and Hanes, D.M. (2009), Simulating and understanding sand wave variation: a case study of the Golden Gates sand waves. *Journal of Geophysical Research*, 114, F02007, doi: 10.1029/2008JF000999.
- Sterlini, F.M., Van Dijk, T.A.G.P., IJzer, S. and Hulscher, S.J.M.H. (2011). Seasonal changing sand waves and the effect of surface waves. Conference proceedings of 5th International Short Conference on Applied Coastal Research, Aachen, Germany, 9 p.
- Ten Brinke, W.B.M. (1997). De bodemsamenstelling van Waal en IJssel in de jaren 1966, 1976, 1984 en 1995. Rijkswaterstaat RIZA, ISBN 9036950562.
- Van der Giessen, A., De Ruijter, W. P. M. & Borst, J. C. (1990). Three-dimensional current structure in the Dutch coastal zone. *Netherlands Journal of Sea Research*, 25(1-2), pp. 45-55.
- Van der Mark, C.F., & A. Blom (2007). A new and widely applicable tool for determining the geometric properties of bedforms. CE&M Research Report 2007R-003/WEM-002 ISSN 1568-4652, University of Twente, Enschede, the Netherlands.
- Van der Mark, C.F., A. Blom, & S.J.M.H. Hulscher (2008). Quantification of variability in bedform geometry. *Journal of Geophysical Research*, 113, F03020, doi:10.1029/2007JF000940.
- Van der Molen, J. & De Swart, H. E. (2001). Holocene wave conditions and wave-induced sand transport in the southern North Sea. *Continental shelf research*, 21, pp. 1723-1749.
- Van Dijk, T.A.G.P. and Kleinhans, M.G. (2005). Processes controlling the dynamics of compound sand waves in the North Sea, Netherlands. *Journal of Geophysical Research*, 110, F04S10, doi:10.1029/2004JF000173.
- Van Dijk, T.A.G.P., Lindenbergh, R.C. and Egberts, P.J.P. (2008). Separating bathymetric data representing multi-scale rhythmic bedforms: a geostatistical and spectral method compared. *Journal of Geophysical Research*, 113, F04017, 10.1029/2007JF000950.
- Van Dijk, T.A.G.P., Van der Tak, C., De Boer, W.P., Kleuskens, M.H.P., Doornenbal, P.J., Noorlandt, R.P. and Marges, V.C. (2011). The scientific validation of the hydrographic survey policy of the Netherlands Hydrographic Office, Royal Netherlands Navy. Deltares report 1201907-000-BGS-0008, 165 pp.

- Van Rijn, L. C. (1993). *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*. Amsterdam: Aqua
- Van Santen, R.B. (2009). Tidal sand waves in the North Sea: data analysis and modelling. Unpublished MSc dissertation thesis, University of Utrecht, Utrecht, Netherlands.
- Van Santen, R.B., De Swart, H.E. and Van Dijk, T.A.G.P. (2011). Sensitivity of tidal sand wavelength to environmental parameters: A combined data analysis and modelling approach. *Continental Shelf Research*, 31, 966-978.
- Varfaillie, E., Van Lancker, V. & Van Meirvenne, M. (2006). Multivariate geostatistics for the predictive modelling of the surficial sand distribution in the shelf seas. *Continental Shelf Research*, 26(19), pp. 2454-2468.
- Verlaan, M., Zijderveld, A., De Vries, H. and Kroos, J. (2005). Operational storm surge forecasting in the Netherlands: developments in the last decade. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 363, 1441-1453.
- Wesseling, C. & Wilbers, A.W.E. (2000). Handleiding DT2D versie 2.3: Software voor dune-tracking in twee dimensies. Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, Universiteit Utrecht, Utrecht.
- Wilbers, A.W.E. (2001). Verbetering van de dune-tracking methode. Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, Universiteit Utrecht, Utrecht.
- Wilbers, A. (2004). The development and hydraulic roughness of river dunes. Ph.D. thesis, University of Utrecht, Netherlands.

8 Bijlagen

8.1 Berekening van potentieel zandtransport aan de bodem door oppervlaktegolven (vooral nog in het Engels)

Wavelength and wavenumber

Linear wave theory is used to calculate wavelength and wavenumber of the surface waves from the only known parameters; wave height and wave period (Soulsby, 1997). As a consequence of using linear wave theory, effects of having a range of waves with differing lengths and heights within a specified wave spectrum are neglected. Therefore for each measurement interval only one wave type with the same height, length and period, is assumed. To simplify matters even more daily averages of the wave height and period are calculated. With these averages the wave number is calculated using the dispersion relation for linear free capillary gravity waves

$$\omega^2 = \left(gk + \frac{\tau}{\rho_w} k^3 \right) \tanh(kh). \quad (2.1)$$

In this equation ω denotes the angular frequency, g the gravity acceleration, k the wavenumber, ρ_w the water density ($\sim 1025 \text{ kg/m}^3$), τ the uniform surface tension ($\sim 0.08 \text{ Nm}^{-1}$) and h the water depth. Since wavenumbers are expected to be small, it is assumed that the approximation for gravity waves is valid. This approximation states that

$$\frac{\tau k^2}{\rho g} \ll 1. \quad (2.2)$$

This reduces the dispersion relation to

$$\omega^2 = gk \tanh(kh). \quad (2.3)$$

By inserting the parameters $\xi = \frac{\omega^2 h}{g}$, $\eta = kh$ and $\omega = \frac{2\pi}{T}$, the final equation reduces to

$$\xi = \eta \tanh(\eta). \quad (2.4)$$

This equation is solved iteratively using the Newton-Raphson iteration scheme

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}, \quad (2.5)$$

with $x_n = \eta$ and $f(\eta) = \xi - \eta \tanh(\eta)$.

