



Pilot zandige vooroever Houtribdijk

Hoofdrapportage



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat



Contact

Spuiboulevard 210,
3311 GR Dordrecht
+31 78 6111 099
info@ecoshape.nl
www.ecoshape.nl

Managementsamenvatting

In de periode van 2014 tot 2018 is een pilot uitgevoerd voor een zandige versterking van de Houtribdijk. In 2013 was al onderzocht of de benodigde versterking van de Houtribdijk gedeeltelijk met zand zou kunnen in plaats van met breuksteen. De kennis over de werking van zandige voorlanden in een meeromgeving bleek echter nog te beperkt voor goede besluitvorming, in tegenstelling tot beschikbare kennis over voorlanden aan de kust. Rijkswaterstaat en Stichting EcoShape formuleerden daarom samen een onderzoeksvoorstel om via een pilot deze kennis te vergroten. Het doel van de pilot was kennis te ontwikkelen over de toepassing van zandige versterkingen voor dijken met milde golfcondities. Met deze kennis zou het ontwerp en uitvoering van waterkeringen in een meeromgeving goedkoper kunnen.

De volgende vragen zijn onderzocht:

- Wat zijn mogelijke optimalisaties van de aanleg?
- Hoe moet dit type zandige oplossingen worden getoetst?
- Hoe ziet de beheer- en onderhoudsfase eruit en wat zijn daarvan de kosten?

Onderzoeksopzet en financiering

De pilot is bestond uit een voorland van zand aan de zuidkant van de Houtribdijk, ter hoogte van Trintelhaven. Het ontwerp van de driehoekige proefsectie was 400 meter lang en 150 meter breed en werd aan de noordkant begrensd door de Houtribdijk en aan de westzijde door een damwandconstructie die loodrecht op de dijk was aangebracht. De waterlijn van het zandpakket lag loodrecht op de gemiddelde golfvalsrichting van het Markermeer. Om de ontwikkeling van vegetatie onder verschillende omstandigheden te onderzoeken werd in een deel van de proefsectie klei (holoceen materiaal) door de toplaag gemengd. Het voorland is vier jaar gemonitord. In totaal zijn 23 inmetingen uitgevoerd. De monitoring startte in september 2014. De laatste inmeting vond op 20 maart 2018. De pilot is gefinancierd uit het HWBP-innovatiebudget (€ 3,7 miljoen) en door EcoShape (€0,7 miljoen). EcoShape partners Arcadis, Deltares, Wageningen Environmental Research, Royal Haskoning DHV en HKV voerden de pilot uit in opdracht van het HWBP van Rijkswaterstaat.

Ontwikkeling van de vegetatie

Een belangrijk onderdeel van de pilot bestond uit onderzoek naar vegetatie op het voorland. Vegetatie op voorlanden heeft in veel gevallen een golfremmende werking. Bovendien beperkt vegetatie de erosie en gaat het stuifoverlast tegen. Een van de deelvragen ging daarom over het beheer en onderhoud en de golfremmende werking van deze vegetatie. Binnen de proefsectie is een aantal vakken gedefinieerd waarbinnen verschillende combinaties van vegetatie en ondergrond zijn onderzocht. De vakken verschilden in aanplant van vegetatie (wel of geen aanplant), bescherming tegen foeragerende vogels en het mengen van holoceen materiaal (klei) door de toplaag. Een belangrijke conclusie is dat het inmengen van holoceen materiaal, zeker in het beginstadium, een groot positief effect heeft op de groei van de vegetatie. Foeragerende vogels hebben een duidelijk negatief effect op de beplanting.

Het onderzoek naar golfremmende werking van rietvegetatie rond de oeverlijn bleek lastig: de golfwerking was te sterk voor het aangebrachte riet waardoor deze niet goed aansloeg. Verschillende pogingen bleken weinig succesvol. Deze ervaring sluit aan bij de elders opgedane inzichten dat rietvegetatie nauwelijks bestand is tegen golven hoger dan grofweg 20 cm.

Ontwikkeling zandvolume en profielvorm

De hoeveelheid zand is vrijwel nagenoeg gelijk gebleven ondanks de soms zware stormomstandigheden met golven tot 1,2 m hoog. Dit geldt zowel voor de gehele proefsectie als voor het loodrecht op de oeverlijn liggende dwarsprofiel. Een stabiele zandige oplossing in een meeromgeving is dus daadwerkelijk mogelijk.

De vorm van de pilot is gedurende de looptijd van de pilot wél veranderd. Het dwarsprofiel heeft zich ontwikkeld in een lager gelegen vooroever en een steiler deel rond de waterlijn. Het steilere, hoger gelegen deel (dwarshelling ongeveer 1 : 10) beweegt mee met de heersende golfvalsrichtingen. Een periode met bijvoorbeeld meer zuidoostelijke windrichtingen leidde tot een draaiing van de het hoger gelegen deel met de klok mee en een aangroei van de kustlijn ter plaatse van de damwandconstructie. De buitencontour van het lagere deel van het profiel (beneden NAP-1 m) vertoont dit gedrag niet. Dit nam de vorm aan van een plateau.

Functie en werking plateau

Op grond van de waarnemingen bleek het nog niet goed mogelijk de functie en werking van dit plateau goed te verklaren. Medio 2017 is besloten om een deel van het resterende projectbudget te gebruiken om dit te onderzoeken. Dit aanvullende onderzoek bestond uit twee onderdelen, namelijk:

- Fysische metingen op het plateau zoals golfhoogten en stroomsnelheden
- Het monitoren van het effect van een lokale afgraving van het plateau, om de werking van het plateau te onderzoeken.

De analyse van de fysische metingen van het plateau leverde aanvullende inzichten op over het verloop van de hydraulische condities over het plateau. Dit heeft bijgedragen aan een betere validatie van het morfologisch model XBeach. Een belangrijk resultaat is ook dat er een rekenmodule aan dit model is toegevoegd waarmee de steile profielvorm rond de waterlijn veel beter reproduceerbaar is. Een andere conclusie is dat de huidige versie van het rekenmodel een (te) beperkte gevoeligheid laat zien voor de effecten van de korreldiameter.

De monitoring van de lokale afgraving leverde inzichten op over de werking van het plateau. De hypothese was dat indien het plateau een beschermende werking zou hebben voor het deel rond de waterlijn, het gedeeltelijk afgraven van dit plateau hier vrijwel direct zou leiden lokale erosie. Uit de waarnemingen blijkt echter dat de afgraving geen grote impact had op het gedeelte rond de waterlijn. De opvulling van het aangebrachte 'gat' vond namelijk vooral aan de beide zijanten plaats als gevolg van stroming langs de pilot (langstransport), en niet vanuit het hoger gelegen deel (dwarstransport). Conclusie is dus dat het plateau geen duidelijke beschermende werking heeft op het hoger gelegen deel van het voorland..

Vorming van het plateau

De vorming van het brede plateau lijkt tenminste voor een deel samen te hangen met de specifieke vormgeving van de proefsectie, namelijk de aanwezigheid van damwand en dijk. Dit is af te leiden uit het feit dat er gedurende de onderzoeksperiode sprake was van extreme hydraulische condities met de hoogste windsnelheid, de hoogste waterstand en golfhoogten tot ruim 1 m en er zelfs toen geen significant effect op de waterlijn aanwezig was.

Verskil tussen meer en open kust

De aanwezigheid van de karakteristieke profielvorm met een steil profiel rond de waterlijn en een vrijwel horizontaal plateau onder water is het meest markante verschil met de situatie aan de kust. De oorzaak is dat er in een meer geen getij aanwezig is. Wel is er in een meer een sterke samenhang tussen waterstand en golfhoogte. De wind zorgt namelijk zowel voor het opstuwen van de waterstand als voor de inkomende golfaanval. Een zwaardere golfaanval gaat samen met een hogere waterstand. Het niveau van het vlakke plateau lijkt samen te vallen met het niveau waarop de golven effectief kunnen aangrijpen bij verschillende combinaties van opzet van de waterstand en golfhoogten.

Resultaten en conclusies van de pilot

De belangrijkste conclusies zijn van de pilot zijn:

Vegetatie

- Zware golfslag belemmert de groei van vegetatie langs de waterlijn
- Bijmengen van klei door het zand heeft in het begin een positief effect op de vegetatiegroei
- Foeragerende vogels hebben een negatief effect op de vegetatieontwikkeling

Morfologie

- Het voorland blijft goed liggen en er is weinig zandverlies
- Voor het voorland (meerzijde) heeft zich onverwacht een plateau gevormd.
- Dit plateau heeft echter geen duidelijke beschermende werking voor het voorland
- Het model XBeach is gevalideerd en uitgebreid op basis van de gegevens over vorming van het plateau
- De damwand en dijk hebben als opsluitconstructie effect gehad op de vorm van het zandpakket en de vorm van het plateau.

