

**Aanvullende metingen en
modellering pilot Houtribdijk**



Aanvullende metingen en modellering pilot Houtribdijk

Robert McCall
Marlies van der Lugt
Matthijs Gawehn
Vincent Vuik (HKV)

1209013-006

Titel

Aanvullende metingen en modelering pilot Houtribdijk

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Ecoshape Building with Nature	1209013-006	1209013-006-ZWS-0003	119

Trefwoorden

Zandige voorlanden, Houtribdijk, Veldmetingen, Hydrodynamica, Morfologie, XBeach

Samenvatting

Dit rapport beschrijft de metingen en resultaten van de additionele meetcampagne op het pilotstrand Houtribdijk in de periode september–december 2017, evenals de ontwikkeling van een conceptueel en uitbreiding van een numeriek model voor de morfologische ontwikkeling van zandige stranden in merengebieden.

De metingen van waterstand, golfhoogte en golfvorm op het pilotstrand laten zien dat de hydrodynamische condities op het pilotstrand sterk afwijken van normale condities voor zee-kusten. Hierbij spelen met name het ontbreken van getij in combinatie met een sterke correlatie tussen golfhoogte en waterstandsopzet, en de laag-energetisch, weinig-asymmetrische golven, een belangrijke rol bij de morfologische ontwikkeling van het strand. Op basis van deze bevindingen is een conceptueel model opgezet die de hydrodynamische condities relateert aan de ontwikkeling van het onderwaterplateau en steile strand van het pilot.

De morfologische modelconcepten voor het pilotstrand zijn geïntegreerd in het numerieke model XBeach en gevalideerd aan de hand van de additionele metingen. Het model laat een goede representatie zien van de gemeten hydrodynamische condities en morfologische ontwikkeling.

Referenties

Deltares, 2017. *Plan additionele metingen Pilot Houtribdijk*. Memo 1209013-008-ZWS-0001.
 Deltares, 2018. *Monitoring pilot Houtribdijk*. Tech. rapport 1209013-000-ZWS-0035.

Version	Date	Author	Initials	Review	Initials	Approval	Initials
1.0	juni. 2018	Robert McCall	Rm	Ap van Dongeren	Av	Dirk-Jan Walstra	DJW
		Marlies van der Lugt					
		Matthijs Gawehn					
		Vincent Vuik (HKV)					

Status

definitief

Contents

1 Inleiding	1
1.1 Achtergrond	1
1.2 Probleembeschrijving	2
1.3 Doelstelling	4
1.4 Leeswijzer	4
2 Aanvullende metingen	5
2.1 Inleiding	5
2.2 Opzet metingen	5
2.3 Meteo condities binnen meetcampagne	7
2.3.1 Wind	7
2.3.2 Luchtdruk	8
2.3.3 Waterstanden	9
2.4 Beschikbaarheid data	9
2.5 Verwerking drukdozen	10
2.5.1 Kwaliteitscontrole	10
2.5.2 Druk naar oppervlakteuitwijking	11
2.6 Verwerking ADV data	12
2.6.1 ADV correctie op positionering	12
2.6.2 PUV naar golven	13
2.6.3 Hoog- en laagfrequente snelheidscomponenten	14
2.7 Kwaliteitscontrole	16
3 Overzicht en analyse meetresultaten	21
3.1 Inleiding	21
3.2 Locatie en opslag meetdata	21
3.3 Overzicht golfcondities	21
3.4 Overzicht stroming	22
3.5 Inzoomen op storm periode	23
3.6 Overzicht morfologische verandering	25
3.7 Analyse golven op het plateau	26
3.7.1 Golfhoogte	26
3.7.2 Golfrichting	28
3.8 Analyse golfasymmetrie	29
3.8.1 Methodiek	29
3.8.2 Resultaten	30
3.9 Analyse stromingen	31
3.10 Conclusies	33
4 Conceptueel model profielvorm	35
4.1 Inleiding	35
4.2 Diepte plateau	36
4.3 Breedte plateau	39
4.4 Helling plateau	43
4.5 Helling strand	44
4.6 Effect ontbreken getij	44
4.7 Synthese conceptueel model profielvorm	45

5 XBeach modelering	47
5.1 Inleiding	47
5.2 Korte beschrijving XBeach	48
5.3 Modelontwikkeling	49
5.3.1 Swash-zone transporten	49
5.3.2 Sediment transport door vortex-ripple effect en golfasymmetrie	50
5.4 Modelopzet	52
5.5 Validatie hydrodynamica storm 13 september	54
5.6 Vergelijking morfologie en effect modelontwikkelingen voor storm 13 september	57
5.7 Vergelijking morfologie en effect modelontwikkelingen middellange termijn simulatie	61
5.7.1 Modelopzet	62
5.7.2 Modelresultaten	62
5.8 Conclusies	64
6 Conclusies	65
7 Referenties	67
Bijlage(n)	
A Plan additionele metingen Pilot Houtribdijk	A-1
A.1 Inleiding	A-1
A.2 Kennisvragen	A-2
A.3 Doel en uitgangspunten metingen	A-4
A.4 Geplande metingen	A-5
A.4.1 Metingen bij Kennisvraag 1	A-5
A.4.2 Metingen bij Kennisvraag 2	A-7
A.5 Verwerking meetdata	A-8
A.5.1 Verwerking ruwe data en kwaliteitscontrole	A-8
A.5.2 Verwerking en analyse hydrodynamische data t.b.v. Kennisvraag 1	A-8
A.5.3 Analyse hydrodynamische en morfologische data t.b.v. Kennisvraag 2	A-9
A.6 Tijdsplanning	A-9
A.7 Kosten	A-10
A.8 Risico's	A-10
A.9 Referenties	A-12
B Analyse stroming en golven (HKV)	B-1
B.1 Inleiding	B-1
B.2 Plaatsing van de instrumenten	B-1
B.3 Golfhoogte / waterdiepteverhouding op het plateau	B-1
B.4 Golfrichting op het plateau	B-4
B.5 Stroomrichting op het plateau	B-6
B.6 Stroomsnelheid op het plateau	B-12
C Theoretische invloed hogere harmonischen analyse golfasymmetrie	C-1
D Literatuurbeschrijving en andere stranden	D-1
D.1 Stranden in het Markermeer	D-1
D.1.1 Randgegevens Markermeer	D-1
D.1.2 Locatie van de stranden en sedimentcompositie	D-1

D.1.3	Profielvorm en sedimentbeweging	D-2
D.2	Markermeerstranden in Nederlands en internationaal context	D-7
D.3	Conclusies	D-7
E	Sediment transport mechanismen pilot Houtribdijk	E-1
E.1	Transportmechanismen en de mobilisatie van sediment	E-1
E.1.1	Initialisatie van sediment transport door (langs)stroming	E-1
E.1.2	Initialisatie van golf gedreven sediment transport	E-1
E.2	Schatting stroomsnelheden door streaming en retourstroming en effect op transport	E-2
E.3	Beddingvormen en transportrichting	E-5
E.3.1	Mobiliteitsgetal en transportregimes	E-5
E.3.2	Afhankelijkheid transportstadium van H_s	E-7
E.3.3	Afhankelijkheid transportstadium van de (plateau)diepte	E-9
E.3.4	Afhankelijkheid transportstadium van de korreldiameter	E-9
E.4	Formules	E-11
E.4.1	Sediment transport	E-11
E.4.2	Transportrichting bij “vortex ripple” regime ($\psi < 190$)	E-12
F	Beschrijving langjarige hydrodynamische condities HRD	F-1
G	Simulatie morfologische ontwikkeling ingreep januari 2018	G-1
G.1	Inleiding	G-1
G.2	Model opzet en randvoorwaarden	G-1
G.3	Resultaten	G-2
G.4	Conclusies	G-6

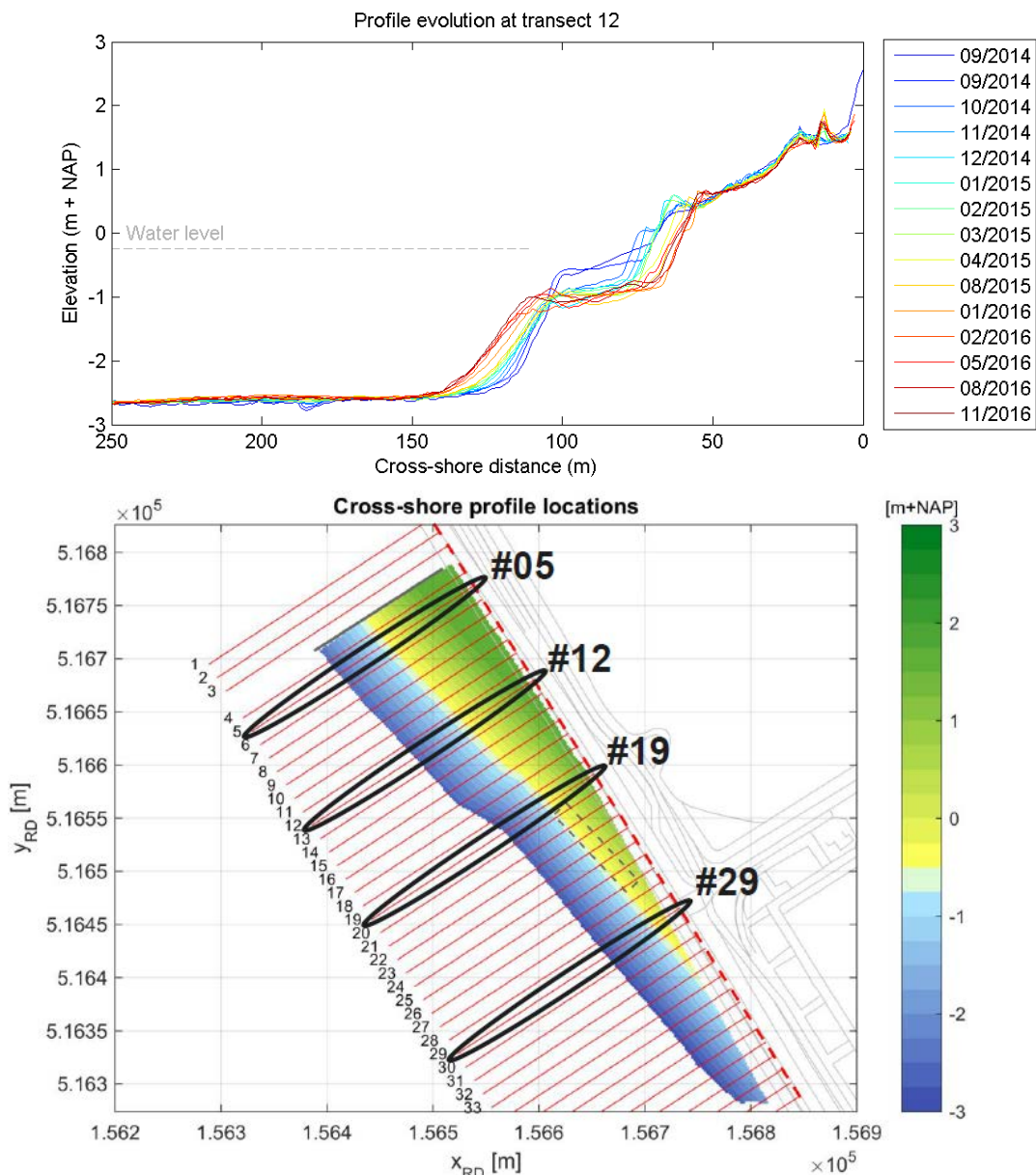
1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Voor een deel van de Houtribdijk is een pilot zandstrand gerealiseerd met als doel om kennis, en toets- en ontwerptools te ontwikkelen, die kunnen bijdragen aan het sneller en beter onderbouwd realiseren van zandige versterkingswerken voor de grotere meren (RWS/EcoShape, 2016). Als onderdeel van dit pilotproject heeft EcoShape verkennend onderzoek gedaan naar de morfologische ontwikkeling van het zandstrand bij de pilotstudie Houtribdijk door middel van doorlopende bathymetrie- en topografiemetingen en analyse. De analyse van deze resultaten laat een karakteristieke morfologische ontwikkeling zien in de kustdwarsrichting, die gekenmerkt wordt door een breed en bijna-horizontaal onderwaterplateau op een hoogte van NAP - 0.8–1.0 m, en een steil talud bij de waterlijn (Figuur 1.1). Deze morfologische ontwikkeling is anders dan die van stranden aan de Nederlandse zee-kusten.

Om belangrijke vragen voor het ontwerp en beheer van zandige versterkingswerken in het merengebied te kunnen beantwoorden, zoals wat het evenwichtsprofiel is voor veranderende hydrodynamische condities (waterstanden, golfklimaat) en materialen (korrelgrootte, holoceen), en op welke tijdschaal de morfologische veranderingen zich voor kunnen doen, is het nodig om te weten welke processen hebben geleid tot de morfologische ontwikkeling van het pilotstrand Houtribdijk, en welke processen ervoor dat het strand in evenwicht kan blijven. Omdat de bestaande meetdata geen directe verklaring geven voor de morfologische ontwikkeling van het pilotstrand, en er daarnaast nog geen bestaande, geverifieerde conceptuele modellen (e.g., Bruun, Dean) of numerieke modellen (e.g., XBeach; Deltares, 2016; RWS/EcoShape, 2017) zijn die het geobserveerde gedrag goed kunnen beschrijven, kunnen deze vragen nog niet beantwoord worden.

Om beter inzicht mogelijk te maken is Deltares, als onderdeel van het EcoShape consortium, gevraagd om additionele hydrodynamische en morfologische metingen uit te voeren op het onderwaterplateau van het pilotstrand. Daarnaast is Deltares gevraagd om op basis van de gegevens van de additionele metingen een analyse te doen van de optredende hydrodynamische condities, de gegevens te gebruiken om een conceptueel model van het gedrag van het pilotstrand verder uit te werken, en om het numerieke model XBeach verder te ontwikkelen en valideren voor toepassingen op zandige stranden in meergebieden. Dit rapport beschrijft de stappen die hiervoor door Deltares, samen met EcoShape partners HKV en Arcadis zijn uitgevoerd.

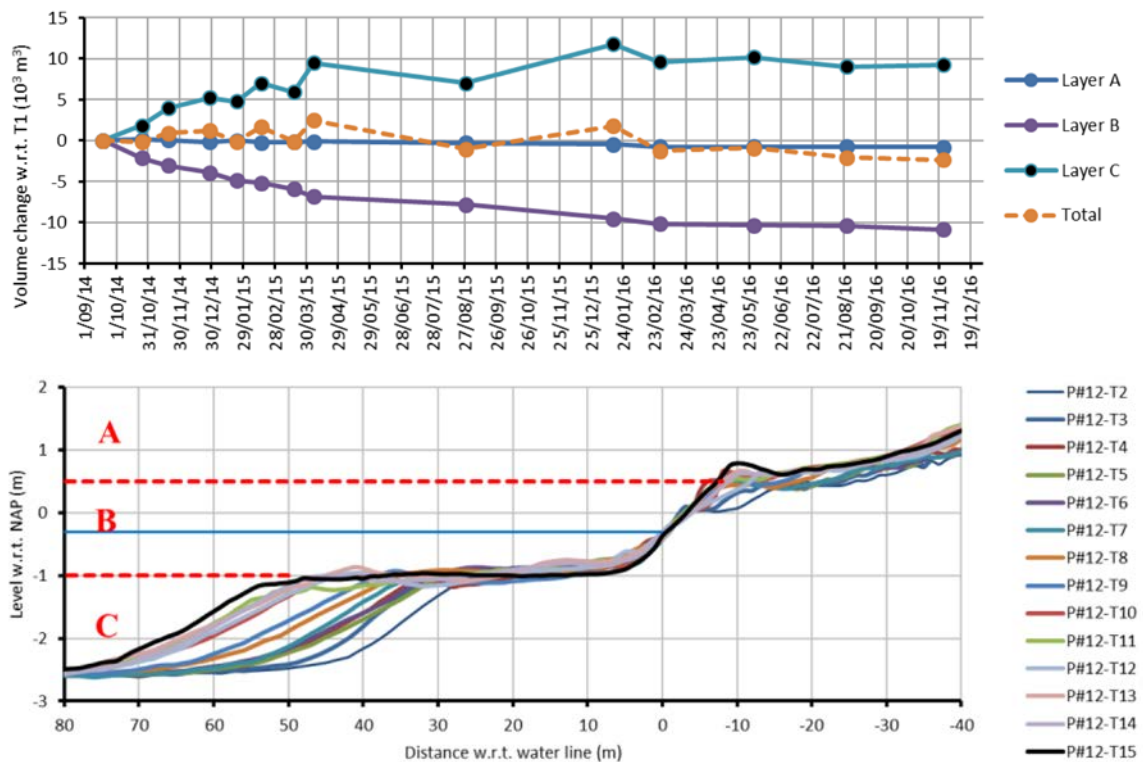


Figuur 1.1 Boven: ontwikkeling karakteristiek dwarsprofiel (Transect 12) van het pilotstrand in de tijd. De ontwikkeling van een plateau op ongeveer NAP - 1 m en steil (1:10) profiel bij de waterlijn is duidelijk zichtbaar. Onder: Bathymetrie van de Houtribdijk, met onder andere de locatie van Transect 12.

1.2 Probleembeschrijving

De ontwikkeling van een representatief dwarsprofiel (Figuur 1.1) laat een ontwikkeling in de tijd zien van initiële erosie op het plateau en bij de waterlijn, tot latere stabilisatie van de positie van de waterlijn, de helling van het talud bij de waterlijn, de breedte en diepte van het onderwater plateau, en de positie van het talud naar dieper water. In een uitgebreid sedimentvolume analyse van het pilotstrand (Steetzel, et al., 2017; RWS/EcoShape, 2017) is een vergelijkbare grootschalige ontwikkeling gevonden voor het hele pilotstrand, en is geconstateerd dat er in de periode sinds maart 2016 een verwaarloosbare hoeveelheid sediment verdwenen is uit het gebied van het droge strand (zone A, zie Figuur 1.2) en het gebied van het plateau en talud bij de waterlijn (zone B). Deze analyse ondersteunt de

stelling dat het pilotstrand na een periode van morfologische verandering een (mogelijk tijdelijk) evenwichtsprofiel heeft bereikt. Hoewel de bestaande meetdata wel aangeven dat het strand zich ontwikkeld heeft tot een evenwichtsprofiel, geven de data geen directe verklaring waarom het strand nu in evenwicht is en waarom het deze vorm heeft.



Figuur 1.2 Boven: ontwikkeling totale volume van het pilotstrand, en volumens van verticale lagen A, B, en C, in de tijd. Onder: Definitie van verticale lagen A, B en C, weergegeven voor Transect 12. Bron: Steetzel, et al., 2017.

Om een verklaring te vinden voor de vorm van het pilotstrand heeft Deltares in een eerdere studie (Deltares, 2016) een conceptueel model voorgesteld dat de dwarsprofielvorm van het pilotstrand gedrag tracht te verklaren aan de hand van sediment transport processen in de kustdwarsrichting. In dit denkmodel spoelt door golfwerking het fijne materiaal uit richting dieper water, waarna het zich in langsrichting verspreidt door diffusie. Het grovere materiaal blijft achter en wordt deels in kustwaartse richting getransporteerd door bodemtransportprocessen. Wat uiteindelijk overblijft is een steile oever bestaande uit grover materiaal.

Daarnaast is een conceptueel model voorgesteld (Ecoshape consortium, niet gepubliceerd) dat de morfologische ontwikkeling van het gehele pilotstrand probeert te verklaren aan de hand van langstransportprocessen en de rol van de damwand bij het stabiliseren van het strand. In dit model wordt door schuine golfval een stroming langs de oever opgewekt dat materiaal meeneemt. Deze sedimentstroom buigt door de aanwezigheid van de damwand af naar dieper water waar het materiaal bezinkt, en verplaatst wordt door grootschalig, windgedreven stroming langs de buitenrand van het plateau.

Omdat de conceptuele modellen berusten op veel aannames over de hydrodynamische en morfologische processen op het pilotstrand, is een generieke vertaling van deze concepten

ander zandige versterkingswerken in het merengebied niet mogelijk. Daarnaast kunnen deze conceptuele modellen geen kwantitatieve voorspellingen maken over het morfologisch gedrag van dergelijke stranden. Daarom is het nodig om naast conceptuele modellen, ook een betrouwbaar numeriek model te hebben om de morfodynamiek te voorspellen, zowel op de korte tijdschaal om het effect van stormen te berekenen voor een veiligheidstoets, als op de middellange tijdschaal om ontwerp en onderhoudsplannen te ondersteunen.

1.3 Doelstelling

In september, oktober en november 2017 zijn door Deltares, als onderdeel van het EcoShape consortium, additionele hydrodynamische en morfologische metingen uitgevoerd op het pilotstrand Houtribdijk. Deze studie en dit rapport hebben drie hoofddoelen.

- Het eerste doel is om de gegevens van de additionele metingen te ontsluiten en de gegevens gebruiken om inzicht te krijgen in de hydrodynamische processen op het pilotstrand.
- Het tweede doel is om een conceptuele model voor de ontwikkeling van de dwarsprofielvorm van het pilotstrand verder te ontwikkelen en verifiëren op basis van inzichten die verkregen worden uit additionele metingen.
- Het derde doel is om de meetgegevens en het conceptueel model gebruiken om het numerieke model XBeach te ontwikkelen en valideren voor toepassingen, voor zowel de korte als middellange tijdschaal, op stranden in merengebieden.

1.4 Leeswijzer

De additionele hydrodynamische en morfologische metingen die in september, oktober en november 2017 zijn uitgevoerd worden in Hoofdstuk 2 beschreven. Hoofdstuk 3 geeft een overzicht van de verwerkte meetdata en een analyse van de hydrodynamische condities op het pilotstrand. In Hoofdstuk 4 wordt het conceptueel model voor de dwarsprofielvorm van het pilotstrand geïntroduceerd. In Hoofdstuk 5 wordt de ontwikkeling van het XBeach model besproken, en de validatie van het model op storm-tijdschaal (één dag) en op middellange tijdschaal (15 maanden). De conclusies van deze studie worden in Hoofdstuk 6 besproken.

2 Aanvullende metingen

2.1 Inleiding

In september, oktober en november 2017 zijn additionele hydrodynamische en morfologische metingen uitgevoerd op het pilotstrand Houtribdijk. In dit hoofdstuk wordt de opzet van de metingen, de meteorologische condities tijdens de metingen, en de verwerking van de meetdata besproken. Een overzicht van de planning en motivering van de additionele metingen is te vinden in Deltares (2017; waarvan een kopie in Appendix A).

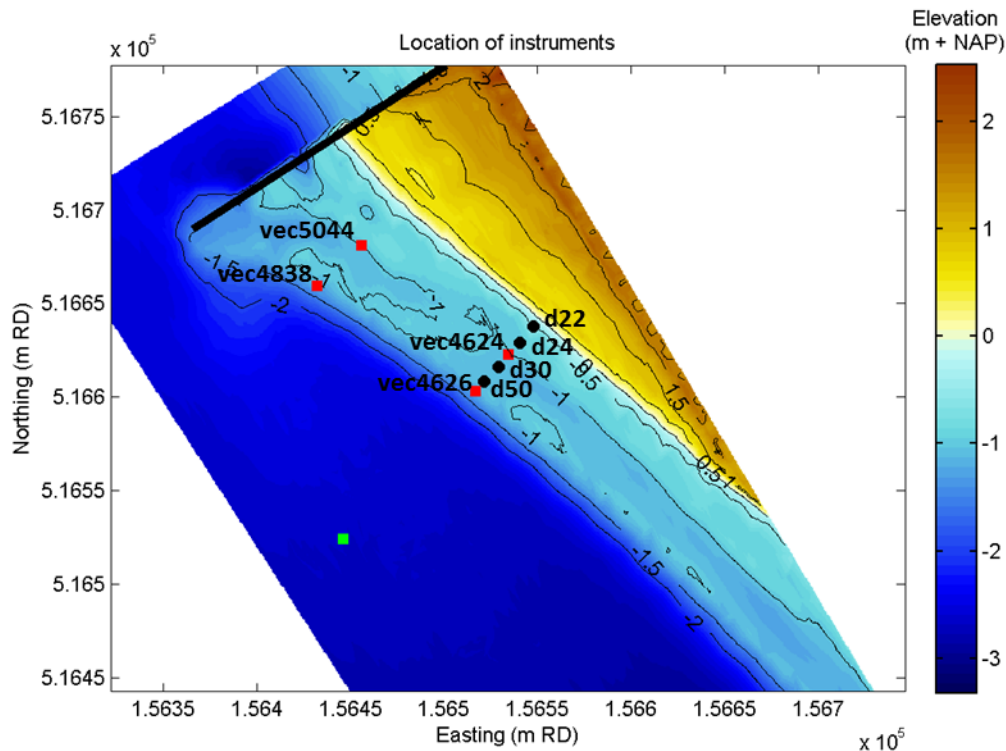
2.2 Opzet metingen

Om de aannames van de opgestelde conceptuele modellen te verifiëren en om numerieke modellen te kunnen kalibreren en valideren zijn metingen nodig van golfcondities (hoogte, periode, richting) en stroming (snelheid, richting) op meerdere locaties op het onderwater gedeelte van het pilotstrand. Hierbij is nodig om ruimtelijke gradiënten te kunnen bepalen in golfcondities en stromingen. Daarnaast is het belangrijk om de veldinstrumentatie voldoende lang uit te zetten om een brede scala aan hydrodynamische condities te kunnen meten, inclusief laag-energetische en hoogenergetische golfcondities en condities met verschillende windrichtingen (ZW en NW) en daarmee stroming bij het pilotstrand. Om redelijke zekerheid te hebben om deze condities te kunnen meten is de instrumentatie over een periode van 3 maanden uitgezet tussen september en december 2017. Voor de conceptuele en numerieke modellen is het nodig om informatie te hebben over stroomsnelheden en -richting aan de offshore rand van het plateau (overgang talud naar dieper water) om karakteristieke transportfluxen tussen het plateau en dieper water te bepalen.

Gegeven de bovengenoemde informatievraag zijn vier ADV's (Nortek Vector) geplaatst op, en aan de rand van, het plateau (zie Figuur 2.1 en Tabel 2.1). In deze gridopstelling is op twee dwarsraaien dwarsgradiënten in stroming en golven en in twee langsvaaien de langsvaaien gemeten. Daarnaast is op twee locaties de stroming tussen het plateau en het dieper gelegen profiel gemeten.

De keuze voor Nortek Vector ADV's is gebaseerd op de mogelijkheden van het instrument om met hoge temporele resolutie (8 Hz) zowel waterdruk als stroming te kunnen meten, waardoor golven en stroming bepaald kunnen worden. Daarnaast kunnen deze instrumenten zelf-loggend worden opgesteld en kunnen zij zelfstandig tot 8 weken lang meten op 8 Hz in bursts van 15 minuten per uur. Dit maakt het mogelijk om met één onderhoudsbeurt om batterijen en geheugenkaart te verwisselen, tot 16 weken lang door meten. Eén ADV is gehuurd van Nortek (vec5044), één ADV is afkomstig van Deltares (vec4838) en twee ADV's zijn gehuurd van Plymouth University (vec4624 en vec4626).

Om te bepalen wat het golftransformatie proces op het onderwaterplateau is wordt de golfhoogte (of golfspectrum) op meer dan twee locaties in een dwarsraai gemeten. Dit bereikt door een dwarsraai van ADV's uit te breiden met vier zelf-loggende drukdozen (zie Figuur 2.1 en Tabel 2.1). Hiervoor is gebruik gemaakt van Ocean Sensor Systems OSSI-010-003B/C drukdozen die via NIOZ en HKV/TU Delft beschikbaar gesteld zijn voor dit project. De drukdozen kunnen 2–4 maanden continue op 4–8 Hz zelfstandig blijven meten. Deze informatie draagt bij aan het onderzoeken van de rol van het plateau in het dissiperen van golfenergie (op welke breedte van het plateau zijn de golven volledig gebroken).



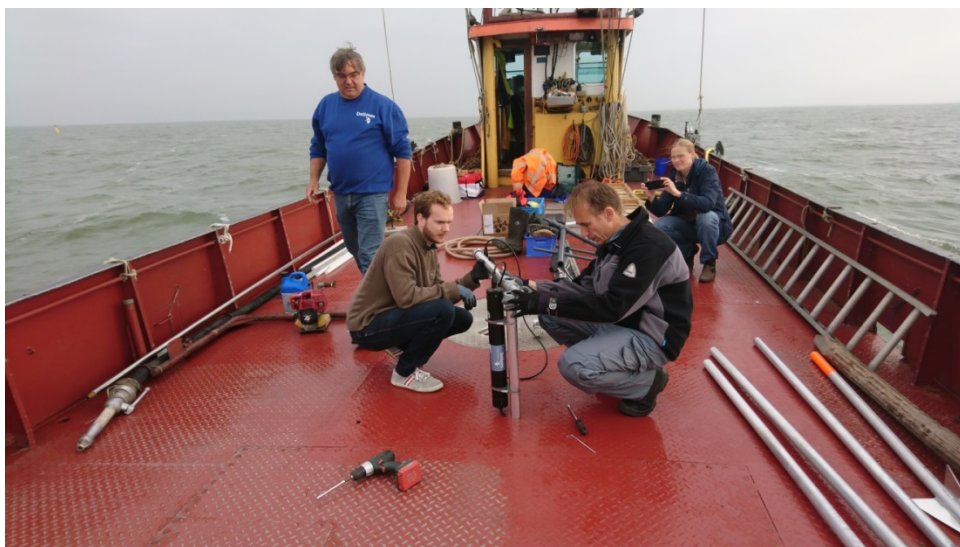
Figuur 2.1 Locaties van de ADV's (rode vierkantjes) en drukdozen (zwarte cirkels). De locatie van de offshore ADV is aangegeven met een groen vierkantje.

Tabel 2.1 Opstellingen instrumentatie

Instrumenten	Verwachte resultaten
Vier Nortek Vector ADV's in gridopstelling	<ul style="list-style-type: none"> • Informatie over waterstand, stroomsnelheid (gemiddeld, en intra-golf) en -richting op vier locaties op, en aan de rand van, het plateau onder verschillende golf- en windbelasting, ter verificatie conceptuele modellen. • Golfspectra op vier locaties en aan de rand van, het plateau onder verschillende golf- en windbelasting voor verificatie conceptuele modellen. • Kwantitatieve stromings- en golfdata voor het kalibreren en valideren van numerieke modellen.
Vier OSSI drukmeters in dwarsopstelling	<ul style="list-style-type: none"> • Informatie over verandering golfspectra (1D) en waterstand in dwarsrichting ter verificatie van conceptuele modellen en validatie van numerieke modellen.

De instrumenten zijn op 5 september geplaatst op het pilotstrand. De instrumenten zijn aan boord van een boot vastgezet aan frames (Figuur 2.2) en met een sloep getransporteerd naar het onderwaterplateau. De frames zijn daarna op het onderwaterplateau verankerd in de

bodem. De instrumenten zijn op 12 oktober teruggebracht naar Deltares om data te downloaden en om de interne batterijen te vervangen. De instrumenten zijn op 19 oktober weer op locatie teruggezet en zijn daar tot 1 december gebleven, waarna de instrumenten en frames verwijderd zijn.



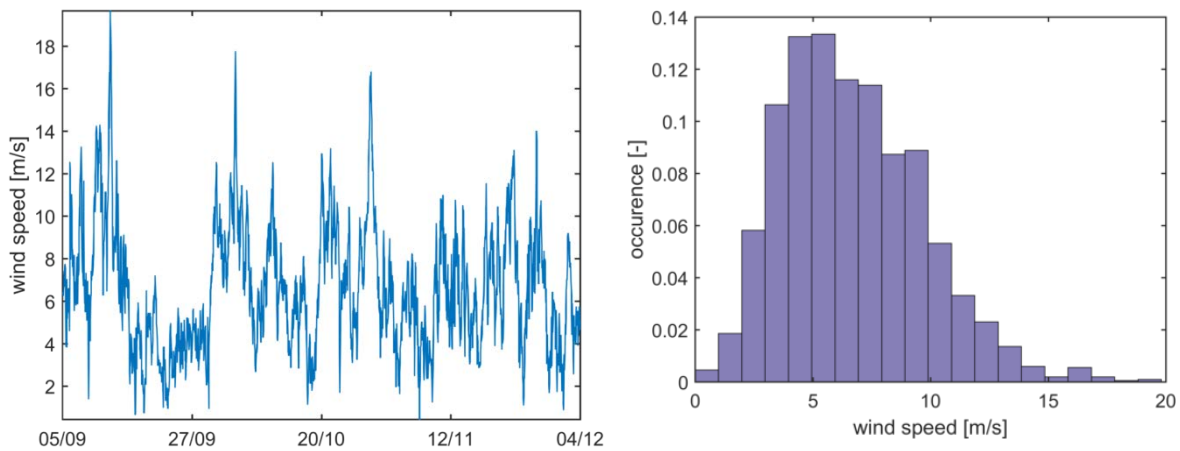
Figuur 2.2. Vaststellen en labelen ADV voor plaatsing aan boord boot

2.3 Meteo condities binnen meetcampagne

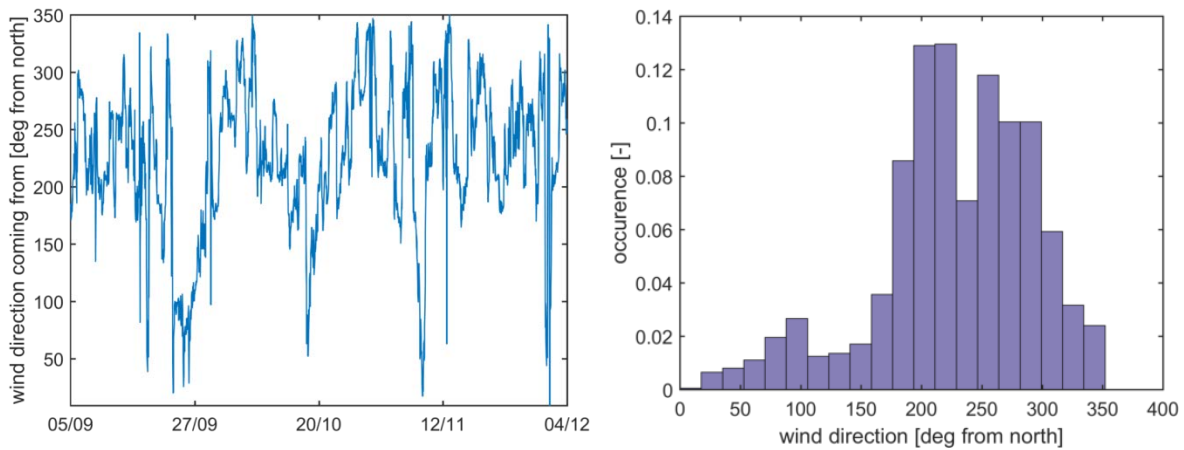
Meteo condities worden rond het pilotstrand continue gemeten vanuit de permanente opstelling op de damwand. Naast het feit dat deze meteo condities de hydrodynamica hebben aangedreven tijdens de meetcampagnes, zijn de meteocondities direct of indirect meegenomen in de verwerking van de ruwe data uit de ADV's en drukdozen. Van deze omgevingsfactoren wordt een kort overzicht gegeven.

2.3.1 Wind

Windsnelheden worden op de repository (<http://houtribdijk.deltares.nl/repos/houtribdijk>) gerapporteerd in het bestand *houtribdijk-hydrometeo_2017*. De windsnelheden en windrichtingen zijn in Figuur 2.3 en Figuur 2.4 geplot voor het tijdbestek van de twee meetcampagnes. De dominante windrichting over de meetcampagnes is zuidwest, met enkele korte perioden waarin deze omslaat of afwijkt. Een aantal dagen voor 27 september is voor een langere periode een oost-noordoosterwind aanwezig (windrichting 45–90°). Met name in de eerste maand van de meetcampagne is een grote variatie in windcondities aanwezig. De meest stormachtige condities zijn te vinden op 13 september, welke een aantal dagen later, rond 18 september, worden opgevolgd door heel kalme condities. In de november december periode zijn de windcondities met name matig, waarin 27 oktober stormachtig was en echt compleet kalme condities in de verdere periode afwezig zijn.



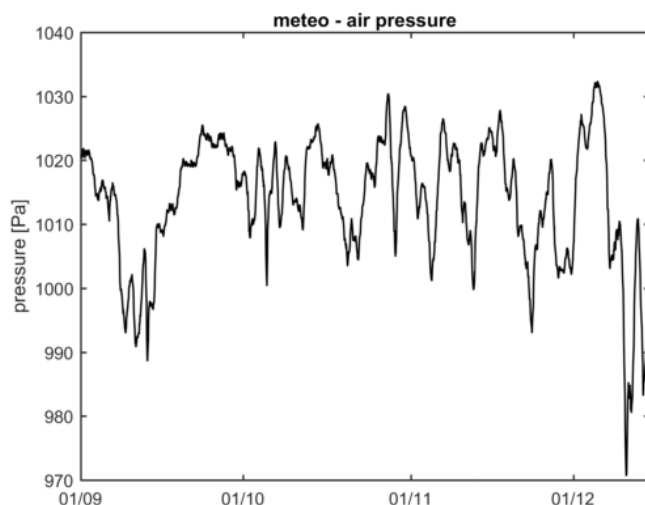
Figuur 2.3 Windsnelheden gedurende meetcampagne 1 en meetcampagne 2 (links) en een histogram van de voorgekomen windsnelheden tijdens de twee campagnes (rechts).



Figuur 2.4 Windrichtingen gedurende meetcampagne 1 en meetcampagne 2 (links) en een histogram van de voorgekomen windrichtingen tijdens de twee campagnes (rechts).

2.3.2 Luchtdruk

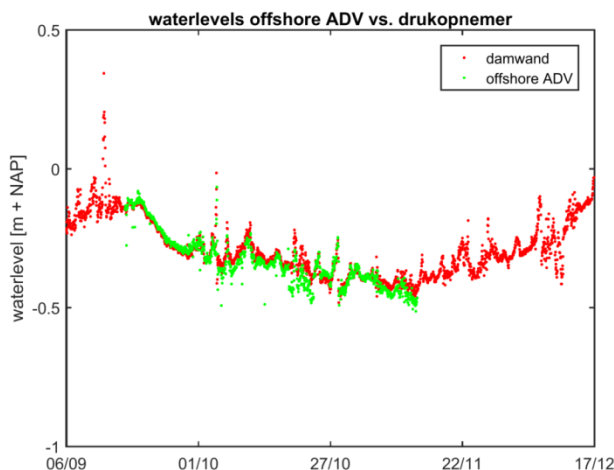
Luchtdrukdata zijn nodig om de hydrodynamische data van geplaatste instrumenten om te zetten naar waterstand. Voor het tijdsbestek van de twee meetcampagnes is de luchtdruk geplot in Figuur 2.5. De luchtdruk tijdens de aanvullende metingen was gemiddeld 1010 Pa, maar varieert tussen de 970 en 1030 Pa.



Figuur 2.5 Omgevingsluchtdrukverloop in de periode september – december 2017.

2.3.3 Waterstanden

Waterstanden zijn met een drukopnemer gemeten direct achter de damwand en op het offshore meetframe, zie Figuur 2.6. Ten behoeve van de vergelijking is het druksignaal van de ADV op het offshore meetframe, dat gedocumenteerd staat in het bestand YY-MM-DD_Houtrib_VelocitySamples, omgezet naar een waterstandsniveau met correctie voor luchtdrukvariaties en de verticale positie van de sensor in de waterkolom.



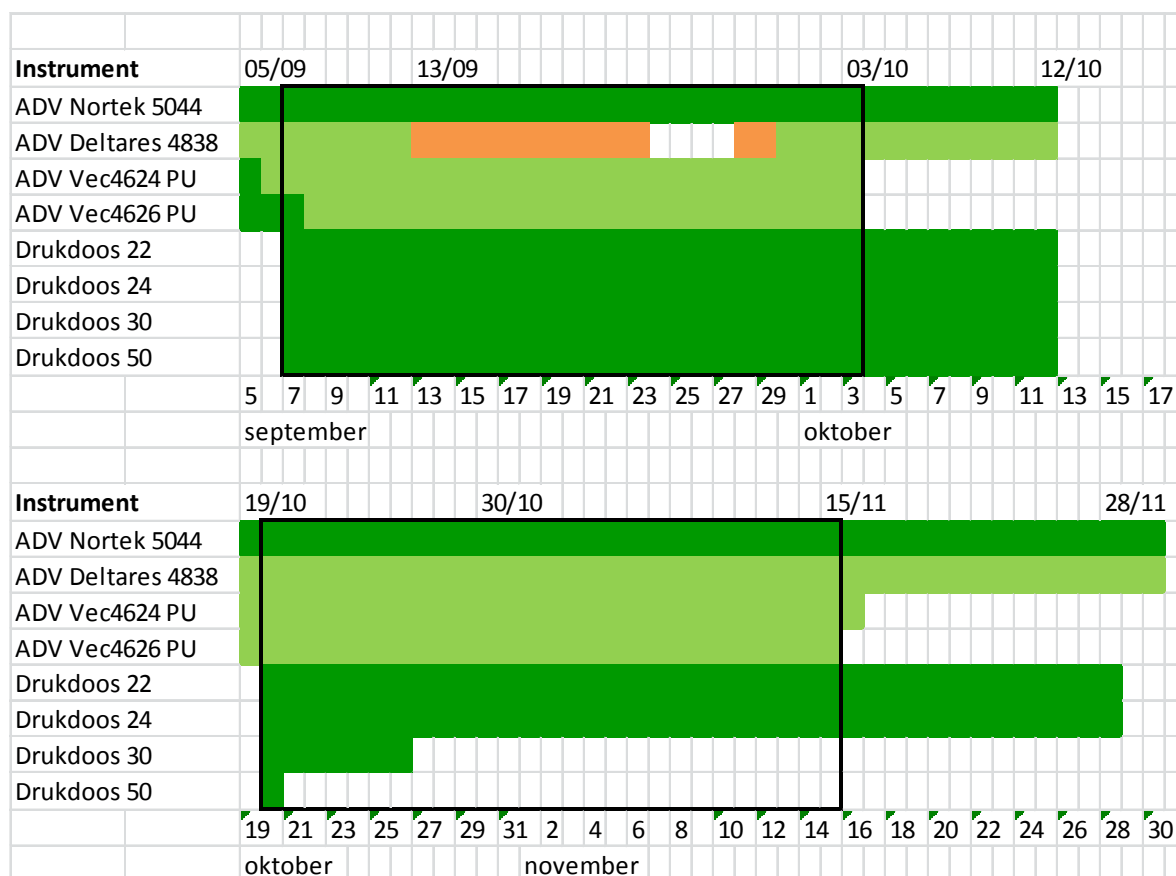
Figuur 2.6 Vergelijking van waterstanden verkregen uit het druksignaal van de offshore ADV en de drukopnemer aan de achterkant van de damwand tijdens meetcampagne 1.

2.4 Beschikbaarheid data

Er zijn meetdata beschikbaar tussen 5 september 2017 en 13 oktober 2017, en tussen 19 oktober 2017 en 1 december 2017. In de tussenliggende periode zijn de meetinstrumenten uit het water gehaald ter controle, uitgelezen en batterijvervanging, en zijn schoongemaakt. In Figuur 2.7 is een overzicht gegeven van de beschikbaarheid van data van de individuele instrumenten. Drie ADV's hebben zowel voor de eerste als de tweede periode geen druk weggeschreven; danwel is de gelogde druk binnen een aantal dagen teruggelopen naar nul. Twee drukdozen zijn in de tweede meetcampagne zeer vroegtijdig uitgevallen.

De ADV's zijn voor het plaatsen in het veld allen afzonderlijk getest in het lab voor het uitzetten, en functioneerden daar naar behoren. Op aanraden van Nortek is voor de tweede meetcampagne een drukoffset meegegeven aan de ingebouwde drukopnemers van de ADV's om herhaling van de uitval te voorkomen, maar dit heeft niet tot verbetering geleid. De oorzaak voor het disfunctioneren van de drukopnemers is niet bekend. Advies voor toekomstige meetcampagnes is om de ADV's te koppelen met een losse drukopnemer.

De drukdozen hebben tijdens de eerste meetcampagne goed en continu gemeten. Drukdoos 30 en drukdoos 50 zijn in de tweede meetcampagne vroegtijdig uitgevallen, zeer waarschijnlijk door lege batterijen. Het is onbekend wat ervoor heeft gezorgd dat de batterijen dusdanig snel leeg zijn gelopen.



Figuur 2.7 Overzicht van beschikbare data in meetcampagne 1 (boven) en meetcampagne 2 (onder). In donkergroen volledig beschikbare data, in lichtgroen zijn snelheidsmetingen beschikbaar maar geen druk data. Oranje geeft een periode aan met veel ruis op het signaal.

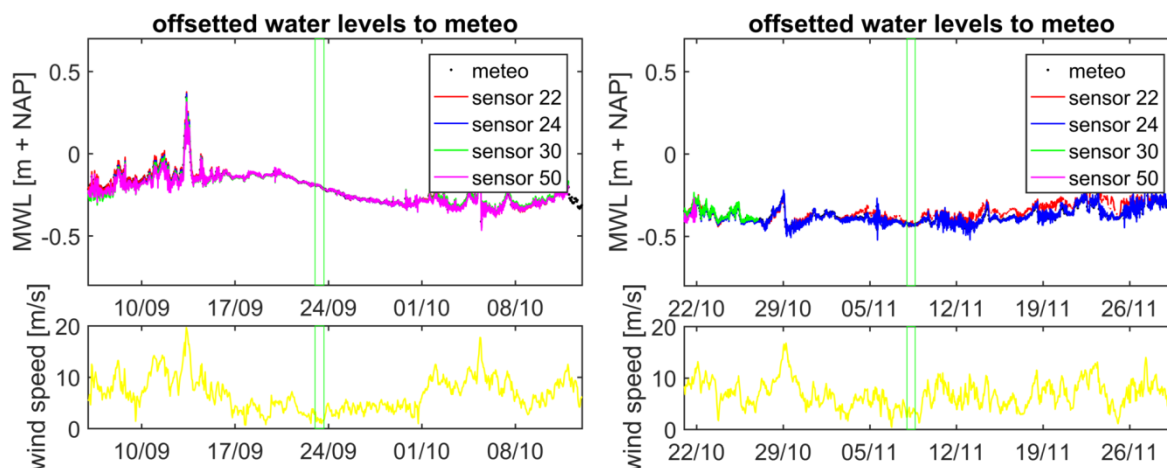
2.5 Verwerking drukdozen

De druk is in alle vier drukdozen continue gesampled op 10 Hz en weggeschreven in bestanden van 24 uur lengte. Om onbekende technische redenen ontbreken in sommige bestanden de meetdata van de laatste 20 minuten van de dag.

2.5.1 Kwaliteitscontrole

De ruwe druksignalen zijn gecorrigeerd voor luchtdrukvariaties. Omdat de verticale positie van de drukdozen in het veld maar tot op de nauwkeurigheid van enkele cm bepaald kan

worden, is een offset op de gemeten hoogte van de drukdoos in de waterkolom bepaald door vergelijking met de gemeten waterstand bij de damwand op een windstille dag (zonder golfopzet). Deze offset is vervolgens toegepast op het gehele signaal. De gecorrigeerde oppervlakte uitwijkingen zijn geplot in Figuur 2.8. Hierbij moet worden opgemerkt dat er voor drukdozen 30 en 50, vanwege de korte duur van de metingen in de tweede meetperiode, geen exacte offset bepaald kan worden.



Figuur 2.8 Gecorrigeerde oppervlakte uitwijking signalen van de meetcampagnes. De bepaling van de offset vond plaats op de groen omkaderde dag. In campagne twee zijn de sensoren 30 en 50 te vroeg gestopt en is de offset van sensor 22 en 24 gemiddeld genomen toegepast op de korte signalen van 30 en 50. In de sub figuur is de windsnelheid geplot gedurende de meetcampagne

Om de druksignalen om te zetten in golfkarakteristieken zijn de data opgedeeld in blokken van 10 minuten. Voor het verwerken van tijdseries op open zee wordt normaal gesproken een langere blok lengte gehanteerd om ook langere golfcomponenten goed te vangen in het blok. Omdat maatgevende golfperioden in het Markermeer niet groter zijn dan 5 seconden heeft een kortere blokperiode de voorkeur om de stationariteit van het blok te vergroten.

Deze blokken van 10 minuten zijn ge-detrend en vervolgens door een kwaliteitscontrole gegaan om de blokken te checken op outliers, en om blokken die te veel variabiliteit of ruis laten zien te verwerpen in de verdere analyse. De gehanteerde kwaliteitscontrole wordt in paragraaf 2.7 verder beschreven. Naast deze (algemene) kwaliteitscontrole is ook gecontroleerd op het optreden van nuldrukmetingen. Wanneer deze in het signaal voorkomen is een golftrog de drukdoos gepasseerd die voldoende diep was om de drukdoos droog te leggen. Dit heeft vooral voor de ondiep geplaatste drukdozen 22 en 24 een aantal keer plaatsgevonden. Wanneer dit is geïdentificeerd, is het blok voor verdere analyse verworpen.

2.5.2 Druk naar oppervlakte uitwijking

Uit de gemiddelde druk volgt een gemiddelde waterstand per blok. De 10-minuten ge-detrende tijdseries zijn vervolgens met lineaire golftheorie omgezet naar tijdseries van oppervlakte uitwijking rondom de gemiddelde waterstand. De signalen zijn daarvoor omgezet naar het frequentiedomein, waar per golfcomponent (frequentie) voor de dynamische druk is gecorrigeerd middels:

$$a'_i = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{\cosh(k \cdot d)}{\cosh(k \cdot (h + z_{inst}))} \cdot \frac{p'_i}{\rho g}$$

Hierin is a_i - oppervlakteuitwijkingcomponent, p_i - drukuitwijkingcomponent, ω – frequentie, k – golfgetal, d – waterdiepte, z_{inst} – hoogte van drukdoos boven het gemiddelde wateroppervlakte, ρ – waterdichtheid en g – gravitatieconstante.

De omzetting van druk naar oppervlakteuitwijking is alleen binnen een begrensde frequentieband toegepast. De bovenlimiet voor toepassing van dynamische drukcorrectie is gesteld op 1.5 Hz, en de bijdrage van golfcomponenten in het druksignaal aan de oppervlakteuitwijking boven 1 Hz is lineair naar nul getapered om het overschatten van de golfhoogte door hoogfrequente ruis te beperken.

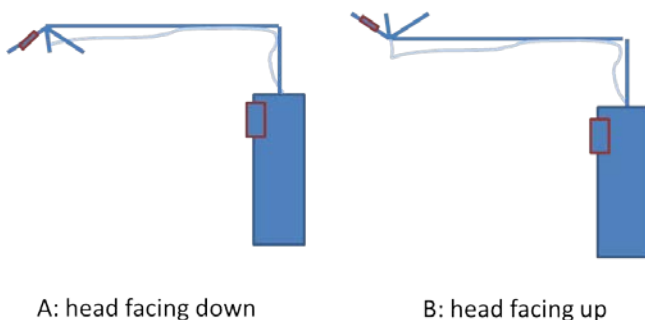
De tijdseries van oppervlakteuitwijking zijn vervolgens omgezet in 1D golf-spectra door het uitrekenen van spectrale momenten. Uit de verkregen spectra zijn golfkarakteristieken uitgerekend op basis van spectrale momenten binnen de frequentieband $f_{min}=0.18\text{Hz}$ en $f_{max}=1.5\text{Hz}$ (overeenkomstig met het offshore meetframe en zijn ADV).

2.6 Verwerking ADV data

De ADV's zijn opgesteld om ieder uur één burst te meten met een resolutie van 8Hz. Rekening houdende met opslagcapaciteit van de individuele vectors hebben de ADV's vec5400Nortek en vec4838Deltares een burstlengte van 15 minuten, en hebben de ADV's vec4624 en vec4626 op de hoofdraai een burstlengte van 12 minuten.

2.6.1 ADV correctie op positionering

ADV's worden aangeleverd met een vastgelegde plaatsingsoriëntatie. De Nortek sensor heeft een vaste verbinding tussen vector en behuizing en moet horizontaal worden geplaatst. De overige drie ADV's hebben een flexibele verbinding tussen behuizing en vector en behoren verticaal geplaatst te worden, waarbij de kop van de vector in lijn hoort met de behuizing (zie Figuur 2.9B). Dit is zo gedaan voor de vector vec4624. De vectoren vec4626 en vec4838Deltares zijn geplaatst met een omgekeerde vectorkop (Figuur 2.9A) om beter binnen de waterkolom te meten. Om hiervoor te corrigeren zijn de gemeten ENU (East-North-Up) snelheden van deze ADV's teruggezet naar lokale XYZ snelheden, waarnaar een transformatie op het lokale assenstelsel is toegepast met Y->-Y en Z->-Z. Hierna is de conversie van de getransformeerde lokale assenstelsel naar ENU coördinaten weer uitgevoerd.



Figuur 2.9 Mogelijke configuraties van de ADV's

2.6.2 PUV naar golven

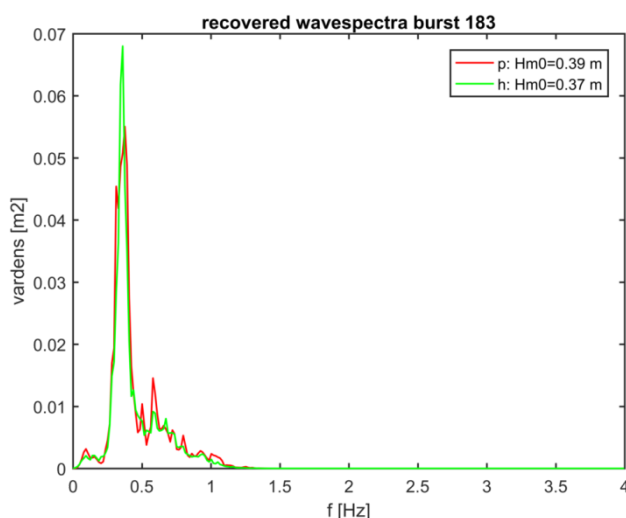
In beide meetcampagnes is de drukmeting niet goed gelukt voor de vectoren vec4838deltares, vec4626 en vec462. De sensor heeft enkel nulwaarden opgeslagen. Er zijn wel voor iedere ADV snelheidssignalen aanwezig. Dit betekent dat het reconstrueren van een tweedimensionaal spectrum via standaard ADV methoden lastig wordt. De snelheidssignalen bieden wel twee mogelijkheden om terug te rekenen tot oppervlakteuitwijking in een richtings geïntegreerde zin; namelijk door lineaire golftheorie toe te passen op de gemeten horizontale snelheden of op de verticale snelheden. De dynamische drukcorrectie op het horizontale snelheidssignaal is minder sterk dan op het verticale signaal in ondiep water, waardoor de horizontale snelheden de meest geschikte componenten zijn voor het bepalen van golfinformatie. Het beschikbare druksignaal uit de Nortek ADV is vervolgens gebruikt om de aanpak te verifiëren. De omzetting van horizontale snelheden naar oppervlakteuitwijkingcomponenten volgt:

$$a'_i = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{\sinh(k \cdot d)}{\cosh(k \cdot (h + z_{inst}))} \cdot u'_i$$

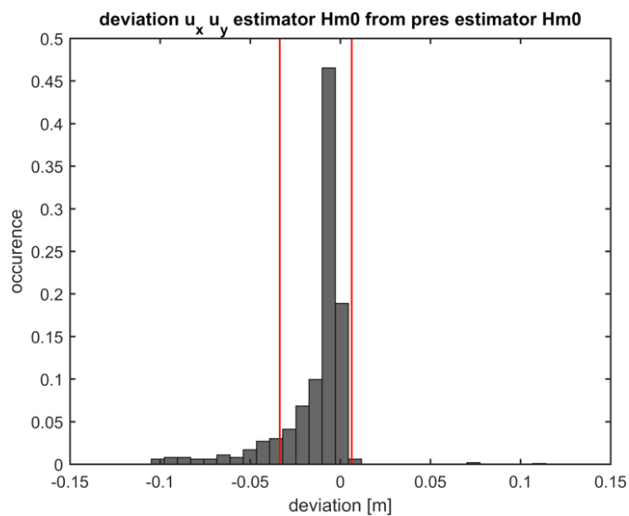
Waarin u_{i} – horizontale snelheidscomponent.