The iteration is stopped when the difference between x_{n+1} and x_n is smaller than 0.000001.

Finally the wavenumber and wavelength are calculated from η .

Motion at the seabed

The orbital velocity at the bottom follows directly from the wavenumber

$$u_{orb} = \frac{\omega h}{2 \sinh(kh)}. \quad (2.6)$$

The amplitude of the orbital motion is calculated with

$$A_{orb} = \frac{u_{orb}T}{2\pi}. \quad (2.7)$$

The skin friction is used to calculate the friction of currents at the bottom generated by surface waves. Soulsby (1997) presents a general expression for the skin friction

$$\tau_w = \frac{1}{2}\rho_w f_w u_{orb}. \quad (2.8)$$

To compare results from this analysis with literature, the White Colbrook equation of the skin friction discussed by Van Rijn (1993) and used by Van Dijk & Kleinhans (2005) is used

$$\tau_w = \rho_w u_{orb}^2 \exp[5.213 \left(\frac{2.5D_{50}}{A_{orb}} \right)^{0.194} - 5.977], \quad (2.9)$$

in which D_{50} is the median sediment grainsize. When the skin friction is known, the Shields parameter at the bottom can be calculated

$$\theta = \frac{\tau_w}{(\rho_s - \rho_w)gD_{50}}. \quad (2.10)$$

Sediment transport is only possible when the Shields parameter exerts a certain threshold. Van Dijk & Kleinhans (2005) use a range between 0.03 and 0.06, this study however uses an approximation of Soulsby (1997)

$$\theta_{cr} = \frac{0.30}{1 + 1.2D_*} + 0.55[1 - \exp(-0.020D_*)]. \quad (2.11)$$

In this expression, D_* is the dimensionless grain size which is calculated by

$$D_* = \left[\frac{g \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right)}{u^2} \right]^{1/3} D_{50}, \quad (2.12)$$

with ρ_s the grain density ($\sim 2650 \text{ kg/m}^3$) and u the kinematic viscosity ($\sim 1.36 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$).

8.2 Berekeningen van de 'Principal Component' Analyse en Regressie (vooralnog in het Engels)

8.2.1 Principal Component Analysis

The used method for calculating the PCA closely follows the textbooks of Haan (1977), Davis (1986), Jolliffe (2002) and an article of Desta Fekedulgn et al. (2002).

To obtain independent variables, the PCA uses eigenvalue and eigenvector manipulations on the variance-covariance matrix of the input data.

Since the input consist of data with differing units and are all varying to a different extent, the original data is normalized and standardized

$$X_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j}. \quad (2.13)$$

Normalization is done by subtracting the mean of the variable (\bar{x}_j) from (x_{ij}). This quantity is then standardized by dividing by the standard deviation of (x_j), (s_j). The columns of the input data represent the input variables, the rows are the measurement locations.

The standardized input data matrix is written as: $[X_{ij}] = \mathbf{X}$. This matrix has zero means and unit standard deviations.

The next step is to calculate the variance-covariance matrix \mathbf{R} from \mathbf{X}

$$\mathbf{R} = \frac{\mathbf{X}' \mathbf{X}}{n - 1}, \quad (2.14)$$

with n the number of data points.

Now the eigenvalues and eigenvectors of the variance-covariance matrix can be calculated by solving,

$$(\mathbf{R} - \lambda_j \mathbf{I}) a_j = 0. \quad (2.15)$$

In the equation λ_j is the eigenvalue corresponding to the eigenvector a_j . The matrix with the eigenvalues on the diagonal and zeros otherwise is written as $[\lambda_j] = \mathbf{D}_\lambda$.

The eigenvector matrix is written as $[a_{ij}] = \mathbf{A}$.

Finally the principal components (\mathbf{Z}) are calculated from \mathbf{X} and the eigenvector matrix

$$\mathbf{Z} = \mathbf{X}\mathbf{A}. \quad (2.16)$$

This set contains uncorrelated variables and is linear to the original data. These variables are also known as the scores. Each principal component explains to a certain extent the variance in the data.

To determine which input variable is represented along which principal component, the correlation between the principal components and the input data is calculated.

After some manipulation this is done with

$$\mathbf{L} = \mathbf{A}\mathbf{D}_\lambda^{1/2}. \quad (2.17)$$

This matrix is called the factor loading matrix.

To make interpretation easier, it is common practice to rotate the factor loading matrix with a Varimax rotation

$$\mathbf{L}_* = \mathbf{L}\mathbf{T}, \quad (2.18)$$

with \mathbf{T} the rotation matrix. This manipulation should result in a matrix with only high and low correlations and a minimum of intermediate correlations. The last category is hard to interpret.