Lessons Learned en Guidelines

Een van de doelen van de pilot was om ontwerprichtlijnen (guidelines) te maken voor toekomstige zandige voorlanden en de geleerde lessen vast te leggen. Er zijn guideline en lessons learned documenten over vergunningen en aanleg en er zijn guidelines voor beheer en onderhoud en ontwerp van dijk-voorlandsystemen. Ook is er een document business case met mogelijke andere locaties voor zandige voorlanden. De documenten zijn vrij beschikbaar op de website van EcoShape. De belangrijkste punten uit deze documenten zijn:

Vergunningen

- Snelste manier om in een Natura2000 gebied de benodigde vergunningen te krijgen (Lessons learned)
- Eisen vanuit vergunningverlening en hoe deze toe te passen in het ontwerp (Guideline)

Aanleg

- Ervaringen tijdens aanleg en analyse van de opgetreden zettingen en zandverliezen. (Lessons learned)
- De mate waarin het ontwerp qua geometrie daadwerkelijk is gerealiseerd. (Lessons learned)
- Leidraad voor kosteneffectieve aanleg van grootschaligere voorlandoplossingen (Guideline)

Ontwerp en beoordeling dijk-voorlandsystemen

- Een overzicht van de technische belemmeringen om het ontwerp te beoordelen?
Deze komen voort uit het gebrek aan concrete rekenregels. Het document bevat daarom ook:
- Aanzet voor ontwikkeling van concrete rekenregels voor ontwerp van zandige voorlanden
- Handvatten voor ontwerp en beoordeling van voorlandoplossingen voor (bestaande) dijken.
- Handvatten voor de integrale beoordeling van de veiligheid van de hybride waterkeringen

Beheer en onderhoud

- De standzekerheid bij een zandig voorland is deels afhankelijk van de keuzes die al in het ontwerp stadium worden gemaakt. Dit komt doordat ook profielvorm en bodemopbouw onderdeel zijn van het ontwerp. Dit heeft grote invloed op de morfologische ontwikkeling van het voorland zelf en op de vegetatieontwikkeling.
- Slimme keuzes in de ontwerpfasen maken het mogelijk om te sturen op de uiteindelijke veldsituatie en het benodigde beheer en onderhoud.

Het document Business-Case bevat tot slot een verkenning van mogelijkheden voor de aanleg van een voorlandoplossing op andere type locaties.

Bijdrage aan andere projecten

Een van de hoofddoelstellingen van de pilot was gericht op het toepassen van de resultaten in zowel lopende als komende HWBP-projecten. De kennis uit de pilot is inmiddels toegepast bij de dimensionering van de zandige versterking van de Houtribdijk en de zandige buitenranden van de Marker Wadden. Verder zijn de inzichten ook toegepast bij de versterking van de Markermeerdijken tussen Hoorn en Edam, de zogenaamde oeverdijk. De pilot heeft dus al tijdens de uitvoering bijgedragen aan projecten in en om het Markermeer.

Beschikbaarheid ingewonnen data

Alle data die tijdens de looptijd van de pilot is ingewonnen is beschikbaar. Ook de onderliggende technische rapportages zijn openbaar. Deze datasets hebben een zogenaamde DOI en blijven gegarandeerd (minimaal) 15 jaar bewaard en ontsloten.

Nog openstaande vragen

Het merendeel van de onderzoeksvragen uit de pilot is beantwoord. Vragen die nog openstaan zijn:

- Hoe beschermt vegetatie het voorland tegen golfwerking? Beantwoording van deze vraag was niet mogelijk omdat deze golfwerking op de pilotlocatie te zwaar was.
- Wat zijn de mogelijkheden van het grootschalig gebruik van holoceen materiaal in het voorland? Beantwoording van deze vraag was niet mogelijk omdat de schaal van de pilot te klein was om holoceen materiaal als kernmateriaal te gebruiken. Als doormenging in de toplaag kan natuurlijk wel.
- Hoe ontwikkelt de aangeplante en spontane vegetatie zich op het zandige voorland? Beantwoording was niet mogelijk vanwege de beperkte duur van de pilot (drie groeiseizoenen).

De aanbeveling is om het antwoord deze vragen alsnog te onderzoeken binnen de twee lopende versterkingsprojecten Markermeerdijk en Houtribdijk.

Nieuwe vragen en vervolgonderzoek

De resultaten van de pilot geven richting aan vervolgonderzoek naar de morfologische verschillen tussen zandige voorlanden aan de kust en de meeromgeving. Met name interessant zijn:

- Effecten van windopzet en golfhoogte op de morfologische ontwikkelingen. Met de projecten Houtribdijk en Marker Wadden en een aantal andere locaties is contact over de het inwinnen van gegevens over profielmetingen in combinatie met waterstanden en golfhoogten. Dit gebeurt binnen het Kennis- en Innovatieprogramma voor de Markerwadden en de Living Labs. Op de versterking van de Markermeerdijk komen in een later stadium ook drie locaties voor gegevensinwinning. De combinatie van windopzet en golfhoogte verschilt naar verwachting op elk van de onderzoekslocaties, wat leidt tot een ander niveau van het plateau.
- Nader onderzoek naar het effect van de opsluitconstructie van damwand en dijk, door andere locaties te onderzoeken zonder deze constructie.

Deze vervolgvragen geven invulling aan een van de pijlers van het door ENW opgestelde 'Beter leren kernen'-voorstel, waarbij de monitoring over de projecten heen wordt ingericht. Beantwoording van kennisvragen gebeurt daardoor efficiënter en effectiever.

Inhoudsopgave

Managementsamenvatting	3
Inhoudsopgave	8
Overzicht figuren	17
Overzicht tabellen	25
1 Inleiding	27
1.1 Algemeen	27
1.2 Doelstelling van de pilot	28
1.3 Inrichting activiteiten	28
1.4 Opzet rapportage en leeswijzer	29
1.4.1 Inleiding	29
1.4.2 Algemeen deel in hoofdttekst	29
1.4.3 Basisrapporten in annexen	32
1.4.4 Guidelines in bijlagen	34
1.5 Totstandkoming en verantwoording	35
1.6 Samenvatting en conclusies	36
2 Voorlandoplossingen	39
2.1 Inleiding	39
2.2 Typering van voorlandoplossingen	39
2.2.1 Inleiding	39
2.2.2 Types voorlandoplossingen in relatie tot rol van de dijk	39
2.2.3 Volledig zandige oplossingen	41
2.2.4 Dijk als grensprofiel	41
2.2.5 Hybride keringen (inclusief dijk-in-duin-oplossing)	42
2.2.6 Duin-in-dijk-oplossing	42
2.2.7 Overzicht typen voorlandoplossingen en implicaties	43
2.3 Rol van vegetatie binnen voorlandoplossingen	43
2.3.1 Inleiding	43
2.3.2 Categorieën bijdragen	43
2.3.3 Bijdrage aan natuurwaarde	44
2.3.4 Indirecte bijdrage	44
2.3.5 Directe bijdrage	44
2.4 Ontwerp van zandige versterkingen	45
2.4.1 Inleiding	45
2.4.2 Huidige ontwerpmethodiek	45
2.4.2.1 Basisprincipe	45
2.4.2.2 Daadwerkelijk versus verwacht benodigd veiligheidsniveau	46

2.4.2.3	Toepassing huidige methodiek bij erosief kustvak	46
2.4.3	Alternatieve methode	47
2.4.3.1	Geleidelijke versterking	47
2.4.3.2	Toepassing alternatieve methode bij erosief kustvak	48
2.4.4	Mogelijke optimalisaties	48
2.4.4.1	Stimulering van natuurlijke aangroei (geometrie)	48
2.4.4.2	Inzet vegetatie ter stimulering van volumetoename (indirect effect) ..	49
2.4.4.3	Gebruik van vegetatie ter vergroting van de veiligheid (direct effect) ..	49
2.5	Relatie met andere projecten en onderzoek	50
2.5.1	BwN/EcoShape-projecten	50
2.5.1.1	Overzicht	50
2.5.1.2	Zandmotor	50
2.5.1.3	BE SAFE	51
2.5.1.4	HPZ Innovatieproject	52
2.5.2	Versterkingsprojecten.....	53
2.5.2.1	Overzicht.....	53
2.5.2.2	Realisatie Marker Wadden (zachte randen)	53
2.5.2.3	Versterking Markermeerdijken (oeverdijktrajecten)	54
2.5.2.4	Versterking Houtribdijk (deel zandige versterking)	54
2.5.2.5	Aanleg Prins Hendrikzanddijk	55
2.5.3	Onderzoeksprojecten.....	55
2.5.3.1	Overzicht.....	55
2.5.3.2	POV-Waddenzeedijken (Voorlanden)	55
2.5.3.3	Definitie onderzoeksplannen WTI2023 (Voorlanden)	55
3	Koppeling met onderzoeksvragen.....	56
3.1	Inleiding.....	56
3.2	Onderzoeksthema's en vragen.....	56
3.3	Producten gekoppeld aan doelen	57
3.4	Productcategorieën.....	58
4	Monitoringsprogramma.....	61
4.1	Inleiding.....	61
4.2	Voortgang en resultaten (WP3).....	61
4.3	Input voor nadere analyses (WP4)	61
5	Basisinfo hydro/meteo	63
5.1	Inleiding.....	63
5.2	Gebruikte informatie in overdrachtstabel	63
5.3	Basisanalyses meetresultaten	64
5.3.1	Wind	64
5.3.2	Waterstand.....	65
5.3.3	Golfhoogte	68
5.3.4	Golfperiode.....	73
5.3.5	Golfrichting.....	74
5.3.6	Langsstromsnelheid	76
5.4	Opvullen van gaten in tijdreeks.....	79