Wederom is de dynamische snelheidscorrectie alleen binnen een begrensde frequentieband toegepast. Dezelfde bovenlimiet (1.5Hz) en taperfunctie (voor bijdragen tussen 1Hz en 1.5Hz) is toegepast als op de drukdoosverwerking.

Een voorbeeld van de verkregen golfspectra uit het snelheidssignaal ten opzichte van het druksignaal is gegeven in Figuur 2.10. Een indruk van het gemiddelde verschil tussen de H_{m0} uit het druk- en snelheidssignaal is gegeven in Figuur 2.11. Dit histogram laat zien dat de significante golfhoogte verkregen uit het snelheidssignaal gemiddeld genomen een paar centimeter lager uitvalt dan wanneer verkregen uit het druksignaal. De verdeling geeft ons vertrouwen dat de golfhoogte met een onzekerheid van ± 0.05 m berekend kan worden uit het snelheidssignaal.



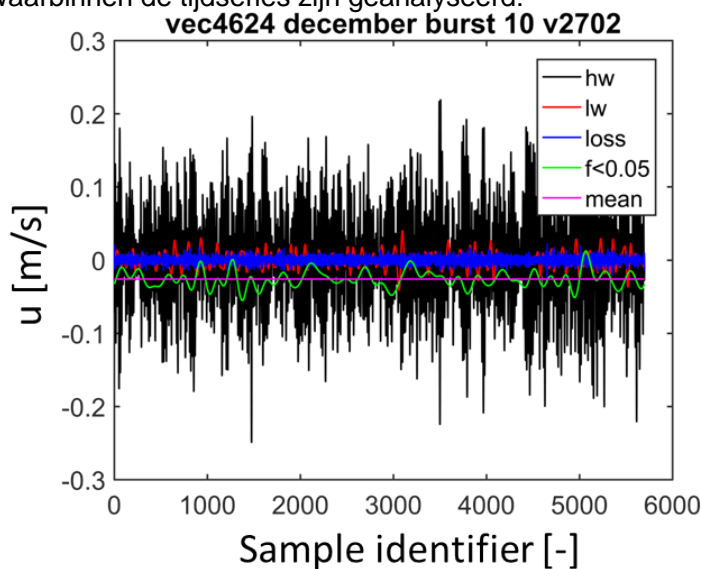
Figuur 2.10 Vergelijking van het verkregen golfspectrum uit de horizontale snelheidscomponenten (groen) en uit de druk (rood).



Figuur 2.11 Histogram van het verschil tussen de H_{m0} uit het druksignaal en het snelheidssignaal berekend, waarbij de rode banden een interval van 2 standaarddeviaties aangeven.

2.6.3 Hoog- en laagfrequente snelheidscomponenten

De snelheidsmetingen uit de ADV's zijn verder geanalyseerd middels band-pass filters om een idee te krijgen van circulatie, en stromingen op de tijdschaal van korte en lange golven op het plateau. Naast burst-gemiddelde circulatie, zijn drie frequentiebanden opgesteld waarbinnen de tijdseries zijn geanalyseerd:

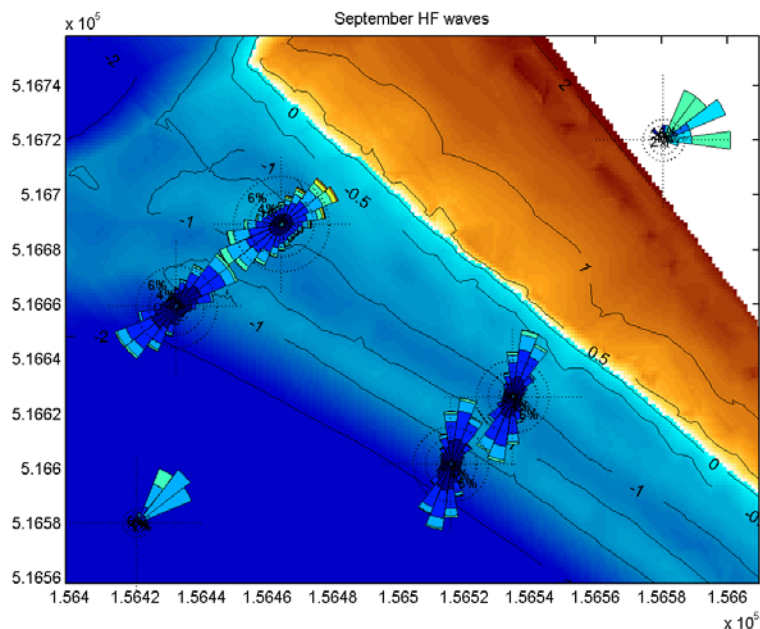


Figuur 2.12 Een voorbeeld van het opdelen van het snelheidssignaal in frequentieband componenten. Zwart frequentieband [0.18-1.5 Hz], rood [0.05 0.18 Hz], groen [<0.05 Hz], rood geeft gemiddelde stroming en blauw geeft hoogfrequente ruis [>1.5 Hz].

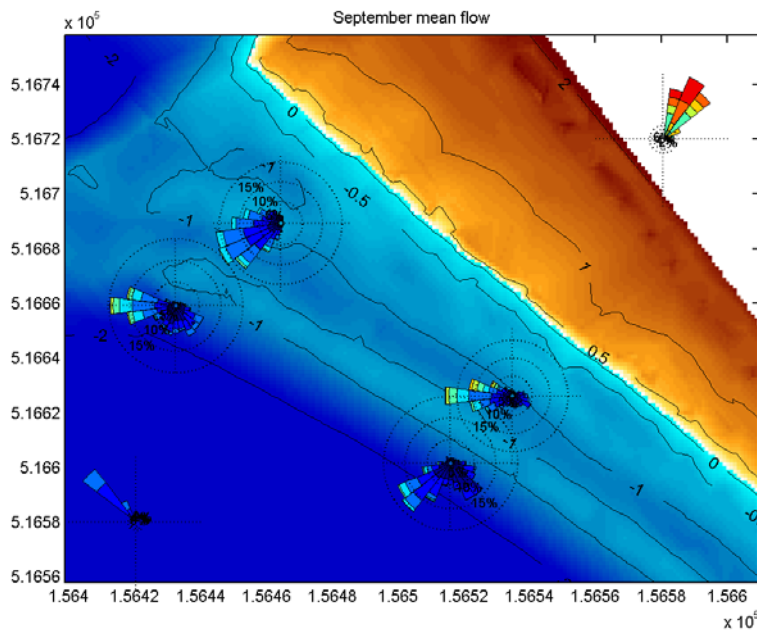
1. Snelheden geassocieerd met wind gedreven golven: frequentieband [0.18 1.5] Hz
2. Snelheden op de tijdschaal van lange golven: frequentieband [0.05 0.18] Hz
3. Laagfrequente stromingen (<0.05 Hz) en burst-gemiddelde achtergrondstroming (gemiddelde van de laagfrequente stroming)

Een voorbeeld van de frequentiecomponenten waaruit een snelheidstijdserie is opgebouwd is gegeven in Figuur 2.12. De windgedreven frequentieband (hw) bevat de meeste variantie. De variantie in de lange golf gerelateerde (lw) frequentieband is bijna even klein als de hoeveelheid variantie in hoogfrequente ruis, en stroomsnelheidsvariaties op tijdschalen langer dan 20 seconden zijn ook klein, maar niet verwaarloosbaar.

Een voordeel van het opdelen van snelheidscomponenten in frequentiebanden is het scheiden van de dominante golfrichting (op basis van de snelheden in de frequentieband 0.18–1.5 Hz) en stromingen als gevolg van grootschalige circulaties (frequentieband < 0.05 Hz), zie Figuur 2.13 en Figuur 2.14.



Figuur 2.13 Voorbeeld van intra-golf stromingspatronen voor de 4 ADV's op 8 september 2017. De roos linksonder geeft de golfrichting van de offshore adv aan; de roos rechts bovenin de windrichting. Alle rozen moeten geïnterpreteerd als stroomrichting-gedefinieerd: dus stroming NAAR de richting aangegeven door de windroos bin.



Figuur 2.14 Voorbeeld van stromingspatronen in de deiningfrequentie ($< 0.05\text{ Hz}$) voor de 4 ADV's op 8 september 2017. De roos linksonder geeft de golfrichting van de offshore adv aan; de roos rechts bovenin de windrichting. Alle rozen moeten geïnterpreteerd als stroomrichting-gedefinieerd: dus stroming NAAR de richting aangegeven door de windroosbin.

2.7 Kwaliteitscontrole

De kwaliteitscontrole op de gemeten signalen verloopt middels de volgende procedure. Voor ieder van de blokken is de gemiddelde druk of snelheid μ bepaald evenals de standaardafwijking σ . Aan de hand van deze statistieken zijn outliers gedetecteerd aan de hand van de criteria:

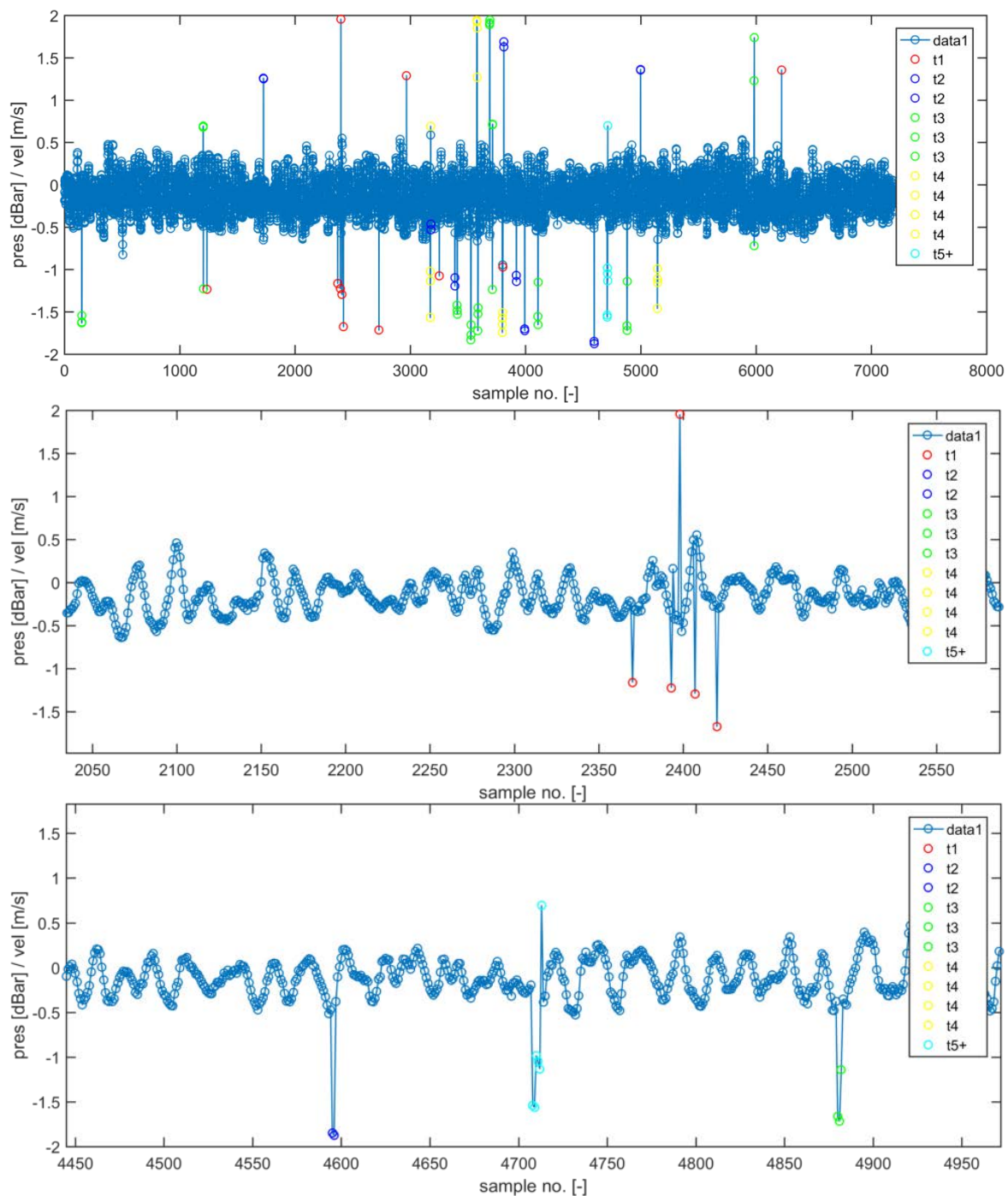
- Meetwaarde overschrijdt vooraf opgestelde meetrange ($[-1\ 1]$ m/s voor snelheden, druk $> 0\text{ Pa}$ voor druk)
- Meetwaarde wijkt meer dan 4σ af van μ
- Meetwaarde wijkt meer dan 4σ af van voorgaande meetwaarde

Als de outliers gedetecteerd zijn (e.g., Figuur 2.15), worden blokken aan de hand van de volgende criteria afgewezen (strengste criterium geldt voor afwijzing):

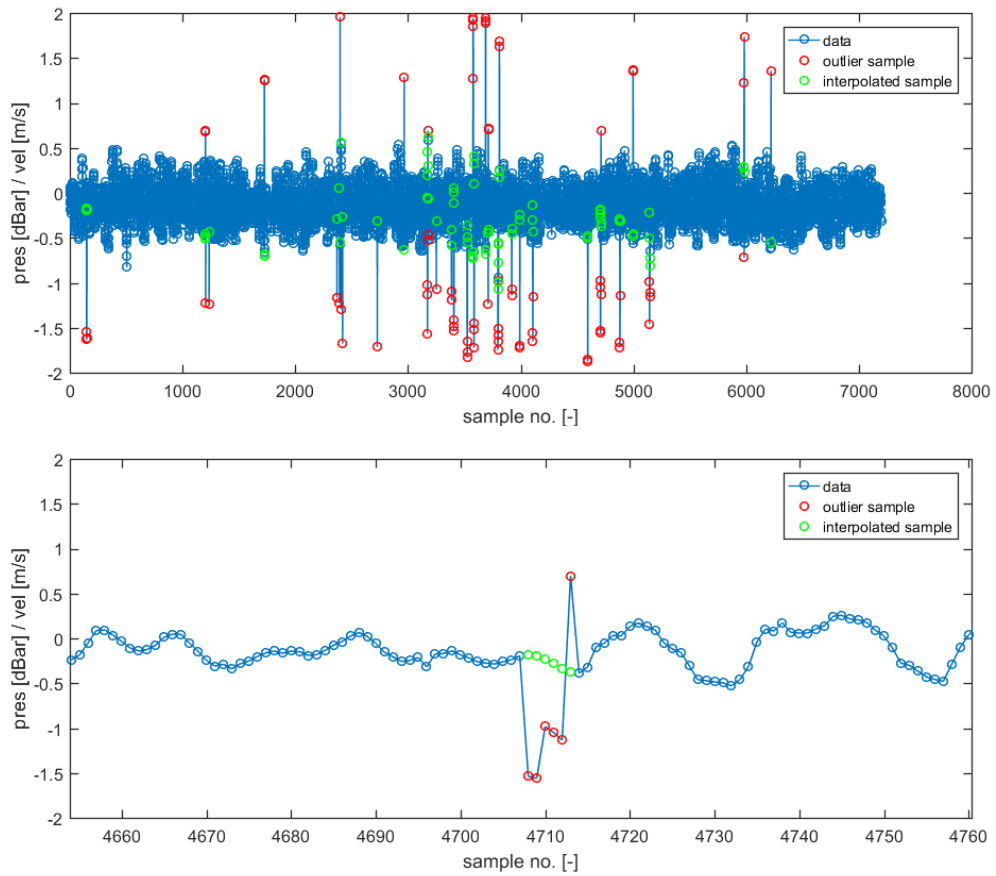
- De hoeveelheid outliers. Hierbij wordt een burst afgewezen als $>5\%$ meetwaarden gemarkeerd zijn als outlier.
- De hoeveelheid en lengte van series opeenvolgende outliers in de burst (i.e., opeenvolgende datapunten zonder geldig signal). Dit criterium is ingesteld omdat series outliers een zorgvuldige interpolatie van de geldige data voorkomen. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen korte series opeenvolgende outliers (<5 opeenvolgende outliers), waarvoor geen aparte criteria gelden, en middenllange (5–9 opeenvolgende outliers) en lange (≥ 10 opeenvolgende outliers) series, zie ook Figuur 2.15 (lichtblauwe serie in onderste figuur). Het criterium voor outlier series wordt overschreden als (strengste criterium geldt voor afwijzing):
 - De hoeveelheid outliers in series van 5 of meer outliers $>2\%$ van alle meetwaarden.

- De hoeveelheid outliers in series van 10 of meer outliers $>0,5\%$ van alle meetwaarden.
- Het bestaan van metingen van luchtdruk in plaats van waterdruk als het instrument boven water is. Omdat het instrument door meteorologische condities een “geldige” druk > 0 Pa (ten opzichte van de referentie nuldruk) kan meten als het boven water is, is een onderscheid op de waarde van het druksignaal niet voldoende. Daar voor in plaats wordt gekeken naar de variatie in metingen omdat het druksignaal tijdens het meten van luchtdruk zeer constant is. Het criterium wordt overschreden als $<0.1\%$ meetwaarden een unieke waarde heeft. Hierbij moet worden opgemerkt dat op basis van dit criterium slechts enkele bursts zijn verwijderd die plaatsvonden tijdens het plaatsen van de instrumenten.

Als een blok wordt afgewezen, wordt er geen spectrum en golfkarakteristieken berekend voor het blok, en wordt het blok gemarkeerd met een NaN. Als een burst niet wordt afgewezen, maar wel outliers bevat, worden de outliers overschreven met een cubic-spline interpolatie van de omliggende geaccepteerde meetwaarden. Een voorbeeld van deze interpolatie is gegeven in Figuur 2.16.



Figuur 2.15 Boven: voorbeeld van de outlier identificatie op een 15-minuten burst uit een ADV snelheidssignaal. De kleur van de bolletjes geeft aan hoe lang de serie van outliers is (rood: enkele outlier, blauw: twee outliers, groen: drie outliers, geel: vier outliers en lichtblauw: meer dan 5 outliers). Midden: ingezoomde periode met identificatie van afzonderlijke outliers (rood). Onder: ingezoomde periode met identificatie van outliers in een serie van twee (donkerblauw), een serie van drie (groen), en een serie van vijf of meer (lichtblauw).



Figuur 2.16 Boven: voorbeeld van interpolatie van de outliers van de 15-minuten burst van Figuur 2.15 (rood: outliers, groen interpolatie). Onder: ingezoomde periode met interpolatie van serie outliers.

3 Overzicht en analyse meetresultaten

3.1 Inleiding

Binnen de meetcampagnes zijn veel data gegenereerd. Dit hoofdstuk geeft een overzicht van waar deze data beschikbaar is gesteld en geeft een overzicht van afgeleide golfkarakteristieken en stroomkarakteristieken over de gehele meetperiode. Daarnaast is ingezoomd op data op twee afzonderlijke dagen: een hoog-energetische dag en een dag met zeer rustige condities.

3.2 Locatie en opslag meetdata

Van alle meetinstrumenten zijn zowel kwaliteitsgecheckte 'ruwe' uitvoer gepubliceerd als afgeleide golfkarakteristieken. De verwerkte data is opgeslagen in een netCDF bestand per sensor per meetsessie (sessie 1 referentie september en sessie 2 referentie december).

- netCDF bestanden per drukdoos per meetcampagne. Deze hebben de naam *Houtribdijk_{campagne}_2017_d{drukdoosnummer}*.
- netCDF bestanden per ADV met druk waar beschikbaar en tijdseries van snelheidscomponenten. Deze hebben de naam: *Houtribdijk_{campagne}_2017_vec{vectornummer}*.
- netCDF bestanden met stromingsdata binnen frequentiebanden en stroomrichtingen *Houtribdijk_{campagne}_2017_vec{vectornummer}_currents*.

De ADV gerelateerde data staat gepubliceerd op:

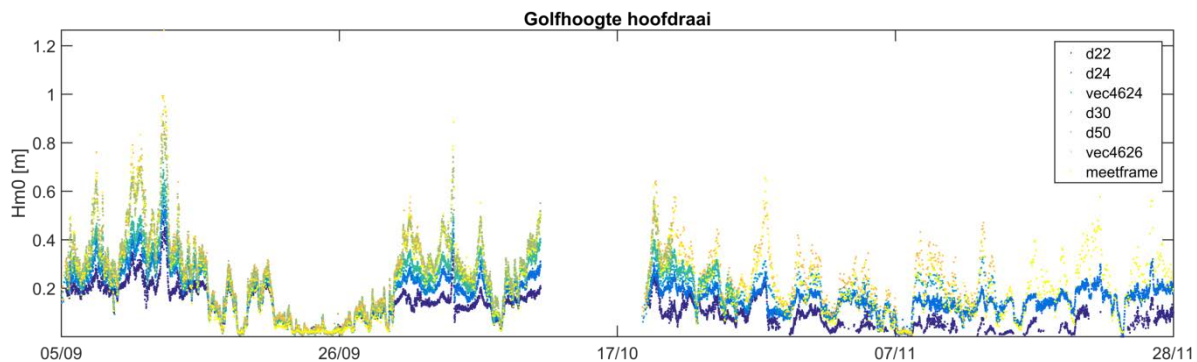
<https://houtribdijk.deltares.nl/thredds/catalog/opensap/hydrodynamics/vector/catalog.html>

De drukdoos afgeleide data staat gepubliceerd op:

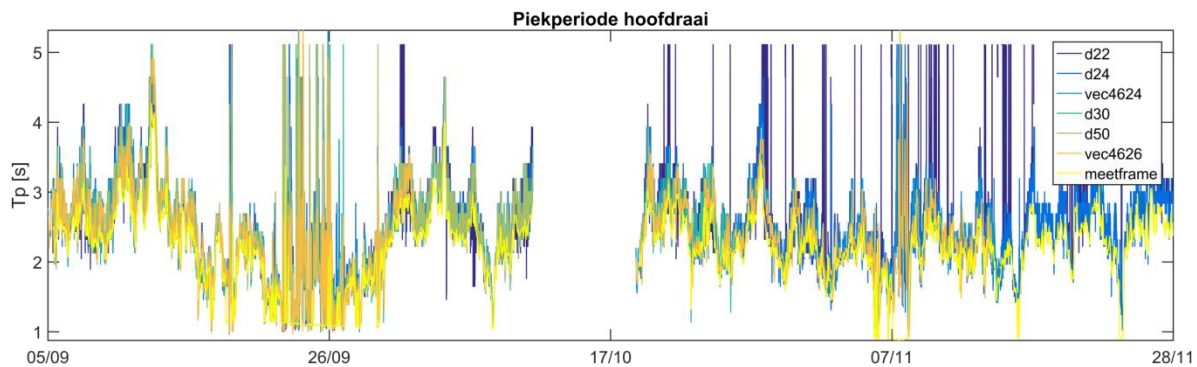
https://houtribdijk.deltares.nl/thredds/catalog/opensap/hydrodynamics/pressure_sensors/catalog.html

3.3 Overzicht golfcondities

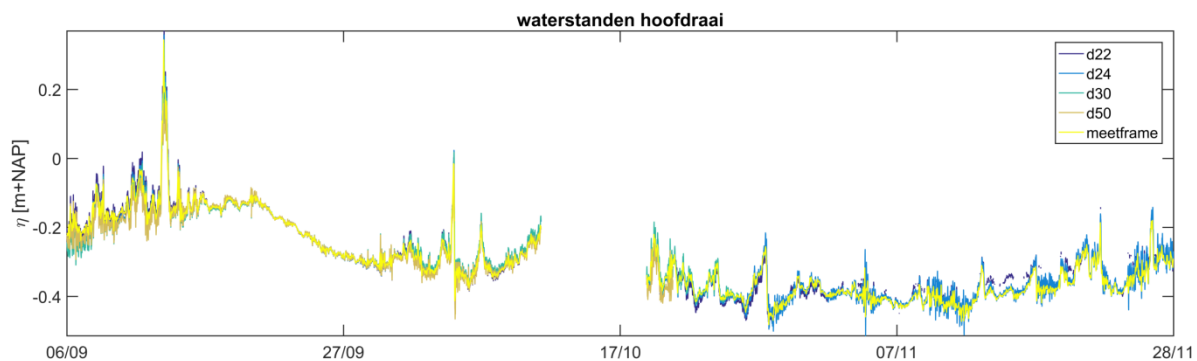
Op de hoofdraai staan 7 instrumenten in een lijn (zie offshore ADV – drukdoos d22 in Figuur 2.1), waardoor de informatie uit de verschillende instrumenten goed tegenover elkaar uit te zetten is. Figuur 3.1, Figuur 3.2 en Figuur 3.3 plotten respectievelijk de golfhoogte, de piekperiode en waterstand van alle instrumenten op de raai tijdens beide meetcampagnes. Hierin zijn perioden met hoog- (e.g., 13 september) en laag-energetische (e.g., 25 september) golfcondities te onderscheiden (Figuur 3.1). Gedurende beide meetcampagnes is een duidelijk verloop in golfhoogte te zien tussen de offshore ADV (geel) en drukdoos d22 bij de waterlijn (blauw), met uitzondering van de kalme periode tussen 23–27 september ($H_{m0} < 10$ cm). Hoewel er wel sprake van variatie in golfhoogte, laat Figuur 3.2 geen variatie van de peakperiode over de hoofdraai zien, en dus geen substantiële verandering van de spectrale vorm. Figuur 3.3 laat ten slotte zien dat er tijdens energetische condities een waterstandsverhang bestaat, met hogere waterstanden aan de kust dan bij de offshore ADV (zie ook Paragraaf 3.5).



Figuur 3.1 Golfhoogten verloop op de hoofdraai van meetframe, drukdozen en daar aanwezige ADV's. Kleurenverloop van geel (offshore) naar donkerblauw (onshore) geeft positie op de raai aan.



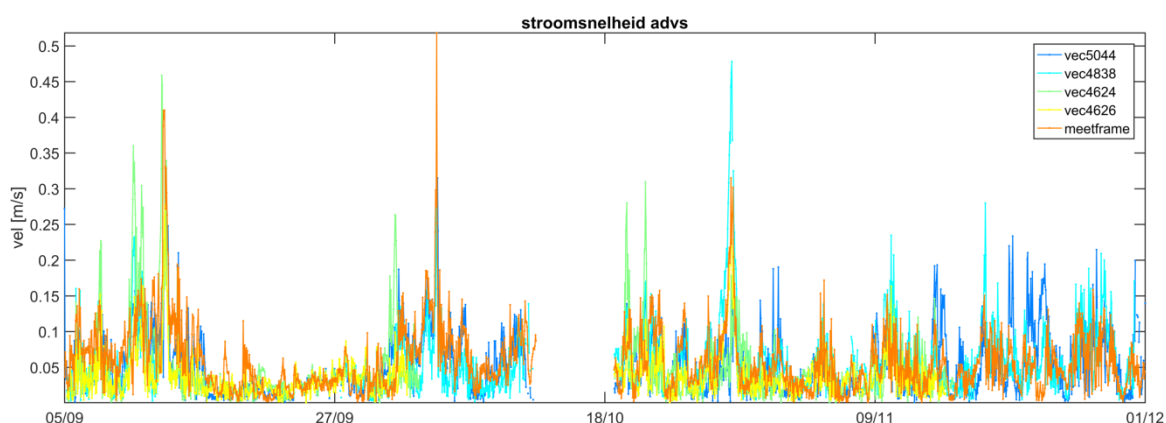
Figuur 3.2 Piekperiode verloop op de hoofdraai van meetframe, drukdozen en daar aanwezige ADV's. Kleurenverloop van geel (offshore) naar donkerblauw (onshore) geeft positie op de raai aan.



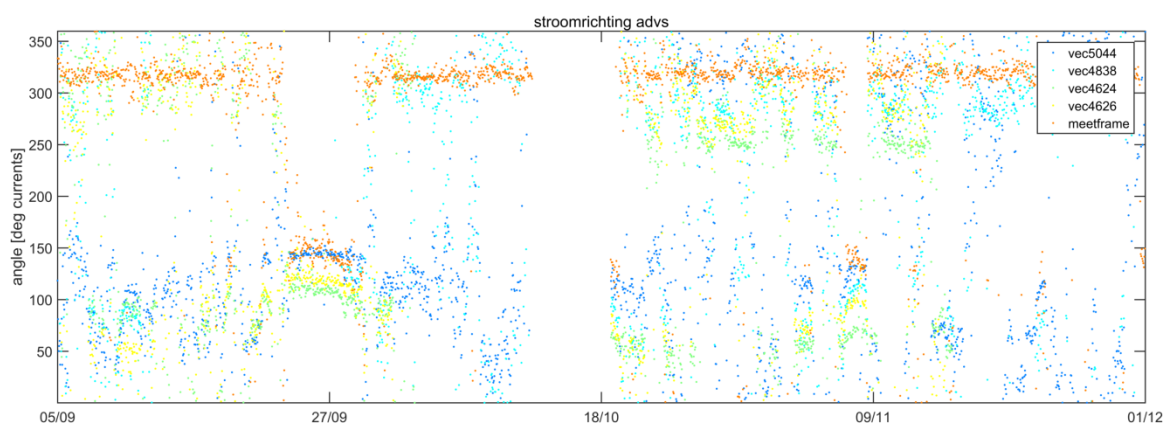
Figuur 3.3 Waterstandenverloop op de hoofdraai van meetframe en drukdozen. Kleurenverloop van geel (offshore) naar donkerblauw (onshore) geeft positie op de raai aan.

3.4 Overzicht stroming

De ADV stromingsdata zijn in verschillende frequentiebanden geanalyseerd. In Figuur 3.4 en Figuur 3.5 zijn de burst-gemiddelde (15 minuten gemiddelde) stroomsnelheid en stroomrichting geplot. De stromingsdata geven een minder coherent beeld dan de golfinformatie. Met name de burst-gemiddelde stromingsrichting op het plateau (blauw-geel in Figuur 3.5) komt niet structureel overeen met de richting bij de offshore ADV (oranje in Figuur 3.5). Op zeer rustige intervallen, bijvoorbeeld rond 27 september, liggen alle stroomrichtingen echter wel binnen een band van 20 graden. Deze 20 graden wordt daarom beschouwd als een maat van de onzekerheid in de gemeten stroomrichting.



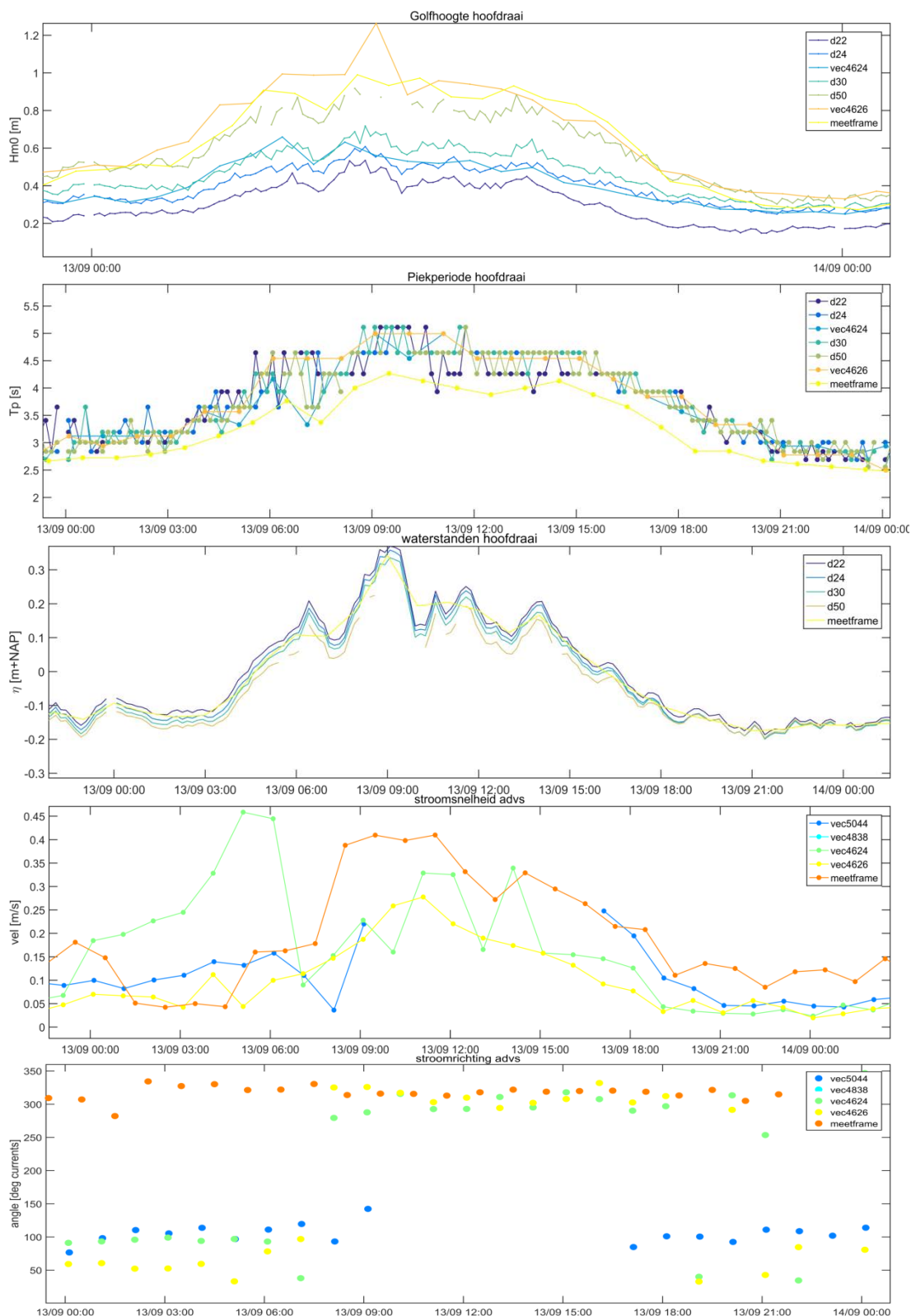
Figuur 3.4 Uurgemiddelde stroomsnelheden van de 4 additionele ADVs (blauwen op nevenraai, groen en geel hoofdraai) en de offshore ADV (meetframe; oranje).



Figuur 3.5 Stroomrichtingen van de uurgemiddelde stroming. De vier additionele ADVs (blauwen op nevenraai, groen en geel op hoofdraai) en de offshore ADV (meetframe; oranje).

3.5 Inzoomen op storm periode

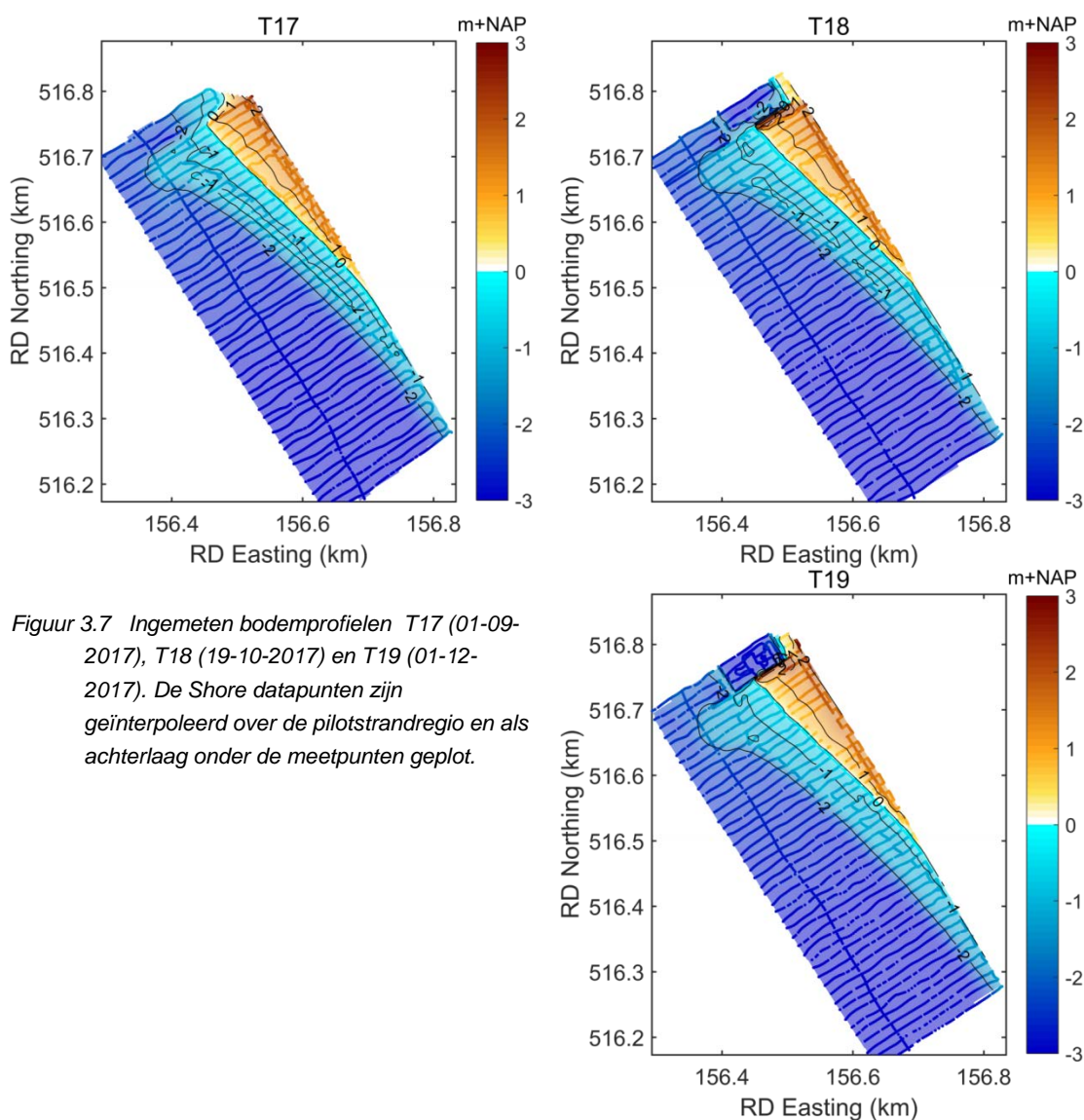
Uit de onderzochte tijdreeksen is een stormachtige dag (13 september) uitgelicht. Voor deze periode is een overzicht van golfcondities, waterstanden en stromingsinformatie geplot in Figuur 3.6. In deze periode loopt de significante golfhoogte offshore op tot $H_{m0} = 0,99$ m, en aan de rand van het plateau zelfs op tot meer dan 1,2 m (Figuur 3.6). Nader focussen op de stroomrichting laat zien dat in de aanloop naar de stormpiek (tot ongeveer 07:00 op 13 september) de stroomrichtingen op het plateau een richting hebben van ongeveer 40–110 graden (stroming vanuit oostnoordoost), terwijl de stroomrichting bij de offshore ADV ongeveer 300 graden (stroming vanuit westnoordwest) is. Tijdens de piek en van de storm en tot ongeveer 19:00 op 13 september, is de richting van de stroming op het plateau en bij de offshore ADV wel gelijk, waarschijnlijk door de toegenomen forcering van wind en golven op de stroming. .



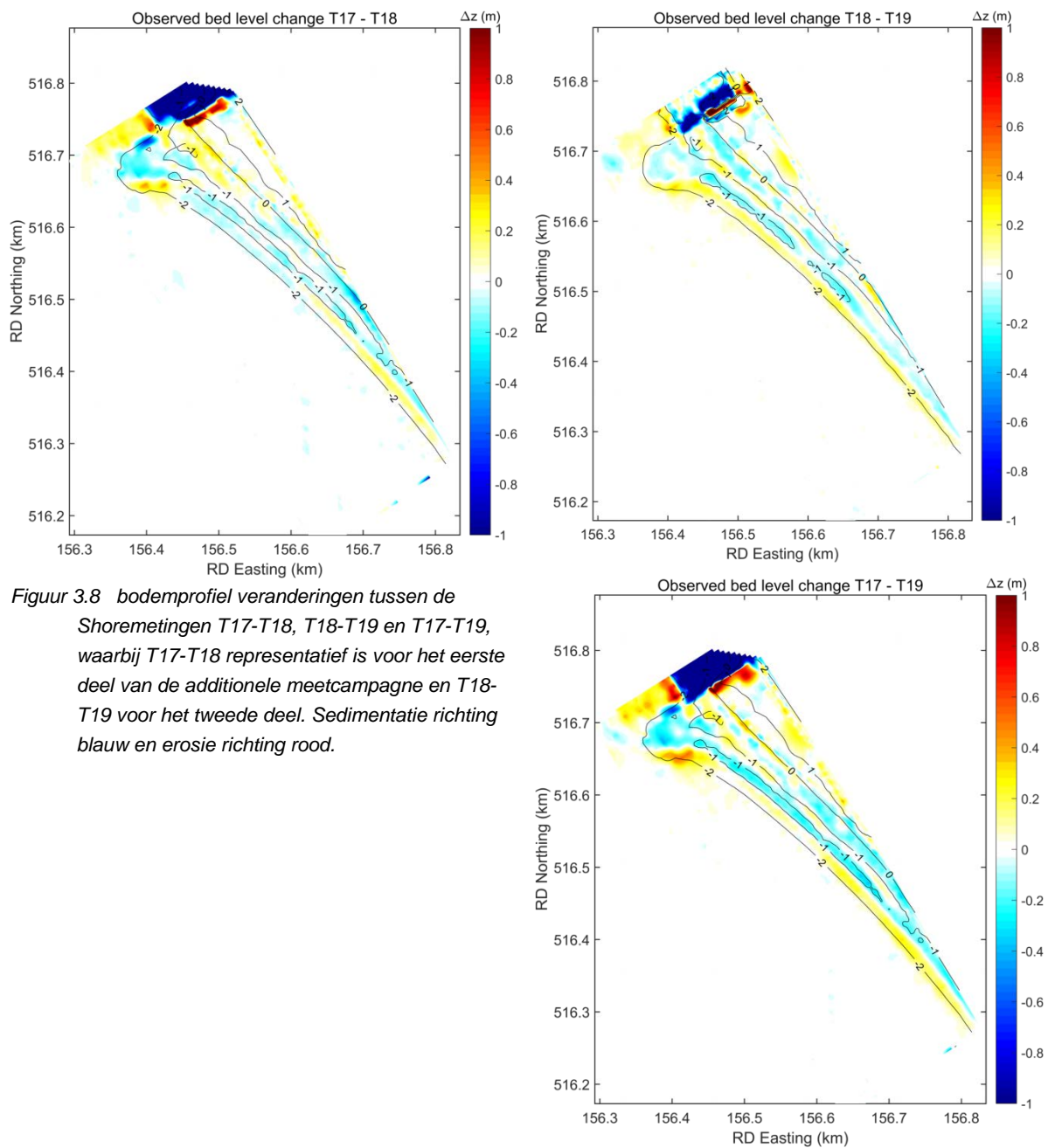
Figuur 3.6 Een zoom-in op de significante golfhoogte (1), piekperiode (2), en waterstanden (3) over de hoofdraai voor 13 september 2017, een hoog-energetische dag. Kleurverloop van geel (offshore) naar donkerblauw (onshore) geeft positie op de raai aan. Stroomsnelheid (4) en stroomrichting (5) gemeten op de ADV's zowel hoofd als nevenraai.

3.6 Overzicht morfologische verandering

Morfologische metingen van het pilotstrand zijn door SHORE Monitoring uitgevoerd op 1 september, 19 oktober en 1 december 2017. Grofweg betekent dit dat er bodemprofielveranderingen kunnen worden opgemerkt ten gevolge van de eerste meetcampagne (september) en de tweede meetcampagne (december) en een netto profielverandering over de periode van de aanvullende metingen. Figuur 3.7 laat de ingemeten kustlijnen zien bovenop een geïnterpoleerd bodemprofiel. De netto bodemveranderingen zijn geplot in Figuur 3.8. Over het plateau zijn de netto veranderingen over de gehele periode binnen 20 cm gebleven.



Figuur 3.7 Ingemeten bodemprofielen T17 (01-09-2017), T18 (19-10-2017) en T19 (01-12-2017). De Shore datapunten zijn geïnterpoleerd over de pilotstrandregio en als achterlaag onder de meetpunten geplot.



Figuur 3.8 bodemprofiel veranderingen tussen de Shoremetingen T17-T18, T18-T19 en T17-T19, waarbij T17-T18 representatief is voor het eerste deel van de additionele meetcampagne en T18-T19 voor het tweede deel. Sedimentatie richting blauw en erosie richting rood.

3.7 Analyse golven op het plateau

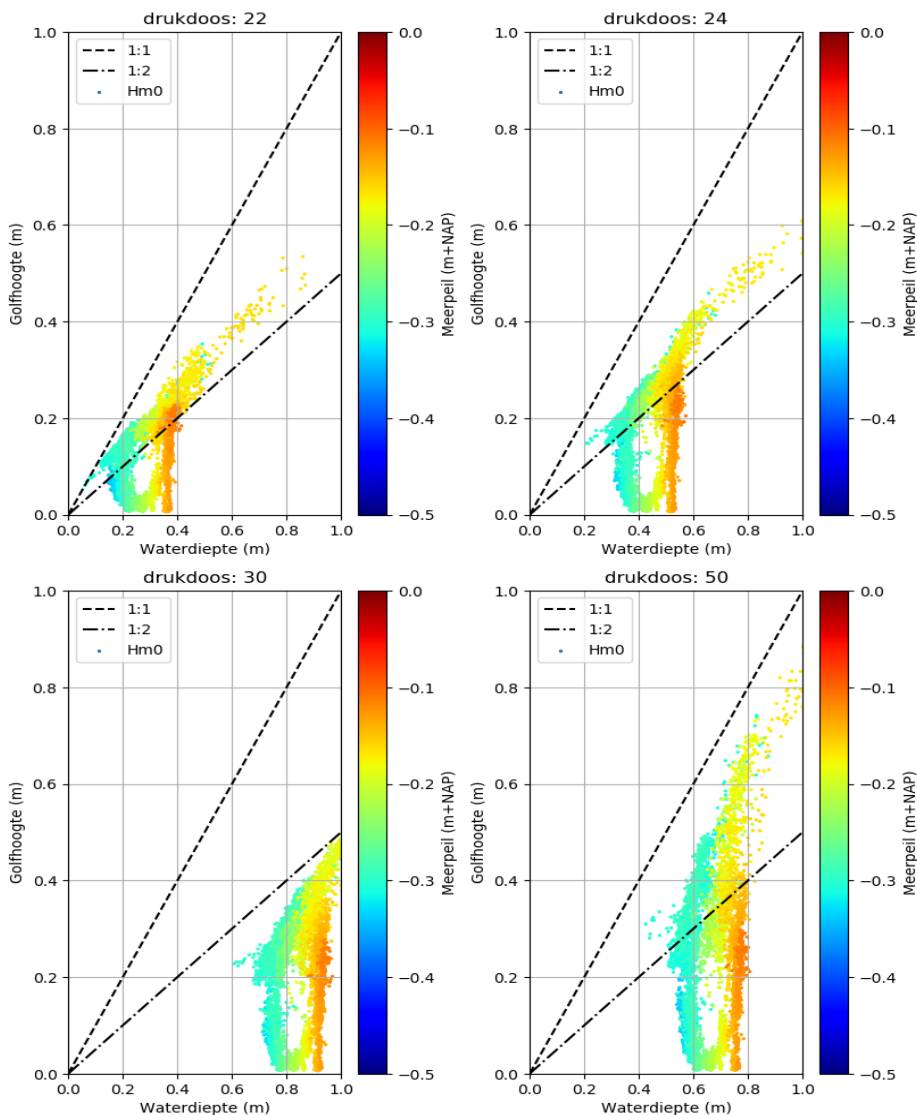
Voor de analyse van de hydrodynamica op het plateau is de focus gelegd op de meetperiode september-oktober, omdat hier de meeste bruikbare data is vergaard, zowel qua variabiliteit in meteo-condities als functioneren van meetapparatuur.

3.7.1 Golfhoogte

De significante golfhoogte is als functie van de waterdiepte en het meerpeil uitgezet voor de 4 drukdozen op de hoofdraai in Figuur 3.9. Hierbij is het meerpeil berekend een uit lopend gemiddelde van de gemeten waterstand bij de offshore ADV gedurende perioden met een windsnelheid lager dan 10 m/s (en dus weinig opwaaiing), met een middelingsperiode van een maand (Deltares, 2018). Het meerpeil is daarmee niet gelijk aan het streef zomer- of

winterpeil. Het figuur laat een duidelijke positieve correlatie zien tussen windopzet (waterstand boven meerpeil) en golfenergie, waarbij geen energieke golven voorkomen bij lage windopzet, en geen hoge opzet voorkomt zonder grote golven. Opvallend in deze scatterplots is het 'gat' in de datawolk aanwezig voor iedere drukdoos. Door het wisselen van het streefpeil van zomerpeil naar winterpeil binnen de meetperiode van september zijn voor elke drukdooslocatie twee typerende waterdiepten bij laag-energetische (niet-brekende) golfcondities te onderscheiden, gerelateerd aan het streefzomerpeil en -winterpeil. Deze tweedeling verdwijnt voor condities waarbij de golfhoogte-waterdiepte verhouding groter wordt dan ongeveer 1:2, en diepte-geïnduceerde breking de golfhoogte op het plateau bepaalt, ongeacht de waarde van het meerpeil.

De verhouding golfhoogte/waterdiepte neemt af naarmate de golven verder het plateau oplopen. Golfhoogtes op de rand van het plateau (drukdoos 50) naderen de waterdiepte, $H_{m0}/h = 0.80$. Aan het eind van het plateau (drukdoos 22) is de verhouding (bij de hogere golven in de tijdreeks) circa $H_{m0}/h = 0.65$. Voor de interpretatie van drukdoos 33 moet worden opgemerkt dat deze drukdoos zich precies boven een kuil in het plateau bevindt. Dit betekent dat de waterdiepte op deze locatie niet representatief is voor de mate van diepte geïnduceerde dissipatie die de golven hebben ondergaan over de eerste meters van het plateau.

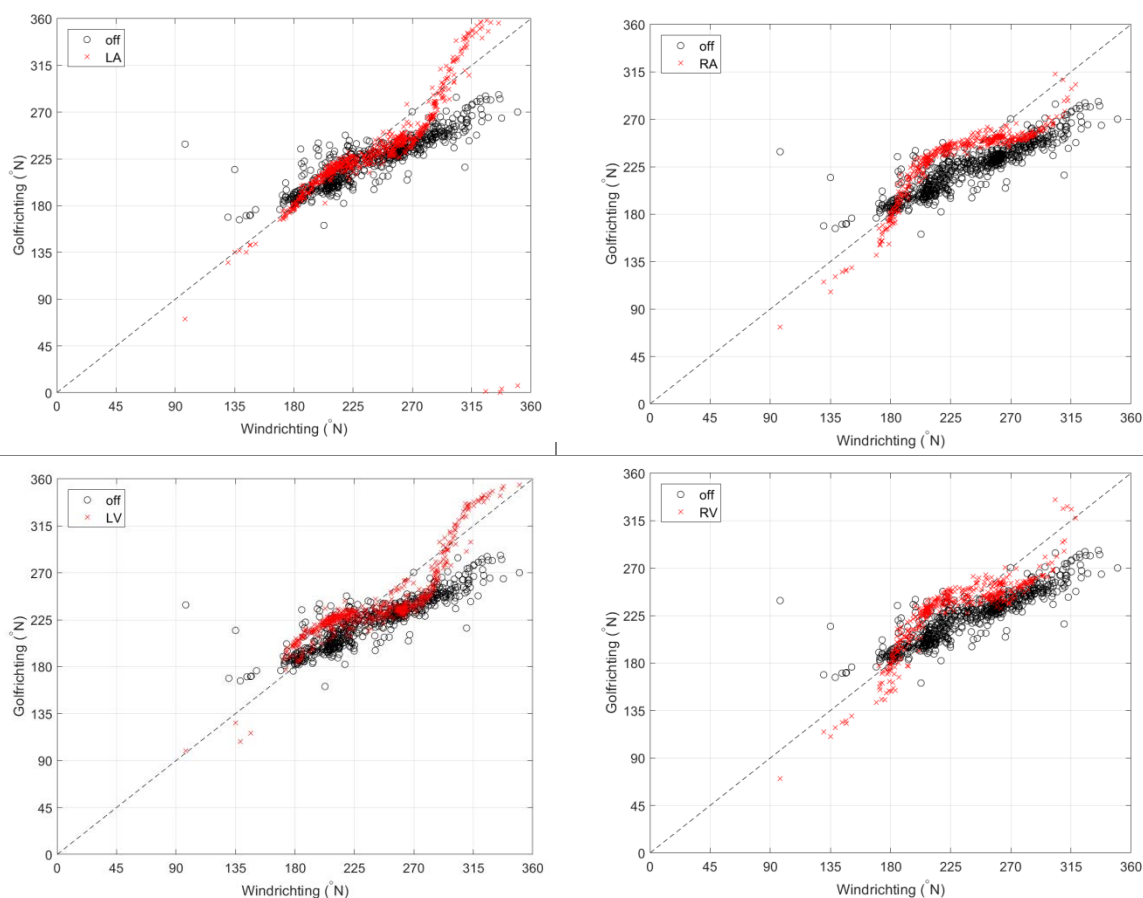


Figuur 3.9 Relatie tussen significante golffhoogte en waterdiepte bij de vier drukdozen op het plateau, gekleurd op meerpeil, voor de meetperiode September 2017

3.7.2 Golfrichting

Voor aanlandige wind op de dijk (vanuit zuiden tot zuidwesten) ligt de golfrichting in lijn met de windrichting op het offshore meetframe. Wanneer de wind meer vanuit Enkhuizen komt (vanuit westen tot vanuit noorden), draait de golfrichting op het offshore frame bij. Dit wordt bepaald door de dieptecontouren in het Markermeer (mogelijk in combinatie met de grootschalige windgedreven stroming in het Markermeer).

De golfrichting op het plateau wordt beïnvloed door de oriëntatie van het plateau. Dit heeft tot gevolg dat het bijdraaien richting 225 graden (ongeveer de oriëntatie van de pilot) sterker aanwezig is dan offshore. Bij een windrichting tussen 270 en 360 graden wijkt de golfrichting op het plateau duidelijk af van de offshore golfrichting. Dit is vooral bij de twee ADV's het dichtst bij de damwand zichtbaar. Mogelijk is hier sprake van diffractie rond de punt van de damwand.



Figuur 3.10 Vergelijking tussen golfrichting bij de offshore ADV (off) en de vier ADV's op het plateau (LA=linksachter, Nortek5044, RA=rechtsachter, Plymouth 4624, LV = linksvoor, Deltares 5044, RV=rechtsvoor, Plymouth 4626)

3.8 Analyse golfasymmetrie

In Ruessink et al. (2012) wordt een parametrisatie van het effect van horizontale (skewness) en verticale golfasymmetrie (asymmetry) op bed-load sediment transport gepresenteerd. Met deze parametrisatie kan het effect op het sediment transport worden meegenomen, zonder dat daar de snelheden vlakbij de bodem voor bekend hoeven te zijn. Om die reden wordt deze parametrisatie ook in XBeach gebruikt.