8.2.2 Interpretation of the principal components

There are several options of determining the principal components. Unfortunately the literature is decisive about which option is best.

In general one wants to lose the possible multicollinearity of the input variables and one wants to decide which input variable(s) explain(s) the behaviour of the dependent variables. This study considers two options which are used frequently in the literature.

First, recall that each principal component corresponds to an eigenvalue. The ratio of the eigenvalues to the sum of all eigenvalues determines to which level the total variance in the data is explained by the component (i.e. eigenvector) corresponding to the eigenvalue.

For example, the ratio of eigenvalue j to the sum of all eigenvalues is 70%. This means that the j^{th} principal component explains 70% of the total variance.

Now the effect of multicollinearity is avoided by discarding all principal components that do not correspond in explaining the total variance. A certain arbitrary threshold has to be introduced to decide which principal component has to be eliminated. Multivariate regression can now be applied on the remaining principal components. Note that all input variables are represented in the resulting regression equation.

A second method of reducing the size of the principal component matrix, is by inspection of the rotated factor loading matrix (\mathbf{L}^*). Instead of eliminating principal components, one eliminates the input variables. When an input variable does not correlate with any of the principal components, one may conclude that this variable is not important and may be discarded in the standardized input matrix (matrix \mathbf{X}). Usually a threshold of a correlation higher than 0.90 is used. After eliminating the unimportant variables, the principal components are calculated again with the reduced input matrix \mathbf{X} . Linear regression can now be performed on the new set of principal components. A drawback of this method is that multicollinearity is not necessarily been avoided.

8.2.3 Principal component regression

In order to explain the behaviour of the dependent variables (e.g. the migration rates) to the variables, one can perform a multivariate regression on the principal components. The regression model for the original input variables reads,

$$y_i = \sum_{j=1}^p \beta_j x_{ij} + \varepsilon_i \quad (2.19)$$

with y_i the dependent variable, β_j the regression coefficients and ε an error coefficient. The regression coefficients are then estimated by

$$[\beta_j] = \left([x_{ij}]' [x_{ij}] \right)^{-1} [x_{ij}]' [y_i]. \quad (2.20)$$

This expression holds only when no multicollinearities exists. This is not likely in the presented analysis. Therefore it is more convenient to calculate the regression coefficients directly from the (reduced) set of principal components. This is done by the following the procedure. This starts by rewriting (16),

$$\mathbf{XAA}'\boldsymbol{\beta} = \mathbf{Z}\boldsymbol{\gamma}, \quad (2.21)$$

with $\boldsymbol{\gamma} = \mathbf{A}'\boldsymbol{\beta}$. From this (19) is written as,

$$\mathbf{Y} = \mathbf{Z}\boldsymbol{\gamma} + \boldsymbol{\varepsilon}. \quad (2.22)$$

Since the principal components are orthogonal, a least square method is now allowed to use,

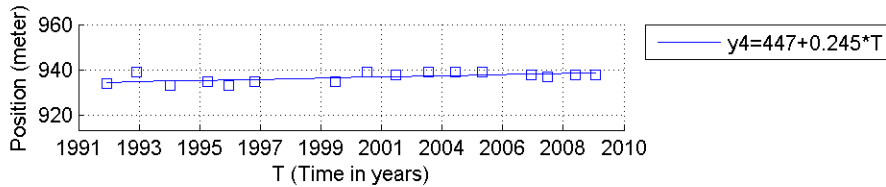
$$\boldsymbol{\gamma} = (\mathbf{Z}'\mathbf{Z})^{-1}\mathbf{Z}'\mathbf{Y}. \quad (2.23)$$

The regression coefficients in terms of the standardized input data follow from,

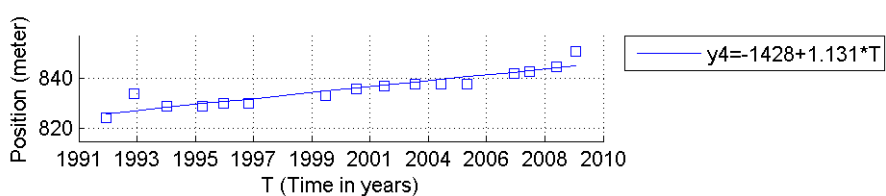
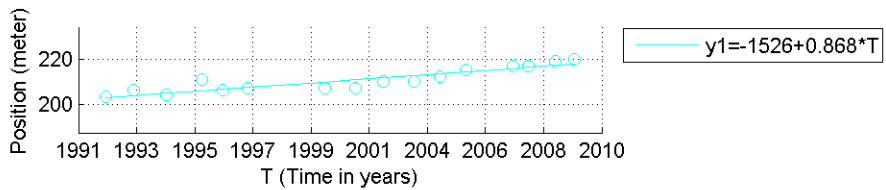
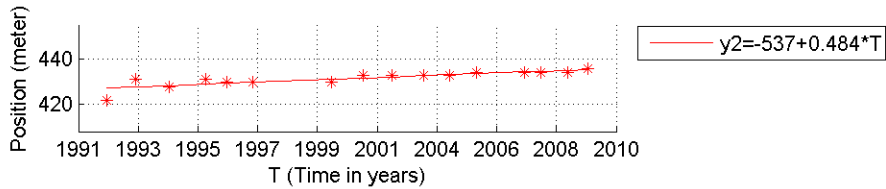
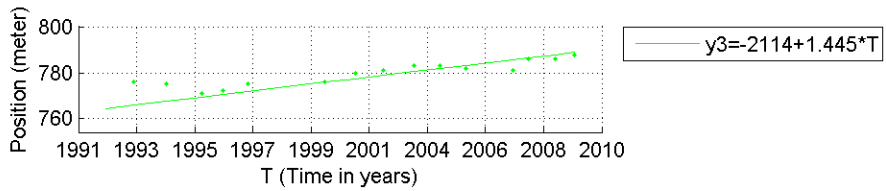
$$\boldsymbol{\beta} = \mathbf{A}\boldsymbol{\gamma} \quad (2.24)$$