5.5	Karakteristieke condities per meetinterval.....	80
5.5.1	Inleiding.....	80
5.5.2	Algemene karakteristieken.....	81
5.5.3	Meetinterval T1-T2 (18-9-14 tot 25-10-14).....	82
5.5.4	Meetinterval T2-T3 (25-10-14 tot 19-11-14).....	83
5.5.5	Meetinterval T3-T4 (19-11-14 tot 28-12-14).....	84
5.5.6	Meetinterval T4-T5 (28-12-14 tot 23-01-15).....	85
5.5.7	Meetinterval T5-T6 (23-01-15 tot 15-02-15).....	86
5.5.8	Meetinterval T6-T7 (15-02-15 tot 18-03-15).....	87
5.5.9	Meetinterval T7-T8 (18-03-15 tot 06-04-15).....	88
5.5.10	Meetinterval T8-T9 (06-04-15 tot 21-08-15).....	89
5.5.11	Meetinterval T9-T10 (21-08-15 tot 15-01-16).....	90
5.5.12	Meetinterval T10-T11 (15-01-16 tot 28-02-16).....	91
5.5.13	Meetinterval T11-T12 (28-02-16 tot 27-05-16).....	92
5.5.14	Meetinterval T12-T13 (27-05-16 tot 23-08-16).....	93
5.5.15	Meetinterval T13-T14 (23-08-16 tot 23-11-16).....	93
5.5.16	Meetinterval T14-T15 (23-11-16 tot 06-03-17).....	94
5.5.17	Meetinterval T15-T16 (06-03-17 tot 17-05-17).....	95
5.5.18	Meetinterval T16-T17 (17-05-17 tot 31-08-17).....	96
5.5.19	Meetinterval T17-T18 (01-09-17 tot 09-10-17; Eerste fase extra metingen).....	97
5.5.20	Meetinterval T18-T19 (10-10-17 tot 30-11-17; Tweede fase extra metingen).....	98
5.5.21	Meetinterval T19-T20 (01-12-17 tot 19-12-17; Tijdens uitvoering ingraving).....	99
5.5.22	Meetinterval T20-T21 (20-12-17 tot 05-01-18; Eerste fase na afgraving).....	100
5.5.23	Meetinterval T21-T22 (06-01-18 tot 20-02-2018).....	101
5.5.24	Meetinterval T22-T23 (20-02-2018 tot 20-03-2018; laatste periode).....	102
6	Basisinfo bodemligging.....	103
6.1	Inleiding.....	103
6.2	Beschrijving morfologische ontwikkeling op hoofdlijnen.....	104
6.2.1	Inleiding.....	104
6.2.2	Initiele bodemligging.....	104
6.2.3	Bodemligging per opname tijdens ongestoorde ontwikkeling.....	105
6.2.4	Beschrijving ontwikkeling op hoofdlijnen.....	114
6.2.5	Bodemligging per opname na gedeeltelijke afgraving voorland.....	115
6.2.6	Beschrijving reguliere ontwikkeling per interval.....	118
6.2.7	Beschrijving ontwikkeling per interval na afgraving (tweede fase aanvullend onderzoek).....	129
6.3	Alternatieve data-inwinning via analyse satellietbeelden.....	132
6.3.1	Inleiding.....	132
6.3.2	Gebruikte informatie.....	133
6.3.3	Resultaten.....	133
6.3.4	Conclusies.....	135
6.4	Basisresultaten zettingen.....	135
6.4.1	Inleiding.....	135
6.4.2	Gebruikte data.....	135
6.4.3	Aanpak data-analyse.....	136

6.4.4	Absolute niveau-ontwikkeling.....	138
6.4.5	Relatie zettingen en dikte zandpakket.....	141
6.4.6	Voorspelde zettingen.....	143
6.4.7	Zettingsontwikkeling.....	145
6.4.8	Schatting volume zettingsverlies.....	148
6.4.9	Conclusies.....	148
7	Basisinfo sedimentkarakteristieken.....	150
7.1	Inleiding.....	150
7.2	Gevolgde methode korrelgrootte-analyse.....	150
7.2.1	Inleiding.....	150
7.2.2	Bemonstering aanleg.....	150
7.2.3	Bemonstering talud (droge deel).....	150
7.2.4	Bemonstering onderwaterdeel.....	151
7.2.5	Voorbehandeling en analyse.....	153
7.3	Resultaten.....	153
7.3.1	Bemonstering aanleg.....	153
7.3.2	Bemonstering talud (droge deel).....	155
7.3.3	Bemonstering onderwaterdeel.....	157
7.4	Conclusies.....	159
7.4.1	Effect voorbehandeling.....	159
7.4.2	Dwarsvariatie in de korrelgrootte-verdeling.....	159
7.4.3	Tijdsvariatie in de korrelgrootte (D50).....	160
8	Basisinfo vegetatie.....	161
8.1	Inleiding.....	161
8.2	Ontwerp aanlegstrategie voor vegetatie.....	161
8.2.1	Basisontwerp.....	161
8.2.2	Vorbereidende workshop.....	162
8.2.3	Rijsmattentest.....	162
8.2.4	Aanplant in voorjaar 2015.....	162
8.3	Resultaten vegetatieontwikkeling.....	163
8.3.1	Ontwikkeling riet in oeverzone.....	163
8.3.2	Ontwikkeling vegetatie op de rijsmat.....	163
8.3.3	Effect begrazing.....	163
8.3.4	Effect inmenging holocene materiaal.....	164
8.3.5	Spontane vestiging planten op de pilot.....	164
8.4	Alternatieve data-inwinning via analyse satellietbeelden.....	167
8.4.1	Inleiding.....	167
8.4.2	Gebruikte informatie.....	167
8.4.3	Resultaten.....	168
8.4.4	Conclusies.....	171
	Literatuur.....	173
Annex I	NATUURLIJKE GEOMETRIE VAN VOORLANDOPLOSSINGEN.....	175

1	Inleiding	177
1.1	Algemeen	177
1.2	Inhoud conform werkplan	177
1.2.1	Inleiding	177
1.2.2	Natuurlijke talud helling (vraag 1).....	177
1.2.3	Validatie morfologisch model (vraag 1)	179
1.2.4	Stabiliseren voorland met vegetatie (vraag 2).....	179
1.2.5	Optimaal geometrisch veiligheidsontwerp (vraag 3).....	180
1.3	Beantwoording van de vragen	181
2	Natuurlijke taludhelling	182
2.1	Algemeen	182
2.2	Stabiele profielvorm	182
2.2.1	Aanpak	182
2.2.2	Analyse profielvorm.....	184
2.2.3	Geschematiseerde profielvorm	186
2.2.4	Conclusies	186
2.3	Effect hydraulische condities	187
2.4	Effect korreldiameter.....	187
2.5	Effect zettingen.....	187
3	Validatie morfologisch model	189
3.1	Inleiding.....	189
3.2	Afhankelijkheid korreldiameter	189
3.3	Verkenning aanpassing instellingen XBeach-model.....	190
3.4	Detailanalyse processen op onderwaterplateau	191
3.5	Definitie strandmodule XBeach-model.....	192
4	Stabilisatie met vegetatie	194
4.1	Inleiding.....	194
4.2	Rietontwikkeling op de proefsectie	194
4.3	Conclusie.....	194
5	Veiligheidsontwerp	195
5.1	Inleiding.....	195
5.2	Optimale helling buitentalud	195
5.3	Optimaal veiligheidsontwerp	195
6	Aanvullende producten	196
6.1	Guideline ontwerp van voorlandoplossingen (zie Bijlage 1).....	196
Annex II	AANLEG VAN VOORLANDOPLOSSINGEN	197
1	Inleiding	199
1.1	Algemeen	199
1.2	Inhoud rapportage conform werkplan	199

1.2.1	Inleiding	199
1.2.2	Ervaring vergunningentraject (vraag 4).....	199
1.2.3	Ervaring aanleg proefsectie (vraag 5).....	200
1.2.4	Gebruik ander kernmateriaal (vraag 6).....	200
1.2.5	Initiatie van vegetatie (vraag 7).....	201
1.3	Resultaat uitwerkingen.....	201
2	Gebruik ander kernmateriaal	202
2.1	Inleiding.....	202
2.2	Conclusies.....	202
3	Initiatie van vegetatie.....	203
3.1	Inleiding.....	203
3.2	Randvoorwaarden: maximaal toelaatbare golf voor rietvegetatie	203
3.2.1	Algemeen	203
3.2.2	Vegetatie op de proefsectie.....	203
3.2.3	Maximaal toelaatbare golfhoogte op buitenrand rietvegetatie.....	204
3.3	Nadere uitwerking en conclusies	208
4	Gerelateerde producten	210
4.1	Lessons-learned vergunningen-traject (zie Bijlage 2).....	210
4.2	Guide-line vergunningen (zie Bijlage 3)	210
4.3	Lessons-learned aanleg (zie Bijlage 4).....	211
4.4	Guide-line aanleg (zie Bijlage 5)	212
Annex III	BEHEER EN ONDERHOUD VAN VOORLANDOPLOSSINGEN	213
1	Inleiding.....	215
1.1	Algemeen.....	215
1.2	Inhoud rapportage conform werkplan	215
1.2.1	Inleiding	215
1.2.2	Ontwikkeling morfologie (vraag 8).....	215
1.2.3	Lessons-learned ontwikkeling vegetatie (vraag 9)	216
1.3	Resultaten	216
2	Morfologische ontwikkelingen.....	217
2.1	Inleiding.....	217
2.2	Ontwikkeling kustlijn.....	217
2.2.1	Overzicht.....	217
2.2.2	Ontwikkelingen op centrale deel.....	219
2.2.2.1	Tijdontwikkeling positie oeverlijn	219
2.2.2.2	Tijdsontwikkeling orientatie oeverlijn	220
2.2.2.3	Tijdsontwikkeling karakteristieke positie oeverlijn	221
2.2.2.4	Tijdontwikkeling positie onderlaag.....	222
2.3	Samenhang boven en onderlaag.....	224
2.3.1	Posities boven- en onderlaag.....	224
2.3.2	Breedte van het plateau.....	224