Het werk van Ruessink et al. (2012) is gebaseerd op meerdere datasets, ingemeten langs de kusten van Nederland, Frankrijk en de Verenigde Staten. Er zit echter geen dataset bij die in een meer (of een anderszins vergelijkbare situatie als het Markermeer) is ingemeten. Daarmee is de parametrisatie afgeleid in Ruessink et al. (2012) wellicht minder geschikt voor toepassing in het Markermeer. Om hier inzicht in te verkrijgen zijn in dit hoofdstuk de metingen uit de drukdozen vergeleken met de relatie uit Ruessink et al. (2012).

3.8.1 Methodiek

Om de data van de drukdozen met de parametrisatie uit Ruessink et al. (2012) te kunnen vergelijken wordt de data op vergelijkbare manier verwerkt tot skewness, S_u , en (verticale) asymmetrie, A_u . In Ruessink et al. (2012) worden de volgende relaties gebruikt:

$$S_u = \frac{\overline{u_w^3(t)}}{\sigma_{u_w}^3}; A_u = \frac{\overline{H(u_w^3(t))}}{\sigma_{u_w}^3}$$

waarbij u_w de golf-gerelateerde horizontale snelheid is, σ de standard-deviatie is, en H een Hilbert-transform representeert.

Omdat de verwerking van de drukdoos data geschiedt onder de aanname van lineaire golftheorie, zijn de skewness en (verticale) asymmetrie van de oppervlakteuitwijking (η) gelijk aan die van de snelheid. Er mag dus gesteld worden dat:

$$S_u = \frac{\overline{\eta^3(t)}}{\sigma_\eta^3}; A_u = \frac{\overline{H(\eta^3(t))}}{\sigma_\eta^3}$$

Naast de S_u en A_u worden ook de non-lineariteit, B , en de fase, ψ , vergeleken:

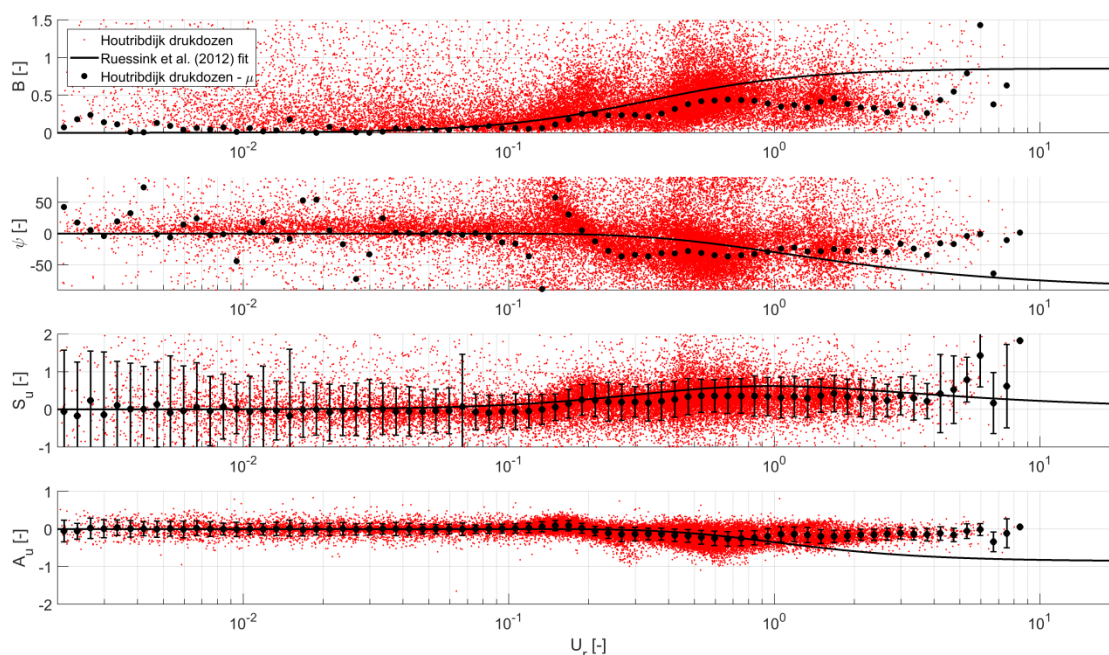
$$B = \sqrt{S_u^2 + A_u^2}; \psi = \tan^{-1}\left(\frac{A_u}{S_u}\right)$$

3.8.2 Resultaten

In Figuur 3.11 zijn de vier hierboven genoemde grootheden uitgezet tegen het Ursell getal (U_r). Elke rood punt vertegenwoordigt een meetblok van 10 minuten. Daarnaast zijn de gemiddelden van de metingen (zwarte bollen) met een indicatie van de standaard afwijking (zwarte error-bar).

In het algemeen lijkt de gemiddelde S_u de Ruessink et al. (2012) fit redelijk goed te volgen. De fit geeft een lichte overschatting van de gemeten S_u , en er zijn uitschieters bij hogere Ursell getallen. De A_u wordt echter significant onderschat voor $U_r > 1$. Deze afwijkingen zijn terug te zien in de figuren voor B en ψ . Een verdere analyse van de (beperkte) invloed van het beperken van het frequentiebereik bij de verwerking van het meetsignaal uit de drukdozen naar een oppervlakteuitwijking is gegeven in Appendix C.

De resultaten van deze analyse laten zien dat voor hoge Ursell getallen (ondiep water, hoge en lange golven) de golfasymmetrie op het plateau lager is dan voor vergelijkbare condities aan de kust. Doordat golfasymmetrie sediment transport in de richting van de golven verhoogt, heeft een verlaging van de golfasymmetrie ook effect op het netto sedimenttransport.



Figuur 3.11 Overzicht van de gemeten waarden van B , ψ , S_u en A_u , afgezet tegen de relaties afgeleid in Ruessink et al. (2012).

3.9 Analyse stromingen

De stroomrichting gemeten op het offshore meetframe staat consequent in één van twee richtingen. Bij wind uit de oostelijke sector (0-180 graden) is de stroming vanuit ZO-richting (langs de dijk, vanuit Lelystad richting Enkhuizen). Bij wind uit de westelijke sector (met hogere windsnelheden en stroomsnelheden in deze periode) is de stroming daar tegengesteld aan.

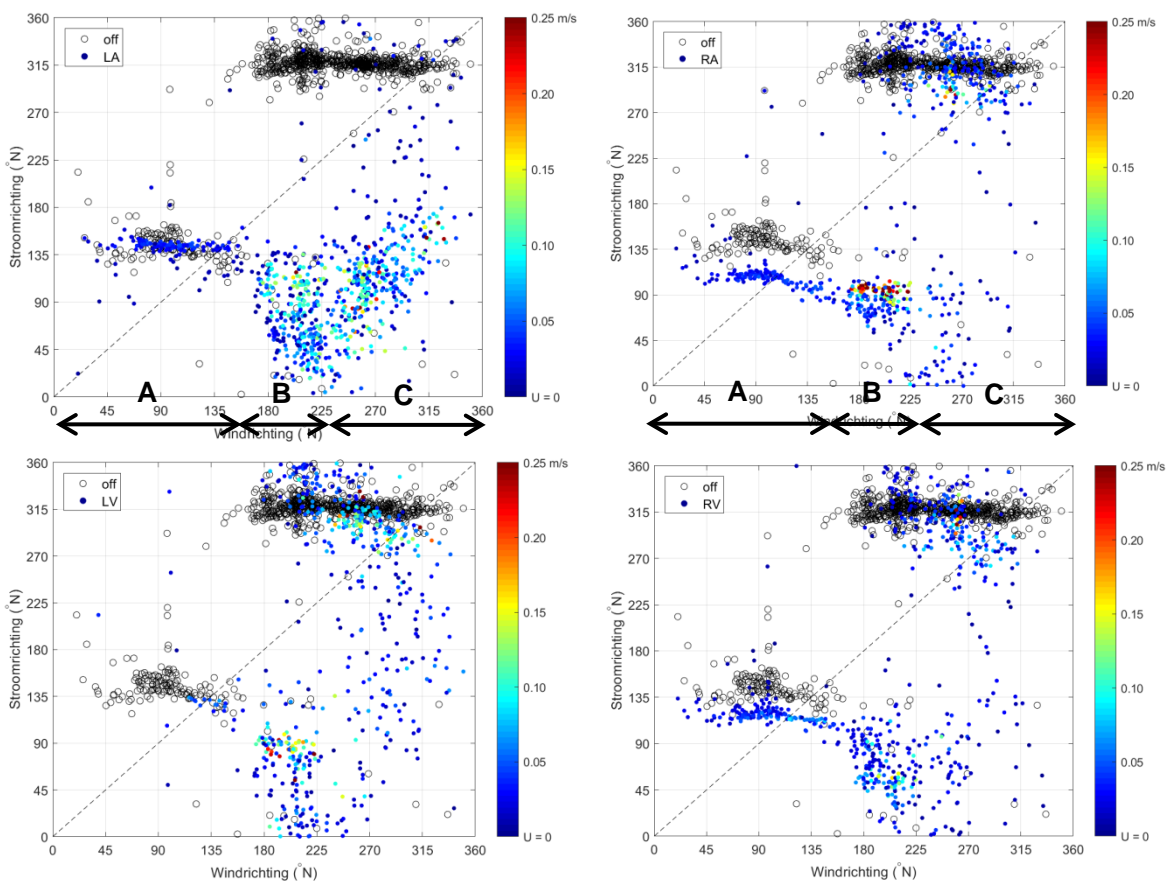
In Figuur 3.12 is de stroomrichting van elk van de ADV's op het plateau uitgezet tegen de windrichting, waarbij de stroomrichting van de offshore ADV telkens als vergelijkingsmateriaal is mede geplot. De stroomrichting op het plateau is in algemene zin bij wind uit de oostelijke sector vergelijkbaar met de stroomrichting bij de offshore ADV; bij de ADV's rechtsvoor en rechtsachter wat bijgedraaid door de oriëntatie van het plateau. Bij wind uit de westelijke sector beweegt stroming vanuit Enkhuizen richting Lelystad. Bij de offshore ADV is dit patroon consequent zichtbaar, zoals tijdens de gehele meetperiode 2014-2018. Bij de ADV's op het plateau is een wat diffuus beeld zichtbaar qua stroomrichting, met onder bepaalde omstandigheden een stroming met een richting die tegengesteld is aan de stroomrichting bij het offshore meetframe. Zie de markering in de betreffende figuren voor de ADV rechtsachter, en een concreet voorbeeld in Figuur 3.13.

Ruwweg kunnen 3 stromingsscenario's worden onderscheiden:

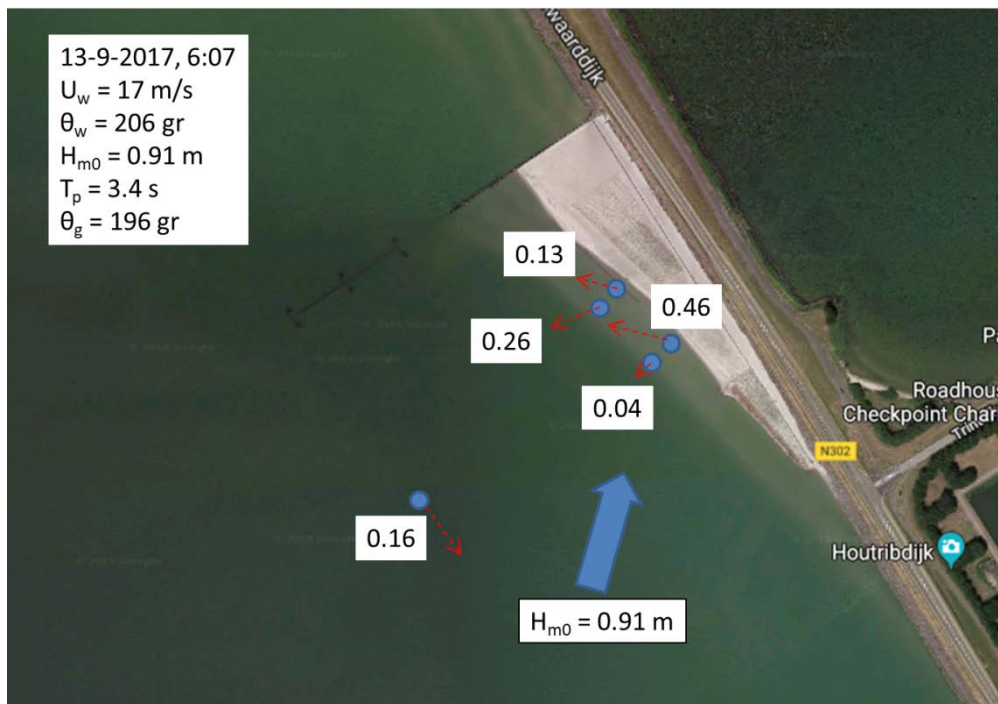
- Geval A: Windrichting 0-170 graden: offshore stroming parallel aan de dijk, richting Enkhuizen (135 graden), en op het plateau stroming richting damwand (circa 100 graden).
- Geval B: Windrichting 170-225 graden: offshore stroming parallel aan de dijk, richting Lelystad (315 graden), en op het plateau (teggengestelde) stroming richting damwand. Mogelijk is dit golfgedreven langsstroming als gevolg van schuin invallende golven ten opzichte van de oriëntatie van de pilot (225 graden).

- Geval C: Windrichting 225-360 graden: offshore stroming parallel aan de dijk, richting Lelystad (315 graden), en op het plateau eveneens stroming parallel aan de oeverlijn in die richting.

Aanvullende figuren met betrekking tot de analyse van de hydrodynamica tijdens de aanvullende metingen kunnen worden gevonden in Appendix B.



Figuur 3.12 Vergelijking tussen stroomrichting bij de offshore ADV (off) en bij de vier ADV's op het plateau (LA = linksachter, Nortek5044, RA = rechtsachter, Plymouth 4624, LV = linksvoor, Deltares5044, RV = rechtsvoor, Plymouth4626), gekleurd op stroomsnelheid op het plateau. De drie stromingsscenario's zijn met pijlen in de bovenste figuren weergegeven.



Figuur 3.13 Voorbeeld van tegengestelde stroming op het plateau ten opzichte van de offshore stroming, opgewekt door hoge golven vanuit de sector 170-225 graden.

3.10 Conclusies

Gedurende de periode van de additionele metingen zijn golfcondities en stroming op het plateau gemeten. De metingen laten een variatie zien in de gemeten golfhoogten op het plateau, van $H_{m0} < 0,05$ m tot $H_{m0} \sim 1,20$ m in de tijd, evenals een duidelijk verloop in de golfhoogte in de kustdwarsrichting ten gevolge van golfbreking. Gedurende energieke condities vindt er een waterstandsverhang plaats van enkele (~ 5) centimeters over de breedte van het plateau. De gemeten piek golfperiode ($T_p = 1-5$ s) varieert in combinatie met de golfhoogte in de tijd, maar varieert niet in de dwarsrichting over het plateau.

Analyse van de optredende golfhoogtes laat zien dat onder energieke condities, golfhoogtes op het plateau sterk correleren met het gemeten waterstandsopzet. Hierbij zijn de golfhoogtes gemaximaliseerd door diepte-geïnduceerde golfbreking, met een relatieve maximale verhouding tussen golfhoogte en waterdiepte van $H_{m0}/h = 0.80$ aan de rand van het plateau en circa $H_{m0}/h = 0.65$ dicht bij de waterlijn. Analyse van de golfvorm laat zien dat golven onder condities met hoge Ursellgetallen (kleine waterdieptes, hoge en lange golven), waarbij op zee-kusten zeer asymmetrische golven worden geobserveerd, de gemeten golfasymmetrie op het plateau van het pilotstrand laag is, en veel kleiner dan voor vergelijkbare condities op zee-kusten.

Gemeten stroomsnelheden op het plateau variëren tussen 0–0,5 m/s, en correleren met windsnelheid en golfhoogte. De stromingrichting op het plateau komt onder condities van wind uit het oosten (windrichting 0–170 graden; stroming richting Enkhuizen) en uit het westen (windrichting 225–360 graden; stroming richting Lelystad) overeen met de stroomrichting gemeten bij de offshore ADV. Voor wind uit het zuiden (windrichting 170–225 graden) ontstaat een verschil in stroomrichting, waarbij stroming bij de offshore ADV richting Lelystad staat, en op het plateau stroming richting Enkhuizen optreedt.

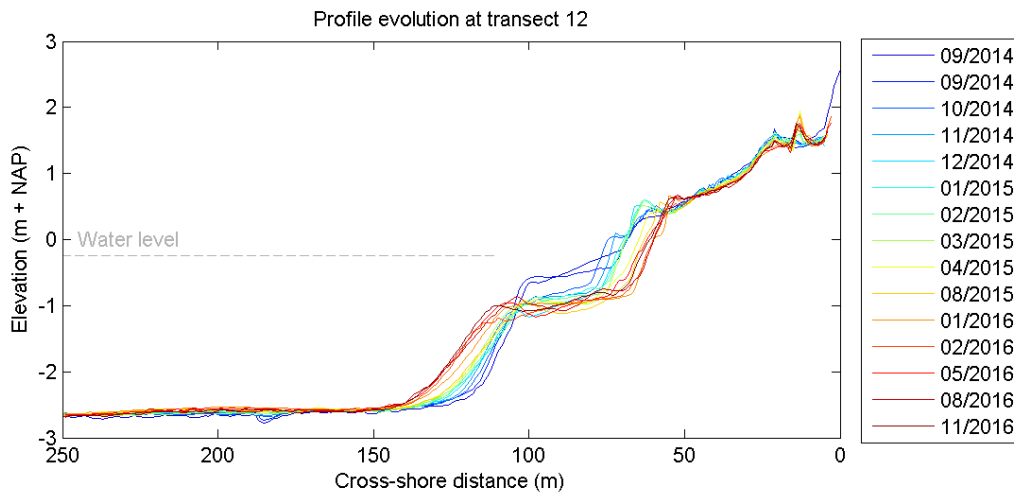
4 Conceptueel model profielvorm

4.1 Inleiding

Het pilotstrand Houtribdijk laat een karakteristieke morfologische ontwikkeling zien, die gekenmerkt wordt door het ontstaan van een brede en bijna-horizontaal (helling ~1:400 – 1:800) onderwaterplateau op een hoogte van NAP - 0,8–1,0 m, en een steil talud (helling ~1:10) bij de waterlijn (Figuur 4.1). Deze morfologische ontwikkeling met een onderwaterplateau is anders dan een typische Dean-type profiel die karakteristiek is voor zee-kusten zoals de Nederlandse Noordzeekust. De analyse van andere zandstranden in het Markermeer en andere meren (Appendix D) toont echter dat veel natuurlijke zandstranden in merengebieden een vergelijkbaar onderwaterprofiel hebben als dat van het pilotstrand (e.g., WL, 1988). Daarnaast is gezien dat in de eerste 18 maanden na aanleg op grote delen van het pilotstrand de waterlijn landwaarts terug is geschreden. Na deze initiële aanpassing is de positie en helling van de waterlijn in zekere mate dynamisch stabiel gebleven, waarbij veranderingen vooral in langrichting voorkomen, die veroorzaakt worden door periodieke veranderingen in golfrichting, en de daarbij bijhorende evenwichtsoriëntatie van het strand. Het bestaan van een stabiele, steile (1:4–1:13) helling bij de waterlijn is wederom anders dan het typische gedrag van de Nederlandse zee-kusten, maar komt veelvuldig voor bij de referentiestranden in merengebieden (Appendix D), mits er daar voldoende grof materiaal (zand, schelpgruis) aanwezig is. Het gedrag van het pilotstrand is hiermee te beschrijven als karakteristiek voor merengebieden, in plaats van voor kustgebieden.

Omdat bestaande conceptuele modellen voor kustprofielen (e.g., Bruun, Dean) niet toepasselijk lijken voor de situatie bij de Houtribdijk, is een nieuw conceptueel model nodig om de karakteristieke morfologische ontwikkeling van het pilotstrand te beschrijven en verklaren. Hoewel de ligging van het pilotstrand ten opzichte van het dominante golfklimaat, de positie van de damwand, en de aanwezigheid van grootschalige stromingen in het Markermeer betekenen dat de precieze morfologische ontwikkeling van het pilotstrand sterk beïnvloed wordt door langsprocessen, zijn veel generieke karakteristieken van het pilotstrand te beschrijven vanuit een beschouwing van het verloop van processen in de kustdwarsrichting.

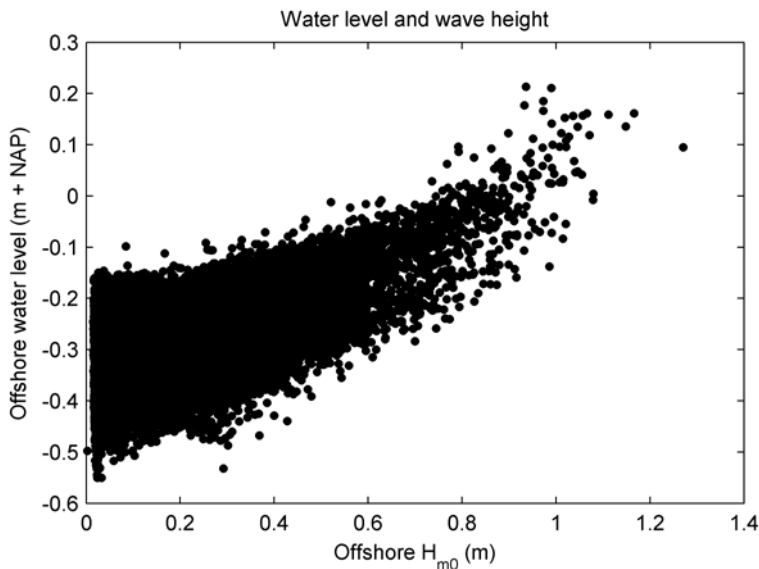
In de volgende paragrafen wordt een conceptuele verklaring gezocht voor de vorm (breedte, diepte, helling) van het onderwaterplateau en de waterlijn aan de hand van een analyse van gemeten en gemodelleerde fysische parameters. Deze analyses beschrijven daarbij niet de ontwikkeling van het strand in de langrichting, waarbij langsprocessen (golf- en windgedreven stroming) en objecten als de damwand en de Houtribdijk een belangrijke rol spelen.



Figuur 4.1 Morfologische veranderingen in dwarsrichting tussen september 2014 en november 2016 in transect 12.

4.2 Diepte plateau

Binnen één tot twee maanden na aanleg is op het pilotstrand een onderwaterplateau ontwikkeld op een hoogte van ongeveer NAP - 0,8–1,0 m (Figuur 4.1). Het plateau is in de maanden daarna wel breder geworden, maar niet wezenlijk dieper (of hoger) geworden.



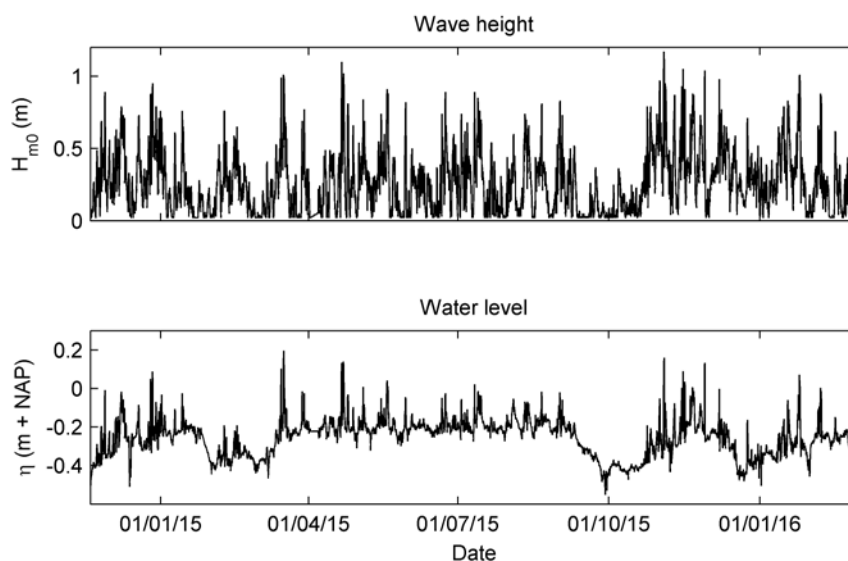
Figuur 4.2 Observaties van waterstand en golfhoogte bij het offshore ADV tussen november 2014 en februari 2017.

Een verklaring voor de constante hoogteligging van het onderwaterplateau kan gevonden worden in de sterke positieve correlatie tussen offshore golfhoogte en waterstanden bij het pilotstrand (Figuur 4.2). Doordat er geen getij is en hoge golven altijd samengaan met een verhoogde windgedreven waterstand, ontstaat er een situatie waarbij stormgolven steeds op dezelfde hoogte op het profiel aangrijpen. Dit heeft als effect dat er op dieper gelegen delen van het profiel ook tijdens minder frequente en meer energieke stormen, geen of weinig sediment transport plaatsvindt. De morfologische gevolgen hiervan zijn dat golven tot een

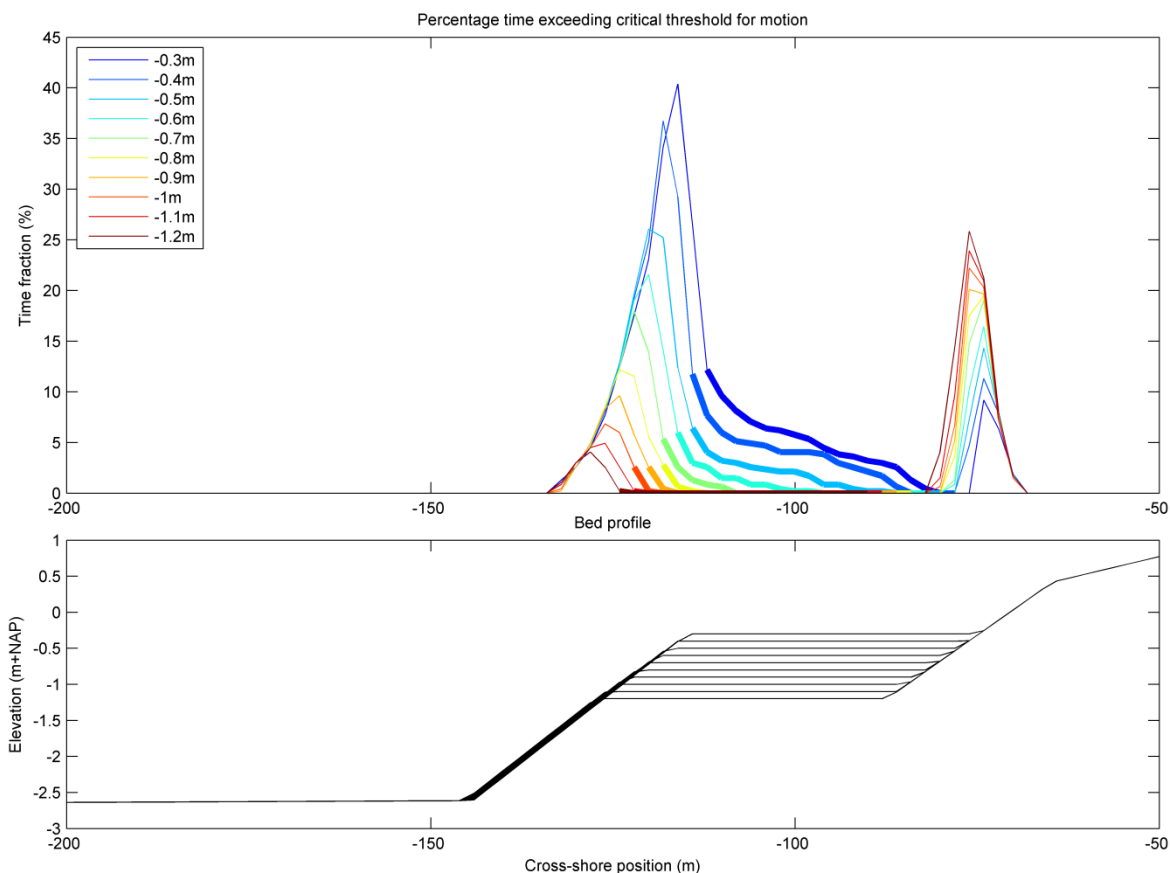
bepaalde diepte sediment kunnen mobiliseren, en in geval van transportgradiënten, de bodem kunnen doen eroderen.

Om te onderzoeken of de diepte van het plateau overeenkomt met een grens van mobilisatie van sediment zijn er een aantal simulaties uitgevoerd met het model XBeach (zie ook Hoofdstuk 5). In het onderzoek zijn er een tiental simulaties uitgevoerd voor een periode van 15 maanden, waarbij de opgelegde golf- en waterstandscondities overeenkomen met condities die bij de offshore ADV gemeten zijn tussen meting T3 (november 2014) en T11 (februari 2016), zie Figuur 4.3. Hierbij is aangenomen dat alle golven loodrecht invallen (en er geen langsstroming optreedt). Deze periode is gekozen omdat bekend is uit de morfologische metingen dat het plateau in deze periode wel dynamisch was (vooral groei in breedte), maar dat het plateau dynamisch stabiel was qua hoogteligging. Alle simulaties zijn uitgevoerd in *stationaire* golfmodus (constante golfforcing op de rand; zie Paragraaf 5.2), met gebruik van default modelparameters.

In ieder simulatie is een ander schematisch dwarsprofiel van het pilotstrand gebruikt, waarin de hoogte van het onderwaterplateau is gevarieerd tussen NAP -0,3 m en NAP -1,2 m (Figuur 4.4). De simulaties zijn uitgevoerd zonder berekening van bodemveranderingen (geen morfologische updating) met default instellingen voor de hydrodynamische modelparameters. De morfologische modelprocessen die beschreven staan in Hoofdstuk 5 hebben geen invloed op de resultaten van deze analyse.



Figuur 4.3 Opgelegde golf- en waterstandscondities XBeach simulaties.



Figuur 4.4 Boven: berekende fractie van de simulatietijd waarin het kritieke Shieldsgetal voor sediment mobilisatie ($\Theta_c=0.05$) wordt overschreden voor configuraties met verschillende plateauhoogtes. Dikgetrokken lijnen geven gebieden op het plateau weer. Onder: bodemligging van de configuraties met verschillende plateauhoogtes.

Voor iedere simulatie wordt het maximale Shieldsgetal per dag per locatie in het dwarsprofiel berekend, waarbij het Shieldsgetal als volgt wordt bepaald:

$$\Theta(x, t) = \frac{\tau_b(x, t)}{(\rho_s - \rho_w)gD_{50}}$$

waarbij ρ_s en ρ_w de dichtheid van respectievelijk zand en water zijn, g de gravitatieconstante is, $D_{50} = 250\mu\text{m}$ de mediane korrelgrootte is, en de bodemschuifspanning τ_b bepaald wordt door (Ruessink, et al., 2001):

$$\tau_b = c_f \rho_w u \sqrt{(1.16u_{rms})^2 + u^2}$$

waarbij $c_f = 0.003$ een bodemruwheidsconstante is, u de diepte-gemiddelde Eulerse snelheid is, en u_{rms} de representatieve orbitaalsnelheid bij de bodem is. Om sediment in beweging te brengen moet het Shieldsgetal groter zijn dan het kritieke Shieldsgetal ($\Theta_c = 0.05$).

Het aantal dagen waarin het maximale berekende Shieldsgetal groter is dan het kritieke Shieldsgetal is per plateauconfiguratie in Figuur 4.4 weergegeven. Hierbij zijn gebieden op het plateau met dikke lijnen aangegeven. De resultaten laten zien dat de hoogte van het plateau veel invloed heeft op het Shieldsgetal, en daarmee potentieel voor sediment

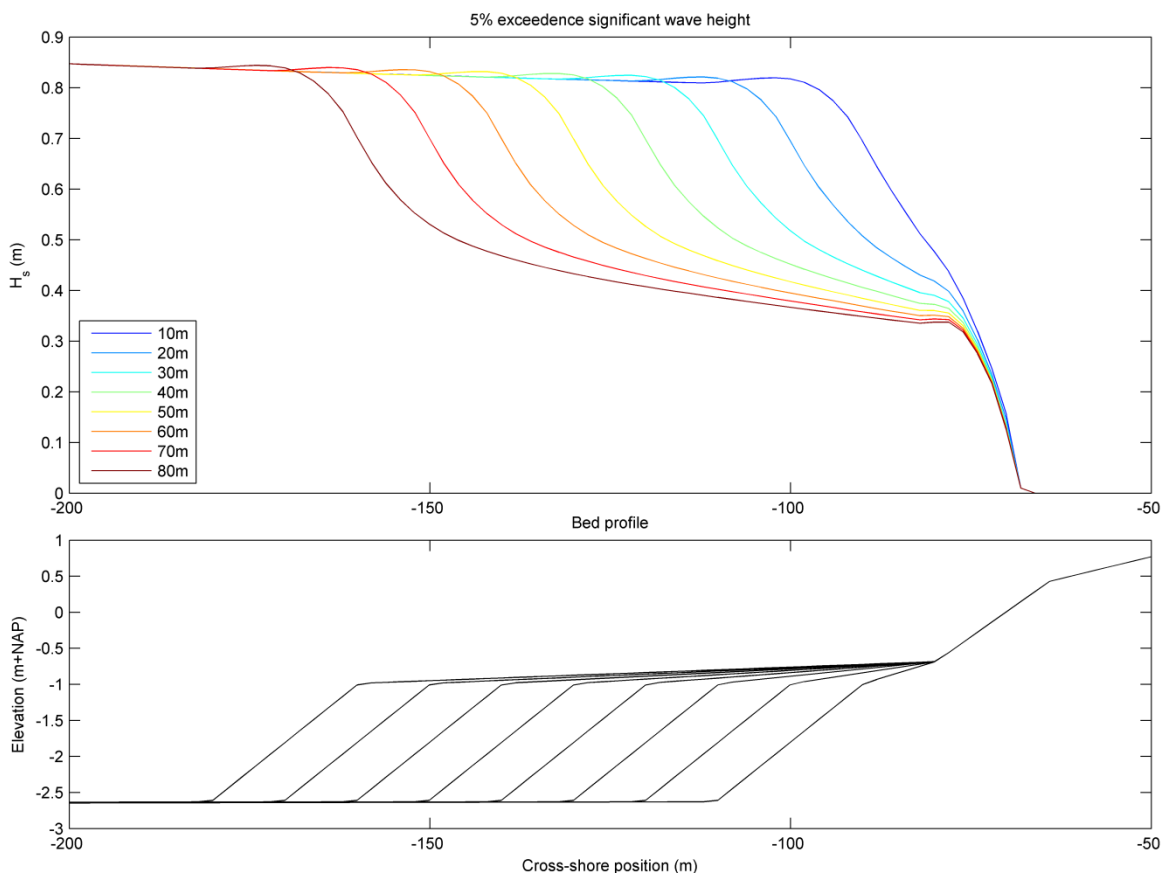
mobilisatie. De resultaten laten verder zien dat bij een plateauhoogte van NAP - 0,8 m of lager, er nauwelijks potentieel is voor sediment transport op het plateau. In het geval van een plateau op NAP - 0,8 m is het maximale Shieldsgetal op minder dan 3% van de dagen (~10 dagen per jaar) groter dan het kritieke Shieldsgetal nodig voor mobilisatie van sediment. In het geval van een plateau op NAP - 1,2 m is dat zelfs minder dan op 0,3% van de dagen. Bij hogere niveaus van het plateau neemt het potentieel voor sediment transport snel toe, van 6% van de dagen (~20 dagen per jaar) in het geval van een plateau op NAP - 0,7 m, tot 12% van de dagen (~44 dagen per jaar) in het geval van een plateau op NAP - 0,3 m. Bovendien wordt in het geval van een plateau met een elevatie hoger dan NAP - 0,7 m het transportpotentieel niet beperkt tot de rand van het plateau, maar vindt over een steeds groter deel van het plateau plaats.

Hoewel de exacte waarden in deze studie deels bepaald worden door aannamen over de bodemruwheidsconstante, de bijdrage van golven aan de bodemschuifspanning en de waarde van het kritieke Shieldsgetal, onderbouwen de resultaten wel een conceptueel model die de hoogte van het plateau beschrijft. In dit conceptueel model wordt de geobserveerde hoogte van het plateau verklaard vanuit een sterke correlatie tussen de waterstand en golfhoogte, waardoor er relatief weinig verticale variatie is van het aangrijpingspunt van de golven op het profiel. De minimale hoogte van het plateau wordt bepaald door het afnemen van het potentieel van stroming en golven om sediment te mobiliseren, waarbij op een gegeven diepte (gegeven een golfklimaat) geen, of weinig, transport meer plaats kan vinden, en het plateau dus niet verder zal kunnen eroderen (of door aanzanding tot op minimaal deze hoogte zal opbouwen).

4.3 Breedte plateau

Hoewel de hoogte van het plateau al na één tot twee maanden na aanleg dynamisch stabiel was, is de breedte van het plateau over een periode van ongeveer 18 maanden toegenomen tot een dynamisch stabiele breedte van ongeveer 40–100 m, waarbij de breedte toeneemt in de richting van de damwand. De groei van de breedte van het plateau is zowel het gevolg geweest van de initiële terugtrekking van de waterlijn, als van een uitbouw van de offshore rand van het plateau.

Om de invloed van de breedte van het plateau op de hydrodynamica op het plateau en aan de waterlijn te onderzoeken is een serie modelsimulaties opgezet, die vergelijkbaar van aard zijn als die beschreven in Paragraaf 4.2. In dit onderzoek zijn een achttal simulaties uitgevoerd voor een periode van 15 maanden (periode T3–T11), waarbij de opgelegde golf- en waterstandscondities overeenkomen met condities die bij de offshore ADV gemeten zijn. Hierbij is weer aangenomen dat alle golven loodrecht invallen. In ieder simulatie is een ander schematisch dwarsprofiel van het pilotstrand gebruikt, waarin de breedte van het onderwaterplateau is gevarieerd tussen 10 m en 80 m (Figuur 4.5). De simulaties zijn evenals de simulaties in Paragraaf 4.2 uitgevoerd zonder berekening van bodemveranderingen (geen morfologische updating), in golfstationaire modus en met default instellingen voor de hydrodynamische modelparameters. De morfologische modelprocessen die beschreven staan in Hoofdstuk 5 hebben geen invloed op de resultaten van deze analyse.



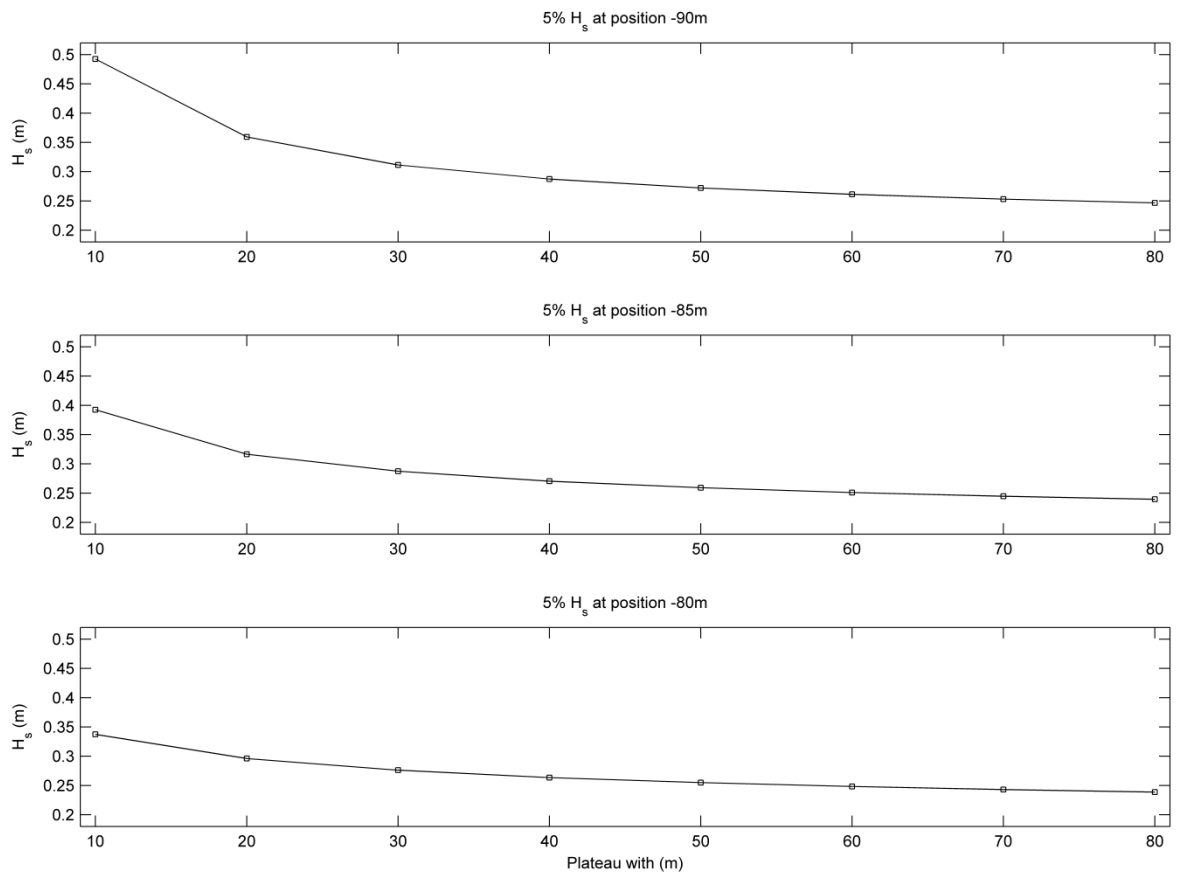
Figuur 4.5 Boven: golfhoogte die 5% van de tijd overschreden wordt voor configuraties met verschillende plateau breedtes. Onder: bodemligging van de configuraties met verschillende plateau breedtes.

Figuur 4.5 toont de berekende maximale dagelijkse golfhoogte die gedurende 5% van de tijd (~18 dagen per jaar) wordt overschreden voor de plateauconfiguraties met verschillende breedten. Het figuur laat zien dat veel energie binnen 10 m van de offshore randen van de plateaus wordt gedissipeerd (~halvering golfhoogte). Doordat de golfhoogte afneemt over een groot deel van het plateau, en deze afname groter is voor brede plateaus, is de 5% overschrijdingsgolfhoogte aan de landwaartse kant (positie -80 m) van het plateau hoger bij smalle plateaus dan bij brede plateaus. Hierbij moet opgemerkt worden dat voor de breedste plateaus (>60 m) de golfhoogte bij het landwaartse einde niet meer in de dwarsrichting afneemt tot de golven het steile strandprofiel ($x > -80$ m) bereiken.

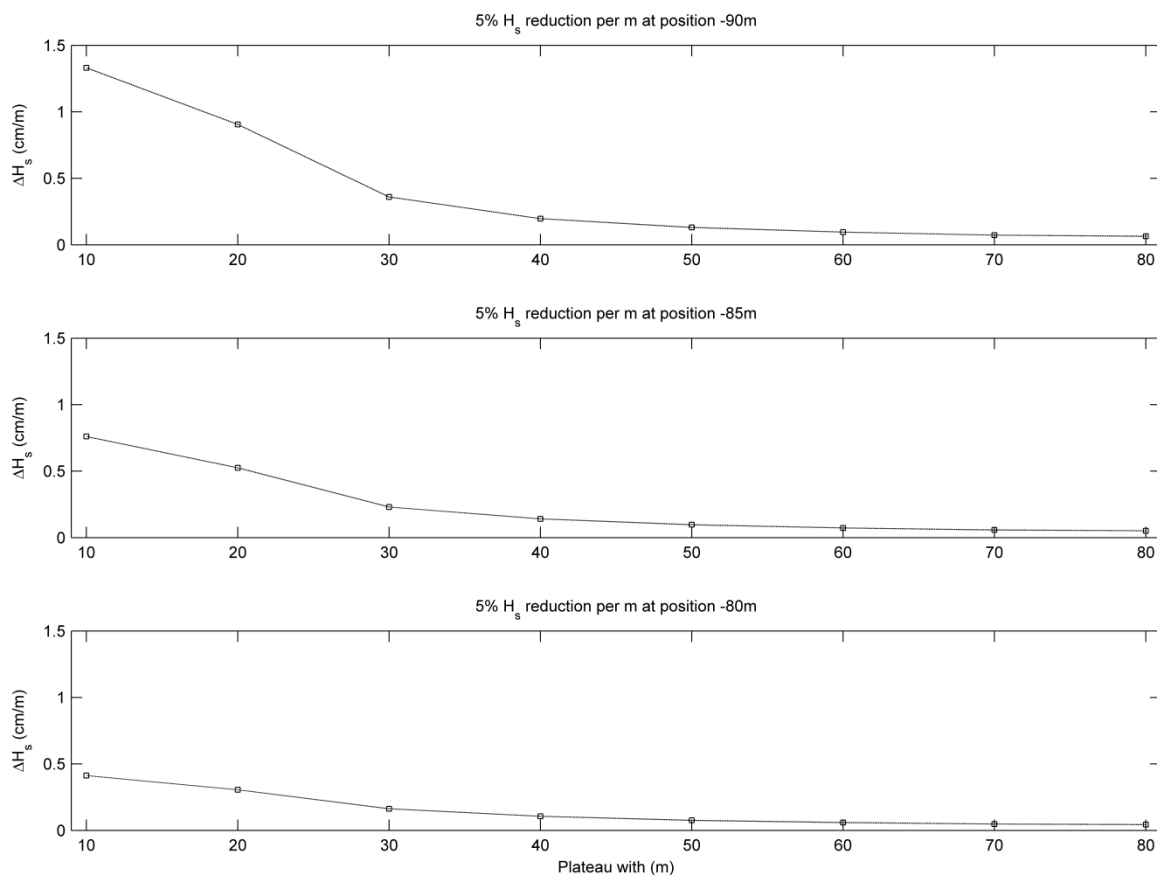
De verschillen in golfhoogte op drie locaties aan de landwaartse zijde van het plateau ($x = 80$, 85 en 90 m) als functie van de plateau breedte is nader gespecificeerd in Figuur 4.6. Het figuur laat met name een groot verschil zien in golfhoogte in de buurt van de waterlijn tussen de simulaties met een zeer smalle plateau (10–20 m) ten opzichte van simulaties met een breder plateau (>40 m).

De golfhoogteafname als gevolg van het breder (of smaller) zijn van het plateau is getoond in Figuur 4.7. In dit figuur is de verwachte afname (of toename) in golfhoogte aan de landwaartse zijde van het plateau gegeven, voor verschillende plateau breedtes, als het plateau breder of smaller zou zijn (het figuur kan gezien worden als de gradient van Figuur 4.6 in de plateau breedte). In het figuur duidt een positieve verandering ΔH_s op een afname in golfhoogte bij toename van plateau breedte. Het figuur laat zien dat de golfhoogte significant afneemt voor breder-wordende plateaus tot een totale plateau breedte van 40–50 m.

Plateaubreedtes groter dan 40–50 m lijken daarbij geen additioneel effect te hebben op de hoeveelheid golfenergie die de waterlijn bereikt.



Figuur 4.6 . Golfhoogte die 5% van de tijd overschreden wordt op 10 m van de landwaartse rand van het schematische profiel (boven), op 5 m van de landwaartse rand van het schematische profiel (midden) en op de landwaartse rand van het schematische profiel (onder), als functie van de totale plateaubreedte.



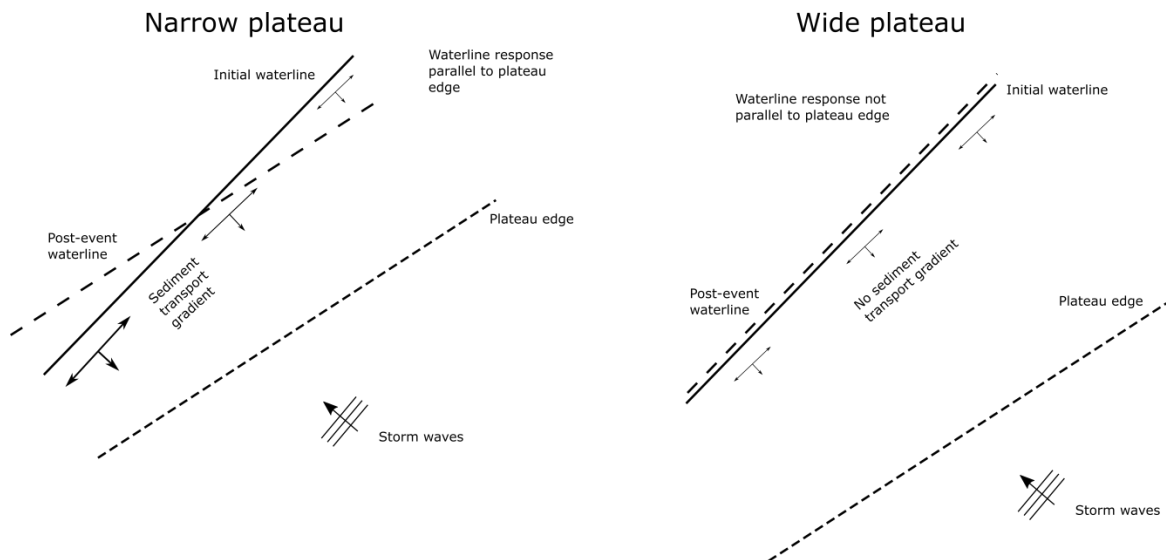
Figuur 4.7 Verandering van de golfhoogte die 5% van de tijd overschreden wordt, per meter breedte van het plateau, op 10 m van de landwaartse rand van het schematische profiel (boven), op 5 m van de landwaartse rand van het schematische profiel (midden) en op de landwaartse rand van het schematische profiel (onder), als functie van de totale plateau breedte. Een positieve verandering ΔH_s duidt hierbij op een afname in golfhoogte bij toename van plateau breedte.

De resultaten van deze studie laten zien dat de breedte van een plateau bijdraagt aan het verlagen van de hoeveelheid golfenergie die de waterlijn bereikt, en daarmee het potentieel voor dwars- en langstransport aan de kust. De reducerende werking van het plateau op de golfhoogte bij de kust is zichtbaar tot een plateau breedte van 40–50 m; bij grotere breedtes is de verlaging niet substantieel groter dan die van een plateau met een breedte van 50 m.

Uit deze resultaten kunnen twee conclusies worden getrokken:

- 1 Het brede plateau (60–100 m) nabij de damwand kan volgens de resultaten van dit onderzoek niet uitsluitend het gevolg zijn van processen die gerelateerd zijn aan golfbreking. Hier moeten andere (langs)processen een belangrijke rol spelen.
- 2 Voor een strand zoals het pilotstrand, waarop naast dwarstransporten, ook langstransporten bestaan, zal het plateau waarschijnlijk niet veel smaller zijn dan 40 m, gegeven gelijke forcering als bij het pilotstrand. Dit is het gevolg van de gradiënt in golfhoogte bij de kust als functie van plateau breedte: daar waar door een perturbatie de plateau breedte kleiner is dan de omgeving, zal het sedimenttransport aan de waterlijn groter zijn dan de omringende gebieden, en zal de transportgradiënt tot lokale erosie leiden (Figuur 4.8). Dit betekent dat de waterlijn en de contour van de buitenrand van het plateau parallel zullen lopen. Over de totale breedte van het strand gaat netto de waterlijn hiermee achteruit als er lateraal of in dwarsrichting een sediment sink is. Als de plateau breedte groter wordt dan ~50 m, wordt deze gradiënt kleiner, en daarmee ook de

relatie tussen de waterlijn en de positie van de contour van de buitenrand van het plateau ontkoppeld, waardoor deze mechanisme voor sedimentverlies bij de waterlijn verkleind wordt.



Figuur 4.8 Conceptueel model plateaubreedte. Op smalle plateaus (links) is toegenomen transport (pijlen) aan de kustlijn met een minder breed plateau. Door diffusie ontstaat een response van uniforme plateaubreedte. Op brede plateaus (rechts) is geen verhoogd transport bij delen met een minder breed plateau, en is geen response van uniforme plateaubreedte.

4.4 Helling plateau

In Paragraaf 4.2 is een verklaring gegeven door de observatie van de hoogteligging van het plateau, waarbij is aangegeven dat er onder een bepaald niveau onvoldoende schuifspanning is om sediment op te woelen. Dit model verklaart lokaal waarom het plateau niet lager zal liggen, maar echter niet waarom het plateau (bijna) horizontaal op die hoogte ligt. Immers, het bestaan van een capaciteit voor sediment transport hoeft niet tot een horizontale bodem te leiden.

Een mogelijke reden voor het ontstaan van een zeer flauwe / horizontale vooroever volgt uit de analyse van transportmechanismen in Appendix E en golfkarakteristieken (golfasymmetrie) in Paragraaf 3.8. Hieruit blijkt dat er weinig potentieel is voor golf-gedreven kustwaarts sedimenttransport (verlaagde golfasymmetrie), dat kustafwaarts transport mechanismen juist veelvuldig voor kunnen komen, en dat deze mechanismen afhankelijk zijn van de waterdiepte. Hoewel de exacte grootten van deze transporten moeilijk te beschrijven zijn, zelfs met zeer gedetailleerde en rekenintensieve modellen (cf. Kranenburg, 2013), laten de resultaten in Appendix E zien dat de kustafwaartse transport processen in voorkomen afnemen met toenemende waterdiepte, en dat kustwaartse transport processen door golfasymmetrie relatief afnemen in afnemende waterdiepte. Hierdoor ontstaat mogelijk een gradiënt in het netto transport met de waterdiepte, waarbij meer kustafwaarts transport plaatsvindt in ondieper water dan in dieper water. Hiermee worden de condities geschapen voor het ontwikkelen van een bijna-horizontaal plateau, met een steil onderwater talud aan het uiteinde van het plateau waar het sediment overheen valt. Immers, door een grote sprong in waterdiepte ontstaat een grote transportgradiënt, waardoor sedimentatie plaatsvindt aan de

bovenkant van het talud (m.a.w., uitbreiding van het plateau) en vrijwel geen transport op dieper water (m.a.w., verstelling van het talud).

Daarnaast speelt mogelijk de retourstroming een rol in het ontwikkelen van een flauw onderwater profiel. Omdat er weinig kustwaarts sedimenttransportpotentieel is met de optredende golfcondities en korreldiameter van het pilotstrand, kan een dergelijk profiel alleen in balans zijn als de retourstroming laag is. Gezien we kunnen verwachten dat de retourstroom toeneemt met de steilheid van het onderwaterprofiel (e.g., Longuet-Higgins, 1983) is het denkbaar dat gebieden met minder transport in de richting van de golven alleen in balans kunnen zijn als zij een flauwe vooroever hebben. Dit effect zal plaatsvinden op alle stranden met weinig potentieel voor sedimenttransport in kustwaartse richting, ook standen met getij. Het ontbreken van getij versterkt hierbij het effect van het ontbreken van sedimenttransportmechanismen in de richting van de kust wel (later beschreven in Paragraaf 4.6).