This procedure is equivalent to (19) and (20), but possible difficulties caused by multicollinearities are avoided by using multiple regression on the principle components.

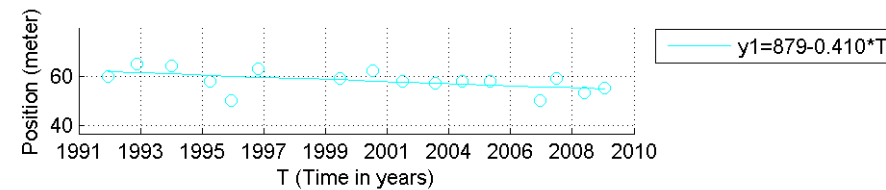
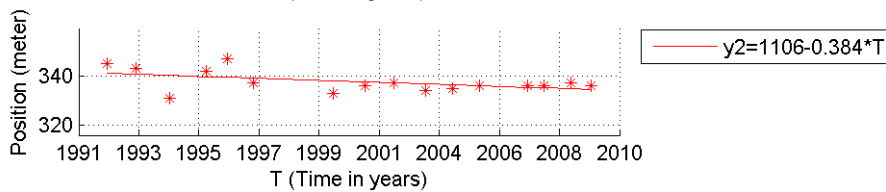
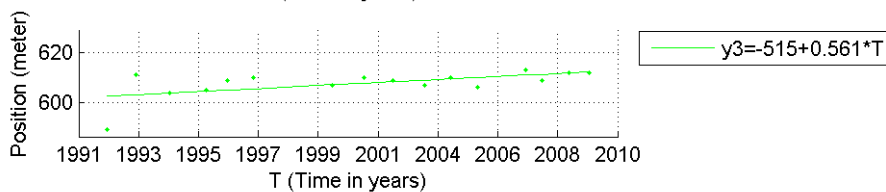
8.3 Zandgolfkam en -trog migratie Rotterdam (profiel 1)



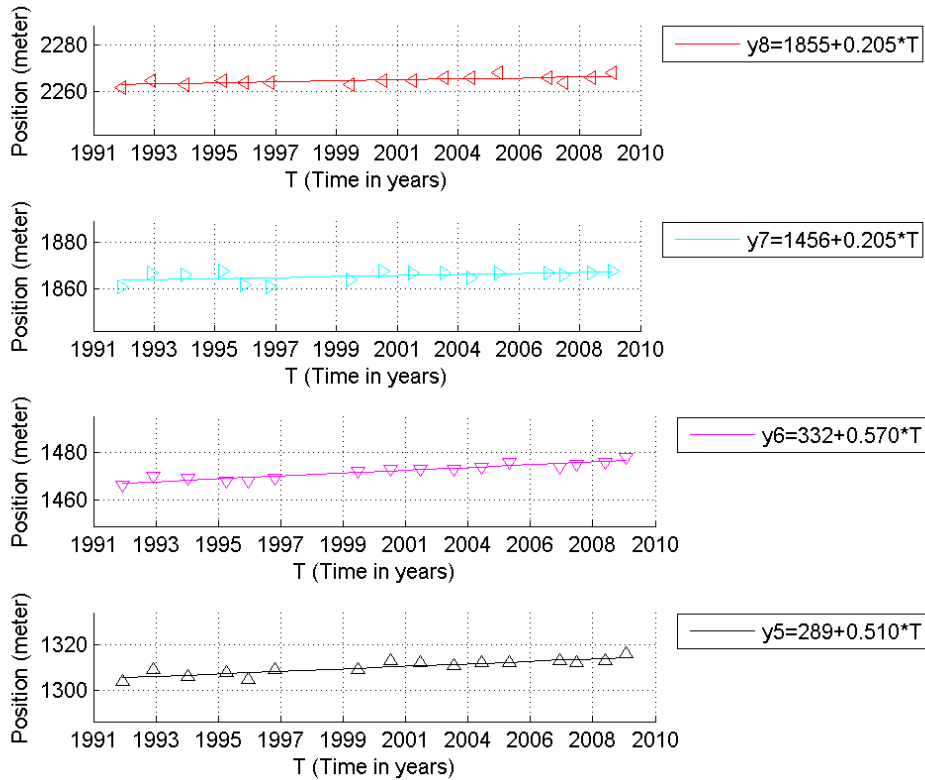
Kampunten van zandgolven 1 t/m 4 in de tijd