2.3.3	Onderlinge samenhang	226
2.3.4	Rol van het plateau en aanvullend onderzoek	227
2.4	Ontwikkeling volumes	227
2.4.1	Effect zettingen	227
2.4.2	Uitwisseling over randen	228
2.5	Herverdeling volumes	228
2.5.1	Inleiding	228
2.5.2	Definitie lagen en vakken	228
2.5.3	Volume-ontwikkeling per laag	230
2.5.4	Volume-ontwikkeling per vak	232
2.5.5	Volume-ontwikkeling gecombineerde vakken	235
2.6	Interactie met constructies	236
2.6.1	Inleiding	236
2.6.2	Aanwezige dijk	237
2.6.3	Damwand	237
2.6.4	Rijsmatconstructie	238
2.6.5	Tijdelijke beschermingsconstructie	238
2.6.6	Windscherm	238
3	Ontwikkeling van de vegetatie	239
3.1	Inleiding	239
3.2	Conclusies op basis van de monitoringsresultaten	239
4	Gerelateerde producten	240
4.1	Guide-line beheer en onderhoud (zie Bijlage 6)	240
Annex IV	TOETSING VAN VOORLANDOPLOSSINGEN	243
1	Inleiding	245
1.1	Algemeen	245
1.2	Inhoud rapportage conform werkplan	245
1.2.1	Inleiding	245
1.2.2	Toetsing veiligheidsontwerp (vraag 10)	246
1.2.3	Rol vegetatie in veiligheidstoetsing (vraag 11)	246
1.2.4	Monitoring veiligheid (vraag 12)	247
1.3	Resultaat uitwerkingen	247
2	Toetsing veiligheidsontwerp	248
2.1	Inleiding	248
2.2	Nadere uitwerking richting dijk-voorlandssystemen	248
3	Rol van vegetatie	249
3.1	Inleiding	249
3.2	Conclusie ten aanzien van de veiligheidsbijdrage	249
4	Monitoring veiligheid	250

4.1	Inleiding.....	250
4.2	Conclusie ten aanzien van de monitoring.....	250
5	Gerelateerde producten	251
5.1	Plan van aanpak toetsingsprotocol (zie Bijlage 7)	251
Annex V	OPSCHALING EN BUSINESS-CASES	253
1	Inleiding.....	255
1.1	Algemeen.....	255
1.2	Inhoud rapportage conform werkplan	255
1.3	Gevolgde aanpak.....	256
1.4	Resultaat uitwerkingen.....	257
2	Mogelijke toepassingen.....	258
2.1	Inleiding.....	258
2.2	Opschalingslocaties	258
2.2.1	Algemeen	258
2.2.2	Eerste Schil - Markermeer/IJsselmeer.....	258
2.2.3	Tweede Schil - Zoet water, rivierbekkens.....	259
2.2.4	Derde Schil - Intergetijdegebieden	259
3	Business-cases.....	260
3.1	Inleiding.....	260
3.2	Verschillende niveaus	260
3.2.1	Nulde niveau: dat van de ontwerpprincipes	260
3.2.2	Eerste niveau: dat van de kosten raming.....	260
3.2.3	Tweede niveau: dat van een MKBA-vergelijking.....	261
3.2.4	Derde niveau; van een (financiële) business case	261
3.3	Nadere uitwerking van de business case benadering.....	261
4	Doorvertalingen	262
4.1	Markermeeromgeving	262
4.2	Haringvliet, Hollands diep situaties	263
4.3	Intergetijde-gebieden.	263
Annex VI	PRODUCTEN	265
Bijlage 1	Guideline ontwerp en beoordeling.....	267
Bijlage 2	Lessons-learned vergunningen.....	268
Bijlage 3	Guideline vergunningen.....	271
Bijlage 4	Lessons-learned aanleg	272
Bijlage 5	Guideline aanleg.....	273

Bijlage 6	Guideline beheer en onderhoud	275
Bijlage 7	Business Case zandige vooroever.....	277

Overzicht figuren

Algemeen deel

Figuur 1-1	Overzicht proefsectie langs Houtribdijk in september 2014 na afronding van aanlegfase bij aanvang monitoringsprogramma [bron: opname Mennobart van Eerden].	27
Figuur 1-2	Overzicht proefsectie langs Houtribdijk in juni 2015 na aanbrengen van de vegetatie en een tijdelijke beschermingsdam op het centrale deel van de proefsectie [bron: GoogleEarth-opname 30 juni 2015].	31
Figuur 1-3	Overzicht proefsectie langs Houtribdijk in juni 2016, twee jaar na de aanleg met ingestelde evenwichtsligging en duidelijk herkenbare vegetatie [bron: opname RWS, Jurriaan Brobbel].	32
Figuur 1-4	Overzicht proefsectie langs Houtribdijk in juni 2017, drie jaar na de aanleg duidelijk herkenbare vegetatievakken [bron: opname RWS, Jurriaan Brobbel].	32
Figuur 2-1	Hoofdtypen waterkeringen, inclusief combinatie-oplossing met voorland.	39
Figuur 2-2	Schematische weergave mogelijke combinatieoplossingen met afnemende omvang benodigde zandige aanvulling.	40
Figuur 2-3	Omvang benodigde aanvulling als functie van de rol van de huidige dijk.	40
Figuur 2-4	Ontwikkeling veiligheidsoverschot bij directe realisatie maatgevend geacht veiligheidsniveau.	45
Figuur 2-5	Ontwikkeling veiligheidsoverschot bij directe realisatie maatgevend geacht veiligheidsniveau en afwijkend daadwerkelijke ontwikkeling van het benodigde veiligheidsniveau.	46
Figuur 2-6	Ontwikkeling veiligheidsoverschot bij directe realisatie maatgevend geacht veiligheidsniveau inclusief aanbrengen onderhoudsbuffers bij erosief kustvak.	47
Figuur 2-7	Ontwikkeling veiligheidsoverschot bij stapsgewijs verhogen van het veiligheidsniveau.	47
Figuur 2-8	Ontwikkeling veiligheidsoverschot bij stapsgewijs verhogen van het veiligheidsniveau inclusief aanbrengen onderhoudsbuffers bij erosief kustvak.	48
Figuur 2-9	Ontwikkeling veiligheidsoverschot bij directe realisatie maatgevend geacht veiligheidsniveau en aanwezigheid autonome aangroei.	49
Figuur 2-10	Ontwikkeling veiligheidsoverschot bij stapsgewijs verhogen van het veiligheidsniveau en aanwezigheid autonome trend.	49
Figuur 5-1	Gemeten windsnelheid (m/s), gekleurd op windrichting (graden t.o.v. Noord).	64
Figuur 5-2	Vergelijking windsnelheid KNMI (verticale as) en lokaal gemeten (horizontale as). Links station Lelystad, rechts station Schiphol.	65
Figuur 5-3	Vergelijking windrichting KNMI (verticale as) en lokaal gemeten (horizontale as). Links station Lelystad, rechts station Schiphol.	65
Figuur 5-4	Gemeten waterstand (zwart) en een lopend gemiddelde met een middelingsperiode van een week (rood).	66
Figuur 5-5	Relatie tussen waterstand (verticale as) en windrichting (horizontale as), gekleurd op windsnelheid. Gestippelde lijn: indicatie voor de oriëntatie van oeverlijn van de pilot.	66

Figuur 5-6	Relatie tussen geschatte opwaaiing (verticale as) en windrichting (horizontale as), gekleurd op windsnelheid. Gestippelde lijn: indicatie voor de oriëntatie van oeverlijn van de pilot.	67
Figuur 5-7	Vergelijking tussen waterstanden uit het operationele WAQUA-model voor het Markermeer en lokale waterstandsmetingen.	68
Figuur 5-8	Gemeten significante golfhoogte Hm0 (m).	69
Figuur 5-9	Relatie tussen significante golfhoogte (verticale as) en windrichting (horizontale as), gekleurd op windsnelheid. Gestippelde lijn: indicatie voor de oriëntatie van oeverlijn van de pilot.	70
Figuur 5-10	Combinaties van waterstand en significante golfhoogte voor vier windsectoren.	70
Figuur 5-11	Combinaties van berekende opwaaiing en significante golfhoogte voor vier windsectoren.	71
Figuur 5-12	Verloop in de tijd van waterstand en significante golfhoogte gedurende een tweetal stormen.	72
Figuur 5-13	Vergelijking tussen de berekende golfhoogte volgens SWAN en op basis van lokale metingen.	72
Figuur 5-14	Vergelijking diverse databronnen voor de significante golfhoogte voor de storm van januari 2015.	73
Figuur 5-15	Vergelijking significante golfhoogte Hm0 (horizontale as) en piekperiode Tp (verticale as), waarbij de markers zijn gekleurd op windsnelheid.	74
Figuur 5-16	Verhouding tussen windrichting (horizontale as) en golfrichting (verticale as), waarbij de markers zijn gekleurd op windsnelheid.	75
Figuur 5-17	Vergelijking van de verhouding tussen windrichting en golfrichting vóór en na 22 januari 2015.	76
Figuur 5-18	Vergelijking stroomrichting (in graden ten opzichte van noord, gedefinieerd als 'komend vanuit') en stroomsnelheid (verticale as), waarbij de markers zijn gekleurd op windsnelheid.	77
Figuur 5-19	Vergelijking windrichting (horizontale as) en stroomrichting (verticale as, beide in graden ten opzichte van noord, gedefinieerd als 'komend vanuit'), waarbij de markers zijn gekleurd op stroomsnelheid in m/s. Stroomsnelheden onder 0,01 m/s zijn niet weergegeven.	78
Figuur 5-20	Vergelijking windsnelheid (horizontale as) en stroomsnelheid (verticale as) voor vier verschillende windsectoren.	79
Figuur 5-21	Wind- en golfklimaat voor het hele meetinterval tussen T1 en T23.	82
Figuur 5-22	Wind- en golfklimaat tussen T1 en T2.	82
Figuur 5-23	Wind- en golfklimaat tussen T2 en T3.	83
Figuur 5-24	Wind- en golfklimaat tussen T3 en T4.	84
Figuur 5-25	Wind- en golfklimaat tussen T4 en T5.	85
Figuur 5-26	Wind- en golfklimaat tussen T5 en T6.	86
Figuur 5-27	Wind- en golfklimaat tussen T6 en T7.	87
Figuur 5-28	Wind- en golfklimaat tussen T7 en T8.	88
Figuur 5-29	Wind- en golfklimaat tussen T8 en T9.	89
Figuur 5-30	Wind- en golfklimaat tussen T9 en T10.	90
Figuur 5-31	Wind- en golfklimaat tussen T10 en T11.	91
Figuur 5-32	Wind- en golfklimaat tussen T11 en T12.	92
Figuur 5-33	Wind- en golfklimaat tussen T12 en T13.	93