4.5 Helling strand

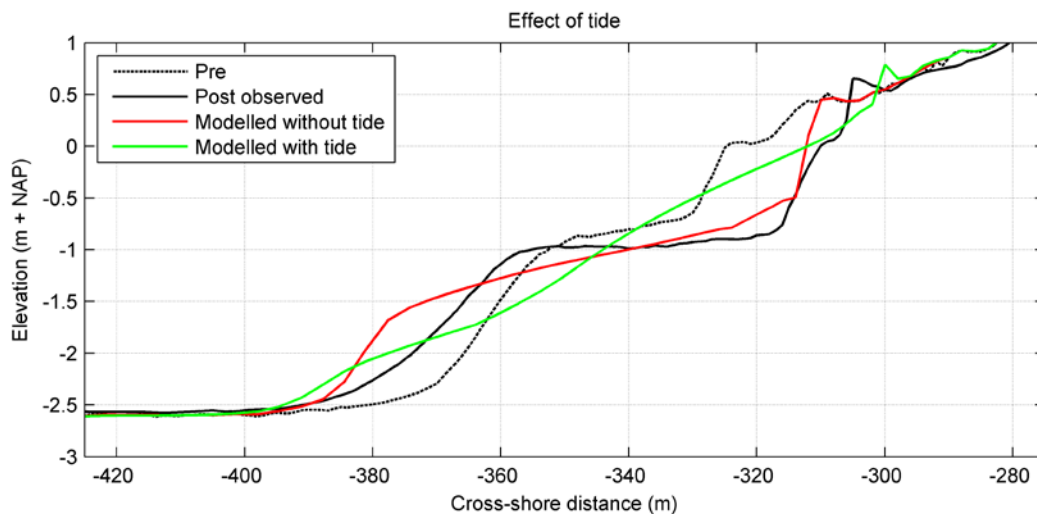
Het bestaan van een stabiel en steil strand bij de waterlijn is waarschijnlijk het gevolg van de aanwezigheid van grove sedimentfracties (zand, vaker schelpgruis) in het suppletiemateriaal of bodem van het meer. Door het ontbreken van sterke kustafwaartsgerichte transportprocessen tijdens laag-energetische condities blijft het grove materiaal op het strand, en fungeert als beschermlaag voor het fijne materiaal daaronder en -achter (afpleistering). Ook tijdens energetische condities wordt dit materiaal weinig in suspensie gebracht, en wordt door golven niet offshore van de waterlijn getransporteerd, en zelfs door middel van bodemtransport naar de kust toe vervoerd (zie ook Appendix E). In de swash zorgen swash asymmetrie en de relatief hoge doorlatendheid van het materiaal ervoor dat dit grove sediment op het strand wordt achtergelaten, en daarmee een swash bar opbouwt (cf., McCall, 2015). Daarnaast is initieel tijdens de waterlijn regressie een steil profiel bij de waterlijn mogelijk als gevolg van erosieprocessen en een gebrek aan getijbeweging. In dit geval wordt de helling van het talud bepaald door de afvoer van sediment op de vooroever en geotechnische processen voor aanvoer vanaf het droge strand (cf. Van Thiel de Vries, 2009).

4.6 Effect ontbreken getij

Een directe vergelijking tussen het sedimenttransportgedrag in het Markermeer en het gedrag aan een zee kust wordt vermoedelijk door de aanwezigheid van het getij: Een kustprofiel kan binnen een getijdecyclus (voor eenzelfde golfconditie) verschillende transport regimes ervaren waarvan het gemiddelde effect onbekend is. Het getij zorgt er ook voor dat de golfenergie wordt uitgesmeerd over de hoogte van het profiel.

Om een eerste analyse te maken van het effect van het getij op de profielontwikkeling, zijn twee simulaties uitgevoerd met een 1D XBeach model zoals beschreven in Paragraaf 4.2. In één simulatie is gerekend met de gemeten tijdserie van waterstanden (rode lijn in Figuur 4.9) en in de andere met een synthetisch getijsignaal met een amplitude van 1 m, een periode van 12.5 uur, en een gemiddelde van NAP - 0.25 m (groene lijn in Figuur 4.9).

De resultaten in Figuur 4.9 laten zien dat de aanwezigheid van het getij leidt tot een sterker achteruitgang van de waterlijn. Daarnaast zorgt het getij voor een steiler profiel op de locatie van het gemeten onderwaterplateau (dwarspositie tussen $x = -320$ m en $x = -360$ m). Deze resultaten ondersteunen eerdere bevindingen dat het ontbreken van getij kan leiden tot het ontwikkelen van een flauw vooroeverprofiel die sterk afwijkt van een Dean-profiel (cf. WL, 1988; Van der Weij, 2005) en ondersteunen de conclusies in Paragraaf 4.2.



Figuur 4.9 XBeach resultaten voor transect 12 tussen meting T3 (november 2014) en T11 (februari 2016) voor simulaties met modelinstellingen van Hoofdstuk 5, en gemeten waterstand (rood) en met synthetisch getij (groen).

4.7 Synthese conceptueel model profielvorm

Het pilotstrand Houtribdijk laat een karakteristieke morfologische ontwikkeling zien, die gekenmerkt wordt door het ontstaan van een bijna-horizontaal onderwaterplateau en een steil talud bij de waterlijn. De vorm van dit profiel wijkt af van profielen die voorspeld worden door conceptuele modellen voor de kust (e.g., Bruun, Dean). In dit hoofdstuk zijn in analogie met de conceptuele modellen voor de kust, concepten opgesteld die de generieke karakteristieken van het pilotstrand Houtribdijk kunnen verklaren.

Uit het conceptueel model dat in dit hoofdstuk beschreven staat volgt dat de vorm van het onderwaterplateau het gevolg is van de milde golfcondities in het Markermeer, in combinatie met de sterke correlatie tussen golfhoogte en waterstand. Door de interactie tussen de laag-energetische golven in het Markermeer en de bodem, en de relatief weinig asymmetrische golven, ontbreekt vaak kustwaartsgericht transportmechanismen voor fijn materiaal. In combinatie met een gradiënt in transport met de waterdiepte leidt dit tot een zeer flauw onderwaterprofiel. De hoogteligging van het plateau wordt bepaald door een vrij constant aangrijpingspunt van de golven op het plateau als gevolg van de sterke correlatie tussen golfhoogte en windopzet. Door koppeling tussen het golfdissipatieverloop op het plateau en de beschikbare golfenergie voor sediment transport bij de waterlijn, is er een terugkoppeling tussen de oriëntatie van de waterlijn en het plateau. Deze koppeling vervalt bij zeer brede plateaus (>50 m), waarbij de additionele breedte van het plateau niet bijdraagt aan het verlagen van de golfenergie bij de waterlijn. Bij smalle plateaus verliest de waterlijn door langs-, dwars, en diffusie-effecten sediment kwijt aan offshore en laterale sinks, waardoor de plateaubreedte toeneemt, waardoor verliezen weer afnemen. De geobserveerde minimale plateaubreedte van ~40 m op het pilotstrand lijkt hierbij overeen te komen met een doorbreken van deze terugkoppeling op het moment dat de breedte van het plateau niet verder bijdraagt aan het verlagen van de golfenergie bij de waterlijn.

Het steile talud bij de waterlijn ontstaat in eerste instantie tijdens condities van landwaartse regressie, maar wordt ook door selectief achterblijven, of aanvoer, van grof materiaal gestabiliseerd. In de swashzone zorgen swash asymmetrie en de relatief hoge

doorlatendheid van het grove materiaal ervoor dat dit sediment op het strand blijft, of wordt achtergelaten, en daarmee een steil profiel onderhoudt met morfologische kenmerken als swash bars.

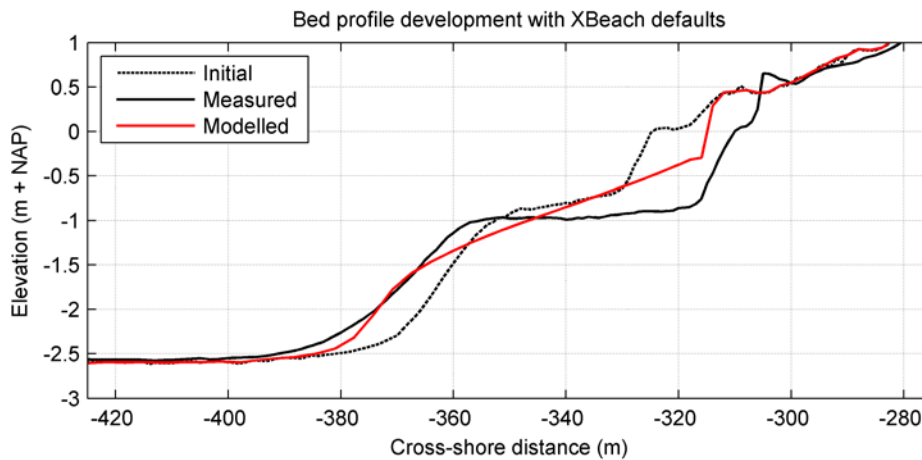
5 XBeach modelering

5.1 Inleiding

In Hoofdstuk 4 is beschreven dat het morfologische gedrag van het pilotstrand Houtribdijk afwijkt van het kenmerkende gedrag van stranden aan de kust, waar het getij en golfklimaat een glad “Dean” profiel creëren zonder onderwaterplateau. In Hoofdstuk 4 zijn ook conceptueel processen beschreven die het morfologische gedrag van het pilotstrand kunnen verklaren. Om dit conceptueel model te gebruiken om kwantitatieve voorspellingen te maken van het gedrag van stranden in merengebieden, is het nodig om deze concepten te introduceren in een numeriek model. Binnen het project Pilot Houtribdijk is gekozen om het model XBeach (Roelvink, et al., 2009) als drager van deze concepten te gebruiken.

Hoewel het XBeach model ontworpen is om op de korte tijdschaal het effect van stormen te simuleren, waren de initiële studies met het XBeach model, die uitgevoerd zijn vóór de additionele metingen (Hoofdstuk 2), gericht op het reproduceren van de middellange-termijn (maanden–jaren) ontwikkeling van het kustdwarsprofiel. In deze studies is gekozen om data van transect 12 (zie Figuur 1.1) te gebruiken voor de analyse van het model, omdat de langstransportgradiënt in dit profiel relatief klein is (rotatiepunt strand) en dus beter geschikt is voor een 1D dwarsprofiel modelaanpak dan andere delen van het pilotstrand. Deze eerste resultaten toonden aan dat het XBeach model, met standaardinstellingen voor de kust, niet in staat was om de middellange-termijn terugschijding van de waterlijn en de ontwikkeling van een onderwaterplateau goed te reproduceren (Figuur 5.1).

Om de nauwkeurigheid van XBeach voldoende te verhogen voor gebruik op stranden in merengebieden, zowel als korte-termijn storm-impact model in een veiligheidstoets, als model voor het middellange-termijngedrag tijdens de ontwerpfase, is het nodig om aan de hand van het conceptueel model te identificeren welke additionele fysische processen in het XBeach model opgenomen moeten worden. Om de voorspelkracht van het model in kaart te brengen moet het model daarna gevalideerd worden aan de hand van de hydro- en morfodynamische data van de aanvullende meetcampagnes (voor gebruik als storm-impact model in merengebieden), en moeten de toegevoegde fysische processen getoetst worden aan de hand van de gemeten middellange-termijnontwikkeling (voor gebruik als model tijdens de ontwerpfase). Deze stappen worden in Paragrafen 5.3–5.7 beschreven.



Figuur 5.1 Voorspelling van de middellange-termijn ontwikkeling (periode T3–T11, november 2014 – februari 2016) van transect 12 met gebruik van standaardinstellingen voor kustprofielen.

5.2 Korte beschrijving XBeach

XBeach (Roelvink, et al., 2009) is een numeriek model dat gebruik maakt van beschrijvingen van fysische relaties voor het voorspellen van de hydrodynamische condities op, en morfodynamiek van, stranden tijdens stormen. Met dit model kunnen kustprocessen (golven, stroming, sedimenttransport, duinafslag, en duinoverwash) onder stormomstandigheden berekend worden. Het model staat wereldwijd bekend als betrouwbaar model voor het voorspellen van duinafslag op zee-kusten en wordt veelvuldig in Nederland en het buitenland door private en publieke partijen gebruikt. Het model is echter weinig toegepast in merensystemen, waardoor hier weinig ervaring mee is.

Het XBeach model kan in verschillende modi gebruikt worden. Het model kan in 1D modus gebruik worden om processen in één dwarsprofiel te simuleren, of als gebiedsmodel in 2DH modus om zowel dwars- als langsveranderingen op te lossen. Daarnaast is de mogelijkheid om golven in verschillende modi op te lossen. In *stationaire* modus worden gemiddelde golfcondities beschreven die veranderen op de tijdschaal van tientallen minuten tot uren, vergelijkbaar met een berekening met het golfmodel SWAN. De stationaire modus wordt vaak gebruikt om simulaties uit te voeren op de middellange-tijdschaal. In *surf-beat* modus worden golven opgelost op de tijdschaal van de golfgroepen (~5–7 golven), waardoor het model in staat is om zogenaamde infragravity golven te simuleren. De surf-beat modus is nodig om het effect van stormen door te rekenen aan de kust, waarbij infragravity golven significant kunnen bijdragen aan de hydrodynamica en morfologische ontwikkeling. Ten slotte worden in *niet-hydrostatische* modus alle individuele golven afzonderlijk gesimuleerd (vergelijkbaar met een Boussinesq model, of het SWASH model). De niet-hydrostatische modus is zeer rekenintensief en wordt alleen gebruikt voor bijvoorbeeld steile grindkusten (McCall, 2015) waar het gedrag van individuele golven bij de waterlijn bepalend is voor het morfologische gedrag van de kust. In deze studie is uitsluitend met de stationaire en surf-beat modi gewerkt.

Het model is vrij verkrijgbaar (open-source code en programma beschikbaar op www.xbeach.org) en wordt sinds 2007 ontwikkeld door een consortium van Deltares, IHE Delft en TU Delft, in samenwerking met binnen- en buitenlandse partners.

5.3 Modelontwikkeling

In Hoofdstuk 4 zijn drie processen beschreven die het morfologisch gedrag van het pilotstrand kunnen beïnvloeden, die niet in default XBeach modellen worden meegenomen. Deze processen zijn:

- Swash-zone processen (e.g., swash asymmetrie en doorlatendheid) die ertoe leiden dat er een steile helling kan ontstaan bij de waterlijn (zie Paragraaf 4.5).
- Offshore sedimenttransport onder laag-energetisch condities als gevolg van het vortex-ripple effect, dat invloed heeft de helling van het plateau (zie Paragraaf 4.4 en Appendix E).
- Afname onshore sediment transport door golven door een reductie in de golfasymmetrie bij hoge Ursell waarden, welke ook invloed heeft de helling van het plateau (zie Paragraaf 4.4 en Paragraaf 3.8).

In de volgende paragrafen worden aanpassingen aan de modelcode beschreven die deze processen (parametrisch) beschrijven. De a anpassingen zijn opgenomen in de open-source code repository van het XBeach model, en zijn te vinden op https://svn.oss.deltares.nl/repos/xbeach/branches/HRD_version.

5.3.1 Swash-zone transporten

Het grove materiaal bij de waterlijn van het pilotstrand kan een stabiele steile helling (~1:10) vormen door een aantal processen in de swash zone, waaronder het infiltreren van water tijdens de golfloop, waardoor minder water beschikbaar is om sediment meerwaarts te transporteren in de terugstroming van de golf, en asymmetrie in turbulentie en drukgradiënten in de golfloop en terugloop waardoor sediment netto makkelijker omhoog getransporteerd kan worden. Om deze transporten expliciet uit te kunnen rekenen moet een gedetailleerd model van de hydrodynamica in de swash worden gebruikt (cf. McCall, 2015) en moeten formules worden ontwikkeld die op deze tijdschaal sheet flow, bodemtransport, en suspensietransport van zand in de swash kunnen voorspellen. Hoewel deze ontwikkelingen in de toekomst goed mogelijk zijn, is een dergelijke aanpak voor dit project onhaalbaar in termen van rekentijd en ontwikkeltijd.

In dit project is daarom gekozen om het sedimenttransport in de swash te beschrijven door middel van een gedragsmodel. Een gedragsmodel is een hybride vorm van een conceptueel model en een empirisch of proces-gebaseerd model, waarin een conceptueel model van het gedrag van het systeem gebruikt wordt om de voorspellingen van een empirisch of proces-gebaseerd model bij te sturen.

In het ontwikkelde swash-zone gedragsmodel in XBeach is een (tweedimensionale) extensie van het model van Roelvink en Costas (2017) waarin de geobserveerde helling van het strand wordt gebruikt om de berekende sedimenttransporten bij te sturen. Het sediment transport wordt standaard in XBeach berekend als:

$$S = u_{sed}hc$$

waarin S het sedimenttransport is, u_{sed} de diepte-gemiddelde sediment-advectiesnelheid is, h de waterdiepte is, en c de dieptegemiddelde sedimentconcentratie is (in geval van bodemtransport wordt de concentratie omgeschreven tot equivalente dieptegemiddelde concentratie).

In rekencellen waar de waterdiepte klein is en de swash zone start (in alle simulaties in deze studie vastgezet op 0,5 m), wordt door middel van het gedragsmodel een correctie uitgevoerd op de berekende transporten:

$$S_{swash} = S - f_{swash} |S| \left(\frac{\partial z_b}{\partial x} - \left[\frac{\partial z_b}{\partial x} \right]_{eq} \right)$$

waarin S_{swash} het gecorrigeerd transport is, f_{swash} een transportfactor is (in alle simulaties in deze studie vastgezet op 15), z_b de bodemhoogte is, x de kustdwarse afstand is (positief in de richting van de kust) en de laatste term tussen de haken een evenwichtshelling bij de waterlijn is. In alle simulaties in deze studie is de gewenste evenwichtshelling op 1:10 gesteld.

5.3.2 Sediment transport door vortex-ripple effect en golfasymmetrie

Een mogelijke verklaring voor de zeer flauwe helling van het onderwaterplateau is het gebrek aan onshore transportmechanismen van golven in combinatie met relatief veel kans op offshore sedimenttransport door golf-ribbelinteracties (vortex-ripple effect; Paragraaf 4.4). Om deze processen te simuleren is in XBeach een parameterisatie van het vortex-ripple effect ontwikkeld en een aangepaste schatting geïntroduceerd voor de golfasymmetrie bij hoge Ursellgetallen.

Het effect van golf-ribbelinteracties op sediment transport is als volgt. Bij passeren van een golftop over een ribbel ontstaat een wervel op de lijzijde van de ribbel. Sediment wordt opgewoeld tot grofweg drie keer de ribbel hoogte en blijft grotendeels gevangen in de wervel. Bij omkeer van de stroomrichting meerwaarts (onder de golftrog) wordt deze wervel over de ribbel heen verplaatst en afgeremd waardoor een gedeelte van het sediment wordt afgezet. Hetzelfde proces vindt ook in omgekeerde richting plaats. Door golf non-lineariteit zijn echter de stroomsnelheden onder de trog lager en de bijbehorende wervel is zodoende kleiner, waardoor het netto suspensietransport uiteindelijk kustafwaarts is gericht. Het mechanisme staat ook wel bekend onder de engelse term "vortex shedding". Voor bodemtransport geldt dit netto offshore transport niet. Door bodemtransport worden deeltjes langs de bodem naar de kruin van de ribbel verplaatst en storten vervolgens omlaag. Bij golf non-lineariteit wordt er door de hogere snelheden onder de golfkruin meer zand afgezet op de lee zijde van de ribbel waardoor het netto bodemtransport uiteindelijk kustwaarts gericht is.

Om dit vortex-ripple effect expliciet te simuleren is een hoge-resolutie 3D numeriek model nodig dat de turbulentie die ontstaat achter kleine bodemvormen onder invloed van golven kan simuleren, en daarbij ook het transport van sediment. Net als voor de swash-zone transporten is daarom een dergelijke aanpak niet haalbaar, en wordt het vortex-ripple effect parametrisch berekend in XBeach.

In het geparametriseerde model voor vortex-ripple transport wordt eerst onderscheid gemaakt tussen condities waarin bodemribbels kunnen bestaan (laag-energetisch) en condities waarin sheet-flow domineert. Dit gebeurt op basis van het non-dimensionale mobiliteitsgetal ψ :

$$\psi = \frac{2u_{rms}^2}{\left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right) g D_{50}}$$

waarin u_{rms} de representatieve orbitaalsnelheid bij de bodem is, ρ_s en ρ_s de dichtheid van respectievelijk zand en water zijn, g de gravitatieconstante is en D_{50} de mediane korrelgrootte is.

Het effect van niet-lineaire golven op sediment transport wordt standaard in XBeach benaderd door een deel van de golf orbitaalbeweging mee te nemen in de sediment-advectiesnelheid u_{sed} (Van Thiel de Vries, 2009):

$$u_{sed} = u + (f_{Sk}S - f_{As}A)u_{rms}$$

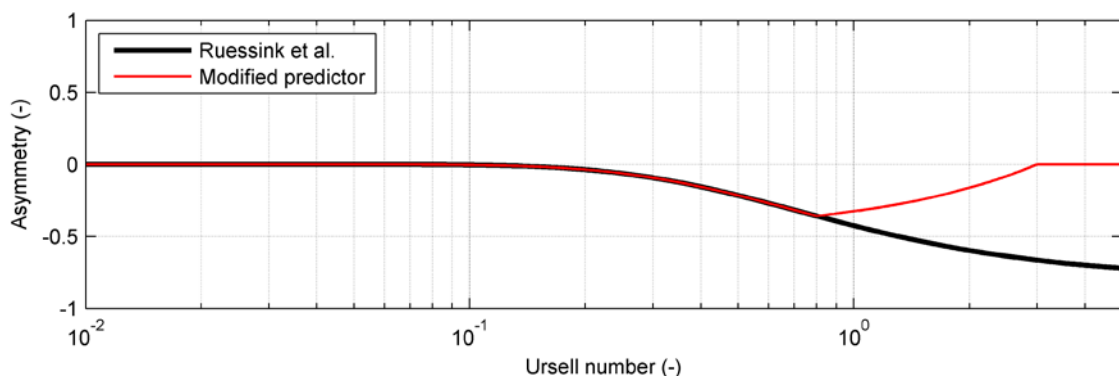
waarin u de diepte-gemiddelde Eulerse snelheid is, S en A de respectievelijk de (geschatte) golf skewness en asymmetrie zijn, en f_{Sk} en f_{As} calibratiefactoren zijn voor sedimenttransport door respectievelijk golf skewness en asymmetrie.

Het geparametriseerde vortex-ripple model vormt een uitbreiding van het standaard transportmodel voor niet-lineaire golven, door voor laag-energetische condities, gedefinieerd als condities met $\Psi \leq 190$ (Appendix E), een negatieve bijdrage van de golf orbitaalbeweging mee te nemen in de sediment advectiesnelheid. De advectiesnelheid voor bodemtransport wordt niet veranderd:

$$\begin{aligned} u_{sed,sus} &= u - f_{vr}(S - A)u_{rms} & \psi \leq 190 \\ u_{sed,sus} &= u + (f_{Sk}S - f_{As}A)u_{rms} & \psi \geq 300 \\ u_{sed,bed} &= u + (f_{Sk}S - f_{As}A)u_{rms} & \psi \geq 0 \end{aligned}$$

waarin $u_{sed,sus}$ en $u_{sed,bed}$ respectievelijk de advectiesnelheden voor suspentie- en bodemtransport zijn, en f_{vr} een calibratiefactor is voor vortex-ripple transport. Voor waarden van Ψ tussen 190 en 300 wordt de advectiesnelheden voor suspentietransport lineair geïnterpoleerd.

Golfasymmetrie en -skewness worden in XBeach geschat op basis van de parametrisatie van Ruessink et al. (2012). In Hoofdstuk 3 is echter beschreven dat op het pilotstrand Houtribdijk lagere waarden van golfasymmetrie zijn gevonden voor hoge Ursellgetallen dan uit de deze parametrisatie zouden volgen. Om deze overschatting van de golfasymmetrie te minimaliseren is een nieuwe functionaliteit aan het model toegevoegd om de geschatte golfasymmetrie op basis van de parametrisatie van Ruessink et al. boven een Ursellgetal van 0,8 lineair op te laten lopen (kleiner absolute waarde) en bij een Ursellgetal van 3,0 of hoger de waarde 0 te hebben (Figuur 5.2).



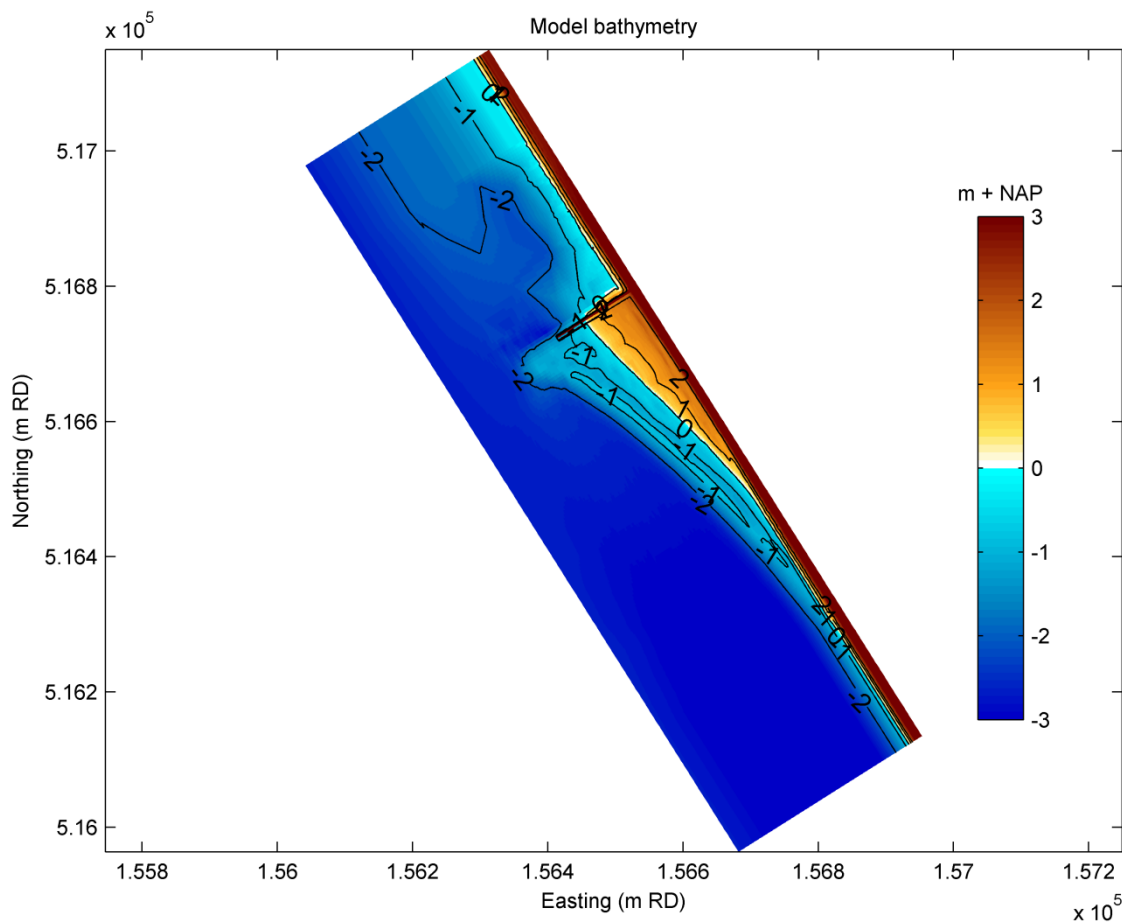
Figuur 5.2 Voorspelling van golfasymmetrie als functie van het Ursellgetal op basis van de parametrisatie van Ruessink et al. (zwart) en parametrisatie met aanpassing voor studie Houtribdijk (rood).

5.4 Modelopzet

Om het model, met en zonder de modelontwikkelingen beschreven in Paragraaf 5.3, te testen en valideren is een XBeach gebiedsmodel (2DH) opgezet van het pilotstrand (Figuur 5.3). Het XBeach model heeft een lengte van 1200 m in de langsrichting en 321 m in de dwarsrichting, met constante gridgrootte: 5 m in de langsrichting en 1 m in de dwarsrichting.

De initiële bodem van het model is een interpolatie van de morfologische metingen (T17) van het pilotstrand aan het begin van de aanvullende meetcampagnes (Paragraaf 3.6). Hoewel de morfologische metingen het gehele interessegebied bedekken, zijn aanvullende bodemgegevens gebruikt in andere delen van het modeldomein. Hierbij zijn AHN2 data gebruikt voor de hoogte en ligging van de Houtribdijk, en bodemgegevens van diepere delen van het Markermeer uit 2005 gebruikt voor de laterale en offshore randen van het model.

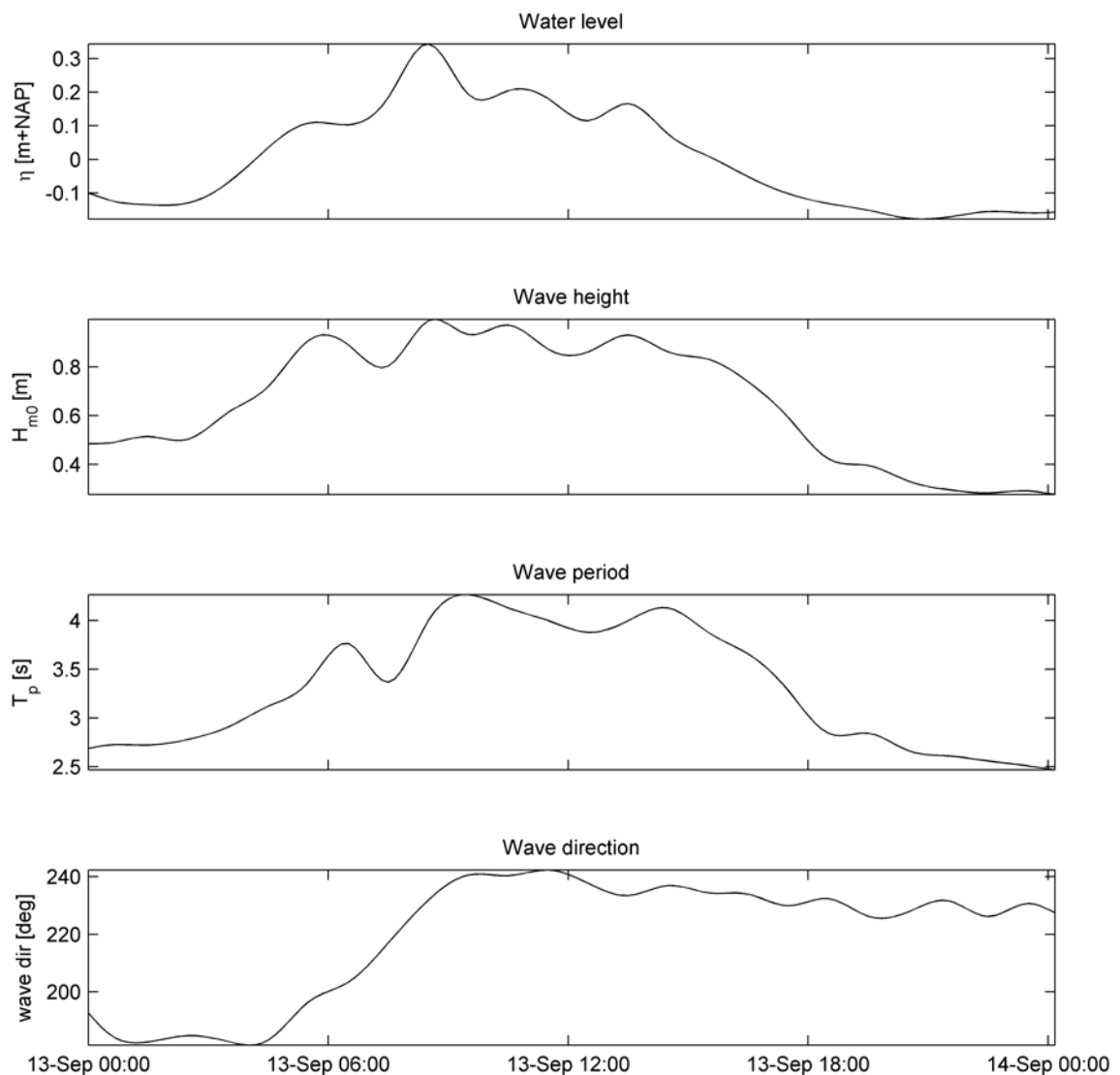
In het model worden de damwand en de Houtribdijk gesimuleerd als niet-erodeerbare objecten. Daarnaast is de bodemruwheid op de blootgestelde delen van de Houtribdijk lokaal verhoogd (Chezy waarde $30 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$) om de ruwheidselementen op de dijk na te bootsen en onrealistisch hoge snelheden aan de waterlijn te voorkomen.



Figuur 5.3 XBeach modeldomein en bodem.

Om de hydrodynamica van het model te valideren en de modelontwikkelingen te testen is het model gebruikt om de hoogenergetische golfcondities van 13 september 2017 te simuleren (zie ook Paragraaf 3.5). Hierbij moet worden opgemerkt dat het effect van de vortex-ripple interactie niet groot verwacht wordt te zijn, daar het mobiliteitsgetal tijdens grote delen van de storm te hoog zal zijn voor dit type transport. Omdat dit transportmechanisme wel effect kan hebben op de middellange-termijn morfologische ontwikkeling (Paragraaf 5.7), wordt de modelparametrisatie van dit mechanisme wel tijdens stormcondities getest.

In de simulatie van de storm van 13 september is het model geforceerd met tijdseries van gemeten waterstand en golfcondities bij de offshore ADV (Figuur 5.4). In het model is geen grootschalige circulatiestroming van het Markermeer of windveld opgelegd. Dit betekent dat het model alleen met golf-gedreven stromingen rekent.



Figuur 5.4 Randvoorwaarden XBeach model storm 13 september 2017.

Om de invloed van de aangepaste morfologische modelprocessen (Paragraaf 5.3) te onderzoeken worden drie simulaties uitgevoerd:

- Simulatie 1: simulatie zonder swash-zone transporten en aanpassing transport door vortex-ripple effect en golfasymmetrie.
- Simulatie 2: simulatie met swash-zone transporten, maar zonder aanpassing transport door vortex-ripple effect en golfasymmetrie.
- Simulatie 3: simulatie met swash-zone transporten en aanpassing transport door vortex-ripple effect en golfasymmetrie.

In alle simulaties is gerekend met de multidirectionele surf-beat golf modus, met een richtingsresolutie van 10 graden. Golfbreking wordt berekend met het Roelvink-Daly golfbrekkingsmodel, met gebruik van default waarden voor de golfbrekkingsparameters. Daarnaast is in de simulaties het Ruessink model, of het aangepaste Ruessink model (Simulatie 3) gebruikt om de golfvorm te schatten, en is een uniforme sedimentgrootte $D_{50} = 250 \mu\text{m}$ gebruikt. De simulaties zijn uitgevoerd met een morfologische versnellingsfactor van twee. Alle andere standaard modelparameters hebben default waarden en alle modelparameters voor de aangepaste morfologische modelprocessen zijn beschreven in Paragraaf 5.3.

5.5 Validatie hydrodynamica storm 13 september

Om het XBeach model te kunnen valideren voor gebruik als storm-impact model voor stranden in merengebieden is het nodig om de gesimuleerde hydrodynamica op het onderwaterplateau te vergelijken met geobserveerde waarden. In deze studie is de simulatie van de storm van 13 september 2017 gebruikt om de berekende golfhoogtes, en kustlangs- en kustdwarsstroming te valideren aan de hand van metingen op de locaties van de vier drukdozen en drie werkende ADVs (ADV VEC4626 en ADV VEC4624 op de hoofddraai en ADV 5044Nortek bij de waterlijn in de nevenraai; gedurende deze periode geeft ADV 3848Deltares op de nevenraai teveel ruis om gebruikt te worden voor modelvalidatie). In deze paragraaf worden de resultaten getoond van Simulatie 3 (simulatie met de aanpassingen van de morfologische processen). Hierbij moet worden opgemerkt dat de invloed van deze processen op de hydrodynamica minimaal zijn (uitsluitend een zwakke terugkoppeling via de morfodynamiek) en de hydrodynamische resultaten voor Simulaties 1 en 2 zeer weinig verschillen van de resultaten die hier gepresenteerd worden.

Figuur 5.5 toont een vergelijking tussen geobserveerde en gemodelleerde totale golfhoogten op de locaties van de drukdozen en ADVs op het plateau. Hierbij zijn de geobserveerde en gemodelleerde golfhoogten berekend in de frequentieband tussen 0.05–1.5 Hz (0.67–20 s), en bevatten zowel hoogfrequente windgolven, als laagfrequente golven. Hierbij moet worden opgemerkt dat de bijdrage van de laagfrequente golven (0.05–0.18 Hz) beperkt is tot ~5% van de totale golfenergie. De figuur laat zien dat het model het verloop van de gemeten golfhoogte in de tijd, evenals het verloop van de golfhoogte in de ruimte (verschil golfhoogte in hoofddraai tussen ADV VEC4626 en PT22) goed reproduceert.

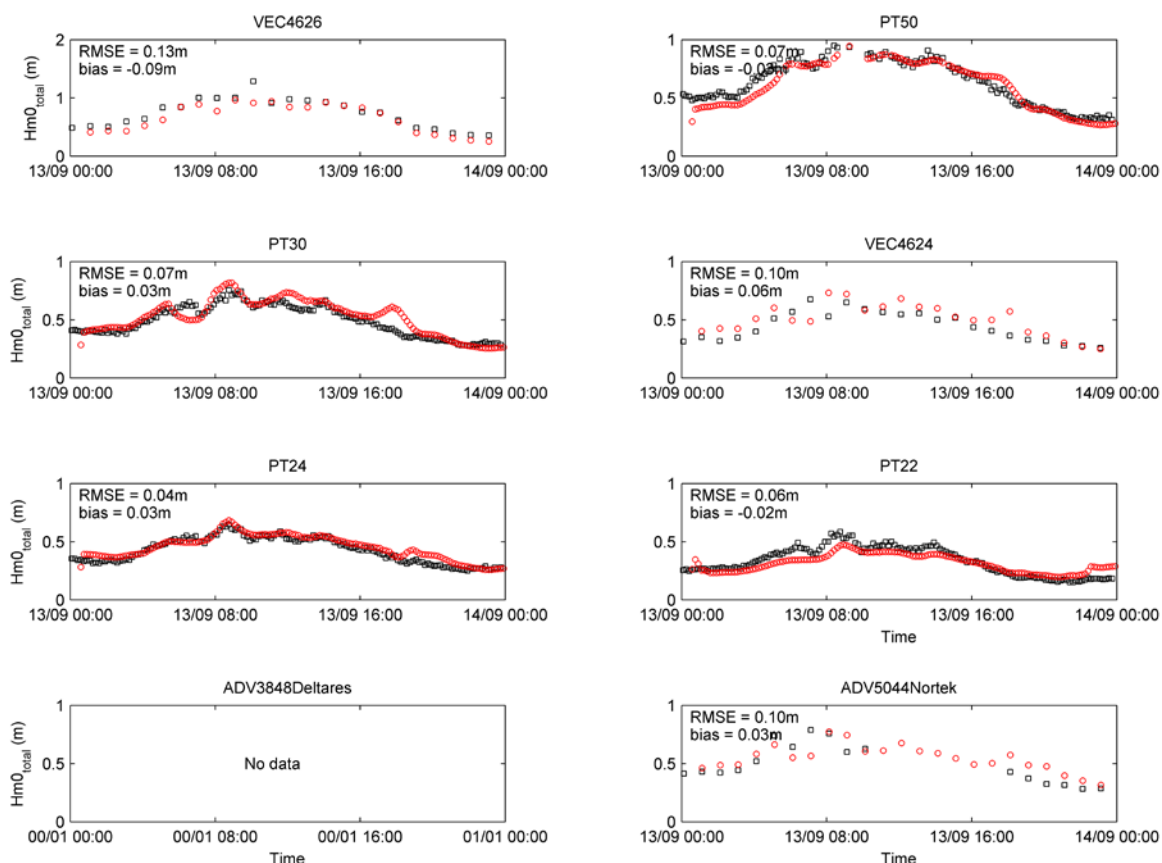
De kwantitatieve fout van de modelvoorspelling wordt als volgt uitgedrukt in de *RMSE* (root-mean square error) en *bias*:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)^2}$$

$$\text{bias} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)$$

waarin N het aantal (meet)datapunten is, X de gemeten waarde is, en Y de gesimuleerde waarde is. De bias is positief als het model een parameter overschat en negatief als de parameter onderschat wordt.

De waarden van de RMSE en bias voor de golfhoogte zijn voor ieder meetpunt in Figuur 5.5 weergegeven. De resultaten laten zien dat het model de golfhoogtes kwantitatief redelijk goed voorspelt met een fout van 4–13 cm (~4–13% van de maximale offshore golfhoogte). Een klein deel van de fout (~1%) kan worden verklaard door een stelselmatige onderschatting van het laagfrequent golfsignaal (0.05–0.18 Hz) in het XBeach model. Andere fouten volgen waarschijnlijk uit een onvolledige beschrijving van de bodem in de buurt van de meetinstrumenten (met name bij PT30 die vlak achter een bank op het plateau ligt), en de beperkingen van het gebruikte golfbrekingsmodel. De grootte van de fouten komt overeen met eerdere gepubliceerde waarden van modelvalidatie van XBeach met veldmetingen (e.g., Roelvink, et al., 2009; McCall, et al., 2014), en is voldoende klein om vertrouwen te hebben in het gebruik van het model voor het voorspellen van golftransformatie.



Figuur 5.5 Gemeten (zwart) en gesimuleerde (rood) golfhoogte op de locatie van de drukdozen en ADVs. De instrumenten staan op volgorde van offshore naar de waterlijn, voor hoofdraai en nevenraai. De RMSE en bias voor ieder modeluitvoerpunt staan in de panelen vermeld.

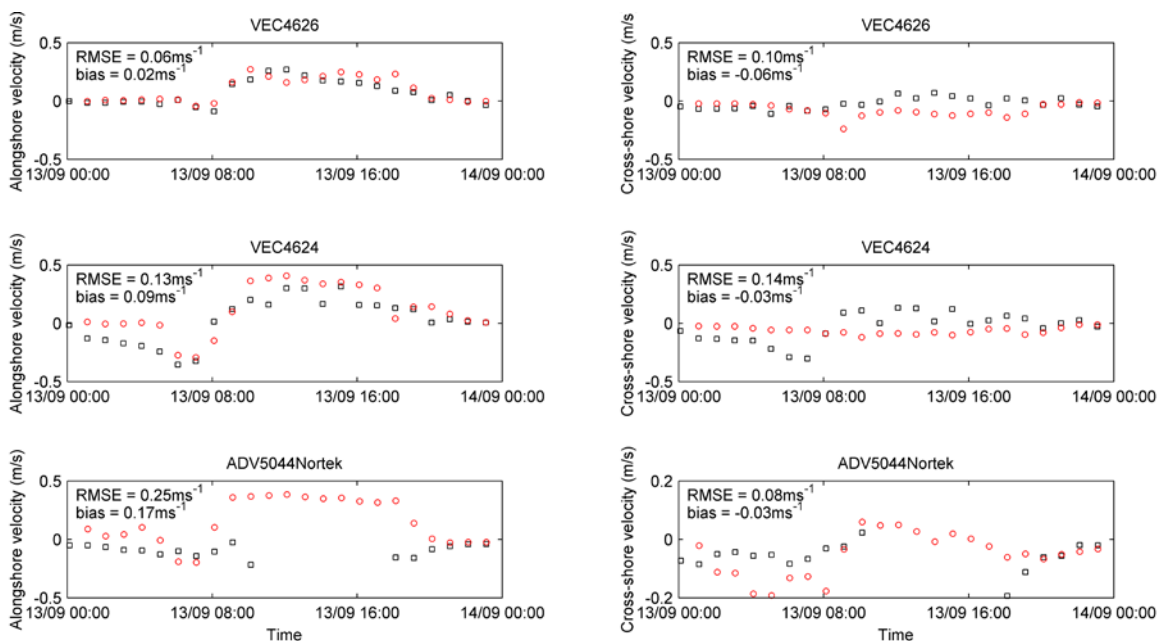
Figuur 5.6 toont de gemeten en gesimuleerde kustlangsstroming (linker kolom) en kustdwarsstroming (rechter kolom). Hierbij is de kustlangsstroming gedefinieerd als de stroming parallel aan de waterlijn van het pilotstrand (136 graden vanaf noord), met positieve waarden in de zuidoostelijke richting (naar Lelystad toe, van de damwand af). De kustdwarsstroming is gedefinieerd als de stroming haaks op de waterlijn van het pilotstrand, met positieve waarden in de noordoostelijke richting (naar de waterlijn toe). In de vergelijking

wordt per 12–15 minuten burst (zie ook Hoofdstuk 2) de gemeten stroming, gemiddeld over de burst, vergeleken met de gesimuleerde gemiddelde Eulerse stroming.

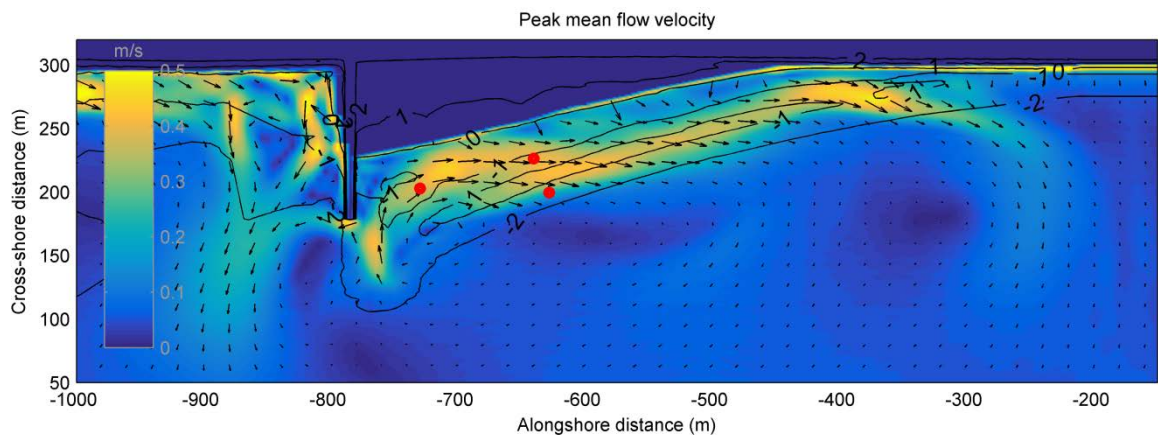
Figuur 5.6 laat zien dat de langsstroming in de hoofdraai (ADVs VEC4626 en VEC4624) goed voorspeld wordt, met een omslag in de richting van de langsstroming tussen 07:00 en 12:00. In de nevenraai (ADV 5044Nortek) wordt de langsstroming tot ongeveer 07:00 goed voorspeld. Hierna volgt een periode waarin het signaal van ADV 5044Nortek tijdelijk door teveel ruis is weggevallen, en de een goede overeenkomst tussen model en metingen na ongeveer 22:00. Door ontbreken van metingen is het niet duidelijk of in de periode tussen 07:00 en 22:00 het model structureel afwijkt van de werkelijke stroming. De kwantitatieve fout in de langsstroming op de hoofdraai is klein (0.06–0.13 m/s), en qua relatieve grootte vergelijkbaar met eerder gepubliceerde waarden van modelvalidatie van XBeach met veldmetingen (Roelvink, et al., 2009).

De stroming in de dwarsrichting wordt door het model redelijk goed voorspeld (RMSE 0.08–0.14 m/s), maar vertoont vooral op de hoofdraai ten opzichte van de metingen minder variatie in de tijd. De oorzaak van deze verschillen is niet bekend, maar lijkt op een verschil te duiden in de richting van de grootschalige stroming langs de ADVs in de hoofdraai (zie bijvoorbeeld Figuur 5.7), in plaats van een structurele over- of onderschatting van de golf-gedreven retourstroom.

In het algemeen kan worden gesteld dat het model de hydrodynamische condities op het plateau met redelijke nauwkeurigheid kan nabootsen. Daarnaast is de nauwkeurigheid van de voorspelling van de hydrodynamische condities in het model van het pilotstrand Houtribdijk vergelijkbaar met de nauwkeurigheid van het model voor kusttoepassingen.



Figuur 5.6 Gemeten (zwart) en gesimuleerde (rood) kustlangssnelheden (linker kolom) en kustdwarsnelheden (rechter kolom) op de locatie van de ADVs. De RMSE en bias voor ieder modeluitvoerpunt staan in de panelen vermeld.



Figuur 5.7 Gesimuleerde gemiddelde Eulerse snelheden tussen 11:00 en 12:00. De locaties van de drie ADVs zijn met rode cirkels aangeven.

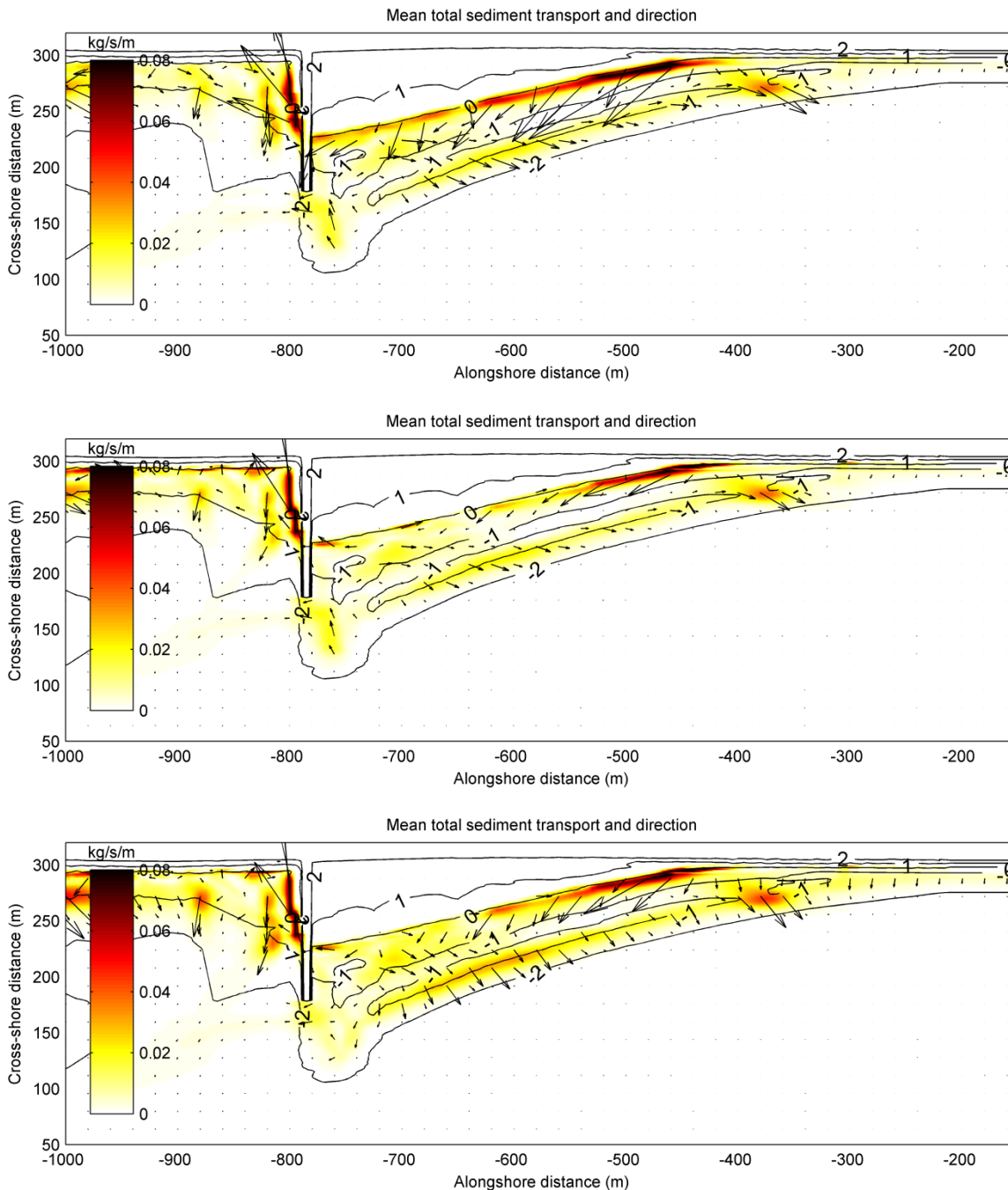
5.6 Vergelijking morfologie en effect modelontwikkelingen voor storm 13 september

Het model dat in Paragraaf 5.5 qua hydrodynamica is gevalideerd, wordt vervolgens gebruikt om de morfologische ontwikkeling tijdens de storm van 13 september na te bootsen. De modelresultaten worden vergeleken met metingen van de morfologische verandering tussen meting T17 (1 september 2017) en T18 (19 oktober 2017). Hierbij moet worden opgemerkt dat de geobserveerde morfologische verandering een periode van zeven weken beslaat, terwijl de gesimuleerde periode maar één dag (de grootste storm van de T17–T18 meetperiode) beslaat. Hierdoor is een kwantitatieve vergelijking met de gemeten morfologische ontwikkeling niet mogelijk. Wel kan een kwalitatieve beschouwing worden gemaakt van de gesimuleerde morfologische ontwikkeling van met name de positie van de waterlijn en de metingen. Naast een kwalitatieve vergelijking met de metingen is ook een vergelijking mogelijk tussen Simulaties 1–3 onderling om het effect van de modelontwikkelingen (swash-zone transporten en sediment transport door vortex-ripple effect en golfasymmetrie) te analyseren.

Figuur 5.8 toont de berekende totale (bodem- en suspentie-) sediment transport, gemiddeld over de hele simulatie van de storm van 13 september (netto transporten). Omdat er geen metingen zijn van sediment concentraties of sediment transport, kan geen vergelijking worden gemaakt met observaties. De figuur laat zien dat in alle drie simulaties, veel grootschalige transportpatronen onderling kwalitatief overeenkomen. In alle simulaties is er netto transport van zand dicht bij de waterlijn, met name aan de zuidoostelijke kop van het strand (langscoördinaat -400 – -450 m in Figuur 5.8) in de richting van de damwand en offshore. Transport op de buitenrand van het plateau (contourlijn NAP - 1 m) is offshore-gericht met een lokale verhoging van transport aan de zuidoostelijke kop van het strand (langscoördinaat -350 – -400 m in Figuur 5.8).

Tussen de simulaties in Figuur 5.8 zijn ook verschillen zichtbaar in de berekende transporten. In Simulatie 1 vindt aanzienlijk meer netto sediment transport plaats bij de waterlijn dan in Simulaties 2 en 3, vooral zichtbaar in de noordwestelijke helft van het strand (langscoördinaat -800 – -550 m in Figuur 5.8). Dit verschil in netto sedimenttransport is direct te relateren aan het toevoegen van swash-zone processen zoals beschreven in Paragraaf 5.3.1. Daarnaast is de richting van het netto offshore transport op de buitenrand van het plateau (contourlijn NAP - 1 m) in Simulatie 3 gedraaid ten opzichte van het transport in Simulaties 1 en 2. Deze

draaiing is het gevolg van het toevoegen van de vortex-ripple en golfasymmetrie effecten, die ertoe leiden dat meer offshore transport in de richting van de golven plaatsvindt.



Figuur 5.8 Gesimuleerde gemiddelde sediment transporten over de hele simulatieperiode voor Simulatie 1 (boven; geen modelaanpassingen), Simulatie 2 (midden; toevoeging swash-zone transportmodel), en Simulatie 3 (onder; toevoeging swash-zone transportmodel en vortex-ripple en golfasymmetrie effect).