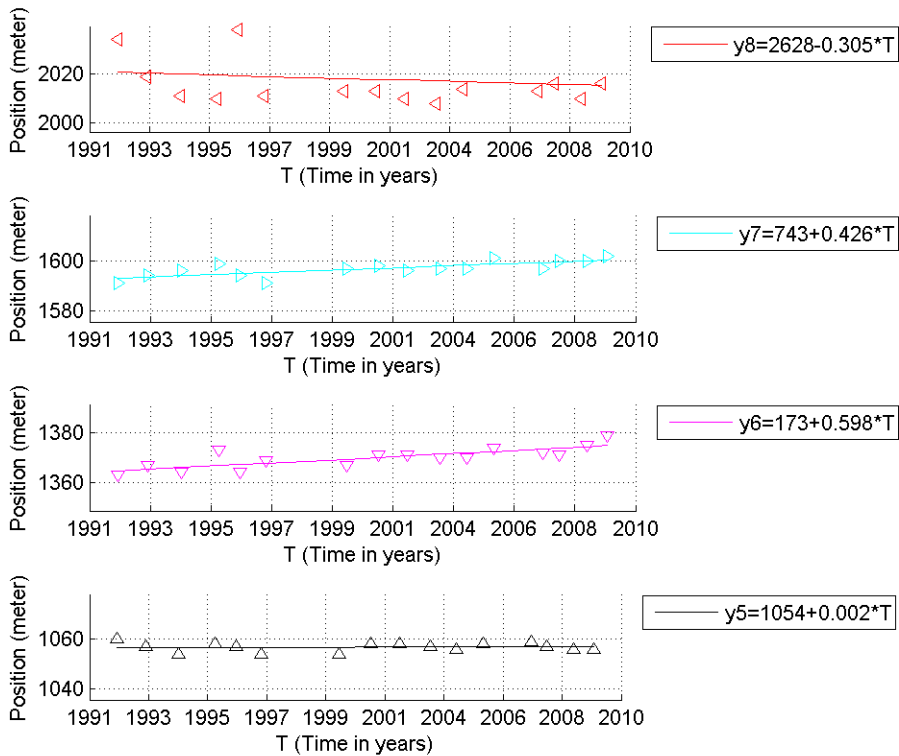
Trogpunten van zandgolven 1 t/ 4 in de tijd.

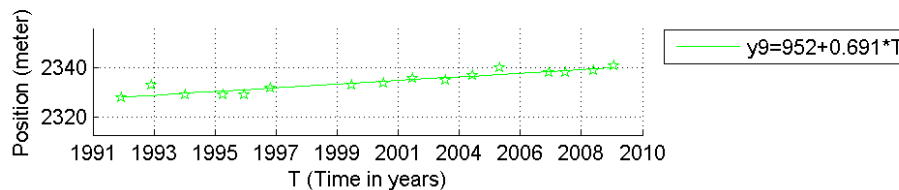
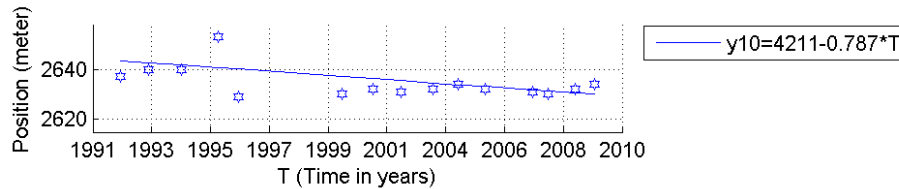
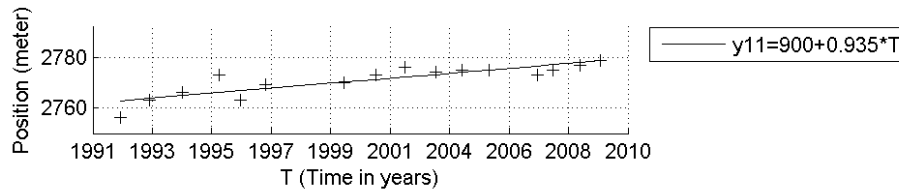
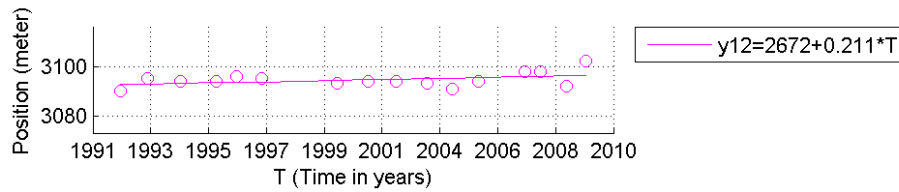
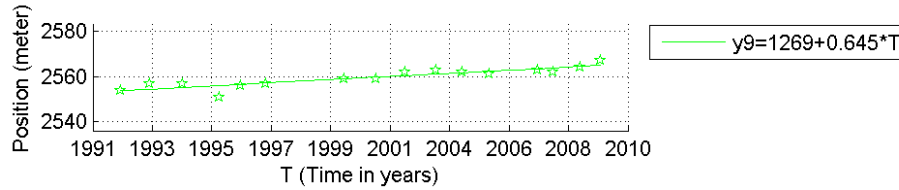
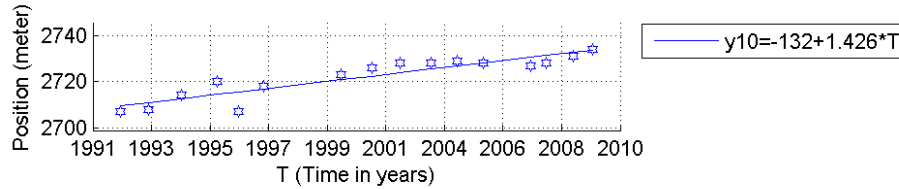
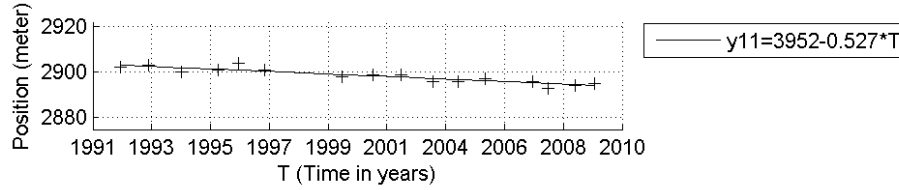
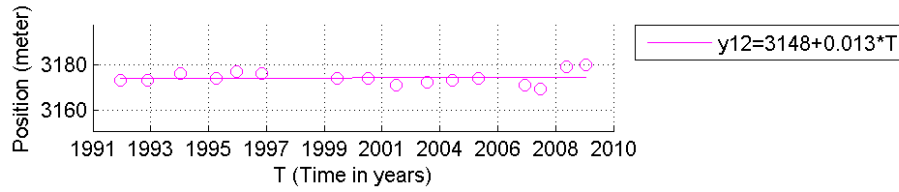