Figuur 5-34	Wind- en golfklimaat tussen T13 en T14.....	94
Figuur 5-35	Wind- en golfklimaat tussen T14 en T15.....	95
Figuur 5-36	Wind- en golfklimaat tussen T15 en T16.....	96
Figuur 5-37	Wind- en golfklimaat tussen T16 en T17.....	97
Figuur 5-38	Wind- en golfklimaat tussen T17 en T18.....	98
Figuur 5-39	Wind- en golfklimaat tussen T18 en T19.....	99
Figuur 5-40	Wind- en golfklimaat tussen T19 en T20.....	100
Figuur 5-41	Wind- en golfklimaat tussen T20 en T21.....	100
Figuur 5-42	Wind- en golfklimaat tussen T21 en T22.....	101
Figuur 5-43	Wind- en golfklimaat tussen T22 en T23.....	102
Figuur 6-1	Bodemligging conform eindpeiling DE Combinatie van 15 september 2014.	105
Figuur 6-2	Overzicht bodemligging T1-inmeting op 18 september 2014.	106
Figuur 6-3	Overzicht bodemligging T2-inmeting op 25 oktober 2014.	106
Figuur 6-4	Overzicht bodemligging T3-inmeting op 19 november 2014.....	107
Figuur 6-5	Overzicht bodemligging T4-inmeting op 28 december 2014.	107
Figuur 6-6	Overzicht bodemligging T5-inmeting op 23 januari 2015.	108
Figuur 6-7	Overzicht bodemligging T6-inmeting op 14 februari 2015.	108
Figuur 6-8	Overzicht bodemligging T7-inmeting op 18 (en 21) maart 2015.	109
Figuur 6-9	Overzicht bodemligging T8-inmeting op 6 april 2015.	109
Figuur 6-10	Overzicht bodemligging T9-inmeting op 21 augustus 2015.	110
Figuur 6-11	Overzicht bodemligging T10-inmeting op 15 januari 2016.	110
Figuur 6-12	Overzicht bodemligging T11-inmeting op 28 februari 2016.	111
Figuur 6-13	Overzicht bodemligging T12-inmeting op 27 mei 2016.....	111
Figuur 6-14	Overzicht bodemligging T13-inmeting op 23 augustus 2016.....	112
Figuur 6-15	Overzicht bodemligging T14-inmeting op 23 november 2016.....	112
Figuur 6-16	Overzicht bodemligging T15-inmeting op 6 maart 2017.	113
Figuur 6-17	Overzicht bodemligging T16-inmeting op 17 mei 2017.....	113
Figuur 6-18	Overzicht bodemligging T17-inmeting op 1 september 2017 (laatste reguliere inmeting).....	114
Figuur 6-19	Verschillen in bodemligging tussen eerste (T1) en de als laatste uitgevoerde inmeting van de reguliere monitoring (T17).....	115
Figuur 6-20	Overzicht bodemligging T19-inmeting op 1 december 2017 (voor uitvoering afgraving).....	116
Figuur 6-21	Overzicht bodemligging T20-inmeting op 20 december 2017 (na uitvoering afgraving).....	116
Figuur 6-22	Overzicht bodemligging T21-inmeting op 6 januari 2018.	117
Figuur 6-23	Overzicht bodemligging T22-inmeting op 23 februari 2018 (voorlaatste inmeting). 117	
Figuur 6-24	Verschil in bodemligging tussen T1- en T2-opname.....	118
Figuur 6-25	Verschil in bodemligging tussen T2- en T3-opname.....	119
Figuur 6-26	Verschil in bodemligging tussen T3- en T4-opname.....	119
Figuur 6-27	Verschil in bodemligging tussen T4- en T5-opname.....	120
Figuur 6-28	Verschil in bodemligging tussen T5- en T6-opname.....	120
Figuur 6-29	Verschil in bodemligging tussen T6- en T7-opname.....	121
Figuur 6-30	Verschil in bodemligging tussen T7- en T8-opname.....	122
Figuur 6-31	Verschil in bodemligging tussen T8- en T9-opname.....	122
Figuur 6-32	Verschil in bodemligging tussen T9- en T10-opname.....	123
Figuur 6-33	Verschil in bodemligging tussen T10- en T11-opname.....	123

Figuur 6-34	Vershil in bodemligging tussen T11- en T12-opname.....	124
Figuur 6-35	Vershil in bodemligging tussen T12- en T13-opname.....	125
Figuur 6-36	Vershil in bodemligging tussen T13- en T14-opname.....	126
Figuur 6-37	Vershil in bodemligging tussen T14- en T15-opname.....	126
Figuur 6-38	Vershil in bodemligging tussen T15- en T16-opname.....	127
Figuur 6-39	Vershil in bodemligging tussen T16- en T17-opname.....	128
Figuur 6-40	Overzicht bodemligging T20-inmeting op 22 december 2017 (direct na ingraving).	129
Figuur 6-41	Overzicht bodemligging T21-inmeting op 6 januari 2018.....	130
Figuur 6-42	Overzicht bodemligging T22-inmeting op 23 februari 2018 (laatste relevante inmeting).....	130
Figuur 6-43	Vershil in bodemligging tussen T19- en T20-opname (omvang ontgraving).....	131
Figuur 6-44	Vershil in bodemligging tussen T20- en T21-opname.....	131
Figuur 6-45	Vershil in bodemligging tussen T21- en T22-opname.....	132
Figuur 6-46	Overzicht positie van de zeven geplaatste zakbakens, inclusief de veronderstelde positie van de buitenbegrenzing van het onder de dijk aanwezige cunet (zwarte lijn in de figuur).....	136
Figuur 6-47	Absolute ontwikkeling top van het zakbaken voor zakb0 (rode lijn), samen met de bijbehorende zetting (blauwe lijn).....	138
Figuur 6-48	Absolute ontwikkeling top van het zakbaken voor zakb1 (rode lijn), samen met de bijbehorende zetting (blauwe lijn).....	139
Figuur 6-49	Absolute ontwikkeling top van het zakbaken voor zakb2 (rode lijn), samen met de bijbehorende zetting (blauwe lijn).....	139
Figuur 6-50	Absolute ontwikkeling top van het zakbaken voor zakb3 (rode lijn), samen met de bijbehorende zetting (blauwe lijn).....	139
Figuur 6-51	Absolute ontwikkeling top van het zakbaken voor zakb4 (rode lijn), samen met de bijbehorende zetting (blauwe lijn).....	140
Figuur 6-52	Absolute ontwikkeling top van het zakbaken voor zakb5 (rode lijn), samen met de bijbehorende zetting (blauwe lijn).....	140
Figuur 6-53	Absolute ontwikkeling top van het zakbaken voor zakb6 (rode lijn), samen met de bijbehorende zetting (blauwe lijn).....	140
Figuur 6-54	Opgetreden zettingen in relatie met de dikte van het zandpakket in zakb0.....	141
Figuur 6-55	Opgetreden zettingen in relatie met de dikte van het zandpakket in zakb1.....	141
Figuur 6-56	Opgetreden zettingen in relatie met de dikte van het zandpakket in zakb2.....	142
Figuur 6-57	Opgetreden zettingen in relatie met de dikte van het zandpakket in zakb3.....	142
Figuur 6-58	Opgetreden zettingen in relatie met de dikte van het zandpakket in zakb4.....	142
Figuur 6-59	Opgetreden zettingen in relatie met de dikte van het zandpakket in zakb5.....	143
Figuur 6-60	Opgetreden zettingen in relatie met de dikte van het zandpakket in zakb6.....	143
Figuur 6-61	Schematisatie ondergrond Houtribdijk ter plaatse van pilot.....	144
Figuur 6-62	Gemeten zettingen uitgezet tegen de afstand in kustdwaarsrichting.....	144
Figuur 6-63	Gemeten zettingen in kustdwaarsrichting vergeleken met de voorspelde zettingen op meerdere momenten in de tijd.....	145
Figuur 6-64	Gemeten zettingen in zakb0 vergeleken met de theoretische zetting voor dit punt.	146
Figuur 6-65	Gemeten zettingen in zakb1 vergeleken met de theoretische zetting voor dit punt.	146
Figuur 6-66	Gemeten zettingen in zakb2 vergeleken met de theoretische zetting voor dit punt.	146
Figuur 6-67	Gemeten zettingen in zakb3 vergeleken met de theoretische zetting voor dit punt.	147
Figuur 6-68	Gemeten zettingen in zakb4 vergeleken met de theoretische zetting voor dit punt.	147