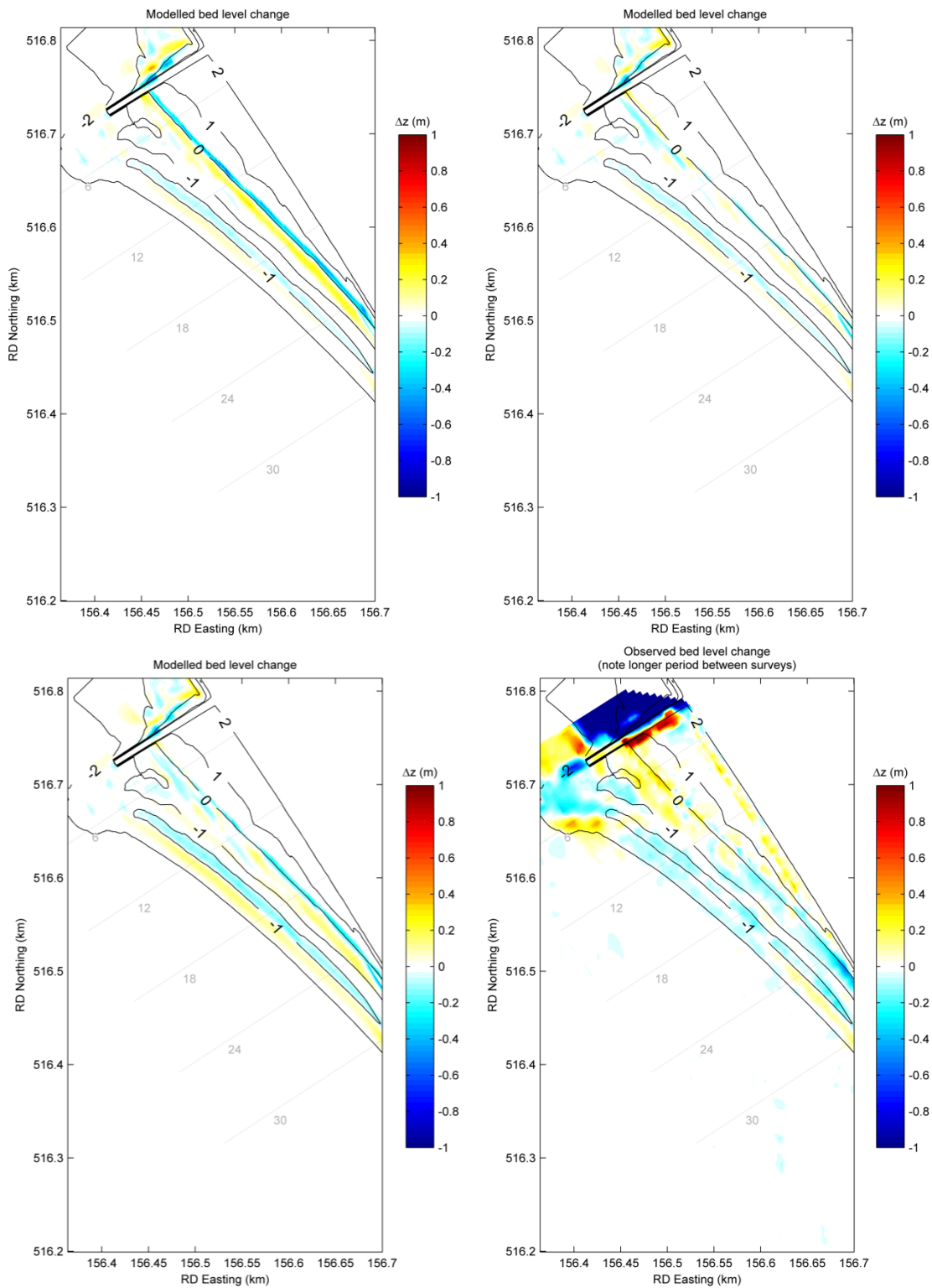
De gesimuleerde bodemverandering tijdens de storm van 13 september is in Figuur 5.9 weergegeven voor de drie simulaties. De patronen van erosie en sedimentatie op het plateau voor het strandtalud verschillen vooral (licht) in grootte tussen de simulaties, en weinig in de ruimtelijke verdeling van erosie en sedimentatie. Hierbij vindt in Simulatie 3 meer

bodemverandering plaats dan in Simulaties 1 en 2 door toegenomen golf-gedreven offshore sediment transport (zie ook Figuur 5.8). Hoewel de erosie van de buitenste bank op het plateau (aangegeven met contourlijn NAP - 1 m) ook in de metingen terug te zien is, wordt het algemene patroon van sedimentatie en erosie in de metingen niet goed benaderd door de XBeach simulaties van één dag.

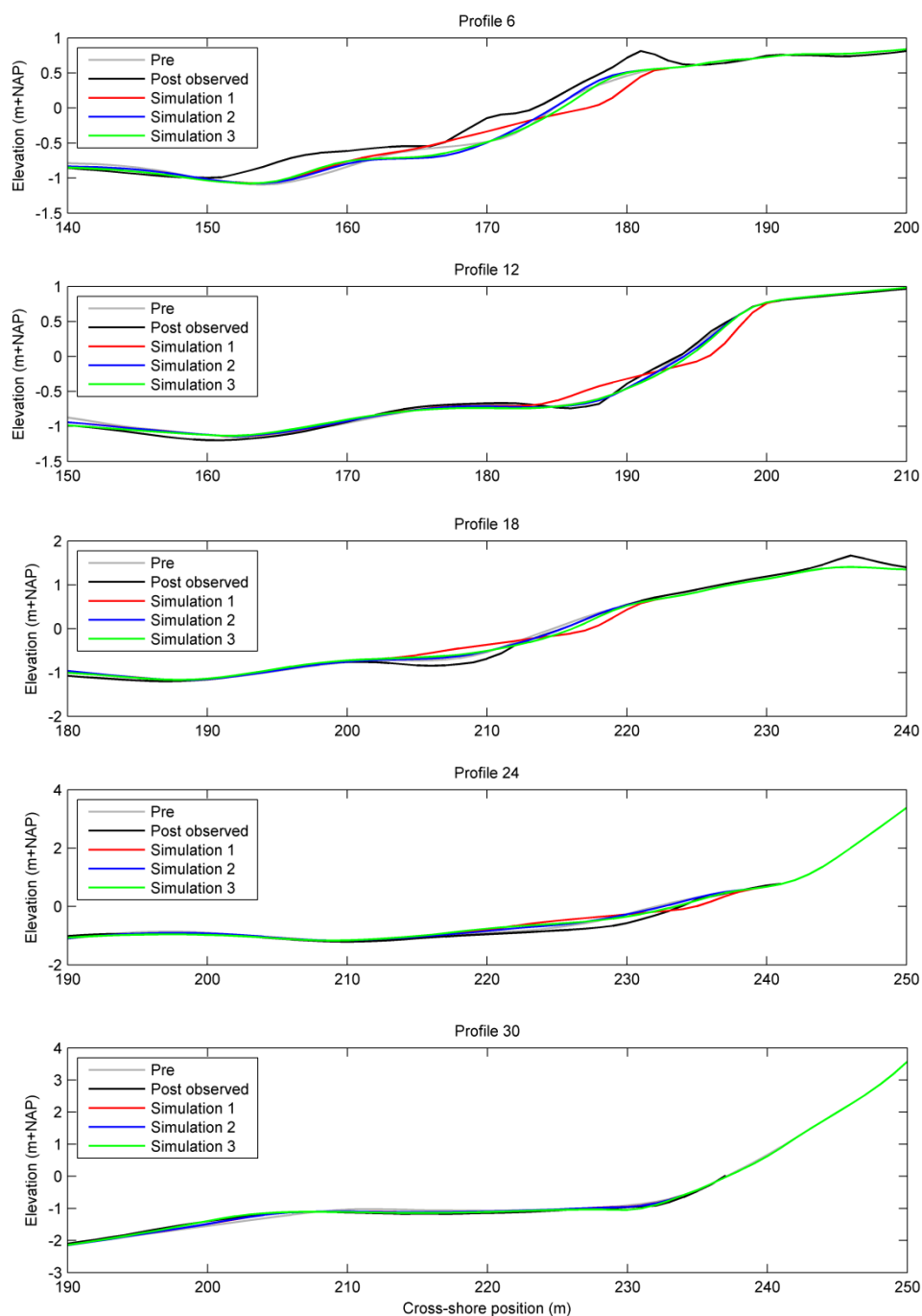
Figuur 5.9 laat een duidelijk verschil zien in de hoeveelheid erosie bij de waterlijn in Simulatie 1 ten opzichte van Simulaties 2 en 3. In Simulatie 1 vindt over de hele breedte van het strand ongeveer 0,5 m verticale erosie plaats, terwijl Simulaties 2 en 3 een gedifferentieerd beeld geven van lichte erosie en beperkte aanzanding boven de waterlijn aan de noordwestelijke zijde bij de damwand. Hoewel de gemeten bodemverandering tussen T17 en T18 (Figuur 5.9 rechtsonder) niet direct vergeleken kunnen worden met de gesimuleerde bodemveranderingen, laten de metingen geen sterke erosie van de waterlijn zien, en een patroon van aanzanding boven de waterlijn aan de noordwestelijke zijde van het strand. Deze aanzanding is groter dan de aanzanding in Simulaties 2 en 3.

De ontwikkeling bij de waterlijn wordt voor vijf dwarsprofielen weergegeven in Figuur 5.10. Deze figuur laat een duidelijk verschil zien in het gesimuleerde gedrag van de waterlijn als swash-zone processen gebruikt worden (Simulaties 2 en 3) ten opzichte van de standaard instellingen van het XBeach model (Simulatie 1). Het toepassen van de swash-zone parametrisatie zorgt in dit geval er niet alleen voor dat het strandprofiel boven de reguliere waterlijn (rondom NAP - 0,2 m) dichter bij de gemeten positie blijft, maar ook dat er minder sedimentatie plaatsvindt op diepere delen voor het strand tussen NAP - 0,5 m en NAP - 1,0 m, welke in lijn is met de metingen. Het voorkomen van sedimentatie op deze diepere delen volgt niet direct uit de swash-zone parametrisatie, daar de waterdiepte groter is dan de gestelde criterium voor de swash zone (0,5 m, zie Paragraaf 5.3.1), maar indirect uit het feit dat er minder sediment door het model aangevoerd wordt vanaf de waterlijn.

De morfologische simulaties van de storm van 13 september laten dat door het toevoegen van de swash-zone parametrisatie, het morfologisch gedrag bij de waterlijn sterk wordt verbeterd ten opzichte van de standaard instellingen van het XBeach model. Hoewel er geen kwantitatieve vergelijking met de morfologische metingen voor de periode tussen T17 en T18 kan worden gemaakt, komen de morfologische veranderingen in het XBeach model met swash-zone parametrisatie kwalitatief goed overeen met de observaties. Op basis van de simulatie van de storm van 13 september is weinig onderscheid gevonden tussen Simulatie 2 (zonder vortex-ripple en asymmetrie effecten) en Simulatie 3 (met vortex-ripple en asymmetrie effecten).



Figuur 5.9 Gesimuleerde bodemverandering tijdens de storm van 13 september in Simulatie 1 (links boven), Simulatie 2 (rechtsboven) en Simulatie 3 (linksonder). De gemeten bodemverandering tussen T17 en T18 is rechtsonder weergegeven. Vijf dwarsraaien (6,12,18,24,30) staan in grijs aangegeven en worden als dwarsprofiel in Figuur 5.10 weergegeven.



Figuur 5.10 Dwarsprofielen aan het eind van Simulaties 1 (rood), 2 (blauw) en 3 (groen), de gemeten profielen op T17 (grijs), en gemeten profielen op T18 (zwart). De locatie van de profielen is weergegeven in Figuur 5.9.

5.7 Vergelijking morfologie en effect modelontwikkelingen middellange termijn simulatie

Om de bruikbaarheid van het model in kaart te brengen voor het voorspellen van de middellange-termijnontwikkeling van een strand in een merengebied, moet naast de validatie van het model op basis van de storm van 13 september, ook worden onderzocht of de toegevoegde morfologische processen de nauwkeurigheid van het model verbeteren voor het simuleren van het morfodynamisch gedrag over langere perioden, met zowel laag-

energetische, als hoogenergetische condities (zie ook Figuur 5.1). Om dit te onderzoeken zijn er simulaties uitgevoerd voor een periode van 15 maanden tussen meting T3 en T11 (zie ook Paragraaf 4.2). Deze periode is gekozen omdat bekend is uit de morfologische metingen dat het plateau in deze periode dynamisch was.

5.7.1 Modelopzet

Het middellange-termijnontwikkeling XBeach model is opgezet in 1D dwarsprofiel modus. Het rekendomein heeft een totale lengte van 248 m, en een constante gridgrootte van 2 m. De bodem van het model is geïntialiseerd met de gemeten bodem op 19 november 2014 (T3). De gemeten tijdseries van golf- en waterstandscondities bij de offshore ADV tussen T3 en T11 (28 februari 2016) zijn als offshore randvoorwaarde opgelegd.

Om de invloed van de aangepaste morfologische modelprocessen (Paragraaf 5.3) te onderzoeken zijn er in lijn met de stormvalidatie simulaties drie simulaties uitgevoerd:

- Simulatie 1: simulatie zonder swash-zone transporten en aanpassing transport door vortex-ripple effect en golfasymmetrie.
- Simulatie 2: simulatie met swash-zone transporten, maar zonder aanpassing transport door vortex-ripple effect en golfasymmetrie.
- Simulatie 3: simulatie met swash-zone transporten en aanpassing transport door vortex-ripple effect en golfasymmetrie.

De golven zijn berekend in *stationaire* modus, met een intervaltijd tussen golfberekeningen van 3600 s. Golfbreking is berekend met het Baldock golfbrekkingsmodel, met gebruik van default waarden voor de golfbrekkingsparameters. In lijn met de stormvalidatie simulaties is het Ruessink model, of het aangepaste Ruessink model (Simulatie 3) gebruikt om de golfvorm te schatten. De simulaties zijn uitgevoerd met een morfologische versnellingsfactor van vier. Alle andere standaard modelparameters hebben default waarden en alle modelparameters voor de aangepaste morfologische modelprocessen zijn beschreven in Paragraaf 5.3.

5.7.2 Modelresultaten

De berekende bodemontwikkeling van Simulaties 1, 2 en 3 wordt in Figuur 5.11 samen de gemeten bodemontwikkeling tussen T3 en T11 weergegeven. De figuur laat zien dat XBeach met default instellingen (Simulatie 1) de ontwikkeling van het onderwaterplateau en regressie van de waterlijn niet goed kan reproduceren.

Door de swash-zone parametrisatie toe te voegen (Simulatie 2), wordt de bodemhelling bij de waterlijn beter gerepresenteerd dan in Simulatie 1, te zien in het feit dat de steile helling bij de waterlijn (ongeveer 1:10) tot dieper onder het meerpeil doorgaat (tot ongeveer NAP -0,7 m) dan in de eerste simulatie. De swash-zone parametrisatie leidt ook tot het ontstaan van een kleine swash-berm, iets dat op het pilotstrand regelmatig gebeurt tijdens energieke condities. De regressie van de waterlijn wordt in Simulatie 2 echter sterk onderschat ten opzichte van de metingen, en de regressie van de kustlijn is zelfs kleiner dan in Simulatie 1. Door toevoegen van de swash-zone parametrisatie neemt de helling van het berekende profiel op de locatie van het onderwaterplateau in de T11 meting (dwarspositie tussen $x = -310$ m en $x = -360$ m in Figuur 5.11) af ten opzichte van Simulatie 1, echter is de helling van het bodemprofiel steiler dan in de observaties.

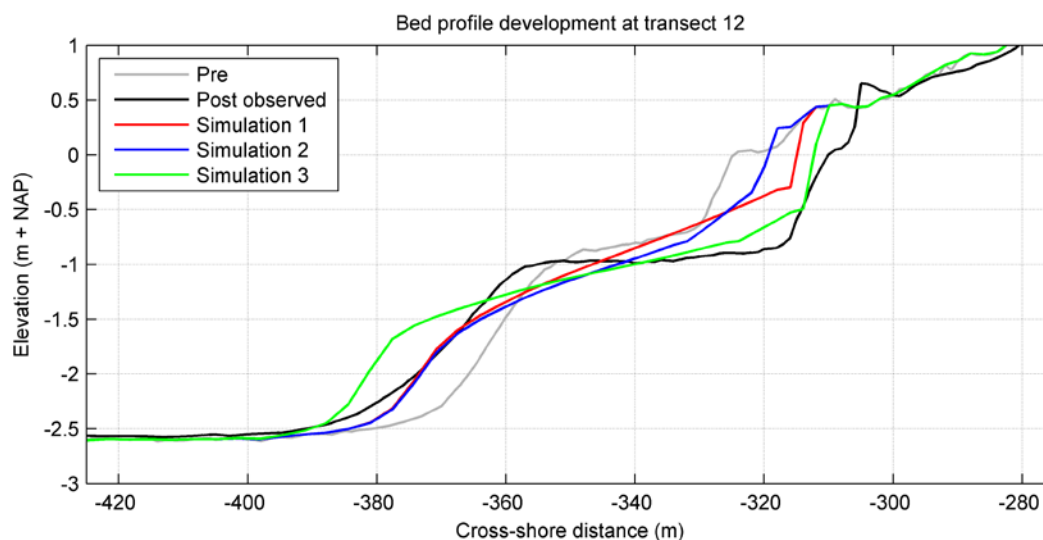
Het eindprofiel van Simulatie 3, waarin zowel de swash-zone parametrisatie is meegenomen en het effect van vortex-ripple interactie en aangepaste golfasymmetrie op sediment

transport, is beter in staat dan Simulatie 1 en 2 om de regressie van de waterlijn te reproduceren. In Simulatie 3 gaat de steile helling bij de waterlijn net als Simulatie 2 door tot onder het meerpeil, maar bereikt daar niet de diepte die in de metingen zichtbaar is. De helling van het bodemprofiel profiel op de locatie van het onderwaterplateau in de T11 meting neemt af ten opzichte van die in Simulaties 1 en 2, en komt beter in de buurt van de het gemeten vlakke plateau.

Een bekende kwantitatieve maat voor de nauwkeurigheid van morfologische voorspellingen is de Brier Skill Score (BSS):

$$BSS = 1 - \frac{(X - Y)^2}{(X - E)^2}$$

waarin X de gemeten waarde (eindprofiel meting) is, Y de gesimuleerde waarde (eindprofiel model) is, en E de initiële schatting is (beginprofiel meting). De BSS waarden voor de drie simulaties is hieronder in Tabel 5.1 gegeven. Hierbij is de BSS berekend tussen dwarspositie $x = -300$ m en $x = -400$ m in Figuur 5.11. De resultaten geven aan dat hoewel Simulatie 3 niet alle aspecten van de morfologische ontwikkeling goed worden berekend, dit model een "goede" voorspelkracht heeft volgens de definitie van Van Rijn et al. (2003). Hieruit blijkt dat bij het simuleren van de middellange-termijn morfologische ontwikkeling, waarin veel laag-energetische condities voorkomen, de bijdrage van met name vortex-ripple interacties substantieel kan zijn. Door het meenemen van dit geparametriseerd proces in het model, wordt de kwantitatieve voorspelkracht van het model aanzienlijk verbeterd.



Figuur 5.11 Dwarsprofielen aan het eind van Simulaties 1 (rood), 2 (blauw) en 3 (groen), de gemeten profielen op T3 (grijs), en gemeten profielen op T11 (zwart).

Tabel 5.1 Brier Skill Score van XBeach simulaties

Simulatie	BSS
1	0.62
2	0.38
3	0.76

Door de benodigde rekentijd is het niet mogelijk geweest om het model voor de periode tussen T3 en T11 (15 maanden, middellange termijn tijdschaal) in 2DH modus te simuleren.

Om te verifiëren dat het XBeach model met de ontwikkelde morfologische modules de geobserveerde morfologische ontwikkelingen in 2DH modus ook na kan bootsen, is een 2DH XBeach simulatie uitgevoerd voor de periode tussen T21 (6 januari 2018) en T22 (20 februari 2018), waarin zowel kalme, als energieke golfcondities voorkwamen. In deze periode is een duidelijk signaal zichtbaar in de gemeten morfologische ontwikkeling van het plateau en strand, ten gevolge van een kunstmatig ingreep (plaatselijke verlaging) in het plateau (cf. Rijkswaterstaat / EcoShape-Stuurgroep, 2018). In de simulatie zijn de geparameteriseerde swash, vortex-ripple interactie, en golfasymmetrie effecten gebruikt. De resultaten staan beschreven in Appendix G en laten zien dat het XBeach model in staat is de karakteristieke morfologische ontwikkeling van het pilotstrand in deze periode redelijk goed te kunnen simuleren.

5.8 Conclusies

Op basis van het conceptueel model van Hoofdstuk 4 zijn nieuwe morfologische modules ontwikkeld in het numerieke model XBeach. Deze modules beschrijven parametrisch de processen die horen bij swash-zone transporten, vortex-ripple interactie, en de afname in golfasymmetrie bij hoge Ursell getallen op het pilotstrand Houtribdijk. Een validatie van de hydrodynamica van het model tijdens de storm van 13 september 2017 toont aan dat het XBeach model in staat is om de hydrodynamica op het onderwaterplateau goed te reproduceren. Toevoeging van de morfologische modules verbetert kwalitatief de modelvoorspellingen van de bodemverandering tijdens de storm van 13 september, met name de bodemontwikkeling in de buurt van de waterlijn. Aan de hand van de gesimuleerde bodemverandering tijdens de storm van 13 september is de bijdrage van de vortex-ripple interactie, en de afname in golfasymmetrie bij hoge Ursell getallen op het pilotstrand Houtribdijk beperkt. Bij het simuleren van de middellange-termijn morfologische ontwikkeling, waarin veel laag-energetische condities voorkomen, is de bijdrage van met name vortex-ripple interacties substantieel, en het meenemen van dit geparametriseerd proces in het model verbetert de kwantitatieve voorspelkracht aanzienlijk. Hoewel het model de ontwikkeling van een volledig horizontaal onderwaterplateau niet kan simuleren, is de kwantitatieve maat voor de nauwkeurigheid van morfologische voorspelling (Brier Skill Score) is na toevoeging van de morfologische modules hoog (0.76).

6 Conclusies

In dit rapport wordt een additionele meetcampagne beschreven die in september, oktober en november 2017 uitgevoerd is op het pilotstrand Houtribdijk. Tijdens deze campagne zijn hydrodynamische processen en morfologische veranderingen gemeten. Waterstanden, golven en stroming zijn door een configuratie van vier drukdozen in een dwarsraai, en vier snelheidsmeters in een grid, gedurende 12 weken op hoge temporele resolutie gemeten op het onderwaterplateau van het pilotstrand. Gedurende de periode van de additionele metingen zijn golfhoogtes van $H_{m0} < 0,05$ m (kalm) tot $H_{m0} \sim 1,20$ m (storm), en stromingsnelheden van 0–0,5 m/s op het plateau gemeten.

Analyse van de optredende golfhoogtes op het plateau laat zien dat onder energieke condities, golfhoogtes op het plateau sterk correleren met het gemeten waterstandsopzet. Hierbij zijn de golfhoogtes gemaximaliseerd door diepte-geïnduceerde golfbreking, met een relatieve maximale verhouding tussen golfhoogte en waterdiepte van $H_{m0}/h = 0.80$ aan de rand van het plateau en circa $H_{m0}/h = 0.65$ dicht bij de waterlijn. Analyse van de golfvorm laat zien dat golven de gemeten golfasymmetrie op het plateau van het pilotstrand laag is, en veel kleiner dan voor vergelijkbare condities op zee-kusten. De stroomrichting op het plateau komt onder condities van wind uit het oosten (windrichting 0–170 graden; stroming richting Enkhuizen) en uit het westen (windrichting 225–360 graden; stroming richting Lelystad) overeen met de stroomrichting gemeten bij de offshore ADV. Voor wind uit het zuiden (windrichting 170–225 graden) ontstaat een verschil in stroomrichting, waarbij stroming bij de offshore ADV richting Lelystad staat, en op het plateau stroming richting Enkhuizen optreedt.

De inzichten die verkregen zijn vanuit de additionele meetcampagne zijn in combinatie met schematische model simulaties gebruikt om een conceptueel model te ontwikkelen voor de dwarsprofielvorm van het pilotstrand. Het conceptueel model veronderstelt dat de vorm van het onderwaterplateau het gevolg is van de (milde) golfcondities in het Markermeer, in combinatie met de sterke correlatie tussen golfhoogte en waterstand. Door de interactie tussen de laag-energetische golven in het Markermeer en de bodem (vortex-ripple effect), en de relatief weinig asymmetrische golven, ontbreekt vaak kustwaartsgericht transportmechanismen voor fijn materiaal. In combinatie met een gradiënt in transport met de waterdiepte leidt dit tot een zeer flauw onderwaterprofiel. De hoogteligging van het plateau wordt bepaald door een vrij constant aangrijpingspunt van de golven op het plateau als gevolg van de sterke correlatie tussen golfhoogte en windopzet. Door koppeling tussen het golfdissipatieverloop op het plateau en de beschikbare golfenergie voor sediment transport bij de waterlijn, is er een terugkoppeling tussen de oriëntatie van de waterlijn en het plateau. Deze koppeling vervalt bij zeer brede plateaus (>50 m), waarbij de additionele breedte van het plateau niet bijdraagt aan het verlagen van de golfenergie bij de waterlijn. De geobserveerde minimale plateaubreedte van ~40 m op het pilotstrand lijkt overeen te komen met een doorbreken van de terugkoppeling op het moment dat de breedte van het plateau niet verder bijdraagt aan het verlagen van de golfenergie bij de waterlijn.

In het conceptueel model wordt beschreven dat het stabiele steile talud ontstaat door het selectief achterblijven, of aanvoer, van grof materiaal. Dit grove materiaal kan in de swash-zone door swash asymmetrie en de relatief hoge doorlatendheid stabiel blijven op relatief steile hellingen. Het grove materiaal aan het oppervlak vormt mogelijk een beschermende laag voor het fijner sediment eronder.

Om de fysische processen die horen bij het conceptueel model te kunnen simuleren, zijn nieuwe morfologische modules ontwikkeld in het numerieke model XBeach. Deze modules beschrijven parametrisch de processen die horen bij swash-zone transporten, vortex-ripple interactie, en de afname in golfasymmetrie bij hoge Ursell getallen op het pilotstrand Houtribdijk. Een validatie van de hydrodynamica van het XBeach model tijdens een storm in de additionele meetcampagne toont aan dat het model in staat is de hydrodynamica op het onderwaterplateau goed te reproduceren. Toevoeging van de morfologische modules verbetert kwalitatief de modelvoorspellingen van de bodemverandering tijdens de gesimuleerde storm, met name de bodemontwikkeling in de buurt van de waterlijn. Het effect van het parametrisch simuleren van swash-zone processen is groot op de gesimuleerde bodemverandering tijdens de storm. De bijdrage van de vortex-ripple interactie en afname golfasymmetrie tijdens de storm is daarentegen beperkt.

Bij het simuleren van de middellange-termijn (15 maanden) morfologische ontwikkeling, waarin veel laag-energetische condities voorkomen, is de bijdrage van met name vortex-ripple interacties substantieel, en het meenemen van dit geparametriseerd proces in het model verbetert de kwantitatieve voorspelkracht aanzienlijk. Hoewel het model de ontwikkeling van een horizontaal onderwaterplateau in een middellange-termijn simulatie niet volledig kan nabootsen, is de kwantitatieve maat voor de nauwkeurigheid van morfologische voorspelling (Brier Skill Score) is na toevoeging van de morfologische modules hoog (0.76).

7 Referenties

Abreu, T., Silva, P.A., Sancho, F., Temperville, A., (2010). Analytical approximate wave form for asymmetric waves. *Coastal Engineering* 57, 656–667.

Davies, A., and Li, Z., 1997. Modelling sediment transport beneath regular symmetrical and asymmetrical waves above a plane bed. *Continental Shelf Research*, 17 (5) (1997), pp. 555–582

De Jong, D. & Maldegem D., 2010. *Invloed getij op oevers Grevelingen Meer*, Eindconcept. Rijkswaterstaat Dienst Zeeland, Auteurs: Dick de Jong & Dirk van Maldegem.

Deltares, 2017. *Plan additionele metingen Pilot Houtribdijk*. Memo 1209013-008-ZWS-0001.

Deltares, 2018. *Monitoring pilot Houtribdijk*. Tech. rapport 1209013-000-ZWS-0035.

Doering, J.C., Bowen, A.J., 1995. Parameterization of orbital velocity asymmetries of shoaling and breaking waves using bispectral analysis. *Coastal Engineering* 26, 15–33.

Komar, P. D., & Miller, M. C. (1975). On the comparison between the threshold of sediment motion under waves and unidirectional currents with a discussion of the practical evaluation of the threshold: Reply. *Journal of Sedimentary Research*, 45(1).

Kranenburg, W.M. (2013) Modeling sheet-flow sand transport under progressive surface waves. University of Twente, the Netherlands, PhD thesis.

Leeuwestein, W., Schoot, P. (1988): Evaluatie oevers - eindrapportage van het project oevererosie. Technische Universiteit Delft, Delft.

Longuet-Higgins, M.S., 1953. Mass transport in water waves. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A*, 245 (1953), pp. 535–581

Longuet-Higgins, M.S., 1983. Wave set-up, percolation and undertow in the surf zone. *Proc. R. Soc. London*, (A)390: 283-291.

Malarkey, J., & Davies, A. G. (2012). Free-stream velocity descriptions under waves with skewness and asymmetry. *Coastal Engineering*, 68, 78-95.

McCall, R., Masselink, G., Poate, T., Roelvink, J., Almeida, L., Davidson, M., Russell, P., 2014. Modelling storm hydrodynamics on gravel beaches with XBeach-G. *Coastal Engineering* 91, 231 – 250

McCall, R.T., 2015. Process-based modelling of storm impacts on gravel coasts. Plymouth University, UK, PhD thesis.

O'Donoghue, T., J. S. Doucette, J. J. van der Werf, and J. S. Ribberink (2006), The dimensions of sand ripples in full-scale oscillatory flows, *Coastal Engineering*, 53(12), 997-1012, doi:10.1016/j.coastaleng.2006.06.008.

- O'Donoghue, T. (2012). Laboratory experiments for wave-driven sand transport prediction. In *Jubilee Conference Proceedings, NCK-Days: Crossing borders in coastal research, Enschede, Nederland, 13-16 maart 2012. University of Twente.*
- Ribberink, J. S., Van der Werf, J. J., O'Donoghue, T., & Hassan, W. N. M. (2008). Sand motion induced by oscillatory flows: Sheet flow and vortex ripples. *Journal of Turbulence*, (9), N20.
- Riza (2003) Afname van de driehoeksmossel in het Markermeer. *RIZA rapport 2003-016, auteurs:Noordhuis & Houwing, Lelystad*
- Rijkswaterstaat (2005). Actueel dieptebestand IJsselmeergebied 2004, *Rijkswaterstaat dienst IJsselmeergebied, revisie 1.0 februari 2005.*
- Rijkswaterstaat / EcoShape-Stuurgroep, 2018. *Pilot voorlandoplossing Houtribdijk: Interim-rapportage februari 2018.* Tech. rapport C03041.003128.0100
- Roelvink, J. A., Reniers, A., van Dongeren, A. R., van Thiel de Vries, J. S. M., McCall, R., Lescinski, J., 2009. Modeling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering* 56, 1133–1152.
- Roelvink, D., and Susana Costas, 2017. Beach berms as an essential link between subaqueous and subaerial beach/dune profiles. *Geotemas (Madrid)* 17: 79-82.
- Ruessink, B. G., Miles, J. R., Feddersen, F., Guza, R. T., & Elgar, S. (2001). Modeling the alongshore current on barred beaches. *Journal of Geophysical Research*, 106(22), 451–463.
- Ruessink, B. G., Ramaekers, G., & Van Rijn, L. C. (2012). On the parameterization of the free-stream non-linear wave orbital motion in nearshore morphodynamic models. *Coastal Engineering*, 65, 56-63.
- RWS/EcoShape-stuurgroep Pilot Houtribdijk (2016). *Pilot voorlandoplossing Houtribdijk interim-rapportage maart 2016.* Technisch rapport 078856227:A - Definitief.
- RWS/EcoShape-stuurgroep Pilot Houtribdijk (2017). *Pilot voorlandoplossing Houtribdijk interim-rapportage februari 2017.* Technisch rapport 079132021:A - Definitief.
- Rijkswaterstaat (2002): Ecologische effecten van peilbeheer: een kennisoverzicht. RIZA rapport 2002.040, ISBN 9036954681,
- Sato, S., & Horikawa, K. (1986). Laboratory study on sand transport over ripples due to asymmetric oscillatory flows. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(20).
- Steetzel, H., Van der Groot, F., Fiselier, J., De Lange, M., Penning, E., Van Santen, R., Vuik, V., 2017. Building with Nature pilot sandy foreshore Houtribdijk.; Design and behaviour of a sandy dike defence in a lake system. *Proceedings of Coastal Dynamics 2017 Helsingør, Denmark.*
- Van der Weij, R. (2005) De Markermeerstranden onderzocht, kansen voor schelpenstranden. *Universiteit Twente, Twente.*

Van der Werf, J.J. (2006): Sand transport over rippled beds in oscillatory flow, *Ph.D. Thesis, University of Twente, The Netherlands*

Van Rooij, S.A.M., Groen, K.P. (1996): *De oeversgebieden van het Volkerak-Zoommeer. Ontwikkelingen van abiotisch milieu en vegetatie sinds 1987*. Flevobericht 393. Rijkswaterstaat, dir. IJsselmeergebied, Lelystad.

Van Rijn, L., Walstra, D., Grasmeyer, B., Sutherland, J., Pan, S., Sierra, J., 2003. The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based profile models. *Coastal Engineering* 47 (3), 295 – 327.

Van Thiel de Vries, J. S. M., 2009. Dune erosion during storm surges. *Phd, Delft University of Technology*.

Waterloopkundige Laboratorium | WL (1988) Hoogheemraadschap Noordhollands Noorderkwartier, stranden te Medemblik, Wervershoof en Andijk. *Verslag WL: H0799, Delft*.

Wiersma, A., Sommer, W., Doornenbal, P (2013): *Morphological effects of a sand nourishment on a shallow shoreface in the IJsselmeer, offshore Workum (Friesland)*. Deltares rapport 1203678-000-BGS-0004, Version 2.

Shields, A. (1936). Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik unter der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. *Preussische Versuchsanstalt fur Wasserbau and Schiffbau*, 26, 524–526.

A Plan additionele metingen Pilot Houtribdijk

Dit hoofdstuk is een kopie van het Deltares memorandum aan EcoShape: *Plan additionele metingen Pilot Houtribdijk*. Memo 1209013-008-ZWS-0001, juni 2017. Het memo is ter informatie toegevoegd aan dit rapport.

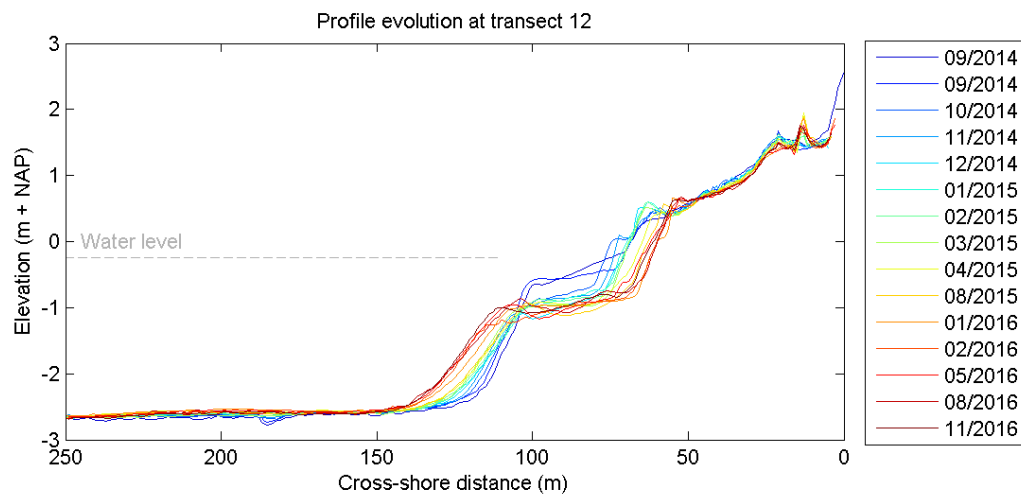
A.1 Inleiding

Voor een deel van de Houtribdijk is een pilot zandstrand gerealiseerd met als doel om kennis, en toets- en ontwerptools te ontwikkelen, die kunnen bijdragen aan het sneller en beter onderbouwd realiseren van zandige versterkingswerken voor met name de belastingomstandigheden voor de grotere meren (RWS/EcoShape, 2016). Als onderdeel van dit pilotproject heeft EcoShape verkennend onderzoek gedaan naar de morfologische ontwikkeling van het zandstrand bij de pilotstudie Houtribdijk op basis van doorlopende bathymetrie- en topografiemetingen. Analyse van deze resultaten laat een karakteristieke morfologische ontwikkeling zien van het pilotstrand, die gekenmerkt wordt door een brede en bijna-horizontaal (helling ~1:400 – 1:800) onderwaterplateau op een hoogte van NAP - 0.8–1.0 m, en een steil talud (helling ~1:10) bij de waterlijn die in de eerste 18 maanden na aanleg op grote delen van het pilotstrand landwaarts terug is geschreden, maar daarna redelijk stabiel is gebleven (zie Figuur 7.1). Deze morfologische ontwikkeling is anders dan een typische Dean-type profiel die karakteristiek is voor zee-kusten zoals de Nederlandse Noordzeekust.

De processen die leiden tot het ontwikkelen van deze karakteristieke morfologie bij het pilot zandstrand zijn niet goed bekend (Deltares, 2016). Hierdoor is het niet mogelijk om generieke conclusies te trekken uit het gedrag van het pilotstrand met betrekking tot volumeverlies, evenwichtsprofiel, e.d., voor gebruik bij andere zandige versterkingswerken in het merengebied. Ook is het tot nu toe niet mogelijk geweest om met behulp van numerieke modellen (e.g., XBeach) accuraat de morfodynamiek van het pilotstrand te simuleren, welke aangeeft dat de optredende processen op het pilotstrand niet goed in deze modellen gerepresenteerd worden. Het gebruik van numerieke modellen om voorspellingen te maken over de toekomstige ontwikkeling van het pilot zandstrand, en, naar waarschijnlijkheid, zandige versterkingen in merengebieden in het algemeen, is daardoor beperkt.

Ons begrip van het natuurlijk gedrag van het pilotstrand Houtribdijk kan verbeterd worden door specifieke additionele hydro- en morfodynamische veldmetingen uit te voeren, deze data te analyseren en deze kennis te gebruiken om conceptuele en numerieke modellen te verifiëren en valideren. Als onderdeel van het EcoShape consortium, is Deltares gevraagd een meetplan op te zetten voor additionele metingen op het pilotstrand.

Het doel van deze memo is om een meetplan te presenteren voor additionele procesmetingen op het pilotstrand Houtribdijk. Het plan beschrijft de dominante kennisvragen rondom de morfologische ontwikkeling van het pilotstrand (Hoofdstuk A.2), het doel van de metingen en uitgangspunten, inclusief mogelijke tijdsplanning (Hoofdstuk A.3), en welke procesmetingen bij kunnen dragen aan het beantwoorden van deze vragen (Hoofdstuk A.4). Het plan beschrijft daarnaast hoe de data verwerkt zullen worden (Hoofdstuk A.5), de tijdsplanning voor de metingen (Hoofdstuk A.6), de geschatte kosten (Hoofdstuk A.7), en mogelijke risico's (Hoofdstuk A.8).



Figuur 7.1 Ontwikkeling karakteristiek dwarsprofiel (Transect 12) van het pilotstrand in de tijd. De ontwikkeling van een plateau op ongeveer NAP - 1 m en steil (1:10) profiel bij de waterlijn is duidelijk zichtbaar.

A.2 Kennisvragen

Het dwarsprofiel in Figuur 7.1 laat een ontwikkeling van initieel erosie op het plateau en bij de waterlijn zien tot latere stabilisatie van de positie van de waterlijn, helling van het talud bij de waterlijn, de breedte en diepte van het onderwater plateau, en de positie van het talud naar dieper water. In een uitgebreid sedimentvolume analyse van het pilotstrand (RWS/EcoShape, 2017) is een vergelijkbare grootschalige ontwikkeling gevonden voor het hele pilotstrand, en is geconstateerd dat er in de periode sinds maart 2016 zeer weinig (verwaarloosbaar) sediment verdwenen is uit het gebied van het droge strand (zone A) en het gebied van het plateau en talud bij de waterlijn (zone B). Deze analyse ondersteunt de stelling dat het pilotstrand na een periode van morfologische verandering een (mogelijk tijdelijk) evenwichtsprofiel heeft bereikt.

Hoewel de bestaande meetdata wel kunnen aangeven dat het strand zich ontwikkeld heeft tot een evenwichtsprofiel, geven de data geen directe verklaring waarom het strand nu in evenwicht is. Omdat er daarnaast geen bestaande, geverifieerde conceptuele modellen (e.g., Bruun, Dean) zijn die het geobserveerde gedrag goed kunnen beschrijven, en de gemeten morfologische verandering slecht gereproduceerd wordt door numerieke modellen (e.g., XBeach; Deltares, 2016; RWS/EcoShape, 2017), is er onvoldoende informatie beschikbaar om het morfologisch gedrag van het pilotstrand te vertalen naar generieke conclusies voor zandige versterkingswerken in het merengebied.

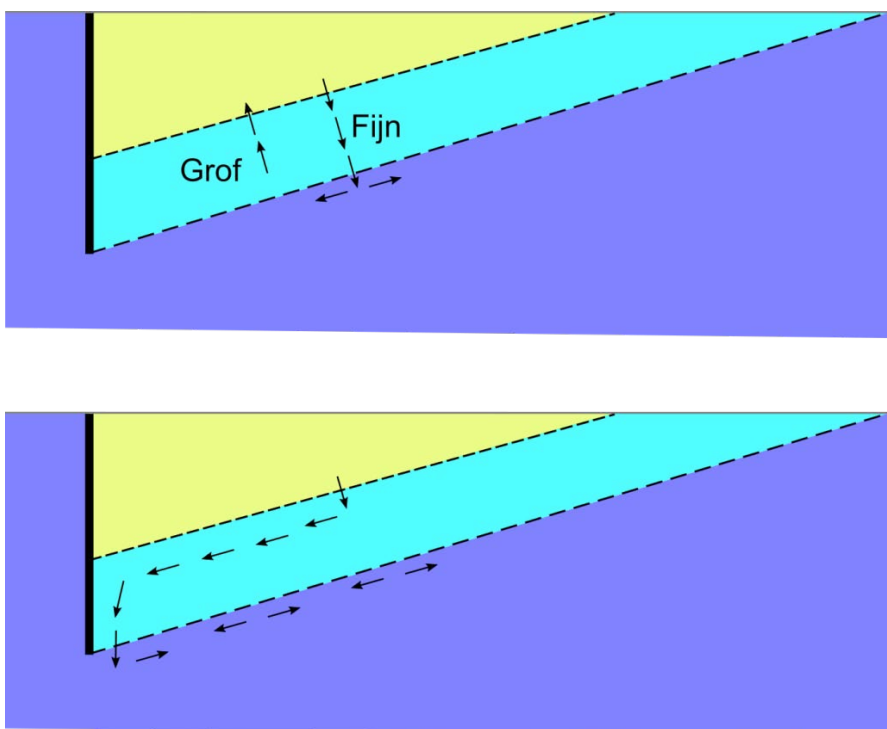
Om belangrijke vragen voor het ontwerp en beheer van zandige versterkingswerken in het merengebied te kunnen beantwoorden, zoals wat het evenwichtsprofiel is voor veranderende hydrodynamische condities (waterstanden, golfklimaat) en materialen (korrelgrootte, holoceen), en op welke tijdschaal de morfologische veranderingen zich voor kunnen doen, is het nodig om de volgende hoofdkennisvraag te beantwoorden:

Welke processen hebben geleid tot de morfologische ontwikkeling van het pilotstrand Houtribdijk, en welke processen zorgen ervoor dat het strand tegenwoordig in evenwicht is?

Om deze vraag te proberen te beantwoorden heeft Deltares (2016) een conceptueel model voorgesteld dat het gedrag tracht te verklaren aan de hand van sediment transport processen

in de kustwaartsrichting, waarbij een tekort aan kustwaartsgericht transport leidt tot een verdieping van het plateau, en het vergroven van het materiaal bij de waterlijn leidt tot een stabilisatie van het talud bij de waterlijn. Daarnaast is een conceptueel model voorgesteld (Ecoshape consortium, niet gepubliceerd) dat de morfologische ontwikkeling probeert te verklaren aan de hand van langtransportprocessen en de rol van de damwand bij het stabiliseren van het pilotstrand (zie **Error! Reference source not found.**).

Beide conceptuele modellen veronderstellen een belangrijk effect op de morfologische ontwikkeling door het ontbreken van getij en de sterke correlatie tussen golfhoogte en waterstandopzet, waardoor golven op een vergelijkbare relatieve waterdiepte bij het actieve deel van het strand aankomen.



Figuur 7.2 Schematisch dominante sediment transport richtingen in twee verschillende conceptuele modellen van het pilotstrand

Gegeven de natuurlijke variatie in het golfklimaat en de complexe stroming rondom de damwand, is het zeer waarschijnlijk dat de morfologische ontwikkeling zowel door langtransport, als dwarstransport bepaald is en dat onderdelen van beide conceptuele modellen gebruikt kunnen worden om het morfodynamisch gedrag van het pilotstrand te beschrijven.

Om de aannames van de conceptuele modellen echter te kunnen verifiëren, en om daarnaast numerieke modellen te kunnen ontwikkelen, kalibreren en valideren zodat deze ingezet kunnen worden om voorspellingen te maken op andere locaties, zijn kwantitatieve gegevens nodig over de processen die optreden in het (initieel) actieve deel van het pilotstrand. Specifiek zijn gegevens nodig om de volgende kennisvragen te kunnen beantwoorden:

- Kennisvraag 1: Wat zijn de optredende hydrodynamische condities op het plateau, bij de waterlijn, en bij het talud naar dieper water, en hoe verschillen deze van de gemeten condities op dieper water?

- Kennisvraag 2: Wat zijn de grootte en richting (kustlangs, kustdwars) van het sediment transport op het pilotstrand en vindt het transport plaats in de vorm van bodem- of suspensietransport?

Door Kennisvraag 1 en 2 te beantwoorden is het mogelijk om conceptuele en numerieke modellen te ontwikkelen en valideren. Om de hoofdvraag echter te beantwoorden en te komen tot generieke conclusies voor zandige versterkingswerken in het merengebied, moeten de volgende kennisvragen beantwoord worden:

- Kennisvraag 3: Hoe zijn de hydrodynamische en sediment transport processen op het plateau en bij de waterlijn veranderd tijdens de morfologische ontwikkeling van het pilotstrand?
- Kennisvraag 4: Welke processen hebben ertoe geleid dat er bij het pilotstrand een evenwichtsprofiel is ontstaan?

A.3 Doel en uitgangspunten metingen

In dit meetplan is het doel van de metingen om informatie te genereren om Kennisvraag 1 en 2 te kunnen beantwoorden. De metingen en aansluitende analyse dienen om beter inzicht te krijgen in de optredende processen op het pilotstrand, en vooral om conceptuele modellen te ontwikkelen en verifiëren. Het resultaat hiervan is beter inzicht in de representativiteit van de resultaten van het pilotstrand voor andere zandige versterkingswerken in het merengebied en betere kennis voor het ontwikkelen van richtlijnen voor ontwerp. Daarnaast kan met beter inzicht in de processen en met duidelijke conceptuele modellen, de meetdata gebruikt worden om numerieke modellen te kalibreren en valideren, en eventueel verder te ontwikkelen, daar waar de modellen essentiële fysische processen lijken missen.

Kennisvraag 3 en 4 kunnen niet als zodanig beantwoord worden door analyse van processen die optreden in de huidige configuratie van het pilotstrand. Om deze vragen te beantwoorden moeten experimenten worden uitgevoerd in het veld (in tegenstelling tot alleen metingen, en bijvoorbeeld door middel van een analyse van het effect van ingrepen in het natuurlijk systeem), door middel van laboratorium experimenten, of door middel van experimenten met gevalideerde numerieke modellen. Om deze experimenten goed op te zetten is kennis over de optredende processen (golven, stroming, potentiële sedimenttransportpaden) nodig. Om deze reden worden er in het huidige meetplan geen voorzieningen opgenomen voor het uitvoeren van experimenten (ingrepen) in het veld. Wel wordt rekening gehouden met de inzetbaarheid van instrumenten voor Kennisvraag 1 en 2 bij eventuele veldexperimenten voor het beantwoorden van Kennisvraag 3 en 4.

De veldinstrumentatie voor het beantwoorden van Kennisvraag 1 en 2 moet voldoende lang uitgezet worden om een brede scala aan hydrodynamische condities te kunnen meten, inclusief laag-energetische en hoogenergetische golfcondities en condities met verschillende windrichtingen (ZW en NW) en daarmee stroming bij het pilotstrand. Om redelijke zekerheid te hebben om deze condities te kunnen meten is een totale meetduur van 12–16 weken gewenst. In dit meetplan wordt voorzien dat, als in juni besloten wordt tot het uitvoeren van additionele metingen, deze metingen uitgevoerd zouden kunnen worden in de periode september–november 2017. Het meetplan moet voldoende flexibel zijn om, in geval van het ontbreken van karakteristieke condities, de meetduur verlengd kan worden met enkele weken.

Gegeven de relatief korte duur van de metingen op het pilotstrand, wordt aangenomen dat de kosten van het opstellen van permanente instrumentatie, inclusief aanschaf en programmeren van een datalogger, bekabeling en voeding, zoals gebruikt voor het bestaande ADV op dieper water, niet opwegen tegen het gebruik van zelf-loggende instrumenten met eigen stroomvoorziening. Daarbij komt dat zelf-loggende instrumenten verplaatst en gebruikt kunnen worden bij een eventueel veldexperiment (ingreep) en dat zelf-loggende instrumenten zonder kabels naar land minder zichtbaar zijn voor passanten, en daardoor minder kans op beschadiging (ongeluk en opzet) hebben.

Er wordt in dit meetplan ervan uitgegaan dat het niet mogelijk is om tijdens energetische condities fysiek aanwezig te zijn op het pilotstrand om eventuele incidentele metingen uit te voeren. Incidentele metingen zouden wel tijdens laag-energetische condities uitgevoerd kunnen worden.

A.4 Geplande metingen

De metingen worden aan de hand van Kennisvraag 1 en 2 voorgesteld.

A.4.1 Metingen bij Kennisvraag 1

Bij het ontwikkelen van een mogelijk conceptueel model voor het gedrag van het pilotstrand (Deltares, 2016) is gebruik gemaakt van schattingen van golf- en stromingscondities op het plateau gemaakt op basis van metingen op dieper water (data van huidige ADV Houtribdijk). Door gebruik te maken van deze schatting op basis van empirische relaties en lineaire golftheorie is het zeer mogelijk de sedimenttransportmechanismen onvoldoende nauwkeurig zijn bepaald. Mogelijke bronnen van fouten in het transport zijn verkeerde schattingen van de niet-lineariteit en de orbitaalbeweging van de golven op het plateau, en de verhouding tussen golf-gedreven en wind-gedreven stroming op het plateau. Daarnaast kon door gebrek aan hydrodynamische data op het plateau onvoldoende rekening gehouden worden met brekende golven (sterk niet-lineair en ruimtelijk verschillend) en het effect van gradiënten in golfhoogte en golf-gedreven stroming in de kustdwarsrichting op sediment transport op het plateau. Door gebrek aan gegevens over stroomsnelheden en golfhoogte- en stromingsgradiënten in de kustlangsrichting kunnen de fundamentele aannames van het tweede conceptueel model (Ecoshape consortium, niet gepubliceerd) niet worden geverifieerd.

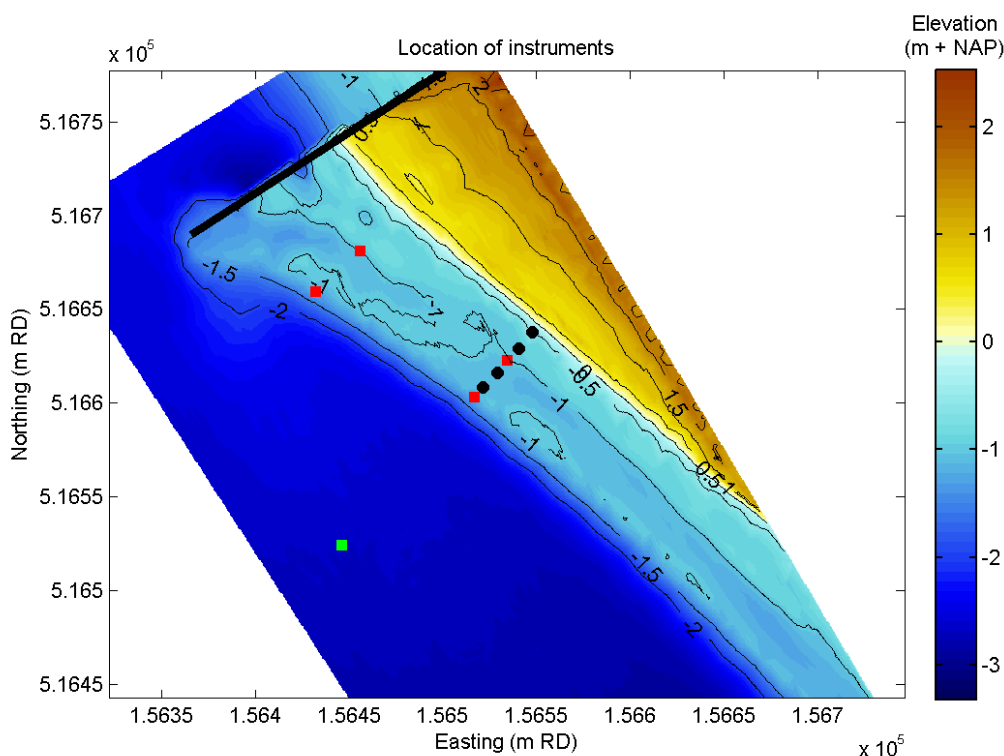
Om de aannames van de conceptuele modellen te verifiëren en om numerieke modellen te kunnen kalibreren en valideren zijn metingen nodig van golfcondities (hoogte, periode, richting) en stroming (snelheid, richting) op meerdere locaties op het onderwater gedeelte van het pilotstrand. Hierbij is met name voor het tweede conceptueel model nodig om ruimtelijke gradiënten te kunnen bepalen in golfcondities en stromingen. Voor beide conceptuele modellen is het nodig om informatie te hebben over stroomsnelheden en -richting aan de offshore rand van het plateau (overgang talud naar dieper water) om karakteristieke transportfluxen tussen het plateau en dieper water te bepalen.

Gegeven de bovengenoemde informatievraag wordt voorgesteld om vier ADV's (Nortek Vector) te plaatsen op, en aan de rand van, het plateau (zie Figuur 2.1 en Tabel 2.1). In deze gridopstelling kunnen op twee dwarsraaien dwarsgradiënten in stroming en golven gemeten worden en in twee langsvaarten de langsvaartgradiënten gemeten worden. Daarnaast wordt op twee locaties de stroming tussen het plateau en het dieper gelegen profiel gemeten.