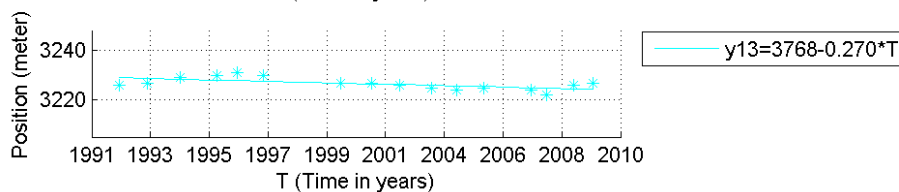
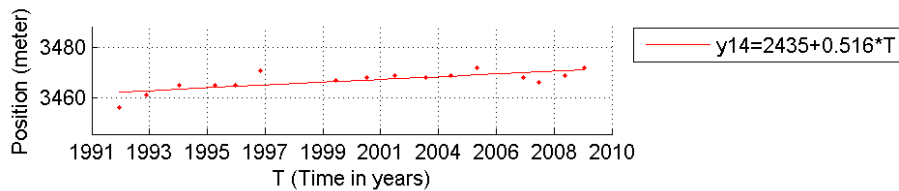
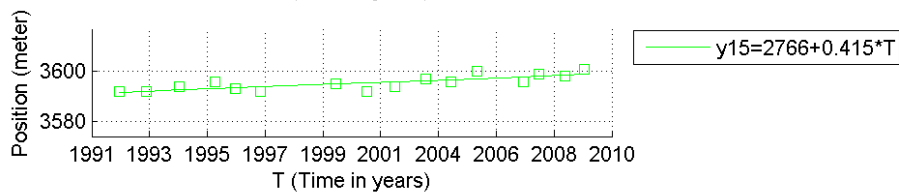
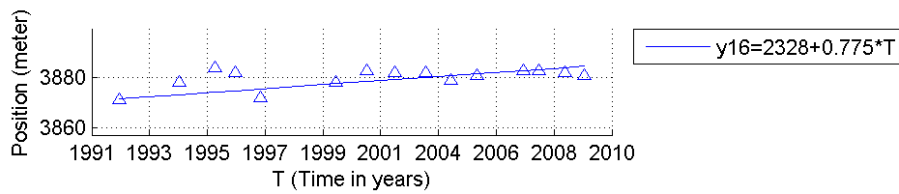
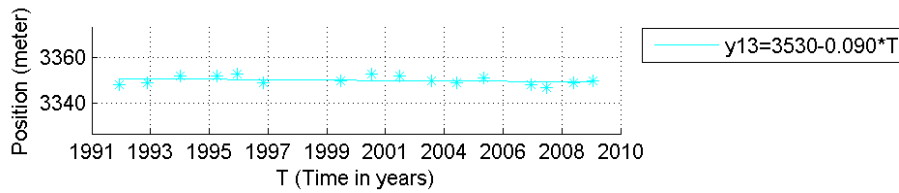
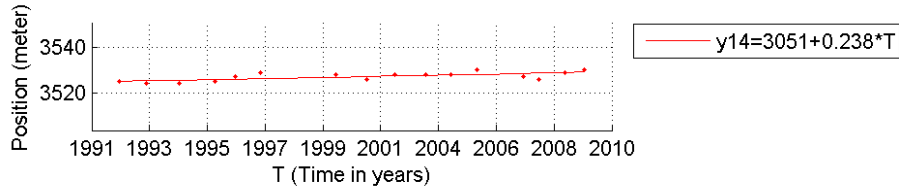
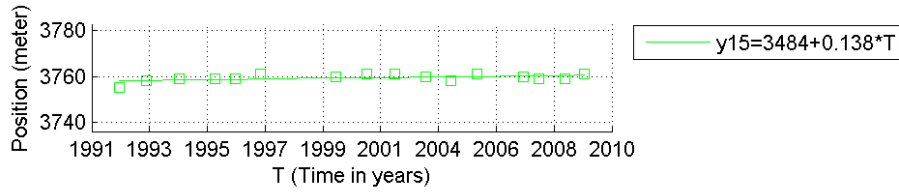
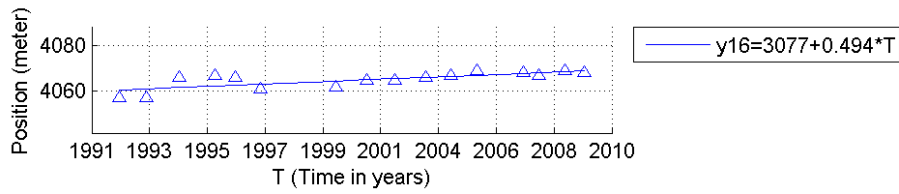
Kampunten van zand-golven 5 t/m 8 in de tijd