Figuur 6-69	Gemeten zettingen in zakb5 vergeleken met de theoretische zetting voor dit punt. 147
Figuur 6-70	Gemeten zettingen in zakb6 vergeleken met de theoretische zetting voor dit punt. 148
Figuur 6-71	Geschat verloop van het zetting gerelateerd volumeverlies. 148
Figuur 7-1	Ligging monsterpunten grid. Raai 1 = groen, raai 2 = rood, raai 3 = zwart. Raai 1 is genummerd van NW-ZO 1 t/m 22 (rijsmat is nummers 17, 18 en 19, groene diamanten), raai 2 is genummerd van ZO-NW 23 t/m 39, raai 3 is genummerd van NW-ZO 40 t/m 53. 151
Figuur 7-2	Horizontale monsternamen met grondboor zodat alleen de bovenste 0,5 cm wordt bemonsterd. 151
Figuur 7-3	Locatie monsterpunten onderwater bemonsterd door Shore Monitoring, met weergegeven de diepte van elk monsterpunt op T7. 152
Figuur 7-4	Gemiddelde diepte per monsterpunt in de tijd (gemiddelde van 4 transecten). 152
Figuur 7-5	Boxplots van D10, D50 (rechtsboven), D90 en % fijn zand (rechtsonder), voor beide jaren samen (n=125), en uitgesplitst voor de analyse in 2014 (n=23) en 2015 (n=102). De (boven en onderzijde van de) box geven het 25 en 75 percentiel aan, de horizontale lijn de mediaan, de vlaggen (horizontale lijnen) zijn het 5 en 95 percentiel, de stippen daarbuiten zijn de zogenaamde outliers. 154
Figuur 7-6	Grootte D10, D50 en D90 tijdens de aanleg als functie van de losdag. 155
Figuur 7-7	Boxplots van D10, D50, D90 en % fijn zand, op de drie bemonsterde raaien op het talud. Raai 1 is langs de oeverlijn, raai 2 is op 10 m van de oeverlijn, raai 3 is op ca 30 m van de oeverlijn. De monsters op de rijsmat zijn hierin weggelaten. 156
Figuur 7-8	Verschuiving van D10, D50, D90 en % fijn zand ten opzichte van afstand vanaf de damwand, op de drie bemonsterde raaien op het talud. Raai 1 is langs de oeverlijn, raai 2 is op 10 m van de oeverlijn, raai 3 is op ca 30 m van de oeverlijn. Alleen de monsters ten westen van de rijsmatconstructie zijn weergegeven. Elk punt is 1 monster. Lineaire regressie is toegevoegd als indicatie van het ruimtelijk patroon. 157
Figuur 7-9	Grootte D10, D50, D90 en % fijn zand op de vier diepten in de tijd (gemiddelde van vier transecten). S1 = 0,5 m diep, S2 = 1 m diep, S3 = 1,5 m diep, S4 = 2 m diep. 158
Figuur 7-10	Boxplots van D50 op de onderwater transecten. S1 = 0,5 m diep, S2 = 1 m diep, S3 = 1,5 m diep, S4 = 2 m diep. 159
Figuur 7-11	Korrelgrootteverdeling onder water (monsternamen 19 november) en op het talud (monsternamen 3 november), directe meting. 160
Figuur 8-1	Schematisch overzicht van aangeplante vlakken (lichtgroen) en kale vlakken (donkerblauw) en locaties van de PQ's (donkere stippen) en exclusies (gele vierkanten). In donkergroen de locatie van de rijsmatten met rietplanten die als additionele proef worden aangelegd op de overgang tussen vak 3 en vak 4. 161
Figuur 8-2	Initiële ontwikkeling van de vegetatie op de rijsmat. 163
Figuur 8-3	Effect exclusie. Foto links: Verschil in hoogte vegetatie binnen en buiten de exclusie. Foto rechts: begrazing buiten de exclusie aan aangeplant riet. 164
Figuur 8-4	De NDVI-groenindex op 12 maart 2015 en 9 september 2015. 164
Figuur 8-5	Muurpeper (op 10 m uit de oeverlijn op het zandige deel van de proefsectie). 165
Figuur 8-6	Google Earth opname van de zandige vooroever aan de Houtribdijk op 30 juni 2015 met hierin onderscheiden 6 proefvakken met verschillende aanplantingen en grondsoorten. 168

Annex I

Figuur I - 2-1	Overzicht ontwikkeling karakteristiek dwarsprofiel in de centrale sectie (profiel #11).	182
Figuur I - 2-2	Detail ontwikkeling karakteristiek dwarsprofiel in de centrale sectie (profiel #11)..	183
Figuur I - 2-3	Detail ontwikkeling karakteristiek dwarsprofiel 60 m westwaarts (profiel #07).	183
Figuur I - 2-4	Detail ontwikkeling karakteristiek dwarsprofiel 60 m oostwaarts (profiel #15).	184
Figuur I - 2-5	Ontwikkeling karakteristiek dwarsprofiel in de centrale sectie (profiel #11) ten opzichte van doorsnijding op NAP-0,3 m niveau.	184
Figuur I - 2-6	Detail ontwikkeling karakteristiek dwarsprofiel in de centrale sectie (profiel #11) ten opzichte van doorsnijding op NAP-0,3 m niveau voor meest recente peilingen.	185
Figuur I - 2-7	Detail ontwikkeling ander, meer westelijk gelegen dwarsprofiel in de centrale sectie (profiel #07) ten opzichte van doorsnijding op NAP-0,3 m niveau voor de 10 laatste peilingen.....	185
Figuur I - 2-8	Detail ontwikkeling ander, meer oostelijk gelegen dwarsprofiel in de centrale sectie (profiel #15) ten opzichte van doorsnijding op NAP-0,3 m niveau voor de 10 laatste recente peilingen.	186
Figuur I - 2-9	Schematisatie karakteristiek dwarsprofiel in de centrale sectie (profiel #11) ten opzichte van doorsnijding op NAP-0,3 m niveau.	186
Figuur I - 2-10	Effect zetting in ongestoorde profieldeel van dwarsprofiel #11.	188
Figuur I - 3-1	Relatie tussen helling en korreldiameter.	189
Figuur I - 3-2	Afhankelijkheid profielontwikkeling van korreldiameter voor XBEACH.	190
Figuur I - 3-3	Resultaat eerste verkenning effect aangepaste asymmetrie-factor op profielontwikkeling.	191

Annex II

Figuur II - 3-1	Bovenaanzicht van dynamische oeverlijn, met grootste uitwijkingen rond de damwand (A) en bij de rijsmatten (C) rond een meer constant middelpunt (B).	204
Figuur II - 3-2	Schematische dwarsdoorsnede van de proefsectie van de dijk (links) tot in het water (rechts).....	204
Figuur II - 3-3	Simulaties van golfhoogte-uitdoving in relatie tot talud en vegetatie bij verschillende golf- en waterpeil scenario's voor een geselecteerde locatie per meer (zie tabel 2 voor de uitleg van de scenario's).	206
Figuur II - 3-4	Range van inkomende golfhoogte aan de buitenrand van het rietveld voor verschillende scenario's.	207
Figuur II - 3-5	Inkomende golfhoogte bij verschillende hellingen voor de 4 modelscenario's zoals in Tabel II - 3 3 beschreven.	208

Annex III

Figuur III - 2-1	Ontwikkeling dwarsprofiel in profiel #11 (op 120 m uit damwand) tot en met de laatste inmeting met daarin aangegeven de gehanteerde niveaus voor het bepalen van de karakteristieke posities van oeverlijn (NAP-0,3 m) en onderlaag (NAP-1,5 m).	217
Figuur III - 2-2	Overzicht ontwikkeling positie oeverlijn (positie doorsnijding op NAP-0,3 m) inclusief naastgelegen secties voor alle inmetingen.	218

Figuur III - 2-3	Overzicht ontwikkeling positie oeverlijn (positie doorsnijding op NAP-0,3 m) inclusief naastgelegen secties voor een beperkter aantal inmetingen.....	218
Figuur III - 2-4	Overzicht ontwikkeling positie oeverlijn (positie doorsnijding op NAP-0,3 m) voor eerste vier en laatste vier inmetingen, inclusief naastgelegen secties.	219
Figuur III - 2-5	Overzicht ontwikkeling positie oeverlijn (positie doorsnijding op NAP-0,3 m) voor de laatste inmetingen, met het (verdwenen) effect van de rijsmatconstructie.....	219
Figuur III - 2-6	Detail positie oeverlijn over centrale deel proefsectie (tussen damwand en rijsmatconstructie).	220
Figuur III - 2-7	Overzicht variatie in oeverlijnposities in centrale deel proefsectie.	220
Figuur III - 2-8	Tijdsontwikkeling oriëntatie oeverlijn centrale deel proefsectie als functie van de tijd.	221
Figuur III - 2-9	Tijdsontwikkeling ligging positie zwaartepunt centrale proefsectie, inclusief de posities behorende bij de twee inmetingen gedurende de eerste fase van het aanvullende onderzoek.....	221
Figuur III - 2-10	Overzicht ontwikkeling positie onderlaag (positie doorsnijding op NAP-1,5 m) inclusief naastgelegen secties voor alle inmetingen.	222
Figuur III - 2-11	Overzicht ontwikkeling positie onderlaag (positie doorsnijding op NAP-1,5 m) inclusief naastgelegen secties voor een beperkter aantal inmetingen.....	223
Figuur III - 2-12	Overzicht ontwikkeling positie onderlaag (positie doorsnijding op NAP-1,5 m) inclusief naastgelegen secties voor initiële en meest recente opnamen.....	223
Figuur III - 2-13	Ontwikkeling positie onderlaag (positie doorsnijding op NAP-1,5 m) in centrale deel voor alle inmetingen.....	224
Figuur III - 2-14	Posities oeverlijn en onderlaag voor de laatste drie opnamen.	224
Figuur III - 2-15	Overzicht ontwikkeling plateaubreedte voor alle opnamen.....	225
Figuur III - 2-16	Overzicht ontwikkeling plateaubreedte voor de eerste vier en laatste vier opnamen.	225
Figuur III - 2-17	Tijdsontwikkeling plateaubreedte in dwarsprofiel #11 op 120 m vanuit de damwand.	226
Figuur III - 2-18	Tijdsontwikkeling gemiddelde plateaubreedte op het traject tussen profiel #10 en #19 (van 105 tot 240 m uit de damwand.	226
Figuur III - 2-19	Configuratie in 3D-aanzicht met actieve bovenlaag en voorliggende onderlaag	227
Figuur III - 2-20	Vergelijking initiële en T15- bodemligging ter plaatse van profiel #11 op 120 m uit de damwand voor het droge deel van de proefsectie.	228
Figuur III - 2-21	Schematische weergave van de gehanteerde definities voor de bepaling van de verticale verdeling van de volume-vakken. Er is onderscheid gemaakt tussen 3 lagen: [A] boven NAP+0,5 m, [B] tussen NAP-1 m en NAP+0,5 m, [C] onder NAP-1,0 m.	229
Figuur III - 2-22	Schematisch overzicht van de gehanteerde indeling van volume-vakken in het studiegebied.	229
Figuur III - 2-23	Ontwikkeling volume per laag (A, B en C) en gesommeerd over alle lagen.	230
Figuur III - 2-24	Ontwikkeling volume bovenlaag (laag A) per vak en gesommeerd over alle vakken.	231
Figuur III - 2-25	Ontwikkeling volume oeverlaag (laag B) per vak en gesommeerd over alle vakken.	231
Figuur III - 2-26	Ontwikkeling volume onderlaag (laag C) per vak en gesommeerd over alle vakken.	232
Figuur III - 2-27	Ontwikkeling volume per laag (A, B en C) en gesommeerd over alle lagen.	233
Figuur III - 2-28	Ontwikkeling volume vak 1 per laag en gesommeerd over alle lagen.....	233