De keuze voor Nortek Vector ADV's is gebaseerd op de mogelijkheden van het instrument om met hoge temporele resolutie (8 Hz) zowel waterdruk als stroming te kunnen meten, waardoor golven en stroming bepaald kunnen worden. Daarnaast kunnen deze instrumenten

zelf-loggend worden opgesteld en kunnen zij zelfstandig tot 8 weken lang meten op 8 Hz in bursts van 15 minuten per uur. Dit maakt het mogelijk om met één onderhoudsbeurt om batterijen en geheugenkaart te verwisselen, tot 16 weken lang door meten.

Om te bepalen of golven volledig uitbreken op het plateau, of hoe breed het plateau moet zijn om dit te bereiken, moet de golfhoogte (of golfspectrum) op meer dan twee locaties in een dwarsraai gemeten worden om het golfhoogteverloop over het plateau in kaart te brengen. Daar geen additionele stroomsnelheden gemeten hoeven te worden, kan dit bereikt worden door een dwarsraai van ADV's uit te breiden met vier zelf-loggende drukdozen (zie Figuur 2.1 en Tabel 2.1). Hiervoor kan gebruik worden gemaakt van Ocean Sensor Systems OSSI-010-003B/C drukdozen die via NIOZ en HKV/TU Delft beschikbaar gesteld kunnen worden voor dit project. De drukdozen kunnen 2–4 maanden continue op 4–8 Hz zelfstandig blijven meten. Deze informatie draagt bij aan het onderzoeken van de rol van het plateau in het dissiperen van golfenergie (op welke breedte van het plateau zijn de golven volledig gebroken).



Figuur 7.3 Voorgestelde locatie Nortek Vector ADV's (rode vierkantjes) en OSSI drukdozen (zwarte cirkels) in opstelling 1.B. De locatie van de ADV op dieper water in aangegeven met een groen vierkantje.

Tabel 7.1 Opstellingen instrumentatie Kennisvraag 1

Instrumenten	Verwachte resultaten
Vier Nortek Vector ADV's in gridopstelling	<ul style="list-style-type: none"> • Informatie over waterstand, stroomsnelheid (gemideld, en intra-golf) en -richting op vier locaties op, en aan de rand van, het plateau onder verschillende golf- en windbelasting, ter verificatie conceptuele modellen. • Golfspectra op vier locaties en aan de rand van, het plateau onder verschillende golf-

	<ul style="list-style-type: none"> en windbelasting voor verificatie conceptuele modellen. • Kwantitatieve stromings- en golfddata voor het kalibreren en valideren van numerieke modellen.
Vier OSSI drukmeters in dwarsopstelling	<ul style="list-style-type: none"> • Informatie over verandering golfspectra (1D) en waterstand in dwarsrichting ter verificatie van conceptuele modellen en validatie van numerieke modellen.

A.4.2 Metingen bij Kennisvraag 2

Bij het ontwikkelen van conceptuele modellen voor het morfodynamisch gedrag van het pilotstrand, en bij het toepassen van numerieke modellen om de morfodynamiek te simuleren, is het ontbreken van metingen van sediment transport op het pilotstrand een grote beperking geweest. Hierdoor is niet duidelijk onder welke condities sediment mobiel is, wat de dominante sediment transportpaden zijn als het sediment mobiel is, en hoe korrelgrootte verschillen deze transportpaden en -groottes beïnvloeden.

Het meten van sediment transport op het pilotstrand is complex door de afwisseling van relatief laag-energetische condities, waarin verwacht wordt dat het sediment niet in suspensie is, maar wanneer mogelijk wel bodemtransport plaatsvindt, en relatief hoogenergetische condities waarin verschillende korrelgrootte fracties wel laag in de waterkolom in suspensie kunnen zijn. Het gebruik van relatief bekende Eulerse meetinstrumenten op basis van optiek (OBS) en akoestiek (ABS, UVP) om sediment in suspensie wordt in de kalibratie gehinderd doordat het niet a priori bekend is welk sediment fractie, of welke fracties (inclusief mogelijk slib uit de omgeving), in suspensie zijn. Het gebruik van afzuigbuizen om de optische of akoestische instrumenten te kalibreren is logistiek niet haalbaar tijdens de energetische condities waarin sediment in suspensie zou kunnen zijn. Daarnaast geven deze instrumenten geen beeld van het optredende bodemtransport en is het zelf-loggend opstellen van deze instrumenten gepaard met enige beperkingen en additionele kosten (beschikbaarheid en ontwikkeling voeding en dataloggers). Het gebruik van sedimentvangen is logistiek wel mogelijk tijdens laag-energetische condities (toegang personeel voor plaatsing en meten gevangen sediment), maar niet mogelijk tijdens energetische condities wanneer verwacht wordt dat meer transport plaatsvindt.

Op basis van de gedetailleerde hydrodynamische metingen die voor Kennisvraag 1 worden uitgevoerd kan echter al een betere schatting worden gemaakt van transportgrootten en transportrichting tijdens variërende hydrodynamische condities dan op basis van volumebalansen en de simpele aannames in de conceptuele modellen (e.g., Deltares, 2016). In dit meetplan wordt daarom niet uitgegaan van additionele instrumenten voor het meten van sediment concentraties en -transport (*Tabel 7.2*). Tijdseries van de gemeten hydrodynamica kunnen geanalyseerd worden om de belangrijkste parameters voor sediment transport (achtergrondstroming, orbitaalbeweging, golf niet-lineariteit) te bepalen, en hiermee op basis van bestaande transportmodellen (e.g., Van Rijn 2007) schattingen te maken van lokale transportgrootten en -richting voor verschillende korrelgroottes. Daarnaast kunnen de Nortek ADVs gebruikt worden om de verandering van de bodemhoogte te meten ter plaatse van de instrumenten, waardoor momenten in de tijd (en behorende hydrodynamische condities) waaronder sediment mobiel is geïdentificeerd kunnen worden ter verificatie van de geschatte transportgrootten.

Om grootschalig transport te meten op basis van volumebalansen wordt voorgesteld om de reguliere bathymetrie en topografie metingen van SHORE uit te breiden rondom de periode waarin de hydrodynamische metingen worden uitgevoerd. Daarbij is het voorstel om een meting aan het begin (gelijktijdig bezoek opbouw), in het midden (gelijktijdig bezoek onderhoud ADV's), en aan het eind van de meetperiode (gelijktijdig bezoek verwijderen instrumenten) uit te voeren.

Tabel 7.2 Opstellingen instrumentatie Kennisvraag 2

Instrumenten	Verwachte resultaten
Instrumenten van Kennisvraag 1 in combinatie met sediment transport voorspellingen op basis van gemeten hydrodynamica en reguliere bathymetrie metingen van SHORE in de periode van instrumentatie.	<ul style="list-style-type: none"> • Kwalitatieve schattingen van sedimenttransportgrootte en -richting op vier locaties op, en aan de rand van, het plateau onder verschillende golf- en windbelasting, ter verificatie conceptuele modellen • Metingen van verandering van bodemhoogte ter plaatse van ADVs, waarmee een schatting gemaakt kan worden onder welke hydrodynamische condities het sediment mobiel is.

A.5 Verwerking meetdata

Dit meetplan voorziet drie grote werkzaamheden voor het verwerken van de meetdata, die hieronder beschreven worden.

A.5.1 Verwerking ruwe data en kwaliteitscontrole

De meetdata van de ADV's en drukdozen moet gecontroleerd worden op ruis; on-fysische pieken in de meetdata (spikes); langzame afwijking van de tijdsgemiddelde waarden (drift); interne consistentie en coherentie tussen de snelheidssignalen (voor de ADV's); controle richting van de snelheidscomponenten van de ADV data en verwerking tot oostwaarts, noordwaarts en verticale stroming; en coherentie tussen metingen van de onderlinge instrumenten (ADV's en drukdozen). Daarnaast moeten de meetdata worden overgezet in toegankelijke databestanden (NetCDF) met duidelijke metadata en verwerkingscripts. In deze fase van de analyse worden de meetdata (nog) niet verwerkt tot afgeleide producten zoals golfspectra, oppervlakteuitwijking (daar waar waterdruk gemeten wordt) en tijdsgemiddelde waarden van stroming. De verwerkte en gecontroleerde data van deze analysefase worden op de data repository van het pilot Houtribdijk beschikbaar gesteld. Het wordt voorzien dat deze taak door Deltares uitgevoerd zal worden.

A.5.2 Verwerking en analyse hydrodynamische data t.b.v. Kennisvraag 1

De verwerkte ruwe hydrodynamische data van de ADV's (tijdseries stroomsnelheid, richting, druk) en OSS1 drukdozen (tijdseries druk) zullen omgezet worden in voor deze studie relevante hydrodynamische parameters, met name waterstand, golfhoogte, -periode, -richting en -spectrum, evenals de geschatte dieptegemiddelde snelheid en stroomrichting, en snelheid bij de bodem. Voor deze analyse is continue meting van de atmosferische druk bij het pilotstrand (onderdeel van de bestaande metingen) essentieel. Daarnaast moeten de data uit de verschillende typen instrumenten (ADV's en drukdozen) op onderlinge consistentie gecontroleerd worden.

Op basis van de verwerkte waterstands-, golf-, en stromingsdata zullen de volgende subvragen beantwoord worden die bijdragen aan het beantwoorden van Kennisvraag 1:

- Wat zijn de karakteristieke stroombeelden met betrekking tot snelheid, richting, en ruimtelijke gradiënten op het plateau? Onder welke forcering (golven, wind, waterstand) ontstaan deze stroombeelden? En hoe verschilt de stroming op het plateau tijdens deze condities met de condities op dieper water (data bestaande offshore ADV).
- Wat is het golfklimaat op het plateau en hoe verschilt dit van het golfklimaat op dieper water? Zijn er ruimtelijke gradiënten in het golfklimaat? Treden er onder bepaalde condities ruimtelijke gradiënten op in de golfspectra (energieverlies, verschuiving piek energie en dominante golfperioden, etc.)? Onder welke omstandigheden vindt golfbreken plaats op het plateau, en als dit gebeurt, over welke dwarsafstand vindt breken plaats?

Het wordt voorzien dat deze taak door HKV geleid zal worden, met ondersteuning van Deltares en Arcadis.

A.5.3 Analyse hydrodynamische en morfologische data t.b.v. Kennisvraag 2

De geanalyseerde hydrodynamische data van de vorige paragraaf vormen, naast de continue metingen van de bodemligging ter plaatse van de ADV's en drie vlakdekkende bathymetrische metingen van SHORE, de belangrijkste informatie voor het beantwoorden van Kennisvraag 2. Op basis van deze metingen en het gebruik van empirische sedimenttransportrelaties worden de volgende subvragen beantwoord:

- Onder welke hydrodynamische condities is het sediment ter plaatse van de ADV's mobiel? Komt de grens voor mobiliteit overeen met empirische relaties hiervoor?
- Wat zijn bruto en netto transportgroottes en transportrichting op het plateau, geschat op basis van de verwerkte golf- en stromingsdata ter plaatse van de ADV's en empirische transportformules? Wat is de gevoeligheid hiervan voor korrelgrootteverschillen?
- Kan op basis van de geschatte transportgroottes bij de ADV's een transportbeeld voor het gehele plateau worden gecreëerd die leidt tot de geobserveerde bodemveranderingen in de metingen van SHORE gedurende de meetperiode?

Het wordt voorzien dat deze taak door Arcadis geleid zal worden, met ondersteuning van Deltares en HKV.

A.6 Tijdsplanning

De uitvoering van de additionele metingen zoals beschreven in deze memo is voorzien te gebeuren in de periode september–november 2017. Deze periode is gekozen om redelijk kans te hebben op afwisselende kalme en energieke golfcondities, en geeft voldoende tijd voor het einde van de pilot om het effect van morfologische ingrepen te testen na afsluiten van deze detailmetingen. De levertijd van 6–8 weken voor de ADV's beperkt de mogelijkheid om eerder dan september te starten met de metingen.

De periode van meten zal twee maal zes weken bedragen. Aan het eind van de eerste zes weken zullen de instrumenten van nieuwe batterijen worden voorzien, en zullen de meetdata afgelezen en gedupliceerd worden. Daarnaast zal een topo- en bathymetrische meting van het pilotstrand door SHORE worden uitgevoerd.

A.7 Kosten

De geschatte kosten van het uitvoeren van de metingen en kosten voor het verwerken van de data (zie paragraaf A.5) zijn in *Tabel 7.3* weergegeven. Hierbij is uitgegaan van de eigen bijdrage van alle EcoShape partners voor gemaakte uren. Daarnaast is uitgegaan van drie metingen van SHORE die buiten het bestaande contract vallen. Afhankelijk van het aantal reguliere metingen in 2017 kan één of meerdere SHORE metingen binnen het regulier contract worden opgenomen, waardoor de totale kosten voor de geplande metingen lager worden.

Tabel 7.3 Geschatte kosten

Instrument / activiteit	Aantal	Unit price	Totaal
Nortek Vector ADV (inclusief instellen instrument en testen, en frame opzetten)	4	€16.000	€64.000
OSSI drukdozen (inclusief instellen instrument en testen, en frame opzetten)	4	€1800	€7200
Topo- en bethymetrische meting van SHORE	3	€4000	€12000
Voorbereiding technische staff	-	-	€3.000
Opbouw, onderhoud (1x) en verwijderen instrumenten, inclusief huur schip	3	€4.000	€12.000
Verwerking ruwe data en kwaliteitscontrole	-	-	€7.000
Verwerking en analyse hydrodynamische data t.b.v. Kennisvraag 1	-	-	€13.500
Analyse hydrodynamische en morfologische data t.b.v. Kennisvraag 2	-	-	€13.500
Project management			€5.000
		subtotaal	€137.200
		onvoorzien (15%)	€20.500
		Totaal	€157.700

De kosten om de instrumenten aansluitend op de geplande 12–16 weken nog 6–8 weken door te laten meten zijn €3.500 voor tussentijds onderhoud (batterij, data download). De kosten voor een eventuele additionele topografische en bathymetrische survey van SHORE is hierbij niet inbegrepen.

A.8 Risico's

Om een succesvol te zijn, moeten de geplande metingen en aansluitende analyse een antwoord geven op Kennisvraag en een substantieel bijdrage leveren aan het beantwoorden van Kennisvraag 2. Door intrinsieke onzekerheden (het weer), meetfouten, en analysefouten is het mogelijk dat deze doelstelling niet bereikt wordt. De belangrijkste risico's voor een succesvol verloop van dit project zijn hieronder in *Tabel 7.4* beschreven, inclusief mogelijke maatregelen om de risico's te verkleinen.

Tabel 7.4 Risico's

Risico	Kans	Maatregel
Weinig variatie in hydrodynamische condities tijdens de meetperiode van 2x6 weken	Middel	<ul style="list-style-type: none"> Meetduur uitbreiden naar 2x8 weken In extreme gevallen metingen uitbreiden naar 3x6 weken (1x

		<p>onderhoud extra). Kosten additioneel onderhoud opnemen in post onvoorzien.</p>
Instrumenten kunnen door slecht weer niet geplaatst of onderhouden worden	Middel	<ul style="list-style-type: none"> • Flexibiliteit in startdatum (en einddatum) aanhouden binnen periode van ca. 2 weken • Onderhoudsperiode plannen na periode van 6 weken; bij slecht weer kunnen instrumenten tot 8 weken doormeten voordat zij ophouden met data inwinnen.
Instrument meet niet	Klein	<ul style="list-style-type: none"> • Instrumenten afzonderlijk testen voor plaatsing op het pilotstrand. • Protocol opzetten met technische staff voor uitzetten instrumenten. • Controle op meetdata na 6 weken.
Instrumenten worden verplaatst, vernield of gestolen	Klein	<ul style="list-style-type: none"> • Instrumenten zoveel mogelijk uit zicht (onderwater) plaatsen. • Wekelijkse controles op beelden camera's om verplaatsing / vernieling instrumenten vroegtijdig te identificeren • Kosten voor additioneel onderhoud opnemen in post onvoorzien • Kosten verlies instrumenten verzekeren
Instrumenten worden laat geleverd	Klein	<ul style="list-style-type: none"> • Flexibiliteit in startdatum (en einddatum) aanhouden binnen periode van ca. 2 weken • Goede afspraken maken met leverancier zodat tijdige aanpassing meetschema mogelijk is.
Meetdata zijn ongeschikt om vragen te beantwoorden	Zeer klein	<ul style="list-style-type: none"> • Instrumenten testen voor plaatsing op het pilotstrand. • Controle op meetdata na 6 weken.

A.9 Referenties

Deltares (2016). Sedimentvormen en gedrag in het Markermeer. Memo 1209013-008-ZWS-0001.

RWS/EcoShape-stuurgroep Pilot Houtribdijk (2016). Pilot voorlandoplossing Houtribdijk interim-rapportage maart 2016. Technisch rapport 078856227:A - Definitief.

RWS/EcoShape-stuurgroep Pilot Houtribdijk (2017). Pilot voorlandoplossing Houtribdijk interim-rapportage februari 2016. Technisch rapport 079132021:A - Definitief.

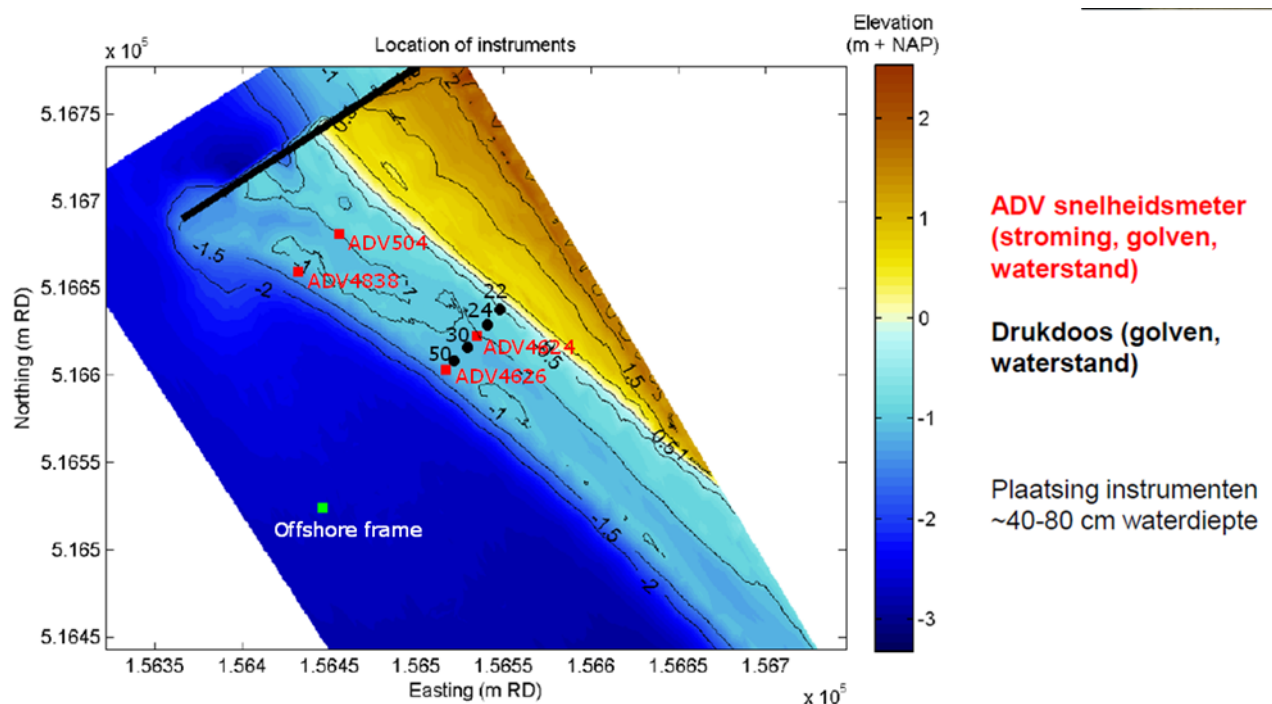
B Analyse stroming en golven (HKV)

Dit hoofdstuk is een kopie van het HKV memorandum aan Deltares: *Toelevering t.b.v. rapportage hydrodynamica detailmetingen pilot Houtribdijk*. Memo PR2797.20, juni 2018. Het memo is ter informatie toegevoegd aan dit rapport.

B.1 Inleiding

Dit document bevat figuren voor gebruik in de rapportage over de detailmetingen op het plateau van het profiel van de pilot met een voorlandoplossing langs de Houtribdijk. De focus ligt op de periode in september 2017, omdat in december 2017 diverse meetinstrumenten niet (goed) hebben gefunctioneerd.

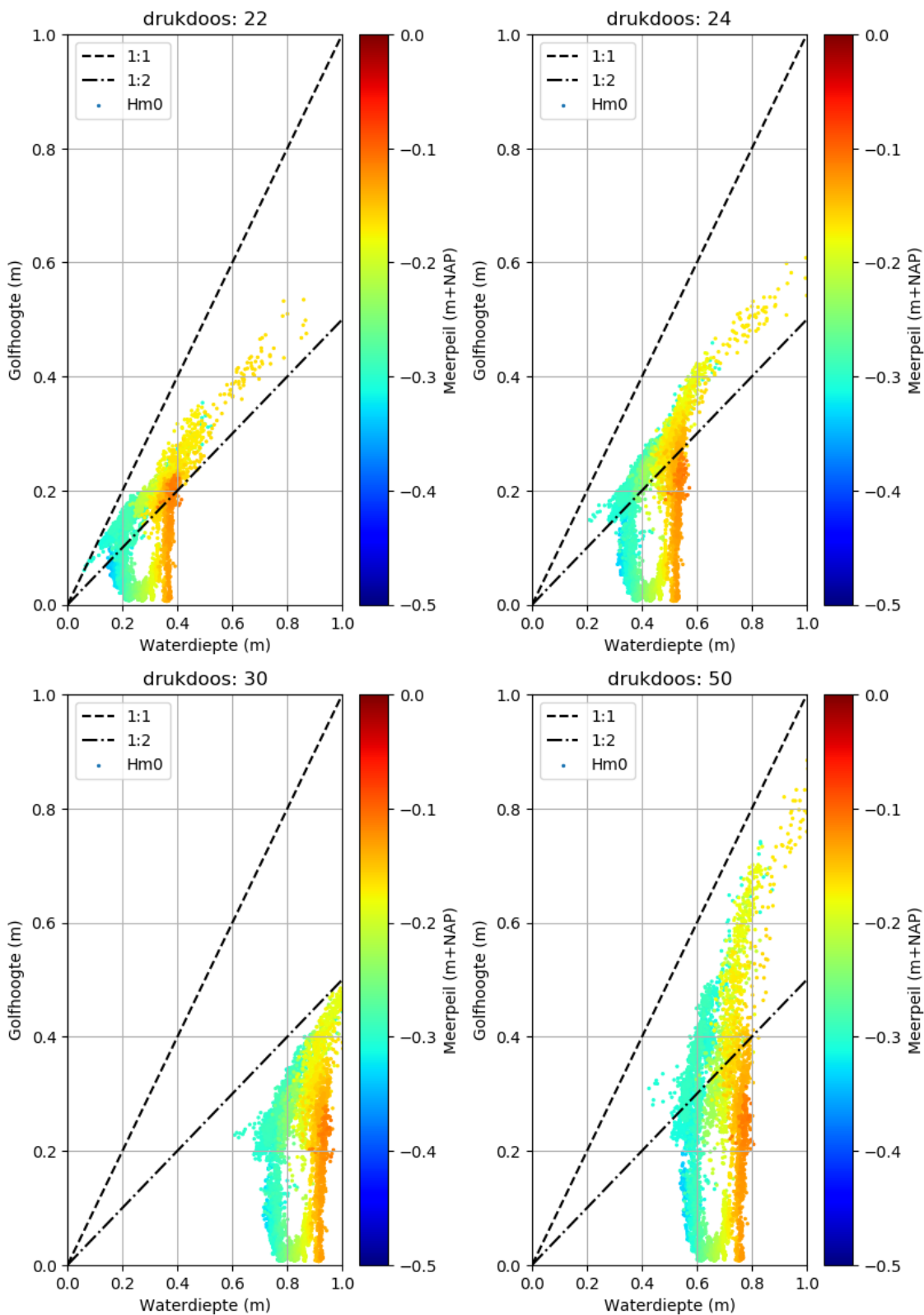
B.2 Plaatsing van de instrumenten



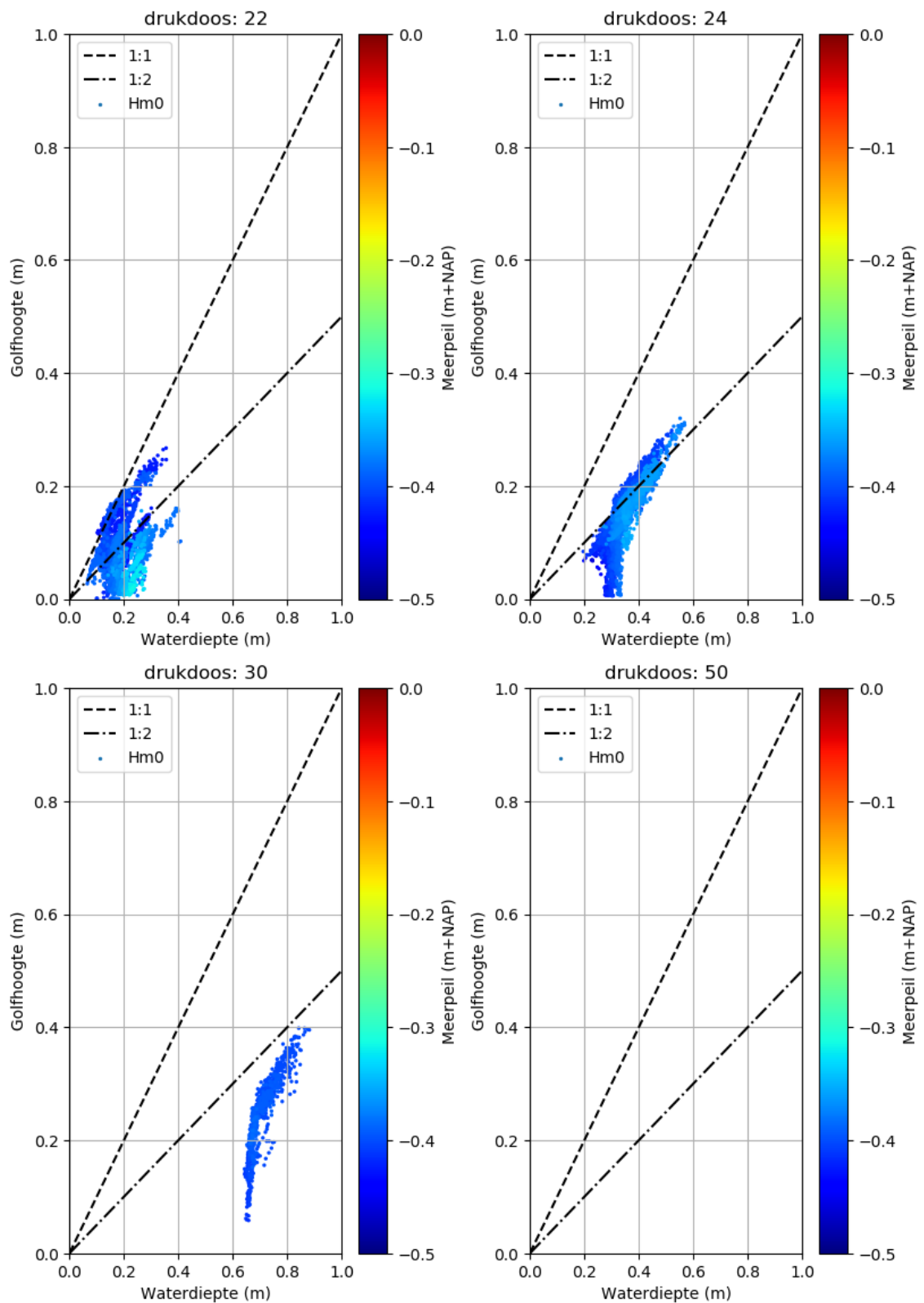
Figuur 7.4 Plaatsing meetinstrumenten, met de offshore ADV (wit), ADV's op het plateau (rood) en drukdozen op het plateau (zwart).

B.3 Golfhoogte / waterdiepteverhouding op het plateau

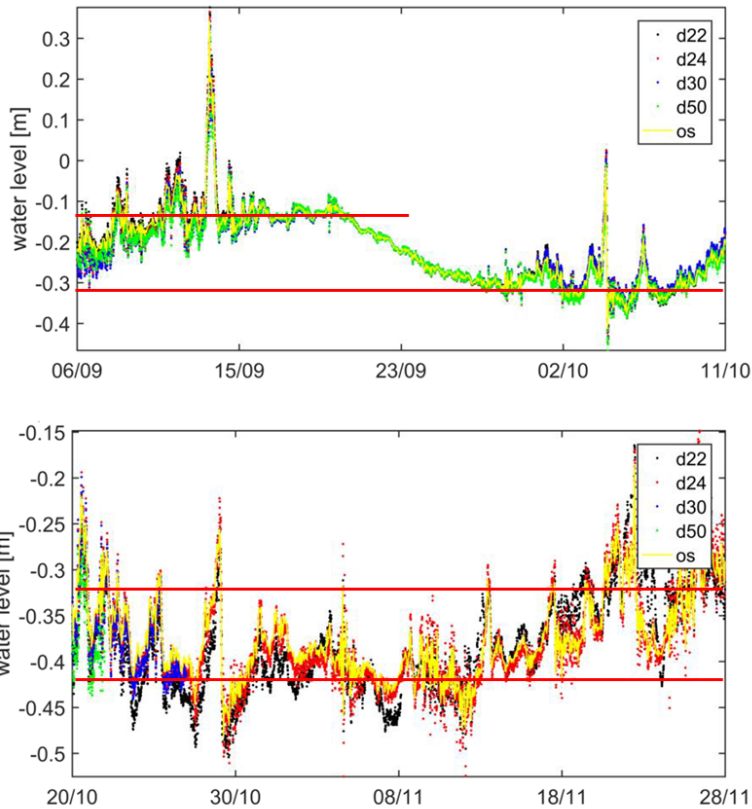
De figuren van september 2017 laten zien dat meerpeil variaties kunnen leiden tot een zelfde golfhoogte boven het plateau bij een verschillende waterdiepte. Golfhoogtes op de rand van het plateau (drukdoos 50) naderen de helft van de waterdiepte, $H_{m0}/h = 0.80$. Aan het eind van het plateau (drukdoos 22) is de verhouding (bij de hogere golven in de tijdreeks) circa $H_{m0}/h = 0.65$.



Figuur 7.5 Relatie tussen golfhoogte en waterdiepte bij de vier drukdozen op het plateau, gekleurd op meerpeil, voor de meetperiode September 2017



Figuur 7.6 Relatie tussen golfhoogte en waterdiepte bij de vier drukdozen op het plateau, gekleurd op meerpeil, voor de meetperiode December 2017



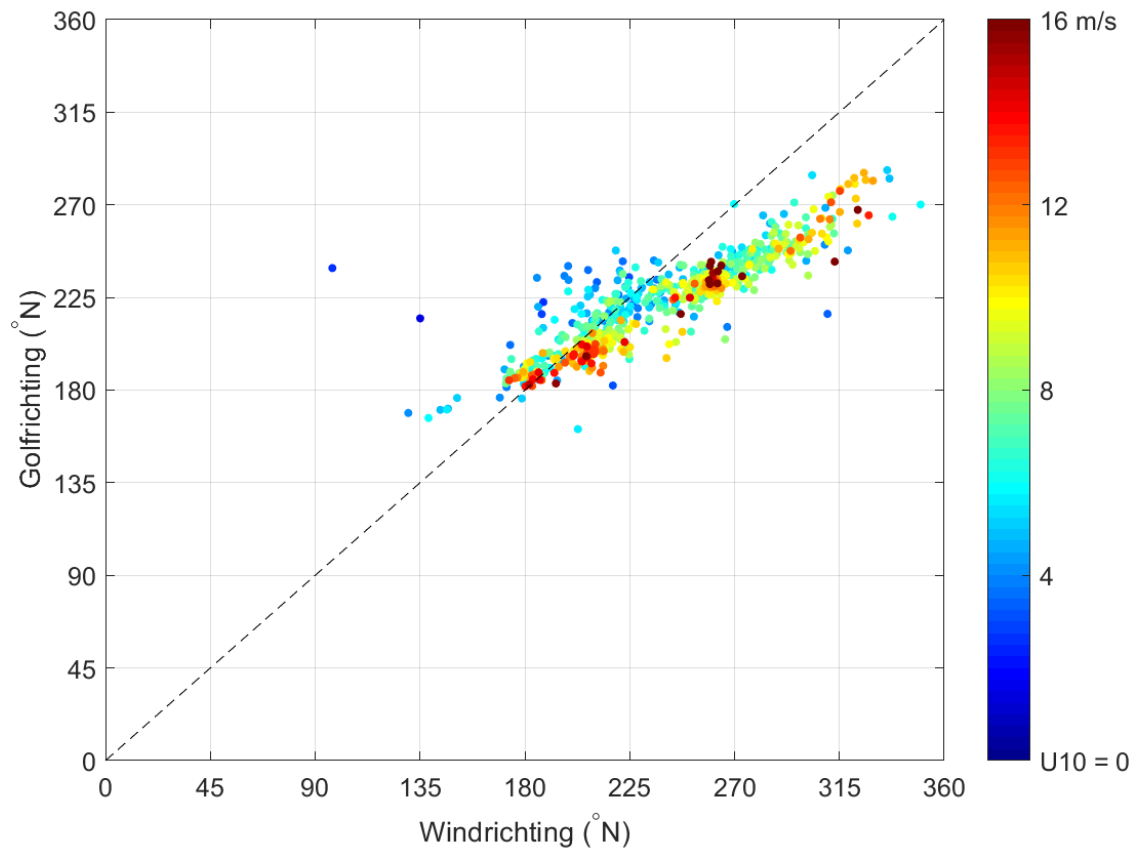
Figuur 7.7 Meerpeil in september 2017 (boven) en december 2017 (onder) (met verschil in verticale schaal)

B.4 Golfrichting op het plateau

Voor windrichting 180-225: offshore golfrichting gelijk aan windrichting

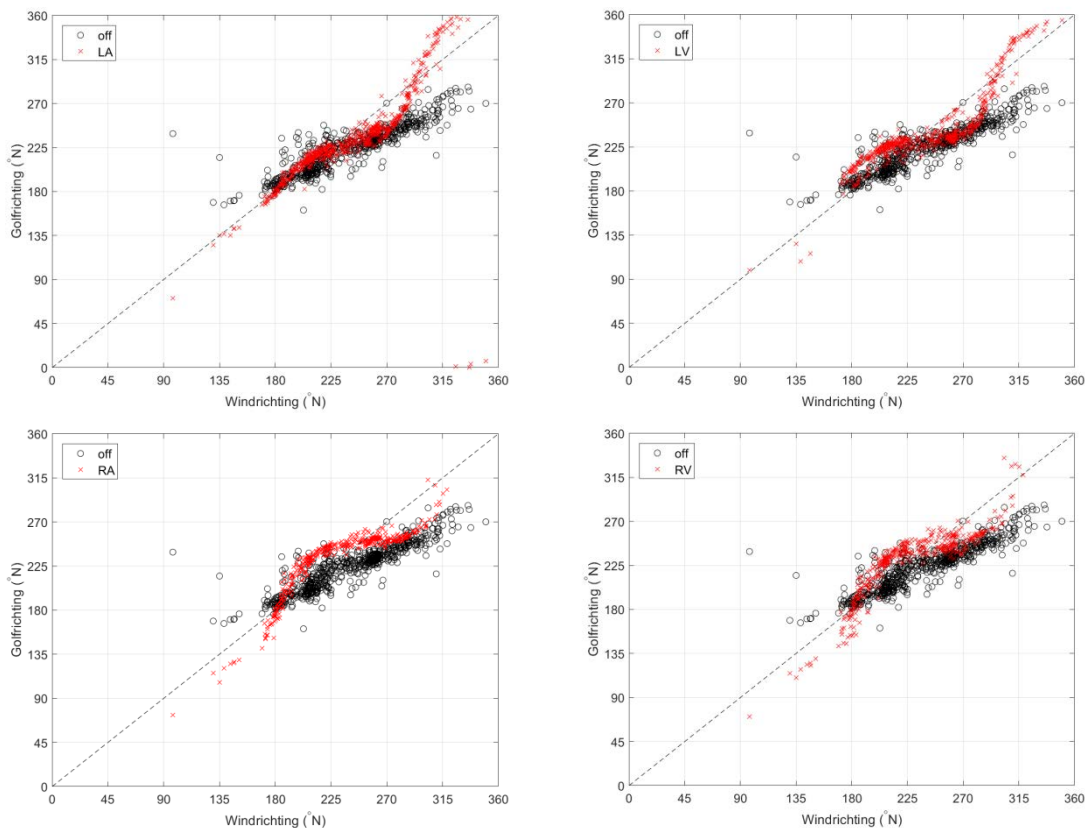
Voor windrichting 225-360: offshore golfrichting draait bij richting 225 graden. Bijvoorbeeld een golfrichting van 270 (vanuit west) bij een windrichting vanuit 315 graden (vanuit noordwest).

Offshore bepalen de dieptecontouren in het Markermeer (mogelijk in combinatie met de grootschalige stroming in het Markermeer) de afwijking van de golfrichting ten opzichte van de windrichting. Op het plateau krijgt de oriëntatie van het plateau invloed.



Figuur 7.8 Windrichting versus golfrichting offshore ADV (filter: $H_{m0} > 0.10$ m bij offshore ADV)

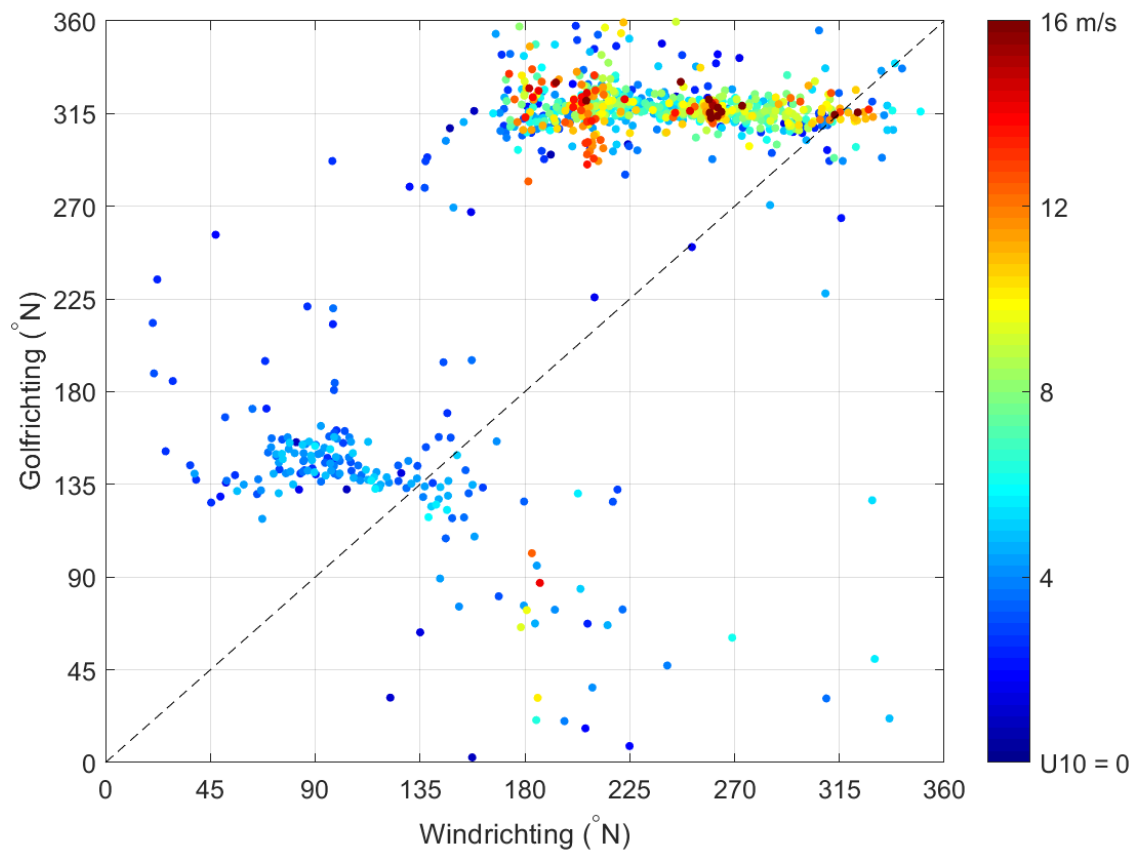
Op het plateau is de golfrichting vergelijkbaar met de golfrichting bij de offshore ADV voor windrichtingen tussen 180 en 270 graden. De bijdraaiing naar de richting van 225 graden (ongeveer de oriëntatie van de pilot) is sterker aanwezig dan offshore. Bij een windrichting tussen 270 en 360 graden wijkt de golfrichting op het plateau duidelijk af van de offshore golfrichting. Dit is vooral bij de twee ADV's het dichtst bij de damwand zichtbaar. Mogelijk is hier sprake van diffractie rond de punt van de damwand.



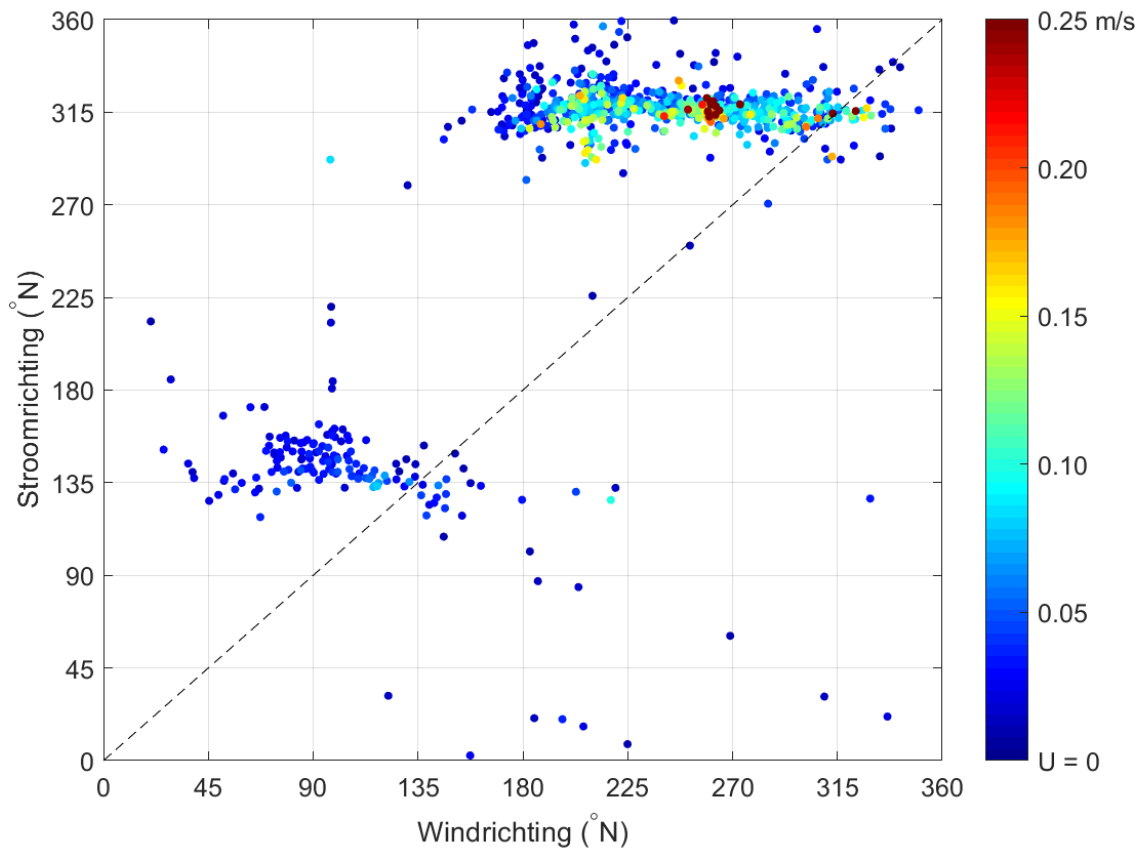
Figuur 7.9 Vergelijking tussen golfrichting bij de offshore ADV (off) en de vier ADV's op het plateau (LA = linksachter, RA = rechtsachter, LV = linksvoor, RV = rechtsvoor)

B.5 Stroomrichting op het plateau

Windrichting versus stroomrichting offshore (stroomsnelheid > 0.01 m/s bij offshore ADV), gekleurd op achtereenvolgens windsnelheid en stroomsnelheid, zie onder. Bij wind uit de oostelijke sector (0-180 graden) is de stroming vanuit ZO-richting (langs de dijk, vanuit Lelystad richting Enkhuizen). Bij wind uit de westelijke sector (met hogere windsnelheden en stroomsnelheden in deze periode) is de stroming daar tegengesteld aan.



Figuur 7.10 Windrichting versus golfrichting bij de offshore ADV, gekleurd op gemeten windsnelheid



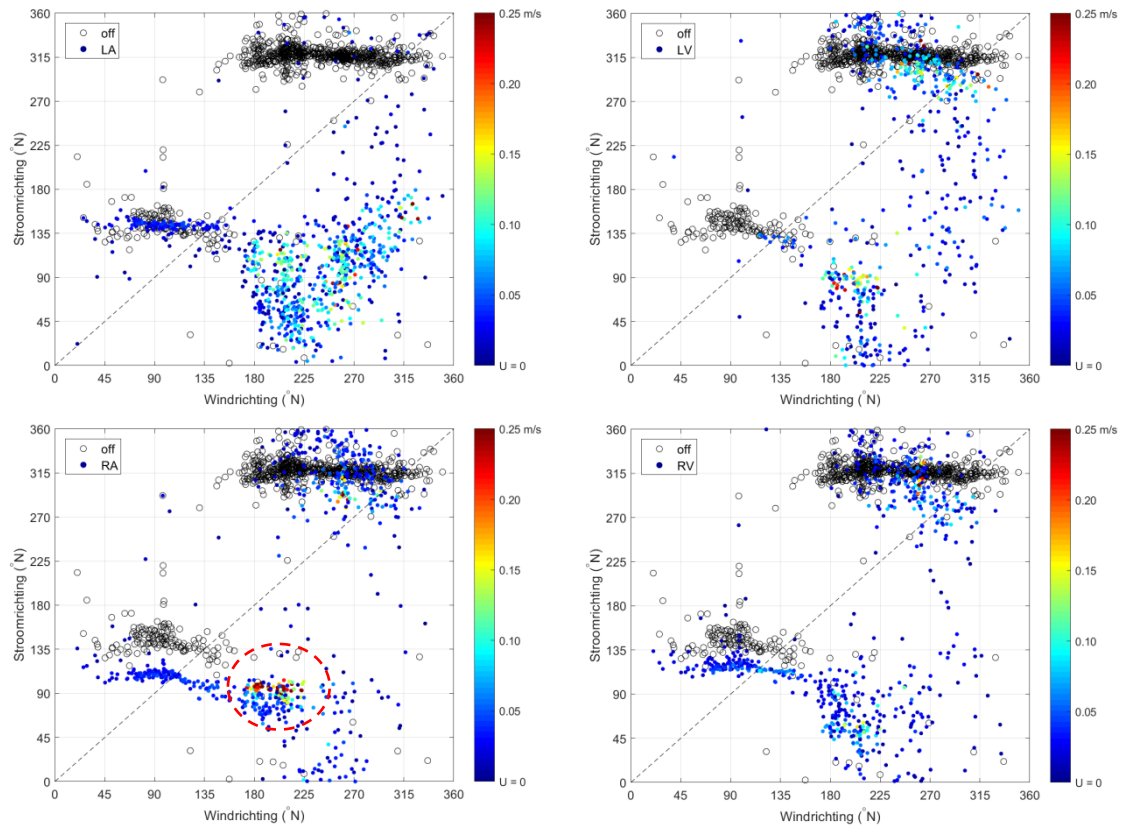
Figuur 7.11 Windrichting versus golfrichting bij de offshore ADV, gekleurd op gemeten stroomsnelheid aldaar

Stroomrichting op het plateau¹ is bij wind uit de oostelijke sector vergelijkbaar met de stroomrichting bij de offshore ADV; bij de ADV's rechtsvoor en rechtsachter wat bijgedraaid door de oriëntatie van het plateau. Bij wind uit de westelijke sector beweegt stroming vanuit Enkhuizen richting Lelystad. Bij de offshore ADV is dit patroon consequent zichtbaar, zoals tijdens de gehele meetperiode 2014-2018. Bij de ADV's op het plateau is een wat diffuus beeld zichtbaar qua stroomrichting, met onder bepaalde omstandigheden een stroming met een richting die tegengesteld is aan de stroomrichting bij het offshore meetframe. Zie de markering in de betreffende figuren voor de ADV rechtsachter, en een concreet voorbeeld in Figuur 7.15.

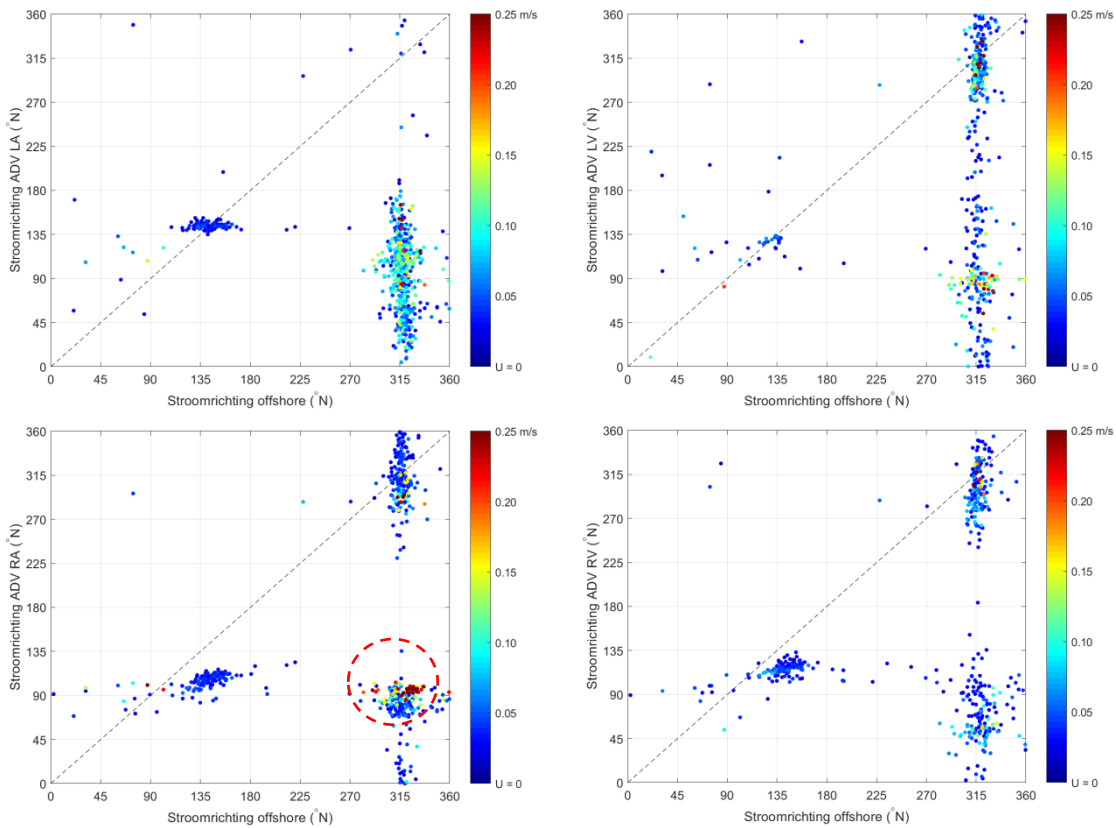
Samenvattend:

- Geval A: Windrichting 0-170 graden: offshore stroming parallel aan de dijk, richting Enkhuizen (135 graden), en op het plateau stroming richting damwand (circa 100 graden).
- Geval B: Windrichting 170-225 graden: offshore stroming parallel aan de dijk, richting Lelystad (315 graden), en op het plateau (teggengestelde) stroming richting damwand. Mogelijk is dit golfgedreven langsstroming als gevolg van schuin invallende golven ten opzichte van de oriëntatie van de pilot (225 graden).
- Geval C: Windrichting 225-360 graden: offshore stroming parallel aan de dijk, richting Lelystad (315 graden), en op het plateau eveneens stroming parallel aan de oeverlijn in die richting.