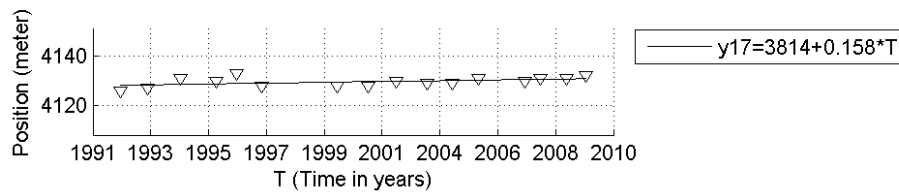
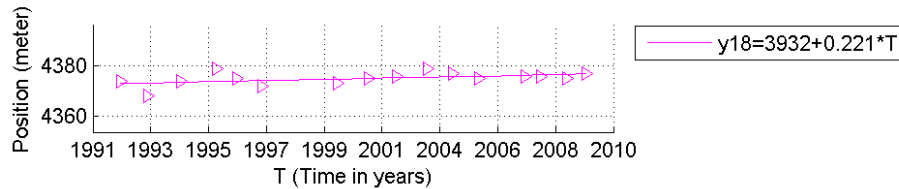
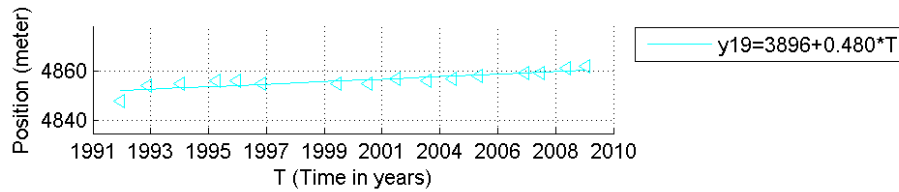
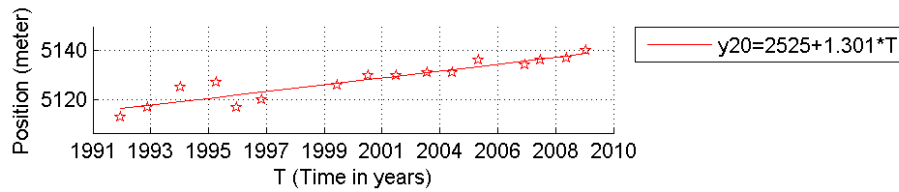
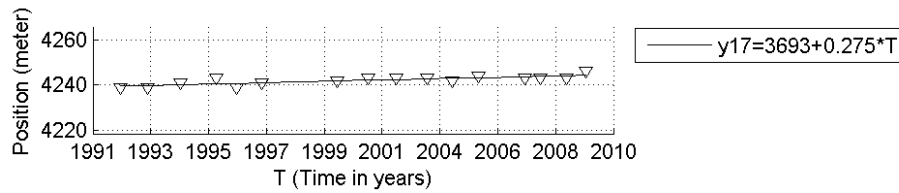
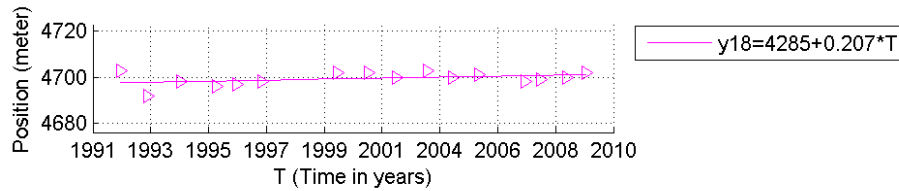
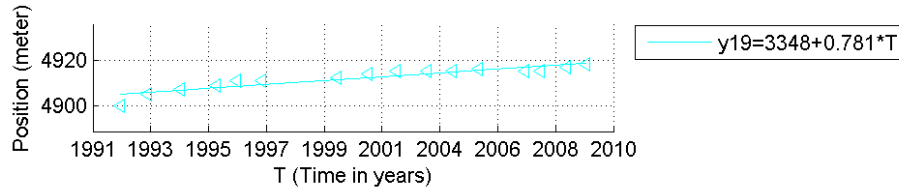
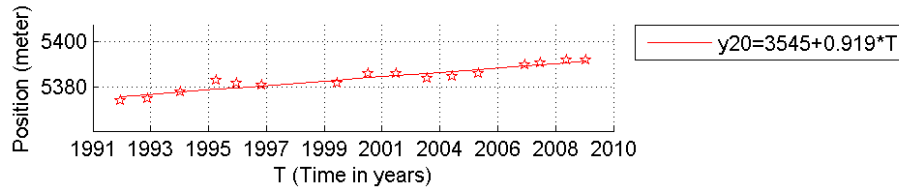