Figuur III - 2-29	Ontwikkeling volume vak 2 per laag en gesommeerd over alle lagen.....	234
Figuur III - 2-30	Ontwikkeling volume vak 3 (rijsmatconstructie) per laag en gesommeerd over alle lagen.	234
Figuur III - 2-31	Ontwikkeling volume vak 4 per laag en gesommeerd over alle lagen.....	235
Figuur III - 2-32	Ontwikkeling volume vak 5 per laag en gesommeerd over alle lagen.....	235
Figuur III - 2-33	Ontwikkeling volume in gecombineerde vakken 1 en 2 per laag en gesommeerd over alle lagen.	236
Figuur III - 2-34	Ontwikkeling volume in gecombineerde vakken 4 en 5 per laag en gesommeerd over alle lagen.	236
Figuur III - 2-35	Overzicht profielontwikkeling in profiel #34 op 465 m uit de damwand.	237
Figuur III - 2-36	Overzicht profielontwikkeling in profiel #28 op 375 m uit de damwand.	237
Figuur III - 2-37	Detailvergelijking initiële en T15- bodemligging ter plaatse van profiel #11 op 120 m uit de damwand ter plaats van het aangebrachte windscherm.....	238

Overzicht tabellen

Algemeen deel

Tabel 1-1	Hoofdstructuur van de overkoepelende pilot-rapportage.....	29
Tabel 1-2	Overzicht hoofdstructuur algemeen deel van de overkoepelende pilot-rapportage.	30
Tabel 1-3	Overzicht basisrapportages en plaats binnen de overkoepelende pilot-rapportage. .	32
Tabel 1-4	Overzicht producten en plaats binnen de overkoepelende pilot-rapportage.	34
Tabel 2-1	Overzicht mogelijke typen zandige versterkingen en relatie tot de (resterende) rol van de aanwezige dijkconstructie.....	43
Tabel 2-2	Overzicht mogelijke bijdragen van vegetatie aan de functies en veiligheid van de waterkering.....	44
Tabel 2-3	Overzicht relevante EcoShape-projecten.	50
Tabel 2-4	Voorbeelden relevante lopende (versterkings)projecten.	53
Tabel 2-5	Overzicht relevante onderzoeksprojecten (per maart 2016).....	55
Tabel 3-1	Relatie tussen doelen, onderzoeksthema's en geformuleerde onderzoeksvragen.	57
Tabel 3-2	Relatie tussen doelen, onderzoeksthema's en onderzoeksvragen, inclusief koppeling met de verschillende producten.....	58
Tabel 5-1	Versiebeheer overdrachtstabel hydro/meteogegevens (relevante versies per oktober 2018).....	63
Tabel 5-2	Richtingsafhankelijke opwaaiing als functie van karakteristieke golfhoogte/windsnelheidsverhouding).	80
Tabel 5-3	Overzicht beschouwde perioden tot en met laatste inmeting T23, inclusief duiding projectfase en opgetreden maximale omstandigheden.	81
Tabel 5-4	Algemene karakteristieken tot nu toe beschouwde meetinterval (18-9-2014 t/m 20-03-2018).....	81
Tabel 5-5	Overzicht events binnen meetinterval T1 – T2.	83
Tabel 5-6	Overzicht events binnen meetinterval T2 – T3.	84
Tabel 5-7	Overzicht events binnen meetinterval T3 – T4.	85
Tabel 5-8	Overzicht events binnen meetinterval T4 – T5.	86
Tabel 5-9	Overzicht events binnen meetinterval T5 – T6.	87
Tabel 5-10	Overzicht events binnen meetinterval T6 – T7.	88
Tabel 5-11	Overzicht events binnen meetinterval T7 – T8.	89
Tabel 5-12	Overzicht events binnen meetinterval T8 – T9.	90
Tabel 5-13	Overzicht events binnen meetinterval T9 – T10 (met de maximaal gemeten golfhoogte van 1,27 m).	91
Tabel 5-14	Overzicht events binnen meetinterval T10 – T11.....	92
Tabel 5-15	Overzicht events binnen meetinterval T11 – T12.....	92
Tabel 5-16	Overzicht events binnen meetinterval T12 – T13.....	93
Tabel 5-17	Overzicht events binnen meetinterval T13 – T14.....	94
Tabel 5-18	Overzicht events binnen meetinterval T14 – T15.....	95
Tabel 5-19	Overzicht events binnen meetinterval T15 – T16.....	96
Tabel 5-20	Overzicht events binnen meetinterval T16 – T17.....	97
Tabel 5-21	Overzicht events binnen meetinterval T17 – T18.....	98
Tabel 5-22	Overzicht events binnen meetinterval T18 – T19.....	99

Tabel 5-23	Overzicht events binnen meetinterval T19 – T20.....	100
Tabel 5-24	Overzicht events binnen meetinterval T20 – T21 (met maximaal gemeten waterstand van NAP+0,43 m).....	101
Tabel 5-25	Overzicht events binnen meetinterval T21 – T22 (met maximaal gemeten windsnelheid).....	102
Tabel 6-1	Overzicht beschouwde meetperioden.....	103
Tabel 6-2	Overzicht uitgevoerde (en geplande) bodempeilingen tot en met de laatste inmeting in maart 2018.	104
Tabel 6-3	Overzicht data inmeting van de verschillende zakbakens tot en met einde reguliere monitoringsperiode op 1 september 2017.	137
Tabel 6-4	Dikte zandpakket (in meters) ter hoogte van de zakbakens gedurende de aanleg van de proefsectie.....	137
Tabel 8-1	Overzicht spontaan gevestigde soorten op bodemtype zand in raai 2 op 10 m uit oeverlijn.....	165
Tabel 8-2	Overzicht spontaan gevestigde soorten op bodemtype zand in raai 3 op 30 m uit oeverlijn.....	166
Tabel 8-3	Overzicht spontaan gevestigde soorten op bodemtype holoceen in raai 2 op 10 m uit oeverlijn.....	166
Tabel 8-4	Overzicht spontaan gevestigde soorten op bodemtype holoceen in raai 3 op 30 m uit oeverlijn.....	167
Tabel 5	Overzicht Lessons learned vergunningentraject.	268
 <i>Annex II</i>		
Tabel II - 3-1	Beschrijving van de referentiemeren (Bron: Van Eerden et al., 2007; Zlinszky, 2013).	205
Tabel II - 3-2	Gebruikte modelscenario's voor inkomende open-water golfcondities en waterstanden.	205
Tabel II - 3-3	Model scenario's voor het ontwerpen van nieuwe vooroevers.	207
 <i>Annex III</i>		
Tabel III - 2-1	Overzicht volumeverschillen ten opzichte van T1-opname tot en met inmeting T17.	230
 <i>Annex V</i>		
Tabel V - 2.1	Overzicht karakteristieken hydrodynamica en vegetatie per beschouwde locatie...	259

1 Inleiding

1.1 ALGEMEEN

Op dit moment wordt binnen het HoogWaterBeschermingsProgramma (HWBP) voor verschillende versterkingsprojecten de afweging gemaakt tussen traditionele versterkingsvormen en meer natuurlijke alternatieven zoals een zandige voorlandoplossing. Deze laatste versterkingsvorm is langs de Noordzeekust, al dan niet in combinatie met een achterliggende harde kering, reeds veelvuldig toegepast. Als voorbeeld kunnen worden genoemd de kustversterkingen bij Scheveningen, Noordwijk en Katwijk. Voor minder energetische omstandigheden, zoals bij meren en rivieren, spelen informatie-lacunes over de haalbaarheid van een dergelijke oplossingen een nog te grote rol in de besluitvorming over de keuze van het type versterking.

In het kader van het HWBP2-innovatiebudget voor projectoverstijgende innovaties, is door RWS-MN met medewerking van Stichting EcoShape een gehonoreerd voorstel gedaan voor de aanleg van een proefsectie van een voorlandoplossing voor de Markermeerzijde van de Houtribdijk.



Figuur 1-1 Overzicht proefsectie langs Houtribdijk in september 2014 na afronding van aanlegfase bij aanvang monitoringsprogramma [bron: opname Mennobart van Eerden].

De pilot, bestaande uit de aanleg van een proefsectie inclusief monitoringsprogramma, data-analyse en het opstellen van toets- en ontwerptools, is expliciet gericht op het bijdragen aan het sneller en beter onderbouwd kunnen realiseren van zandige versterkingswerken voor met name de omstandigheden voor de grote meren, en kan zo toepassing vinden in zowel lopende en komende HWBP-projecten.

1.2 DOELSTELLING VAN DE PILOT

Het doel van het tot voorjaar 2018 lopende pilotproject was het bevorderen van de toepassing van zandige versterkingen voor dijken met milde golfcondities, om zo te komen tot een goedkopere realisatie van een toetsbare en mogelijk 'onderhoudsarme' waterkering.