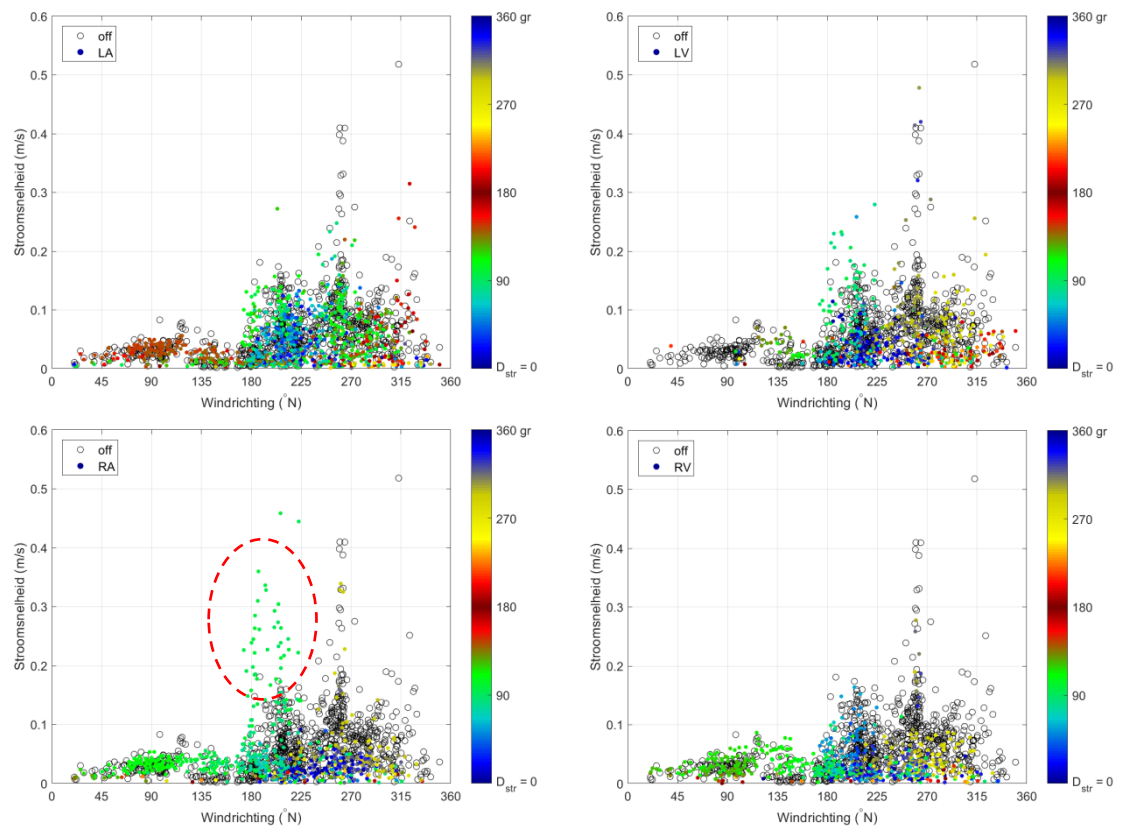
¹ Dit is berekend als $\text{mod}([270\text{-stroomrichting_netcdf}], 360)$



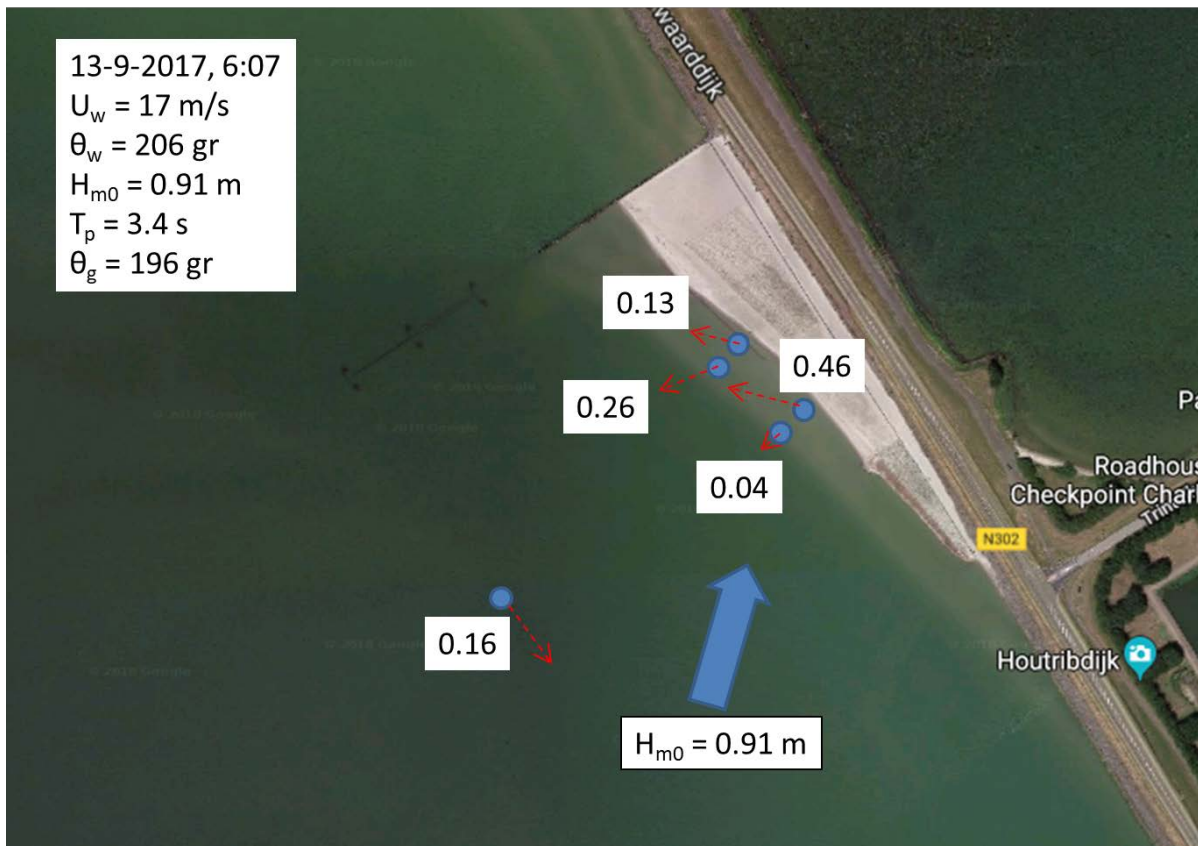
Figuur 7.12 Vergelijking tussen stroomrichting bij de offshore ADV (off) en bij de vier ADV's op het plateau (LA = linksachter, RA = rechtsachter, LV = linksvoor, RV = rechtsvoor), gekleurd op stroomsnelheid op het plateau.



Figuur 7.13 Vergelijking tussen stroomrichting bij de offshore ADV (off) en bij de vier ADV's op het plateau (LA = linksachter, RA = rechtsachter, LV = linksvoor, RV = rechtsvoor), gekleurd op stroomsnelheid op plateau (filter: >0.02 m/s).



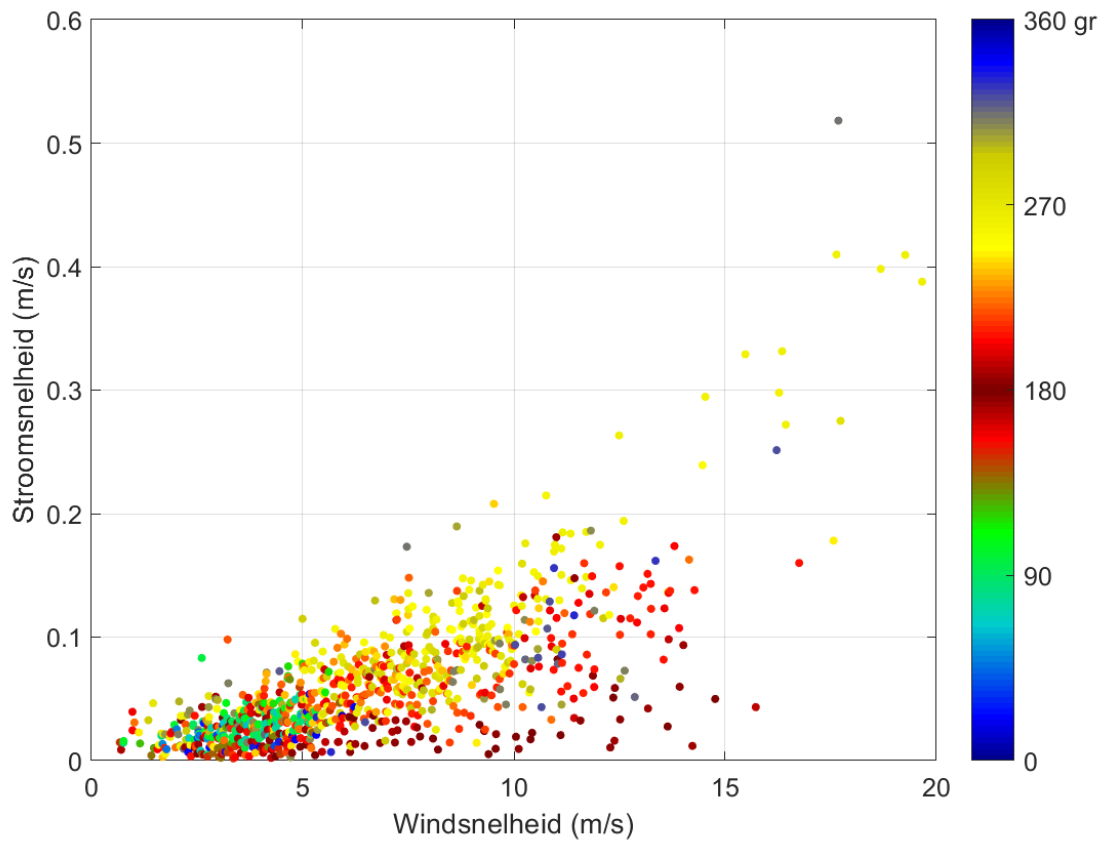
Figuur 7.14 Windrichting versus stroomsnelheid voor het offshore meetframe (off) en de ADV's op het plateau, gekleurd op stroomrichting op het plateau (LA = linksachter, RA = rechtsachter, LV = linksvoor, RV = rechtsvoor).



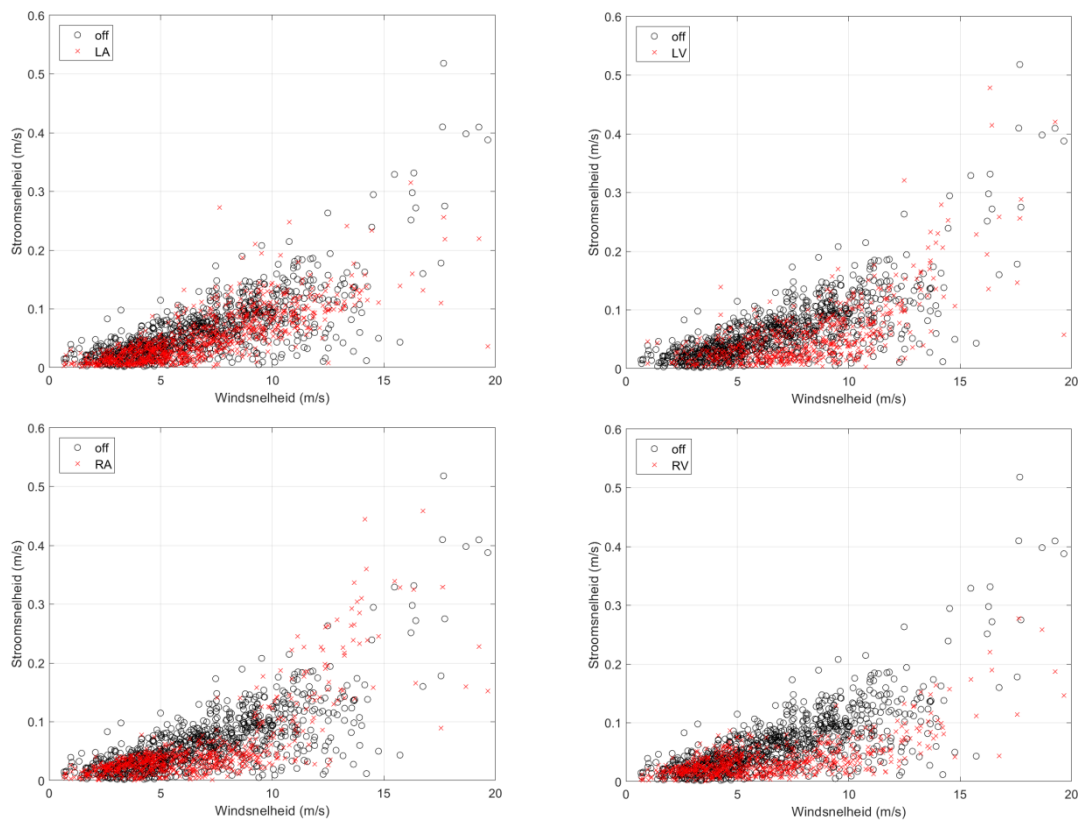
Figuur 7.15 Voorbeeld van tegengestelde stroming op het plateau ten opzichte van de offshore stroming, opgewekt door hoge golven vanuit de sector 170-225 graden.

B.6 Stroomsnelheid op het plateau

De stroomsnelheid op het plateau ligt iets lager dan bij het offshore frame. Bij de ADV rechtsvoor is de stroomsnelheid lager dan bij de andere locaties.



Figuur 7.16 Windsnelheid versus stroomsnelheid bij het offshore frame, gekleurd op windrichting



Figuur 7.17 Vergelijking tussen stroomsnelheid bij de offshore ADV (off) en bij de vier ADV's op het plateau (LA = linksachter, RA = rechtsachter, LV = linksvoor, RV = rechtsvoor)

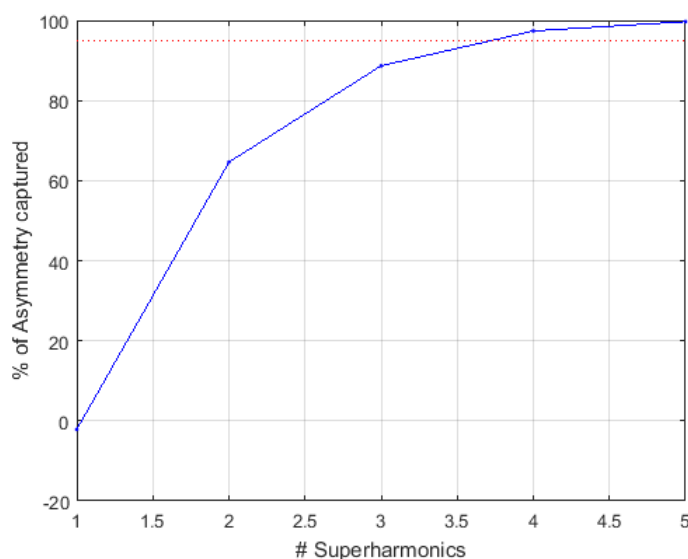
C Theoretische invloed hogere harmonischen analyse golfasymmetrie

Een mogelijke verklaring voor de onderschatting van A_u (Paragraaf 3.8) ligt in het beperken van het frequentiebereik bij de verwerking van het meetsignaal uit de drukdozen naar een oppervlakteuitwijking. Hierbij is het frequentiebereik noodzakelijkerwijs beperkt vanwege het toepassen van de dynamische drukcorrectie (zie Paragraaf 2.5.2). Dit betekent dat er een harde bovengrens is aangehouden van 1,5 Hz en dat er getaperd is tussen 1 en 1,5 Hz. Dit frequentie bereik ligt hoger dan de doorgaans gemeten golffrequenties. Echter, door het verdwijnen van energie bij hogere frequenties verdwijnen ook hogere harmonischen van de eigenlijke golf (grondtoon). Juist deze hogere harmonischen (boventonen) zijn belangrijk voor de (verticale) golf asymmetrie.

Hiermee is het de vraag of deze beperking in frequentiebereik in de praktijk leidt tot een onderschatting van de waargenomen A_u . Om hier inzicht in te vergaren is gekeken hoe de A_u beïnvloed wordt door het meenemen van minder boventonen. Hiervoor wordt een zeer theoretische 'zaagtandgolf' gebruikt, waarvan de werkelijke A_u grofweg overeenkomt met de maximale A_u in de parametrisatie van Ruessink et al. (2012).

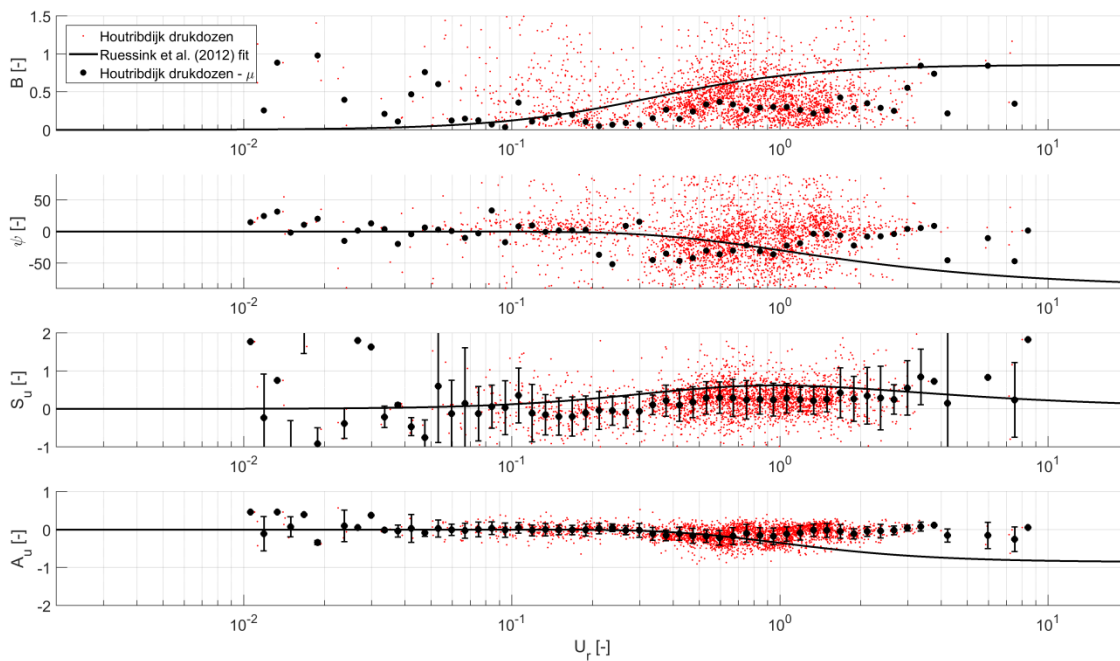
Zoals te zien is in **Error! Reference source not found.**, zorgt het meenemen van de eerste boventoon al dat zo'n 2/3 van de totale asymmetrie wordt gevangen. Voor de tweede en derde boventoon stijgt dat al snel naar 90% respectievelijk 98%.

Typische piekperiodes in de drukdoos metingen liggen tussen de 2 en 3 s, dus tussen de 0.50 en de 0.33 Hz. Dat betekent dat de metingen voor deze golven tussen de 1 en 2 boventonen bevatten, waarmee een relatief groot deel van de totale A_u wordt gevangen in het meetsignaal. Dit is een indicatie dat de onderschatting van A_u , zoals waargenomen in Figuur 3.11, in ieder geval niet geheel te wijten is aan het verdwijnen van hogere harmonischen uit de data.



Figuur 7.18 Percentage van de A_u gerepresenteerd versus het aantal harmonischen in het golfsignaal (1 is slechts de grondtoon).

Deze stelling is verder te onderbouwen door in plaats van alle meetdata te bekijken, alleen de condities te beschouwen waarvoor de piek periode groter is dan 2,5 s, en het gefilterde signaal in ieder geval twee boventonen bevat (**Error! Reference source not found.**). Uit deze analyse blijkt dat ook wanneer minimaal twee boventonen (observatie minimaal 90% van werkelijke asymmetrie), de gemeten asymmetrie voor hoge Ursell waarden veel lager is dan voorspeld door de parametrisatie van Ruessink et al. (2012).



Figuur 7.19 Overzicht van de gemeten waarden van B , ψ , S_u en A_u , afgezet tegen de relaties afgeleid in Ruessink et al. (2012) voor alle condities met piek periode $T_p > 2.5$ s.

D Literatuurbeschrijving en andere stranden

D.1 Stranden in het Markermeer

D.1.1 Randgegevens Markermeer

Oorspronkelijk werd de morphodynamiek van het Markermeer bepaald door getijdenstromingen, maar door het afsluiten van de Zuiderzee is deze invloed verdwenen (*Van der Weij, 2005*). Het merendeel van het Markermeer is ca. 4 m diep (zie Figuur 7.21). Langs de westelijke en de noordelijke oevers wordt het ondieper. Het ondiepe gedeelte in het noorden wordt Enkhuizerzand genoemd en is een overblijfsel uit de tijd van de Zuiderzee.

De golven op het Markermeer zijn vrij klein vergeleken met golven op zee. Normaalgesproken zijn zij 40–60 cm hoog, maar als het stormt, kunnen ze binnen korte tijd aangroeien tot 1,5 m (*www.Rijkswaterstaat.nl*).

Voor de waterstand in het Markermeer wordt een streefpeil gehandhaafd van NAP - 20 cm gedurende de zomer en NAP - 40 cm gedurende de winter maanden om hoge waterafvoeren te kunnen opvangen (*Lee, 2011*).

D.1.2 Locatie van de stranden en sedimentcompositie

Volgens *Van der Weij(2005)* zijn er 66 stranden aanwezig rond het Markermeer, waarvan de meesten aan de ondiepe Noord-Hollandse kust liggen (zie ook Figuur 7.22 in de bijlage). Twee derde van de stranden zijn natuurlijke stranden die uit schelpen(gruis) zijn opgebouwd. Dit schelpengruis stamt nog uit tijden van de Zuiderzee en is rijkelijk aanwezig in de bovenste grondlagen in het Noorden van het Markermeer (Enkhuizen en Houtribdijk; zie Figuur 7.23 in de bijlage). Naast de Zuiderzeeschelpen komen op sommige stranden tussen Enkhuizen en Warder ook zoetwatermosselen voor. Naast natuurlijke stranden zijn enkele aangelegde stranden bedekt met een laag schelpen of schelpengruis, zoals het stand bij het werkeiland voor de bouw van de Houtribdijk (zie Figuur 7.22).

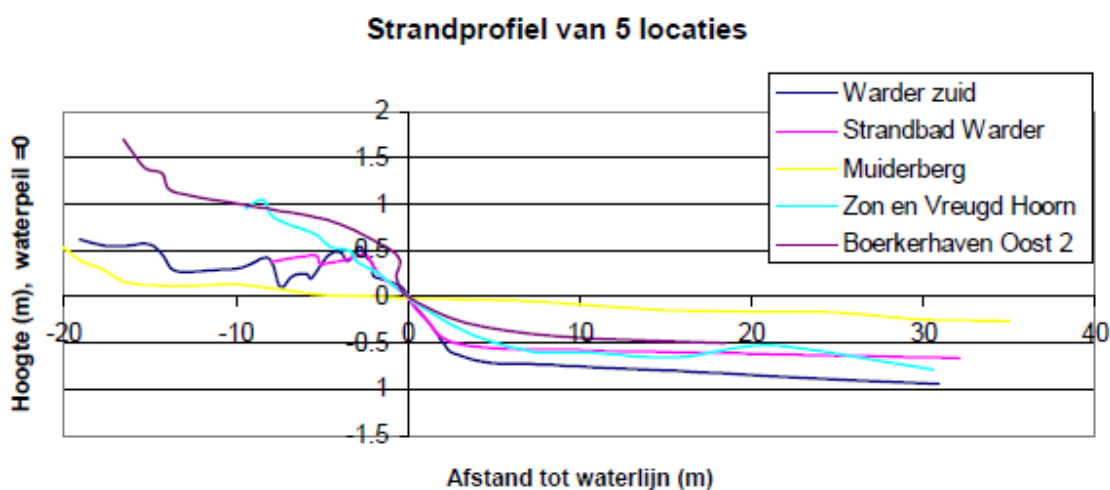
Eén derde van de stranden zijn aangelegd en bestaan uit zand met een korrelgrootte die met gemiddeld 0.3 mm aanzienlijk kleiner is dan de 1.15 mm bij schelpenstranden (zie ook Figuur 7.24 in de bijlage). Daarnaast hebben de schelpenstranden ook een ruimere korrelverdeling met een gemiddelde waarde van $D_{90}/D_{50} = 3.4$ t.o.v. zandstranden waar $D_{90}/D_{50} = 2.4$. Een betere gradering bevordert de stabiliteit van het strand door het effect van armouring. Beide factoren, de korrelgrootte en de gradering, zijn de reden waarom schelpenstranden rond het Markermeer stabiel zijn en zelfs tekens van sedimentatie kunnen vertonen, terwijl zandstranden doorgaans eroderen (*WL, 1988; Van der Weij, 2005*). Uit *Van der Weij(2005)* volgt als vuistregel dat schelpen met een diameter D zich gedragen als zand met diameter $D/2$.

Het moet opgemerkt worden dat de natuurlijke stranden in de Markermeer voornamelijk een andere ligging hebben ten opzichte van het windklimaat dan het pilotstrand. Hierdoor kan het natuurlijk gedrag van het pilotstrand afwijken van de stranden hierboven beschreven. Door gebrek aan kwantitatieve data van andere meerstranden met een vergelijkbare ligging als het pilotstrand is een directe vergelijking met referentiestranden onmogelijk (zie Paragraaf D.2). Echter, kwalitatief komt het gedrag van de natuurlijke Markermeerstranden overeen met die in het noordoosten van de IJsselmeer (e.g., Workum; Wiersma, 2013), waardoor er geen directe aanleiding is gevonden om aan te nemen dat het natuurlijke gedrag van het

pilotstrand significant zal verschillen van het natuurlijke gedrag van andere stranden in het Markermeer.

D.1.3 Profielvorm en sedimentbeweging

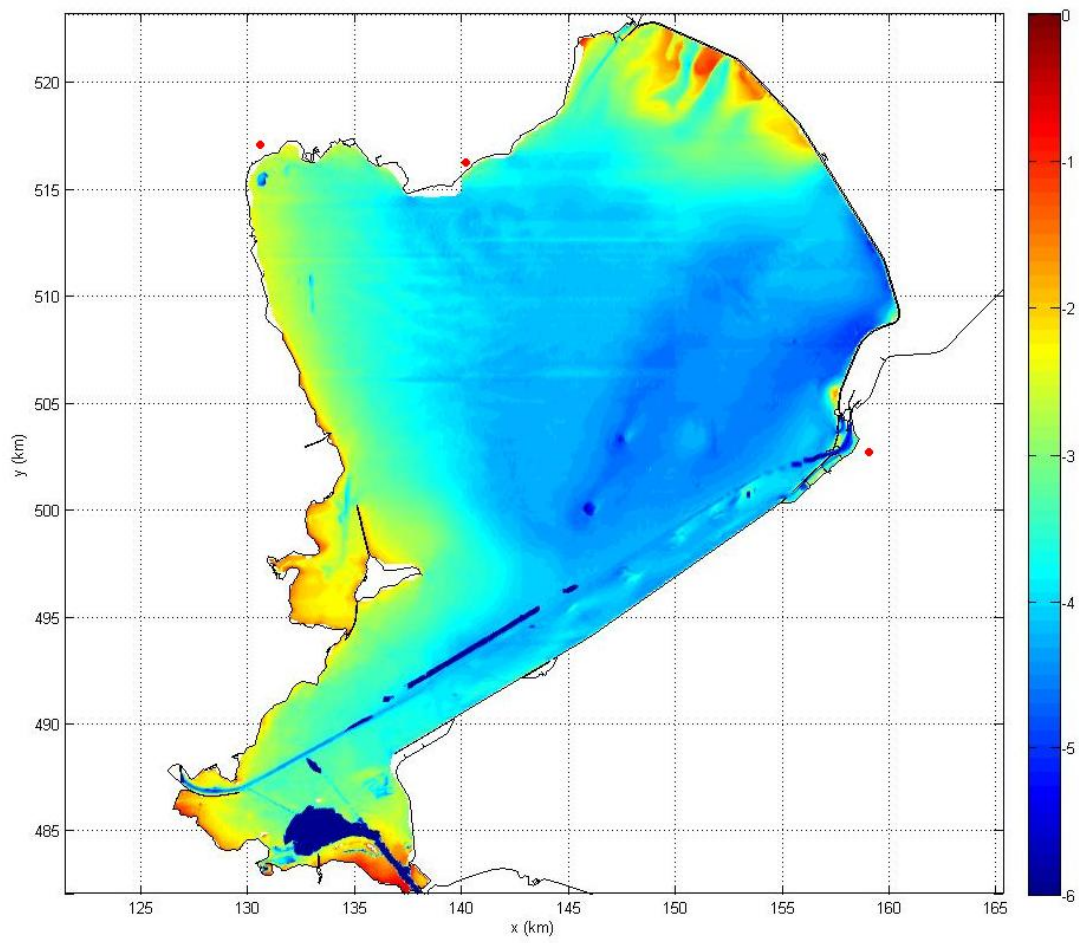
Doordat de schelpendelen grof en goed gegradeerd zijn en daarnaast nog een hoge haakweerstand hebben, zijn de meeste Markermeer stranden erg belastbaar en hebben een steil dwarsprofiel bij de waterlijn, zie (Van der Weij, 2005). Het profiel onder water (~ NAP - 0.5–1.0 m) is veelal flauw (~1:70, e.g., WL, 1988) en bestaat vaak uit een geconsolideerd zand, slib en klei mengsel (Van der Weij, 2005), hoewel er hiervoor minder meetgegevens beschikbaar zijn dan voor de droge delen van het strand.



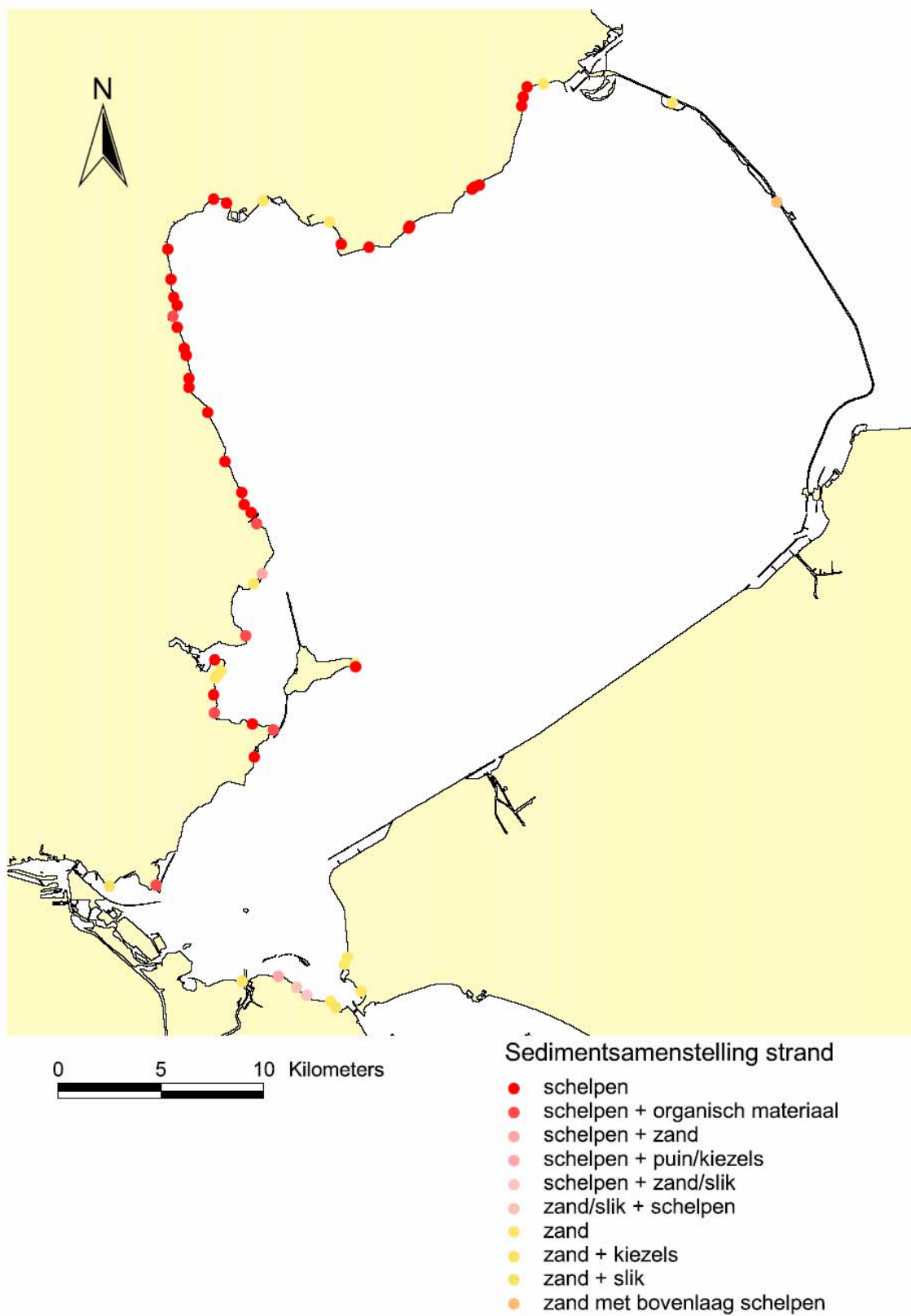
Figuur 7.20 Dwarsprofielen van 5 door Van der Weij(2005) geselecteerde stranden. Het Muiderbergstrand is een aangelegd zandstrand, dat afgeschermd is van golfinval. De overige stranden hebben steile strandhellingen rond de waterlijn van 1:4 - 1:13 en een ondiep onderwaterplateau. De metingen gaan niet ver genoeg om de overgang naar diepere gedeelten van het Markermeer te laten zien. Bron: Van der Weij, 2005.

Als belangrijkste proces voor sedimentverplaatsing wordt de orbitaalbeweging van de golven gezien (WL, 1988; Van der Weij, 2005). Het transport vindt in dwars- en langsrichting plaats. Toch zijn voor aangelegde zandstranden met typische hellingen van 1:20–1:30 de grootste (zand)verliezen in dwarsrichting te verwachten (WL, 1988). Zo wordt vermoed dat een proefstrand dat in 1986 is aangebracht bij Medemblik in het IJsselmeer, en waarvan binnen anderhalf jaar alle 18.000 m³ gesuppleerde zand verdwenen is, vooral door dwarsprocessen is geërodeerd (WL, 1988).

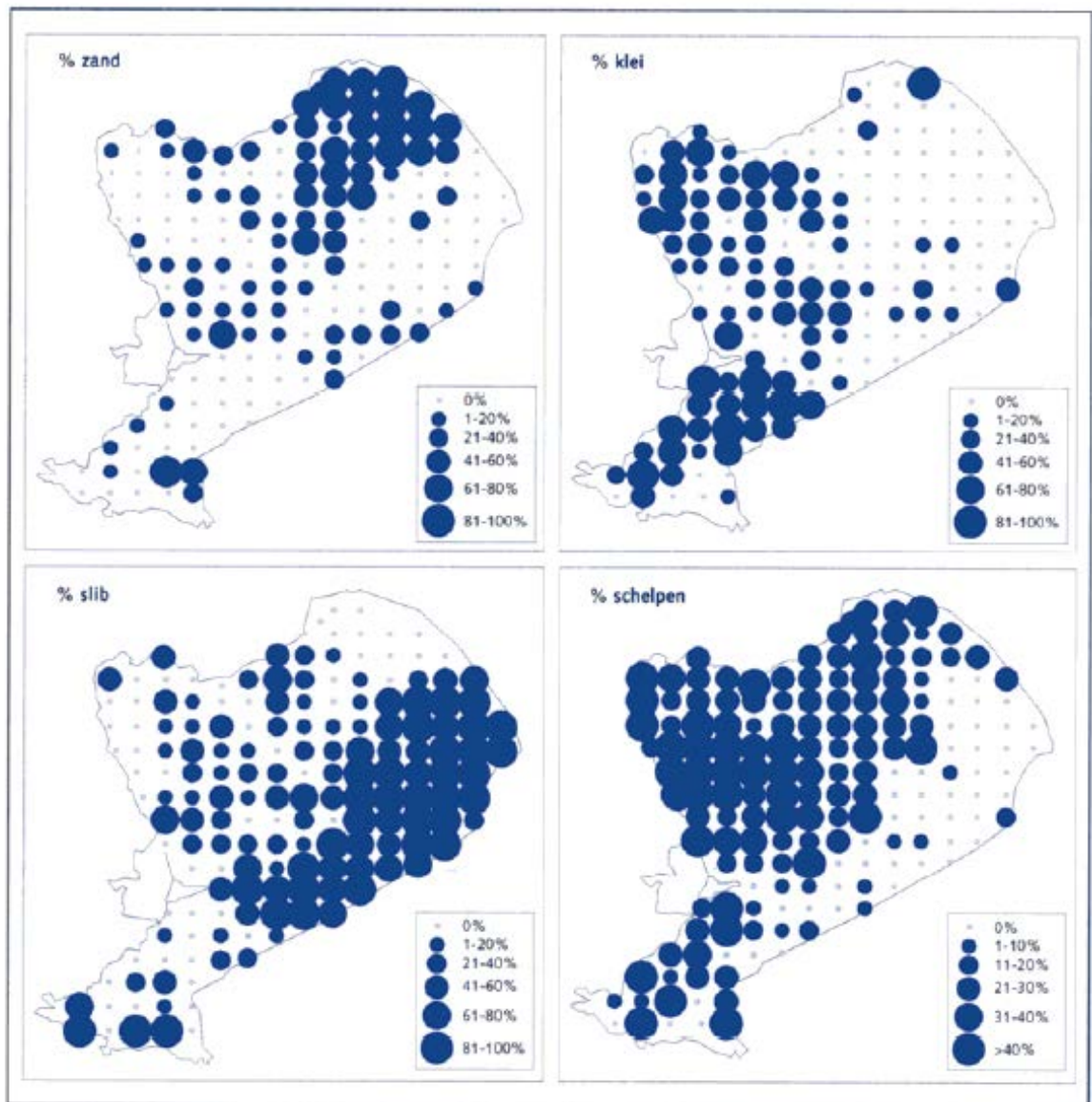
Naarmate het dwarsprofiel flauwer wordt aangelegd, neemt ook het zandverlies af. Over het algemeen is de observatie van vlakke, ondiepe vooroevers (zoals nu aanwezig bij de pilot Houtribdijk) typisch voor plekken met een vrijwel vaste waterstand en veel dwarstransport (WL, 1988). Op het plateau van natuurlijke stranden is weinig verticale bodemverplaatsing en het blijkt dat het sediment hier vaak geconsolideerd is en lastig te eroderen (Van der Weij, 2005).



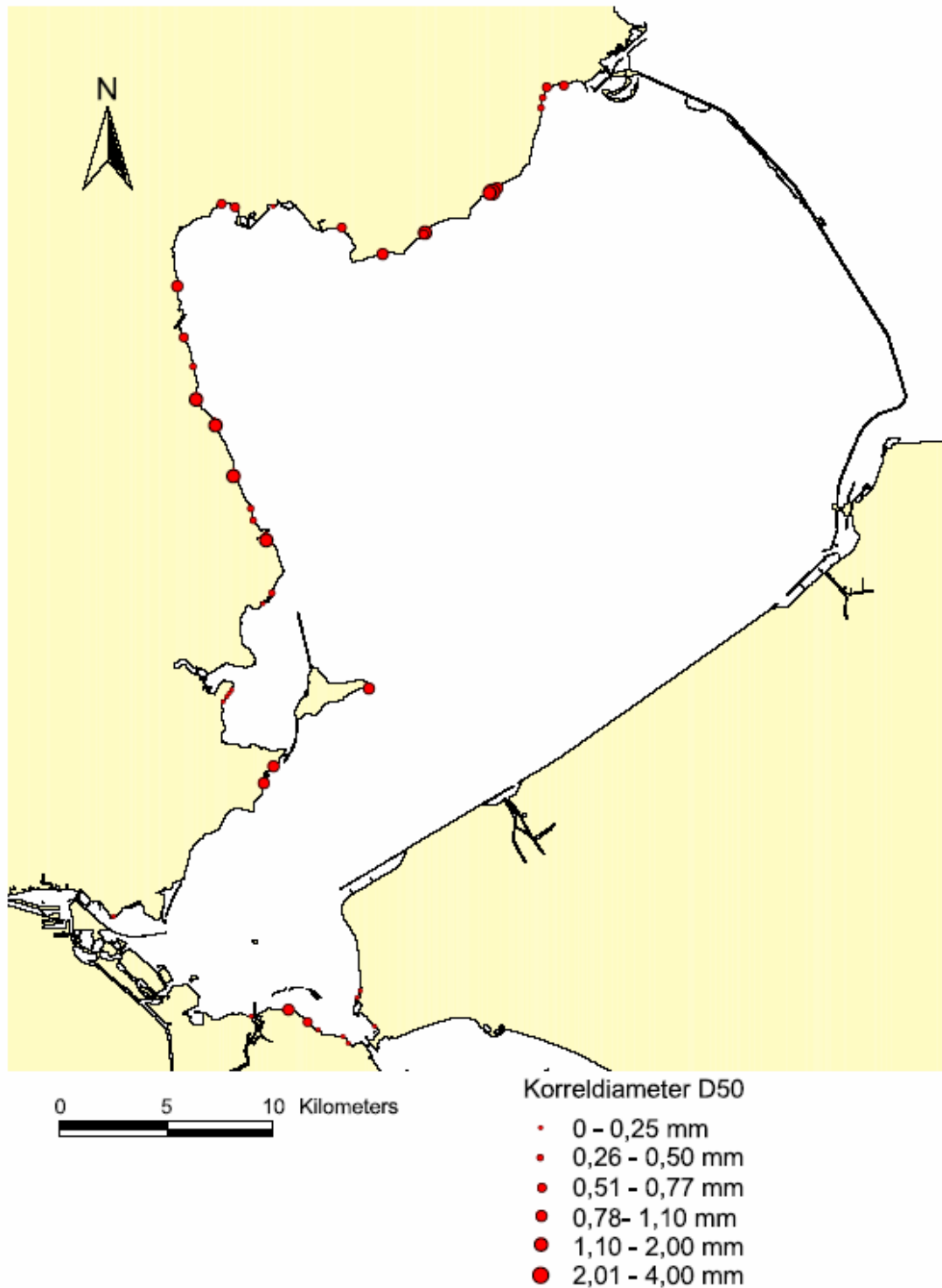
Figuur 7.21 Dieptekaart Markermeer. Bron: Lee, 2011.



Figuur 7.22 Locatie en sedimentsamenstelling van de Markermeer stranden. Bron: Van der Weij, 2005



Figuur 7.23 Sedimentfracties Markermeer. Bron: Riza, 2003

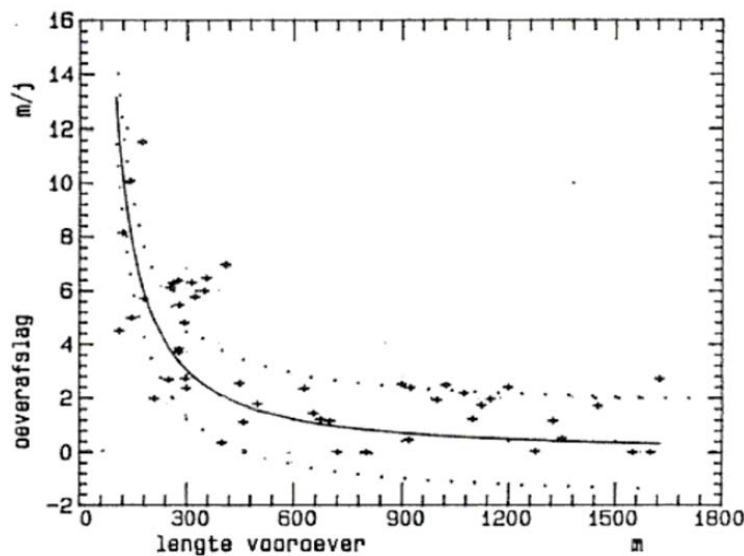


Figuur 7.24 Korrelgrootte gevonden bij Markermeer stranden. De grootst aangetroffen D_{50} is 4.0 mm. Bron: Van der Weij, 2005.

D.2 Markermeerstranden in Nederlands en internationaal context

Voor zandig en slibbige meren met beperkte strijklengte $O(10\text{--}50\text{ km})$ is de observatie van steile strandhellingen en vlakke, ondiepe vooroevers een bekend fenomeen. Binnen Nederland komt deze morfologie veel voor in de getij-vrije wateren van het Deltagebied, bijv. het Veersemeer, Grevelingenmeer en het Volkerak-Zoommeer (Leeuwenstein en Schoot, 1988; Van Rooij en Groen, 1996; Rijkswaterstaat, 2010), en in het IJsselmeer (Wiersma, 2013). Ook in het buitenland zijn zulke profielvormen bekend (e.g., Lorang, 1992).

De stranden in de bovengenoemde bronnen delen naast gelijke morfologische eigenschappen (flauw onderwaterplateau en steile strandhelling), ook een terugtrekkende strandlijn. Deze regressie wordt waargenomen over lange tijdperiodes (in Grevelingen meer dan 30 jaar), waarbij zand van de strandlijn wordt geërodeerd en aan de rand van het onderwaterplateau gedeponeerd. Leeuwenstein en Schoot (1988) constateerden voor de Veermansplaat in het Grevelingenmeer dat de mate van jaarlijkse erosie exponentieel afneemt met toenemende plateaubreedte, zie Figuur 7.25. Hun onderzoek gaf aan dat de afslag op de Veermansplaat voor korte plateaus aanvankelijk groot is ($\sim 10\text{ m/jaar}$), en dat de afslag snel afneemt naarmate het plateau breder wordt ($\sim 1\text{ m/jaar}$ bij een plateaubreedte van 700 m).



Figuur 7.25 Strandafslag als functie van de breedte van vooroever van de Veermansplaat. (Vooroever is de zone tot ca. NAP-2 m.) [Leeuwenstein en Schoot, 1988]

D.3 Conclusies

Een literatuurstudie naar stranden in het Markermeer en andere meren met laag-energetische golfcondities laat zien dat de karakteristieke morfologische kenmerken van het pilotstrand Houtribdijk kwalitatief overeenkomen met andere natuurlijke stranden in vergelijkbare situaties. Hoewel bepaalde morfologische aspecten en hydrodynamische randvoorwaarden overeenkomen tussen de bovengenoemde stranden en het pilotstrand Houtribdijk, kan er niet worden aangenomen dat alle processen per definitie gelijk zullen zijn, en dat de gevonden morfologische veranderingen en snelheden zullen optreden bij het pilotstrand. Daarom wordt in Appendix E op een procesmatige wijze gekeken naar sedimenttransportmechanismen op het pilot zandstrand Houtribdijk om beter inzicht te krijgen in de drijvende processen achter het morfologisch gedrag van het pilotstrand.

E Sediment transport mechanismen pilot Houtribdijk

E.1 Transportmechanismen en de mobilisatie van sediment

De mobilisatie van zandkorrels kan door stroming en golven plaatsvinden. Voor dit onderzoek is er nog een verdere onderverdeling gedaan in (langs)stroming, golf-gedreven retourstroming, streaming, en de combinatie van golforbitaalbeweging en ribbels.

E.1.1 Initialisatie van sediment transport door (langs)stroming

De stromingsmetingen (Appendix F en Figuur 7.34, onderste paneel) laten vrij lage snelheden zien en een stromingsrichting die voornamelijk langs de suppletie is gericht. De meetdata zijn niet op het plateau, maar op dieper water ($h \approx 2.4$ m) gewonnen, vóór het buitentalud van de suppletie (zie ook Figuur 4.1 b). De meetdata bevatten daarom waarschijnlijk weinig bijdrage van het optredende golfgedreven langtransport aan de kustlijn en op het plateau.

De potentie van deze (langs)stroming om sediment te mobiliseren is geschat met behulp van Shields(1936):

$$U_{cr,current} = 0.19 D_{50}^{0.1} \log_{10} \left(\frac{4h}{D_{90}} \right)$$

waarbij $U_{cr,current}$ de kritische snelheid is waarboven sediment begint te bewegen, h de waterdiepte aangeeft en D_{50} en D_{90} de 50% en 90% gewichtsfracties zijn van de korreldiameter.

Het plateau ligt op een diepte van ca. NAP -1 m wat overeenkomt met een gemiddelde waterdiepte $h \approx 75$ cm. In deze analyse nemen we aan dat de gemeten snelheden ook gelden ter hoogte van het onderwaterplateau (in geval van stroming die aangedreven wordt door grootschalige drukgradiënten is dit een conservatieve aanname), en dat de $D_{50} = 200$ μm , wat representatief is voor de korrel diameter die aangetroffen is onder water (*EcoShape*), en de bijbehorende D_{90} 400 μm is. Met deze waarden volgt uit Shields(1936) dat de stroomsnelheden hoger moeten zijn dan 0.31 m/s om transport te kunnen initiëren.

Ook al geeft het resultaat maar een grove indicatie voor de drempel waarbij transport heeft kunnen optreden, zijn snelheden boven 0.3 m/s maar in enkele gevallen gemeten (<1% van de tijd). In vergelijking met het potentieel van golven om sediment op te woelen (zie volgende paragraaf) is het niet waarschijnlijk dat de gemeten grootschalige stroming (niet golf-gedreven) een belangrijke aandrijver van sediment opwoeling. Het kan uiteraard door advectie wel een rol hebben in het totale sediment balans van het gebied.

E.1.2 Initialisatie van golf gedreven sediment transport

Als schatting voor de mobilisatie van sediment door golven rond de Houtribdijk zijn de formuleringen voor de kritische orbitale bodemsnelheid ($U_{bed,cr}$) van Komar & Miller(1975) gebruikt:

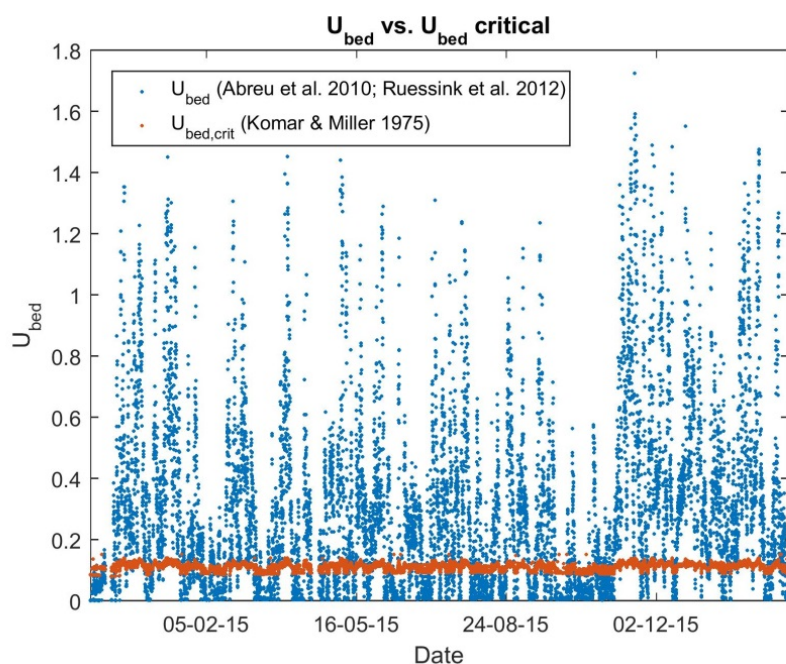
$$U_{bed,cr} = 0.24 (\Delta g)^{2/3} (D_{50} T)^{1/3}$$

waarbij T = golfperiode, Δ = relatieve dichtheid, g = zwaartekrachtsversnelling.

Dit criterium voor sedimenttransport is voor de gehele reeks van uurlijks gemeten golfdata uitgewerkt. Aansluitend zijn de opgetreden (golf gedreven) snelheden (U_{bed}) berekend om te

kunnen bepalen hoe vaak de kritische snelheid is gepasseerd, d.w.z. hoe vaak $U_{bed} > U_{bed,cr}$. Door gebruik te maken van analytische en empirische uitdrukkingen van *Doering & Bowen*(1995), *Abreu et al.*(2010), *Malarkey & Davies*(2012) en *Ruessink et al.*(2012) zijn ook de invloeden van golf skewness en -asymmetrie op de bodemsnelheid in acht genomen. Vanwege de complexiteit is het stelsel vergelijkingen opgenomen in de bijlage op pagina E-11. In essentie wordt U_{bed} afgeleid uit H_s , T_p en de waterdiepte h (zie ook Figuur 7.34), d.w.z. de orbitale bodemsnelheid behoort tot één harmonische die representatief is voor het golfveld.

De golfdata zijn op een diepte van NAP -2.6 m verzameld. Om de sedimentbeweging op het plateau op ca. NAP -1 m te kunnen berekenen zijn de golfhoogtes daarom eerst vertaald naar ondieper water, waarbij aangenomen is dat de golf energie flux behouden blijft (niet brekende golven). Op basis hiervan is voor $D_{50} = 200 \mu\text{m}$ bepaald dat gedurende 63 % van de gemeten periode, sediment in beweging kan komen (zie Figuur 7.26). Een zelfde berekening van $U_{bed,cr}$ voor $D_{50} = 300 \mu\text{m}$ (initiële korrelgrote bij aanleg suppletie) resulteert in sedimentbeweging gedurende 61% van de tijd. Ook al is het effect van golf niet-lineariteit op de bodemsnelheid meegenomen in de berekeningen, wordt het transport niet vaker geïnitieerd dan wanneer niet-lineariteit wordt genegeerd (ook 63/61 %). De reden hiervoor is dat het zand al voor snelheden van 0.08–0.15 m/s in beweging komt terwijl het toegevoegde effect van niet-lineariteit pas zichtbaar wordt voor snelheden boven 0.4 m/s, d.w.z. hogere golven.



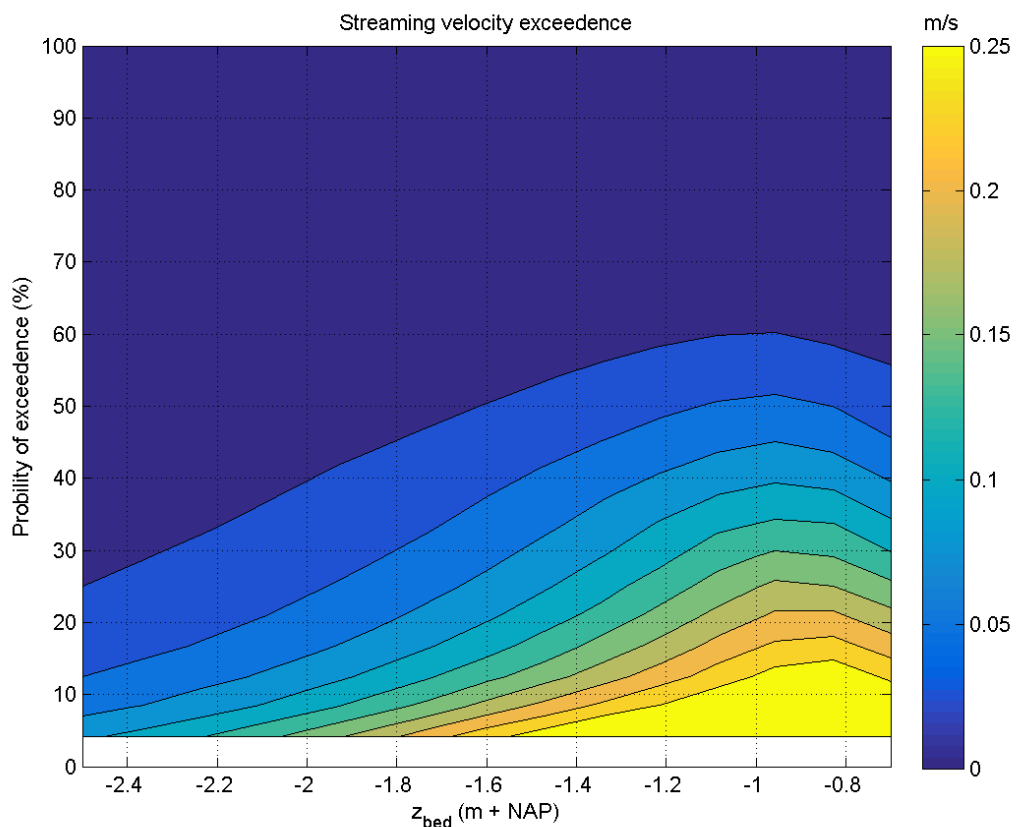
Figuur 7.26 Opgetreden snelheden (blauw) en kritische snelheden (oranje) voor $D_{50} = 200 \mu\text{m}$

E.2 Schatting stroomsnelheden door streaming en retourstroming en effect op transport

Door verticale uitwisseling van impuls van en naar de bodemgrenslaag (Longuet-Higgins, 1953), evenals door asymmetrie van turbulentie en viscositeit in de bodemgrenslaag door ribbels en niet-lineaire golven (e.g., Davies and Li, 1997), ontstaat er vooral dicht bij het bed een netto massatransport (streaming). De richting van deze stroming is veelal in de richting

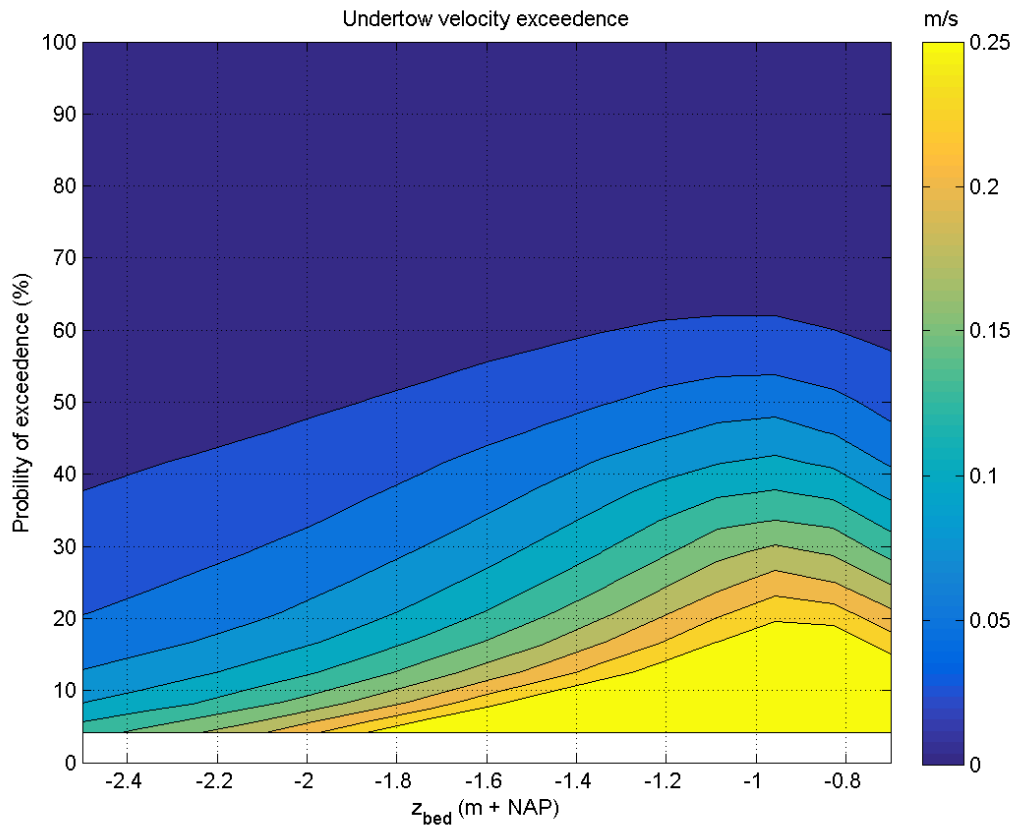
van de golven (kustwaarts), maar kan vlak boven het bed door golfasymmetrie ook tegengesteld aan de richting van de golven zijn.