Trogpunten van zandgolven 5 t/m 8 in de tijd.





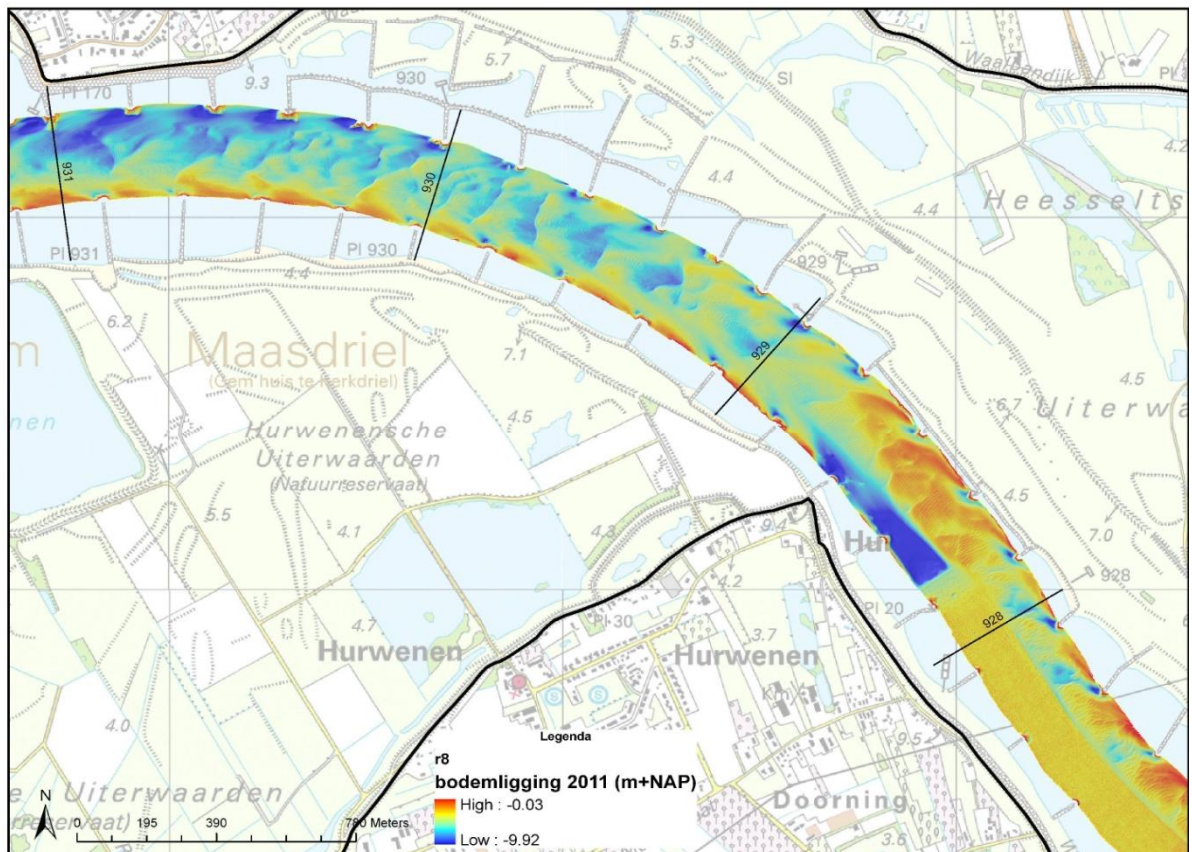




8.4 Bodemligging Waal

Deelkaarten van de Bovenrijn en Waal voor de jaren 2001 en 2011 zijn bijgevoegd als aparte figuren (.pdf). De kaarten beslaan het deel van de Waal tussen Spijk en Gorinchem. (De volgorde van de figuren is stroomopwaarts.) Op deze figuren is de locatie in de Bovenrijn en Waal aangegeven met kilometervakken. Naast een goede weergave van de natuurlijke morfologie van de rivierbodem, zoals de verschillen tussen vlakke bodem en het voorkomen van rivierduinen en de verschillen tussen typen rivierduinen, zijn ook de menselijke effecten te herkennen: baggersporen en fenomenen als vaste lagen en bodemschermen. Op de opeenvolgende kaarten is het grote verschil in karakter van de duinen van traject tot traject heel duidelijk te zien.

Hieronder staat één kaart ter voorbeeld afgebeeld. De volledige serie kaarten wordt enkel digitaal aangeleverd.



Bodemligging in 2011 ten opzichte van NAP van km 928 tot km 931 in de Waal.