Om een indicatie te krijgen van het potentieel van streaming om sediment te transporteren op het plateau van de pilot Houtribdijk, wordt een schatting van de maximale streaming snelheid berekend op basis van de theorie van Longuet-Higgins (1953). In deze theorie wordt uitgegaan van laminaire stroming en een vlak bed, waardoor de schattingen voor streaming snelheden waarschijnlijk overschat worden in de richting van golfpropagatie (m.a.w., overschatting van kustwaartstransport). De streaming is berekend op basis van de gemeten tijdserie van golven tussen 3 december 2014 en 15 maart 2016 en is voor verschillende diepteliggings van het bed bepaald. Hierbij zijn condities met brekende golven ($H_s/h < 0.5$) weggelaten. De berekende maximale stroomsnelheden in de buurt van het bed (~2–15 mm boven het bed) zijn in Figuur 7.27 weergegeven.



Figuur 7.27 Overschrijdingsfrequentie van een gegeven geschatte maximale streaming snelheid in de buurt van het bed in de richting van de golven, berekend op basis van Longuet-Higgins (1953) voor golven buiten de brandingszone. Werkelijke optredende snelheden zijn waarschijnlijk lager.

Voor dezelfde tijdserie als de streaming velocity, is de diepte-gemiddelde retourstroming berekend op basis van de massa-flux door Stokes drift plus de massa-flux door streaming. Hierbij moet opgemerkt worden dat een eventuele overschatting van de streaming velocity ook leidt tot een overschatting van de retourstroom. Wederom zijn alleen niet-brekende golfcondities meegenomen. Dit leidt relatief tot een onderschatting van het effect van de retourstroom, daar we onder brekende golfcondities sterke retourstroming verwachten. De resultaten van de retourstroming zijn in Figuur 7.28 weergegeven.



Figuur 7.28 Overschrijdingsfrequentie van een gegeven geschatte diepte-gemiddelde retourstroming buiten de brandingszone. Snelheden binnen de brandingszone zijn waarschijnlijk hoger dan de hier aangegeven waarden.

Uit Figuur 7.27 en Figuur 7.28 blijkt dat de diepte-gemiddelde retourstroming (kust afwaarts gericht) consequent iets groter is dan de maximale streaming bij het bed (kustwaarts gericht), maar dat deze snelheden enigszins van vergelijkbare grootte zijn. Hierbij moet opgemerkt worden dat de streaming waarschijnlijk overschat wordt, en dat de retourstroom versterkt zou worden door eventuele negatieve streaming boven het bed als gevolg van asymmetrische golven en turbulentie. In werkelijkheid kan daarom verwacht worden dat de kustafwaartsgerichte retourstroming onder de meeste condities sterker zal zijn dan de kustwaartsgerichte streaming.

Het effect van de streaming en retourstroming op sedimenttransport is niet direct te herleiden uit de streaming- en retourstroomsnelheden. Omdat de positie van maximale streaming en retourstroming in de verticaal verschillen, is de verdeling van (gesuspendeerd) sediment in de verticaal van belang. Verwacht wordt dat bed-load transport mogelijk netto kustwaarts getransporteerd wordt door streaming, maar dat gesuspendeerd sediment hoger dan ~2–15 mm boven het bed door retourstroming, en eventuele negatieve streaming, kustafwaarts getransporteerd wordt.

E.3 Beddingvormen en transportrichting

E.3.1 Mobiliteitsgetal en transportregimes

Uit de voorgaande analyses blijkt dat sediment vooral door golven in beweging komt. Het golfklimaat is vrij mild, waardoor zandribbels een significante invloed kunnen hebben op de netto transportrichting en dus mede verantwoordelijk kunnen zijn voor het flauwe onderwaterplateau van de pilot. Om een indruk te krijgen van de mogelijke aanwezigheid van deze ribbels, is het non-dimensionale “mobiliteitsgetal” berekend op basis van de golfmetingen ter plekke. Voor enigszins niet-lineaire golven, geeft het mobiliteitsgetal Ψ een indruk van het transportregime. Hier is de definitie volgens *O'Donoghue et al.(2006)* aangehouden, waarbij Ψ wordt berekend op basis van de maximale orbitale snelheid op de bodem ($U_{bed,max}$) onder een golf:

$$\Psi \equiv \frac{U_{bed,max}^2}{\Delta g D_{50}}$$

De formulering van het mobiliteitsgetal is gelimiteerd tot niet brekende golven en veel van de toebehorende kennis is afgeleid uit proeven in golftunnels, waarbij geen verticale versnellingen optreden. Hierdoor kan de echte situatie afwijken van de theorie (*O'Donoghue, 2012*). In de analyses die hier gepresenteerd worden, zijn situaties waarbij golven breken separaat behandeld.

Er worden drie transportregimes van elkaar onderscheiden: (1) Het “vortex ripple” regime (2) een transitie regime en (3) het “sheet flow” regime.

- (1) Het “vortex ripple” regime treedt op voor $\Psi < 190$ en wordt in verband gebracht met het ontstaan van zandribbels die grote invloed hebben op de richting van het sedimenttransport. Het netto transport wordt bepaald door de verhouding tussen suspensietransport van de kust af en bodemtransport naar de kust toe (*Sato & Horikawa, 1986; Ribberink et al., 2008; O'Donoghue, 2012*).

Suspensietransport: Bij passeren van een golftop, ontstaat er een wervel op de lizijde van de ribbel. Sediment wordt opgewoeld tot grofweg drie keer de ribbel hoogte en blijft grotendeels gevangen in de wervel. Bij omkeer van de stroomrichting (onder de golftrog) wordt deze wervel over de ribbel heen verplaatst en afgeremd waardoor een gedeelte van het sediment wordt afgezet. Hetzelfde proces vindt ook in omgekeerde richting plaats, maar door golfnonlineariteit zijn de stroomsnelheden onder de trog lager en de bijbehorende wervel is zodoende kleiner, waardoor het netto suspensietransport uiteindelijk kustafwaarts is gericht. Het mechanisme staat ook wel bekend onder de engelse term “vortex shedding”.

Bodemtransport: Een gedeelte van het sediment komt weliswaar in beweging maar niet in suspensie. Deze deeltjes worden langs de bodem naar de kruin van de ribbel verplaatst en storten vervolgens omlaag. Bij golfnonlineariteit wordt er door de hogere snelheden onder de golfkruin meer zand afgezet op de lee zijde van de ribbel waardoor het netto bodemtransport uiteindelijk kustwaarts gericht.

Naast de hydrodynamica (golfhoogte, golfperiode, non-lineariteit) en waterdiepte, speelt de korrelgrootte van het sediment ook een belangrijke rol in het bepalen van de mate van bodemtransport en suspensietransport. De korrelgrootte speelt een centrale rol in de bepaling van de exacte beddingvorm (2D of 3D ribbels), -grootte (lengte en hoogte van de ribbels) en

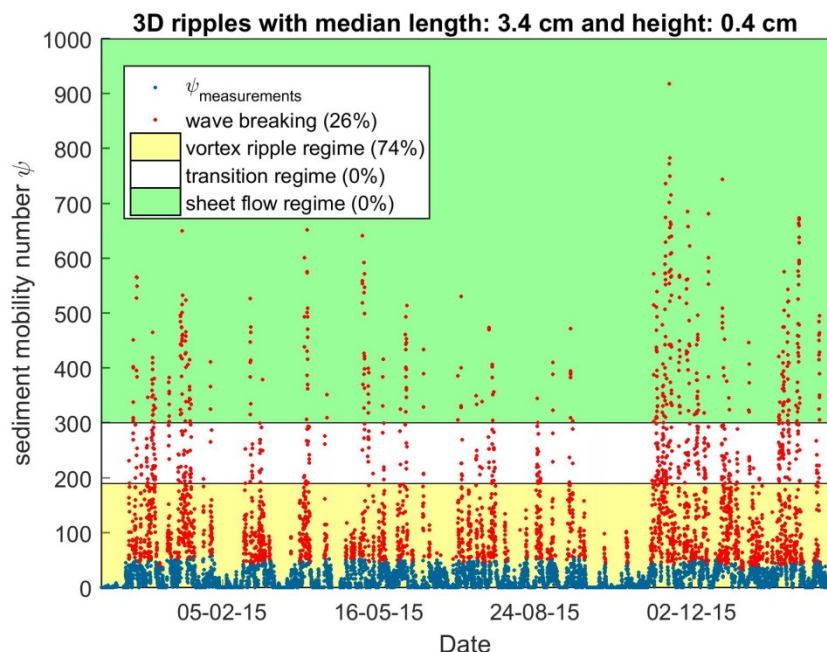
de valsnelheid van de zanddeeltjes. Door de complexiteit van het systeem, zijn de bijbehorende parameters en grenswaarden opgenomen in de bijlage op pagina E-12.

- (2) Tussen $\Psi = 190-300$ ligt een transitie regime van “vortex ripple” naar “sheet flow”.
- (3) Het “sheet flow” regime, $\Psi > 300$, is het meest voorkomend en zorgt over het algemeen voor een vlakke bodem en sedimenttransport naar de kust toe (*Ribberink et al., 2008*).

Het mobiliteitsgetal is berekend voor alle golfmetingen bij de pilot Hourtribdijk en in kaart gebracht in Figuur 7.29, met als randvoorwaarden een plateau diepte van $d_p = \text{NAP} -1$ m en een korreldiameter van $D_{50} = 200 \mu\text{m}$. Aangezien de transportformuleringen niet geldig zijn voor brekende golven (*O'Donoghue, 2012*), worden situaties waarbij de significante golfhoogte $H_s/h > \gamma$ opgenomen in een eigen categorie. Het is onbekend hoe hoog γ is, deze wordt daarom conservatief als $\gamma = 0.5$ aangenomen. Het sediment transportrichting onder brekende golven is in dit model onbekend, maar is waarschijnlijk offshore gericht door sterke retourstroming.

Het blijkt dat 74% van de tijd $\Psi \leq 190$, wat spreekt voor sediment transport gedrag dat sterk wordt bepaald door zandribbels. Bij de overige 26% van de metingen breken de golven, en dus is te stellen dat het transitie regime en het “sheet flow” regime buiten de brandingszone bij de Houtribdijk waarschijnlijk niet optreden. De berekende afmetingen van de ribbels zijn vrij klein met een mediane ribbelhoogte en ribbellengte van respectievelijk 0.4 cm bij 3.4 cm en maxima van 1.6/13 cm.

ψ for $D_{50} = 200 \mu\text{m}$, $d_p = \text{NAP} -1\text{m}$, $\gamma = 0.5$ and hourly measurements of H_s, T_p



Figuur 7.29 Mobiliteitsgetal (Ψ) bij de pilot Houtribdijk voor een plateau diepte van NAP -1 m en $D_{50} = 200 \mu\text{m}$. Het “vortex ripple” regime (geel) een transitie regime (wit) en het “sheet flow” regime (groen) worden aangegeven. Brekende golven (rood) leiden tot een ander transportregime.

In het vervolg wordt een beeld geschetst van de verdeling tussen verschillende transportstadia afhankelijk van de golfhoogte H_s , de diepte van het plateau d_p en als laatste

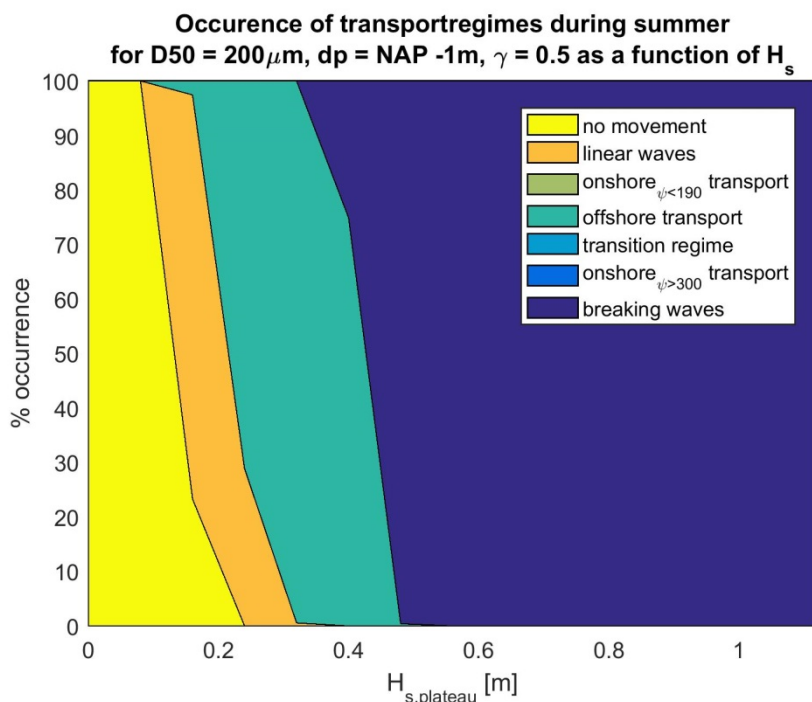
de korreldiameter D_{50} . De volgende transportstadia worden daarbij onderscheiden (transportregimes maken hier een deel van uit en zijn ter verduidelijking cursief gemarkeerd):

- 1 geen transport (“no movement” in Figuur 7.30, Figuur 7.31 en Figuur 7.32);
- 2 lineaire golven (transportrichting: onbekend; “linear waves”);
- 3 “*vortex ripple*” bodem transport (transportrichting: “onshore $\Psi < 190$ transport”);
- 4 “*vortex ripple*” suspensie transport (transportrichting: van de kust af; “offshore transport”);
- 5 “*transitie regime*” (transportrichting: onbekend; “transition regime”);
- 6 “*sheet flow regime*” (transportrichting: naar de kust toe; “onshore $\Psi > 190$ transport”);
- 7 brekende golven (transportrichting: waarschijnlijk van de kust af; “breaking waves”).

E.3.2 Afhankelijkheid transportstadium van H_s

Als eerste is gekeken naar de relatie tussen het transportstadium en de waargenomen golfhoogte op het plateau. Hiervoor zijn een plateaudiepte van $d_p = \text{NAP} - 1$ m en een korreldiameter van $D_{50} = 200 \mu\text{m}$ gehandhaafd. De gemeten tijdseries van golfhoogte, -periode, en waterstand, zoals eerder beschreven in Paragraaf E.1.2, worden gebruikt om de verschillende transportstadia te berekenen.

Voor regime gerelateerd sediment transport (geen stroming of brekende golven), moeten tijdstippen waarop zandkorrels in beweging komen (d.w.z. waar $U_{bed} > U_{bed,cr}$) overeenkomen met tijdstippen waarop golven non-lineair zijn (d.w.z. $r > 0$, zie bijlage op pagina E-11).



Figuur 7.30 Verband tussen de golfhoogte op het plateau ($d_p = \text{NAP} - 1 \text{ m}$) en het te verwachten transportstadium van zand met $D_{50} = 200 \mu\text{m}$. De achterliggende data bevatten uitsluitend metingen gedurende de zomermaanden. De scheidingslijnen zijn nagenoeg verticaal (door de gespreide golfrichtingen niet helemaal) en verduidelijken daarmee dat transportregimes bijna volledig worden bepaald door de golfhoogte en de daaraan gerelateerde golfperiode. Merk op dat niet alle transportstadia in het figuur voorkomen.

Volgens verwachting wordt een transportstadium bijna volledig bepaald door de golfhoogte op het plateau (Figuur 7.30). Voor lage golfhoogtes $H_s \lesssim 0.25 \text{ m}$ komt het sediment niet in beweging (Figuur 7.30, geel) of kan er door de afwezigheid van golf non-lineariteit (Figuur 7.30, oranje) geen uitspraak worden gedaan over de richting van het transport. Voor hogere golfhoogtes ($0.25 \text{ m} \lesssim H_s \lesssim 0.45 \text{ m}$) ontstaan er ribbels ("vortex ripple" regime) en komt het sediment in suspensie om als volgt door werveltjes van de kust af te worden getransporteerd ("vortex shedding") (Figuur 7.30, turquoise). Merk op dat er onder deze golf condities en voor $D_{50} = 200 \mu\text{m}$ geen of verwaarloosbaar "vortex ripple"-bodemtransport naar de kust toe plaatsvindt (Figuur 7.30; groen is niet aanwezig).

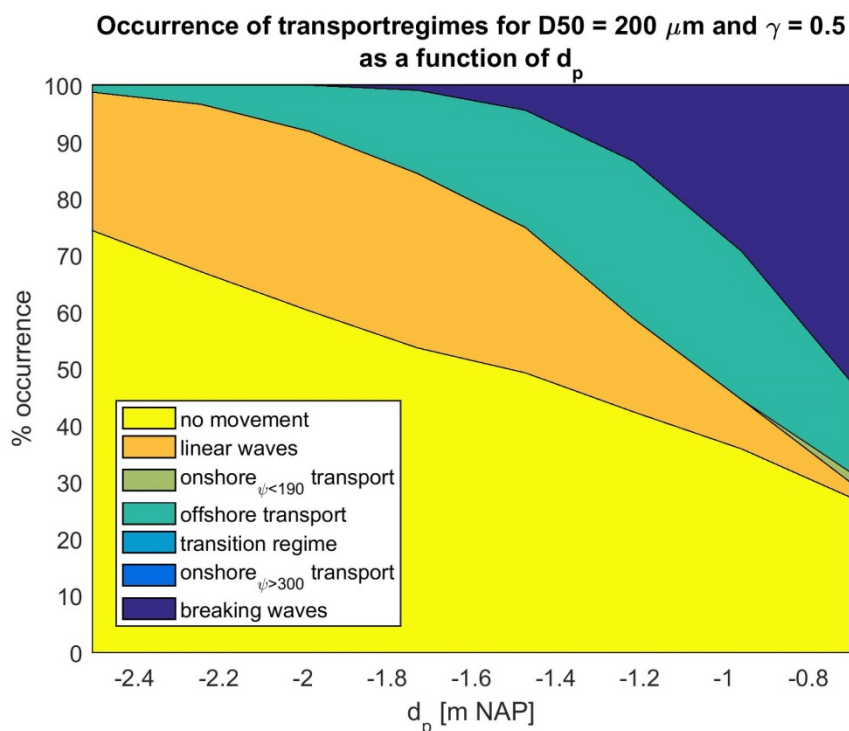
Vanaf $H_s \gtrsim 0.45 \text{ m}$ breken de golven en is de transportrichting onbekend in het vortex-rippel denkmodel, maar waarschijnlijk offshore gericht door sterke retourstroming (Figuur 7.30, donker blauw). Onder aanname dat golven niet breken, zou het "vortex ripple" regime doortrekken tot $H_s \approx 0.8$, wat aanduidt dat de mogelijke aanwezigheid van ribbels in een al deels brekende golf situatie nog steeds voor ribbel gerelateerd suspensietransport van de kust af zorgt. Ook al is de transportrichting in het brekende golfregime onbekend, zal het door de retourstroming waarschijnlijk ook van de kust af gericht zijn. Hetzelfde valt te verwachten voor de situaties waarbij de golven nagenoeg lineair zijn.

Voor specifiek deze analyse is het nuttig geweest om een constante referentiediepte ten opzichte van de golfhoogte te gebruiken. Gezien deze sterk correleren tijdens de zomermaanden, is voor deze analyse alleen gekeken naar de zomermaanden. Net als de wintermaanden bevatten ook de zomermaanden perioden met hoge golven waardoor ook de effecten daarvan kunnen worden meegenomen in de analyse. De inzichten die verkregen zijn

uit deze analyse zijn daarom algemeen toepasbaar voor de gehele tijdserie van metingen. In alle overige analyses is de correlatie tussen golfhoogte en waterdiepte niet meer van belang, en wordt de hele gemeten tijdserie gebruikt.

E.3.3 Afhankelijkheid transportstadium van de (plateau)diepte

De diepteligging van het onderwaterplateau varieert rond $d_p = \text{NAP} - 1$ m (wat overeen komt met een gemiddelde waterdiepte van $h_{avg} \approx 75$ cm), zie Figuur 4.1 b) voor een diepteprofiel. Omdat de golfeigenschappen afhankelijk zijn van de waterdiepte, worden ook de verschillende sedimenttransportmechanismen beïnvloed (zie Figuur 7.31).

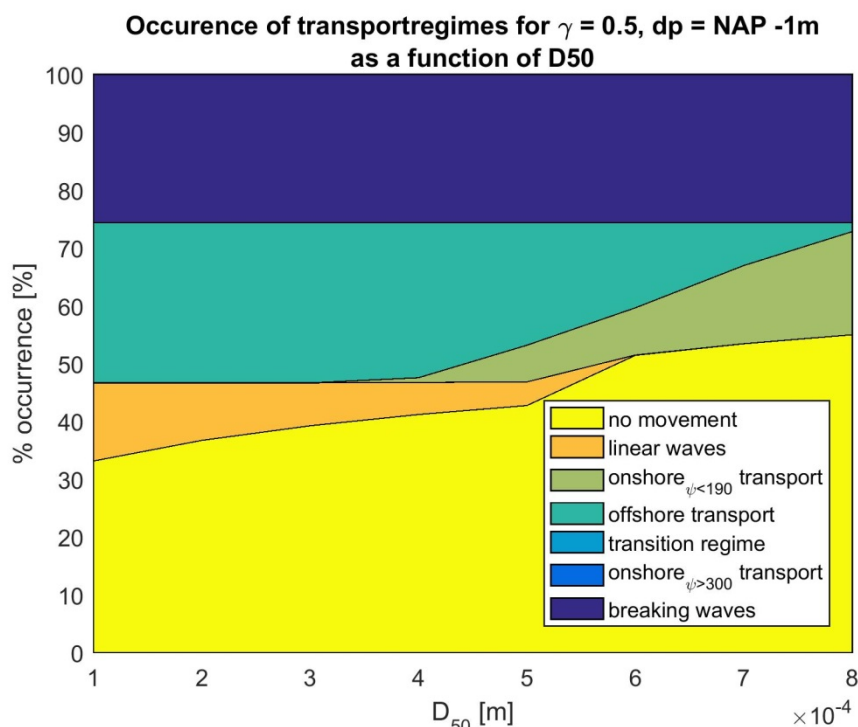


Figuur 7.31 Opgetreden transportstadia in percentages van tijd als functie van variërende plateaudieptes en voor $D_{50} = 200 \mu\text{m}$. Merk op dat niet alle transportstadia in het figuur voorkomen.

Met afnemende waterdiepte, wordt het sediment steeds mobieler door de verhoging van de orbitaalsnelheden bij de bodem. De golven worden ook meer niet-lineair waardoor bij gematigde golfval (zie ook Figuur 7.30) het percentage voorkomen van “vortex ripple” transport van de kust af eerst toeneemt (Figuur 7.31; turquoise) tot ongeveer $d_p \approx \text{NAP} - 1$ m ($h_{avg} \approx 75$ cm), waarna door golfbreking dit transportregime afneemt. De resultaten laten zien dat ongeacht de waterdiepte, (bijna) alleen transport van de kust af te verwachten is, aannemende dat brekende golven door de versterkte retourstroming tot transport van de kust af zullen leiden, en dat het voorkomen van kustafwaartsgerichte transportmechanismen afneemt met de waterdiepte.

E.3.4 Afhankelijkheid transportstadium van de korreldiameter

Gezien grofkorrelig materiaal (schelpen) goed blijft liggen in het Markermeer en zelfs tot lichte sedimentatie kan leiden, zijn de berekeningen op basis van de gegeven golfdata herhaald voor andere D_{50} korreldiameters. Hiervoor is weer een plateaudiepte van $d_p = \text{NAP} - 1$ m gehandhaafd.



Figuur 7.32 Voorkomen van de verschillende sedimenttransportstadia afhankelijk van de korreldiameter D_{50} bij een plateaudiepte van $d_p = \text{NAP} - 1$ m. Merk op dat niet alle transportstadia in het figuur voorkomen.

Naar mate de korreldiameter toeneemt, wordt het sediment minder mobiel en kunnen alleen nog maar hogere en daardoor sterker vervormde golven het sediment in beweging brengen (zie Figuur 7.32). Het kustafwaartse suspensie transport door werveltjes neemt vanaf $D_{50} \approx 400 \mu\text{m}$ af omdat de grovere deeltjes steeds moeilijker worden opgenomen in de ribbelwerveltjes. Onder gematigde golfcondities worden deze zandkorrels daardoor steeds meer langs de bodem verplaatst en wordt het kustwaarts gerichte bodemtransport van het "vortex ripple" regime belangrijk. (Figuur 7.32; groen). Dit mechanisme kan bijdragen aan het scheiden van grove en fijne fracties in een suppletie, door de aanwezige grove fracties (zand, schelpengruis) dicht bij de waterlijn te houden, terwijl fijne fracties door middel van suspensietransport verder offshore getransporteerd worden.

Ten slotte moet opgemerkt worden dat de geldigheid van de onderliggende formules voor $D_{50} > 440 \mu\text{m}$ (*O'Donoghue, 2006*) nooit is onderzocht, waardoor de resultaten voor de grovere korrels in werkelijkheid kunnen verschillen. Desalniettemin is een toename aan bodemtransport te verwachten aangezien de deeltjes steeds minder in suspensie kunnen komen. Dit resultaat komt kwalitatief overeen met het beeld van grofkorrelige schelpenstranden in evenwicht.

E.4 Formules

E.4.1 Sediment transport

1. Amplitude van orbitale snelheid lineaire golf op de bodem

$$U_w = \frac{\pi H_s}{\sqrt{2} T_m \sinh(kh)}$$

2. Ursell nummer volgens *Doering & Bowen (1995)*

$$Ur \equiv \frac{3 H_s k}{4 2(kh)^3}$$

3. Schatting voor B , een maat voor te totale non-lineariteit (*Ruessink et al., 2012*), gedefinieerd als $B \equiv \sqrt{S_u^2 + A_u^2}$, met de skewness S_u en de asymmetrie A_u

$$B = p_1 + \frac{p_2 - p_1}{1 + \exp\left(\frac{p_3 - \log(Ur)}{p_4}\right)}$$

Waar $p_1 = 0$, $p_2 = 0.857$, $p_3 = -0.471$, $p_4 = 0.297$

4. Schatting voor Ψ , de phase (*Ruessink et al., 2012*), gedefinieerd als $\Psi \equiv \tan^{-1}(A_u/S_u)$

$$\Psi = -90^\circ + 90^\circ \tanh\left(\frac{p_5}{Ur^{p_6}}\right)$$

Waar $p_5 = 0.815$, $p_6 = 0.672$

5. Zodoende kunnen de skewness en asymmetrie worden berekend volgens

$$S_u = B \cos(\Psi) \text{ en } A_u = B \sin(\Psi)$$

6. Voor de uiteindelijke bepaling van de orbitale snelheid onder de niet-lineaire golf moeten nog een tweede non-lineariteits factor r en een phase Φ worden berekend volgens *Malarkey & Davies, (2012)*

$$B = \frac{3b}{\sqrt{2(1-b^2)}} \quad \text{met} \quad b = \frac{r}{(1 + \sqrt{1-r^2})}$$

en

$$\Phi = -\Psi - \frac{\pi}{2}$$

7. Tot slot kan analytisch de bodemsnelheid worden bepaald volgens *Abreu et al., (2010)*

$$u(t) = U_w \sqrt{1-r^2} \frac{\sin\left(\frac{2\pi}{T_m} t\right) + \frac{r \sin(\Phi)}{1 + \sqrt{1-r^2}}}{1 - r \cos\left(\frac{2\pi}{T_m} t + \Phi\right)}$$

E.4.2 Transportrichting bij “vortex ripple” regime ($\Psi < 190$)

Het criterium voor de netto transportrichting onder het “vortex ripple” regime is de vortex suspensie parameter P_r (*Ribberink et al., 2008*):

$$P_r \equiv \frac{2\pi\eta}{w_s T}$$

Waarin η de ribbelhoogte is, w_s de valsnelheid en T de golfperiode.

Als $P_r < 0.8$, domineert het kustwaarts gerichte bodemtransport, waartegen voor $P_r \geq 0.8$ het kustafwaarts gerichte suspensietransport belangrijker is.

De hoogte van de ribbel η is afhankelijk van het mobiliteitsgetal Ψ en de vorm van de zandribbels, die afhankelijk van de korrelgrootte geclassificeerd worden als zijnde 2D of 3D (*O'Donoghue et al., 2006*).

$D_{50} \geq 300 \mu\text{m}$ (2D ribbels):

$$\frac{\eta_{2D}}{a} = 0.275 - 0.022 \Psi^{0.42} \quad \text{met} \quad a = \frac{T_p u_{rms}}{\sqrt{2}\pi}$$

$D_{50} \leq 220 \mu\text{m}$ (3D ribbels):

$$\eta_{3D} = 0.55 \eta_{2D}$$

Naast de hoogte van de ribbels is ook hun steilheid belangrijk. Voor transport van de kust af moet een ribbel hoogte/lengte ratio van $\eta/\lambda \geq 0.1$ gewaarborgd zijn, waarbij de ribbellengte λ berekend wordt volgens

$D_{50} \geq 300 \mu\text{m}$ (2D ribbels):

$$\frac{\lambda_{2D}}{a} = 1.97 - 0.44 \Psi^{0.21}$$

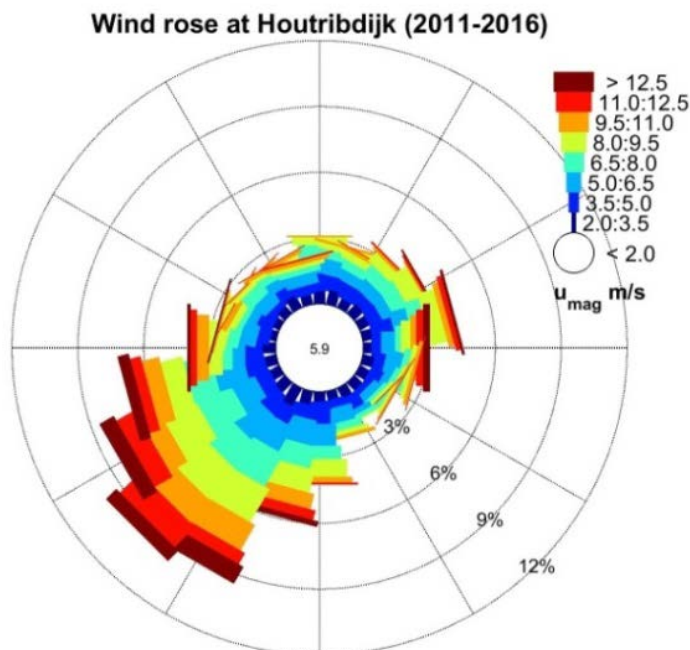
$D_{50} \leq 220 \mu\text{m}$ (3D ribbels):

$$\lambda_{3D} = 0.73 \lambda_{2D}$$

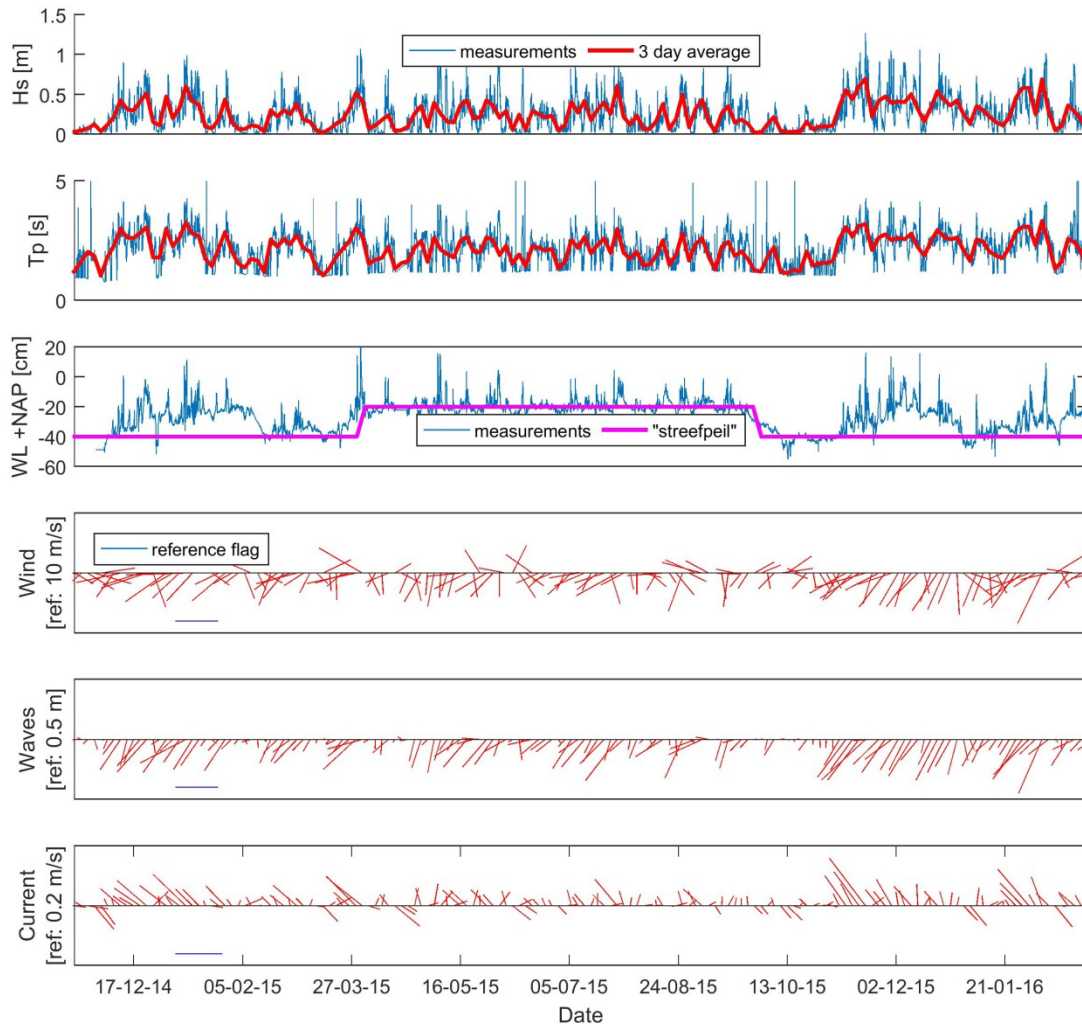
F Beschrijving langjarige hydrodynamische condities HRD

De wind, golf en stromingsgegevens bij de Houtribdijk zijn gevisualiseerd in Figuur 7.33 en Figuur 7.34. Het golfgedrag is direct gecorreleerd aan de windkracht en windrichting waardoor golven voornamelijk uit zuidwestelijke richting komen (Figuur 7.33 en Figuur 7.34, 4-5^{de} paneel). Gemeten golfhoogtes variëren tussen $H_s = 0-1.2$ m en de golfperiodes tussen $T_p = 1-5$ s (Figuur 7.34, 1-2^{de} paneel). Het effect van de streefpeilverlagingen naar NAP-40 cm gedurende de wintermaanden is ook terug te zien in de toebehorende tijdsreeks (Figuur 7.34, 3^{de} paneel), alhoewel door periodes van grotere neerslag in het gebied het waterpeil vaak hoger kan liggen. Buiten het winterseizoen, wanneer het waterpeil minder sterk door neerslag events wordt bepaald, is er een sterke correlatie tussen de golfhoogte en waterstandopzet (Figuur 7.35).

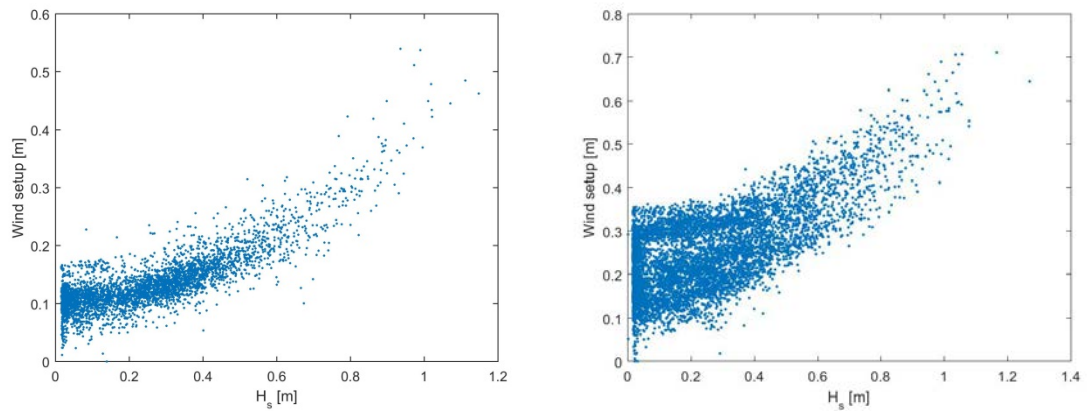
Stroomsnelheden zijn relatief laag: Meer dan 95% van de tijd zijn de snelheden lager dan 0.2 m/s met een gemiddelde van 0.06 m/s. De stroming is voornamelijk naar het noordwesten toe gericht, in langsrichting van de suppletie.



Figuur 7.33 Windroos bij Houtribdijk op basis van data gemeten tussen 2011–2016 (www.Rijkswaterstaat.nl)



Figuur 7.34 Wind en golfgegevens gemeten bij de pilot Houtribdijk. Tijdreeksen van de significante golfhoogte H_s , golfperiode T_p en waterstand worden weergegeven door de bovenste drie panelen. Daarnaast zijn ook de wind, golf en stromingsrichtingen gevisualiseerd door middel van vlaggetjes (richting waar wind, golf en stroming vandaan komen), gemiddelde over 3 dagen. De lengte van de vlaggetjes geeft een indruk van de grootte, waarbij de bijgevoegde (horizontale) blauwe streepjes als referentie kunnen worden gebruikt met waarden zoals aangegeven langs de verticale as.



Figuur 7.35 Relatie tussen windopzet en inkomende golfhoogte voor de zomermaanden (mei–september; links) en wintermaanden (oktober–april; rechts) van de gemeten periode.

G Simulatie morfologische ontwikkeling ingreep januari 2018

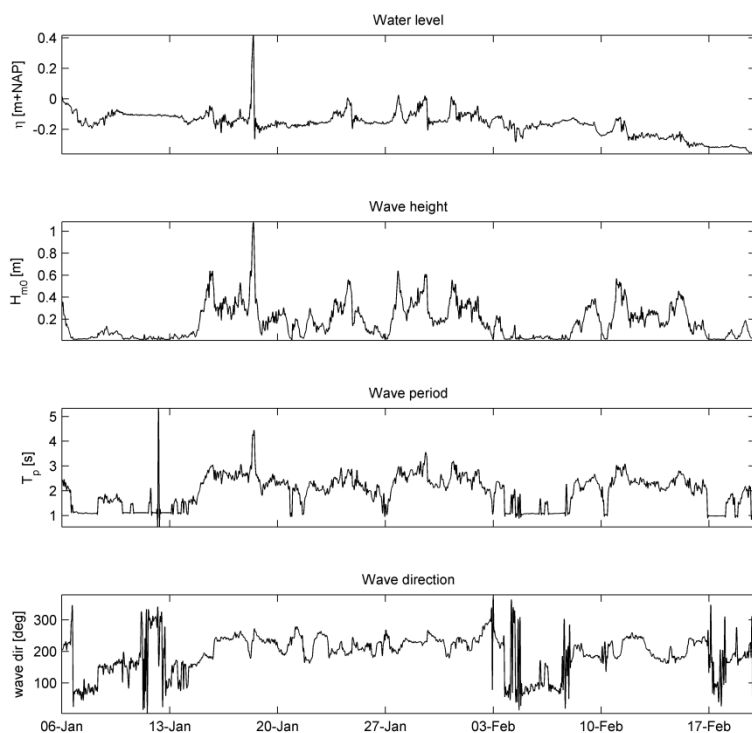
G.1 Inleiding

In Hoofdstuk 5 is het XBeach model met nieuwe morfologische modules ontwikkeld en getest op basis van de simulatie van één storm in 2DH modus (korte termijn tijdschaal), en de simulatie van 15 maanden in 1D modus (middellange termijn tijdschaal). De resultaten van de analyse in Hoofdstuk 5 laten zien dat het model redelijk in staat is om de geobserveerde morfologische ontwikkeling op het pilotstrand na te bootsen.

Door de benodigde rekentijd is het niet mogelijk geweest om het model voor de periode tussen T3 en T11 (15 maanden, middellange termijn tijdschaal) in 2DH modus te simuleren. Om te kunnen verifiëren dat de ontwikkelde morfologische modules de geobserveerde morfologische ontwikkelingen op tijdschalen groter van stormen in 2DH modus ook na kunnen bootsen, is een 2DH XBeach simulatie uitgevoerd voor de periode tussen T21 (6 januari 2018) en T22 (20 februari 2018). Deze meetperiode is aansluitend op de uitgevoerde ingreep (plaatselijke verlaging) in het plateau, waardoor een duidelijk signaal zichtbaar is in de gemeten morfologische ontwikkeling van het plateau en strand. In deze periode zijn zowel energetische, als kalme golfcondities voorgekomen.

G.2 Model opzet en randvoorwaarden

Het model is op een gelijke manier opgezet als het model beschreven in Paragraaf 5.4. Hierbij is in plaats van de morfologische meting op T17, de meting van T21 gebruikt als initiële bodem. Evenals beschreven in Paragraaf 5.4, is het model geforceerd met tijdseries van golfcondities en watertanden die gemeten zijn bij de offshore ADV en (zie Figuur 7.36). De modelinstelling voor de simulatie zijn gelijk aan die van Simulatie 3 in Paragraaf 5.4, waarbij zowel swash processen, als het effect van vortex-ripple interactie en golfasymmetrie meegenomen is.

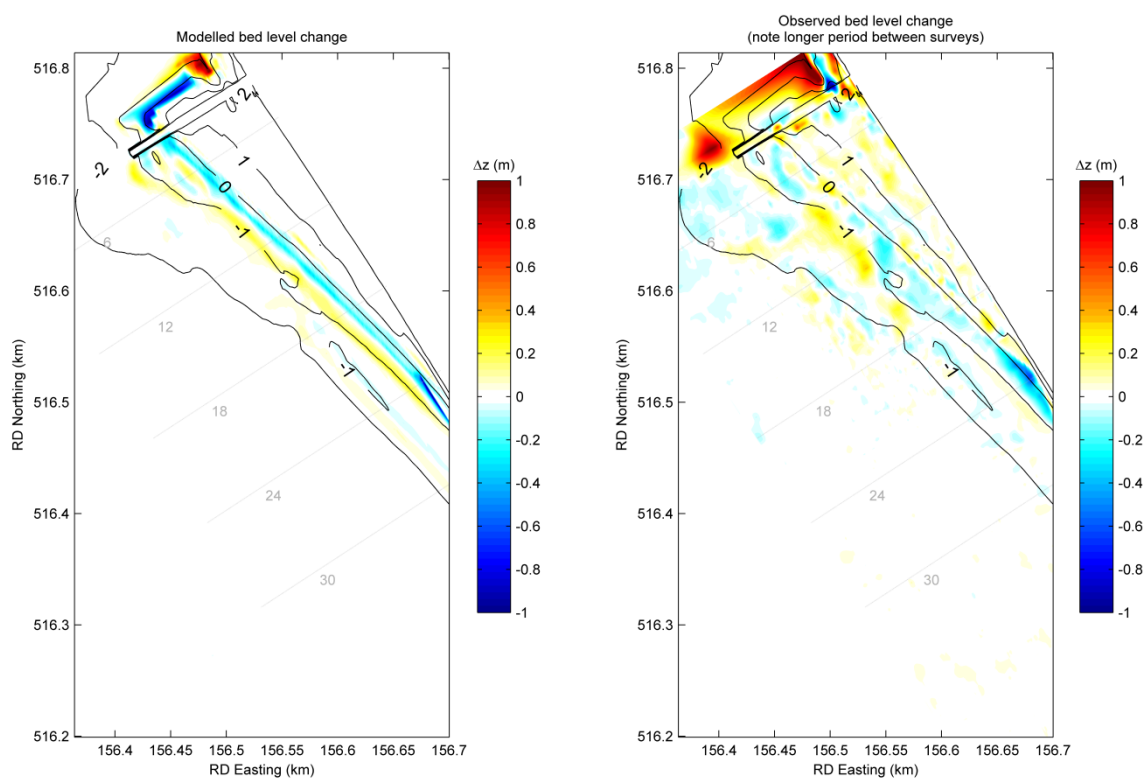


Figuur 7.36 Randvoorwaarden XBeach model januari 2018

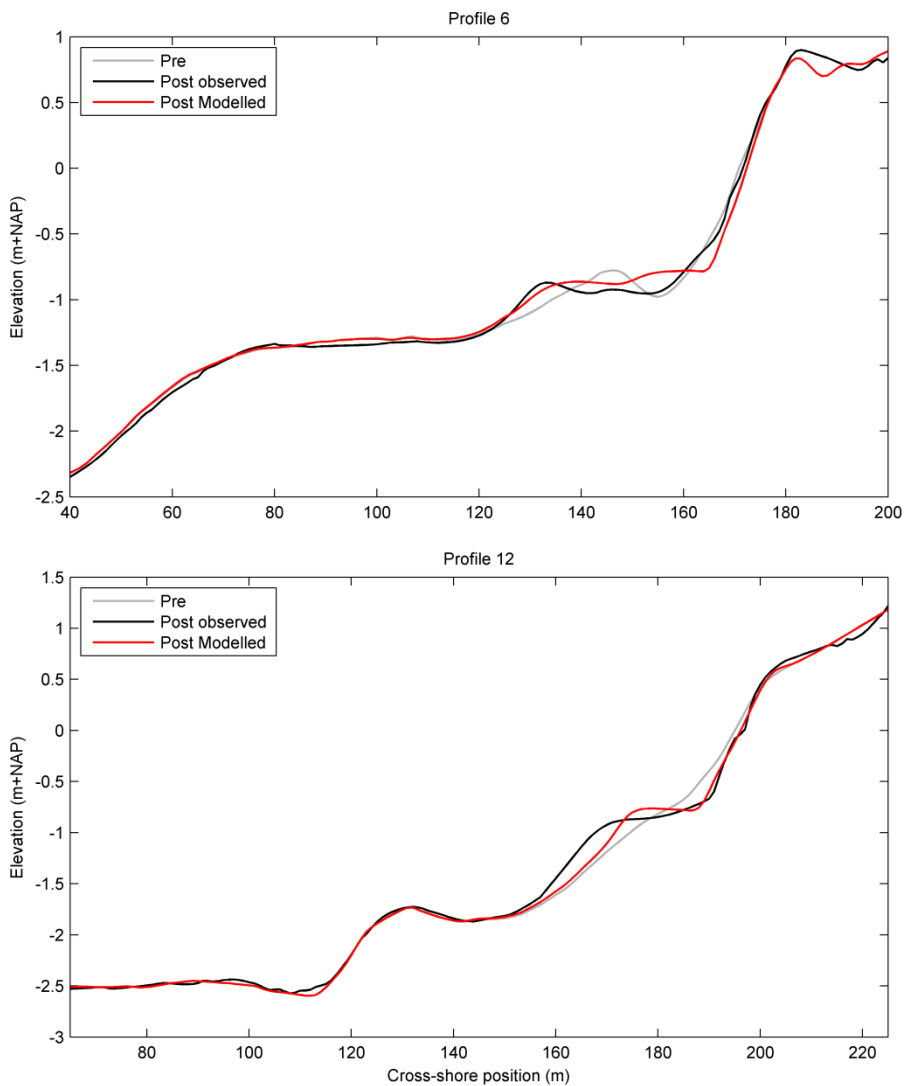
G.3 Resultaten

De gesimuleerde en geobserveerde bodemverandering voor de periode tussen T21 en T22 zijn weergegeven in Figuur 7.37. Het figuur laat in de observaties een patroon van erosie zien tussen de NAP - 1 m en NAP + 0 m contourlijnen, en depositie offshore van de NAP - 1 m contourlijn ter plekke van de ingreep (156,50 km oost, 516,65 km noord; ter plaatse van raai 12). Daarnaast is een afwisselend patroon van erosie en sedimentatie te zien rondom de NAP - 2 m contourlijn (waarschijnlijk door grootschalige stromingsprocessen) en boven de NAP + 0 m contourlijn (door swash en eolische processen). Het figuur laat zien dat het model een deel van de morfologische ontwikkeling goed kan reproduceren. Het model laat erosie zien tussen de NAP - 1 m en NAP + 0 m contourlijnen, en depositie offshore van de NAP - 1 m contourlijn ter plekke van de ingreep. In het model ontbreekt echter de morfologische ontwikkeling op dieper (NAP - 1–2 m) water, en op hoogtes boven circa NAP + 0,2 m (vanwege het ontbreken van eolische processen in het model).

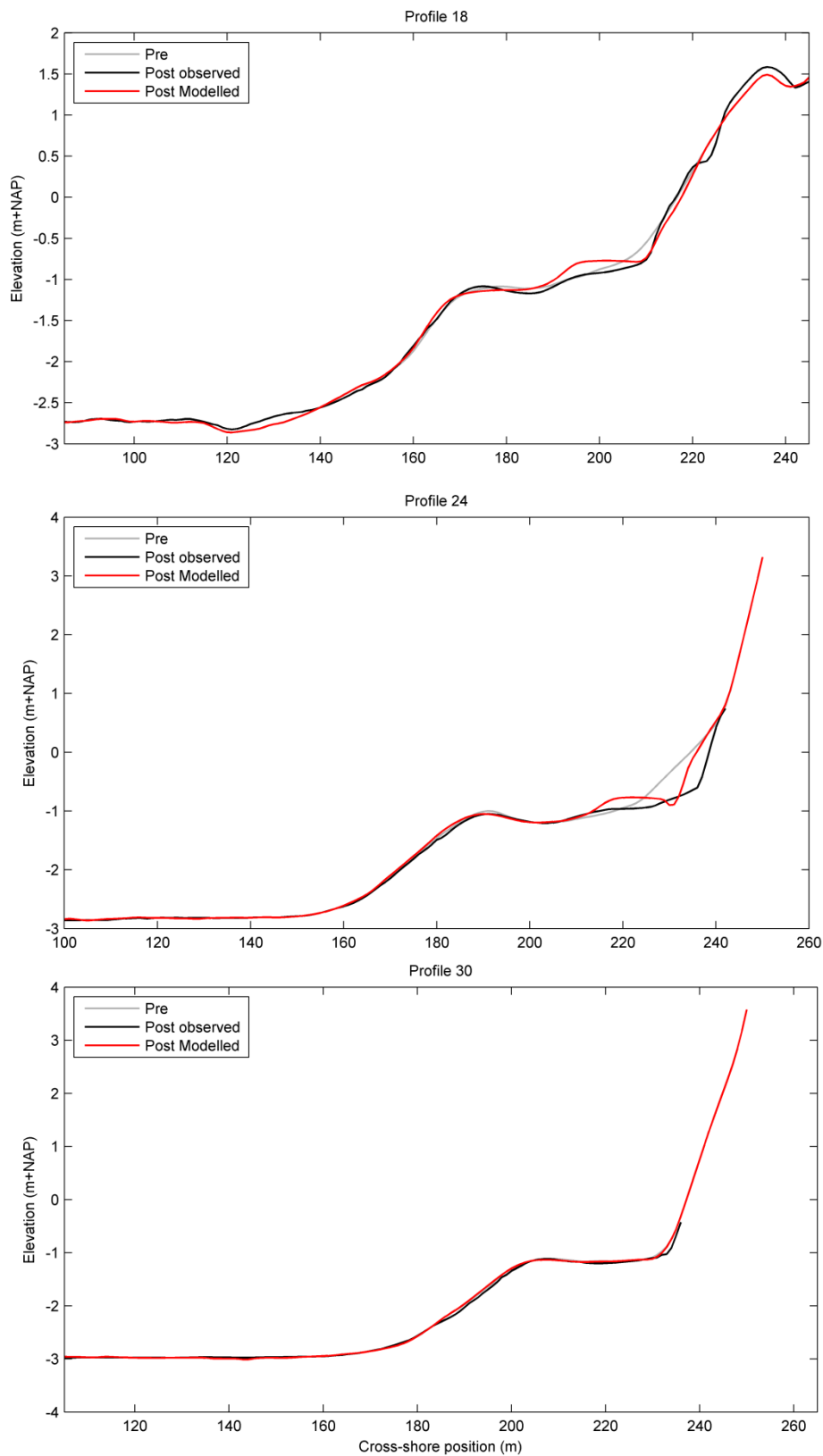
De morfologische ontwikkeling op vijf dwarsraaien, waarvan de locaties in Figuur 7.37 zijn weergegeven, is geplot in Figuur 7.38 en Figuur 7.39. Deze figuren laten zien dat het model in staat is om de algemene morfologische ontwikkeling op het pilotstrand te reproduceren. De erosie aan de waterlijn in raaien 12, 18 en 24 wordt redelijk goed voorspeld, en in raai 12 vindt sedimentatie plaats op de locatie van de afgraving van het plateau. De sedimentatie in raai 12 wordt echter door het model wat onderschat, waardoor er in het model meer sedimentatie plaatsvindt in raai 6 dan in de observaties.



Figuur 7.37 Gesimuleerde bodemverandering gedurende januari in het XBeach model 1 (links) en de gemeten bodemverandering tussen T21 en T22 (rechts). Vijf dwarsraaien (6, 12, 18, 24, 30) staan in grijs aangegeven en worden als dwarsprofiel in Figuur 7.38 en Figuur 7.39 weergegeven.



Figuur 7.38 Dwarsprofielen 6 en 12 aan het eind van de XBeach simulatie (rood), de gemeten profielen op T21 (grijs), en gemeten profielen op T22 (zwart). De locatie van de profielen is weergegeven in Figuur 7.37.



Figuur 7.39 Dwarsprofielen 18, 24 en 30 aan het eind van de XBeach simulatie (rood), de gemeten profielen op T21 (grijs), en gemeten profielen op T22 (zwart). De locatie van de profielen is weergegeven in Figuur 5.9.

G.4 Conclusies

Het XBeach model is met gebruik van de morfologische modules beschreven in Hoofdstuk 5 gebruikt om een periode van één maand in 2DH modus te simuleren. In deze periode laten de metingen een duidelijk morfologische respons zien op een kunstmatige ingreep (plaatselijke verlaging van het plateau). De resultaten van deze studie laten zien dat het XBeach model in staat is om over een periode van een maand, met zowel energetische, als kalme golfcondities, de karakteristieke morfologische ontwikkeling van het pilotstrand redelijk goed te kunnen simuleren.