Om deze strategische doelstelling iets meer concreet te maken is het doel van de pilot geoperationaliseerd tot een drietal onderdelen, namelijk:

- Het komen tot geoptimaliseerde uitvoeringsvormen,
- Het toetsbaar maken van een zandige oplossing en
- Het inzicht verkrijgen in de beheer- en onderhoudsfase en de hiermee samenhangende kosten.

Passend bij deze doelstelling zijn in de opstartfase van het project een groot aantal onderzoeksvragen gedefinieerd. Deze laatste zijn per onderzoeksthema gebruikt om de op te leveren producten te definiëren. Een nadere uitwerking hiervan is beschreven in Hoofdstuk 3 van deze rapportage.

1.3 INRICHTING ACTIVITEITEN

Na een lange voorbereidingsfase is de aanleg van de proefsectie in september 2014 afgerond (zie Figuur 1-1) en is het feitelijke monitoringsprogramma opgestart.

Dit meetprogramma loopt van half september 2015 tot en met maart 2018 en richt zich op drie hoofdonderdelen, te weten de meteorologie en hydrodynamica, de morfodynamica en de vegetatieontwikkeling. De data aangaande de meteorologie en hydrodynamica geeft inzicht in de optredende belasting (windsnelheid, waterstanden, golven en stromingen) en de morfodynamica geeft inzicht in de respons (profielontwikkeling; zowel erosie/sedimentatie-processen als zetting). Ten aanzien van de vegetatieontwikkeling is met name het effect hiervan op de morfodynamica van belang. Ook wordt gekeken naar ecologische meerwaarde en de rol van het beheer.

Het gezamenlijke eindproduct van het pilotproject is contractueel vormgegeven door middel van een viertal werkpakketten (WP1 t/m WP4) waarin de verschillende hoofactiviteiten zijn ondergebracht.

Deze werkpakketten betreffen respectievelijk:

- WP1 - Ontwerp en vergunningen,
- WP2 - Vooronderzoek en aanleg,
- WP3 - Monitoring en analyses en
- WP4 - Werkprogramma en eindrapportage.

De aan de eerste twee werkpakketten (WP1 en WP2) verbonden activiteiten zijn in 2014 al afgerond.

Langer actueel waren dus nog het monitoringsprogramma (WP3) en het zogenaamde werkprogramma (WP4). Binnen het werkprogramma is invulling gegeven aan de data-analyse, het beantwoorden van de onderzoeksvragen en de bijdrage aan de toets- en ontwerptools.

Het voorliggende document heeft betrekking op het de activiteiten en resultaten van met name het laatste werkpakket (WP4).

1.4 OPZET RAPPORTAGE EN LEESWIJZER

1.4.1 INLEIDING

De voorliggende overkoepelende rapportage betreft de laatste versie van eerdere interim-versies van een 'levend' document waarin steeds de laatste resultaten en inzichten vanuit de pilot in onderlinge samenhang werden beschouwd. Het aan deze uitwerkingen oorspronkelijk ten grondslag liggende werkplan van het werkprogramma is hierbij als basis gehanteerd (EcoShape, 2015a). Dit is ook terug te vinden in de opzet en inrichting van de voorliggende rapportage waarin aan elk van de onderscheiden onderzoeksthema's zowel een basisrapportage als een of meerdere producten zijn gekoppeld (zie Tabel 1-1).

Onderdeel	Toelichting	Locatie
Algemeen deel	Onderzoeksvragen, koppeling met monitoringsprogramma	Hoofdstuk 2 t/m 8
Basisrapportages	Ontwerp, aanleg, beheer en onderhoud, toetsing, opschaling	Annex I t/m Annex V
Producten	Lessons-learned, guidelines, plan van aanpak	Bijlage 1 t/m Bijlage 7

Tabel 1-1 Hoofdstructuur van de overkoepelende pilot-rapportage.

Naast een meer algemeen deel omvat deze rapportage dan ook vijftal (in annexen opgenomen) basisrapportages en een zevental (in bijlagen opgenomen) producten. Onderliggend zijn ook nog een aantal meer gedetailleerde rapportages opgesteld die verslag doen van de activiteiten en analyses rondom de binnen WP3 uitgevoerde monitoring (EcoShape/Deltares/WEnR/HKV, 2018), alsmede het in een later stadium van het project uitgevoerde aanvullende onderzoek (EcoShape/Deltares/HKV, 2018), (EcoShape/Arcadis, 2018).

In het algemene deel van de voorliggende overkoepelende rapportage wordt naast een algemene uiteenzetting over zandige voorlandversterkingen met name ingegaan op de basisanalyse van de monitoringsresultaten, enkele specifieke morfologische uitwerkingen en de verwerking er van tot voor beantwoording van de onderzoeksvragen benodigde informatie.

In het volgende is een nadere toelichting gegeven op in de tabel genoemde onderdelen van deze rapportage.

1.4.2 ALGEMEEN DEEL IN HOOFDTEKST

Het algemene deel van deze rapportage bestaat uit een vijftal blokken, te beginnen met dit hoofdstuk met inleiding en achtergronden (Hoofdstuk 1).

In Hoofdstuk 2 wordt vervolgens in gegaan op de bredere relatie met ander onderzoek op het gebied van voorlandoplossingen (het zogenaamde framework).

Na deze verbreding wordt in Hoofdstuk 3 de nadere uitwerking van de onderzoeksvragen en de koppeling ervan met de basisrapportages en producten belicht.

Aansluitend volgt een korte toelichting op de rol en invulling van het monitoringsprogramma (Hoofdstuk 4). Het laatste blok bestaat uit een viertal hoofdstukken waarbinnen een eerste verwerkingsslag van de basisresultaten van het monitoringsprogramma (hydro/meteo-data, bodemligging, sedimentkarakteristieken en vegetatie) is beschreven (Hoofdstuk 4 tot en met 8).

Tabel 1-2 geeft een samenvattend overzicht van de verschillende onderdelen.

Onderwerp	Toelichting	Locatie binnen rapportage
Algemeen deel	Doelstelling, opzet rapportage en verantwoording	Hoofdstuk 1
Framework	Karakterisering voorlandoplossingen	Hoofdstuk 2
Onderzoeksvragen	Koppeling met thema's, basisrapportages en producten	Hoofdstuk 3
Monitoringsprogramma	Algemeen deel	Hoofdstuk 4
	Hydro/meteo-data (wind, waterstanden, golven, ...)	Hoofdstuk 5
	Bodemligging (niveaus, zettingen, ...)	Hoofdstuk 6
	Sedimentkarakteristieken (korrelgrootte, verdeling, ...)	Hoofdstuk 7
	Vegetatie (aanleg, ontwikkeling, effecten, ...)	Hoofdstuk 8

Tabel 1-2 Overzicht hoofdstructuur algemeen deel van de overkoepelende pilot-rapportage.

Dit algemene rapportagedeel wordt afgesloten met een overzicht van de relevante literatuur en rapportages, dit inclusief een toelichting op de onderliggende detailrapportages zoals daar zijn (EcoShape/Deltares/WEnR/HKV, 2018), (EcoShape/Deltares/HKV, 2018) en (EcoShape/Arcadis, 2018). In het volgende is een korte schets gegeven van deze onderdelen.

Voorlandoplossingen en relatie met ander onderzoek

In Hoofdstuk 2 is een algemene karakterisering van voorlandversterkingen in relatie tot zowel de rol van het zand en vegetatie binnen de veiligheidsoplossing als de mogelijkheden tot optimalisatie van het ontwerp van zandige versterkingsoplossingen. Deze laatste heeft onder meer een directe relatie met een van de doelstellingen (onderzoeksthema's) van het HPZ-innovatieproject (EcoShape, 2015d). Ook is een relatie gelegd met ander onderzoek dat op het gebied van voorlanden wordt of gaat worden uitgevoerd. Hierbij komt ook de relatie met andere EcoShape-projecten aan de orde.

Koppeling activiteiten met onderzoeksvragen

De aan de basis van deze pilot ten grondslag liggende onderzoeksvragen vormen het uitgangspunt voor de initiële definitie van de op te leveren producten. Deze vertalingsslag vormt ook de basis voor de definitie van het aan het werkprogramma ten grondslag liggende (geüpdatete versie van het) werkplan (EcoShape, 2015a). In Hoofdstuk 3 van deze rapportage is deze aansturende uitwerking in nog iets meer detail uitgewerkt.

Aansluiting op monitoringsprogramma

Het zogenaamde monitoringsprogramma levert de basisinformatie die in het werkprogramma wordt gebruikt voor het beantwoorden van de verschillende onderzoeksvragen. De invulling van het binnen WP3 gepositioneerde monitoringsprogramma is op hoofdlijnen beschreven in het zogenaamde monitoringsplan. De thans vigerende versie van dit monitoringsplan dateert van november 2014 (EcoShape, 2014). In Hoofdstuk 4 is een korte schets gegeven van het oorspronkelijke plan en is in aanvulling hierop ook aangegeven op welke onderdelen dit plan in de loop van de tijd is aangepast.

Resultaten van het monitoringsprogramma

Zoals aangegeven, richt het monitoringsprogramma zich op drie hoofdonderdelen, te weten de meteorologie en hydrodynamica, de morfodynamica en de vegetatieontwikkeling. De data aangaande de meteorologie en hydrodynamica geeft inzicht in de optredende belasting (windsnelheid, waterstanden, golven) en de morfodynamica in de morfologische respons (profielontwikkeling; zowel erosie- en sedimentatie-processen als de zetting). Ten aanzien van de vegetatieontwikkeling is met name het effect

hiervan op de morfodynamica van belang. Ook wordt gekeken naar ecologische meerwaarde en de rol van het beheer.



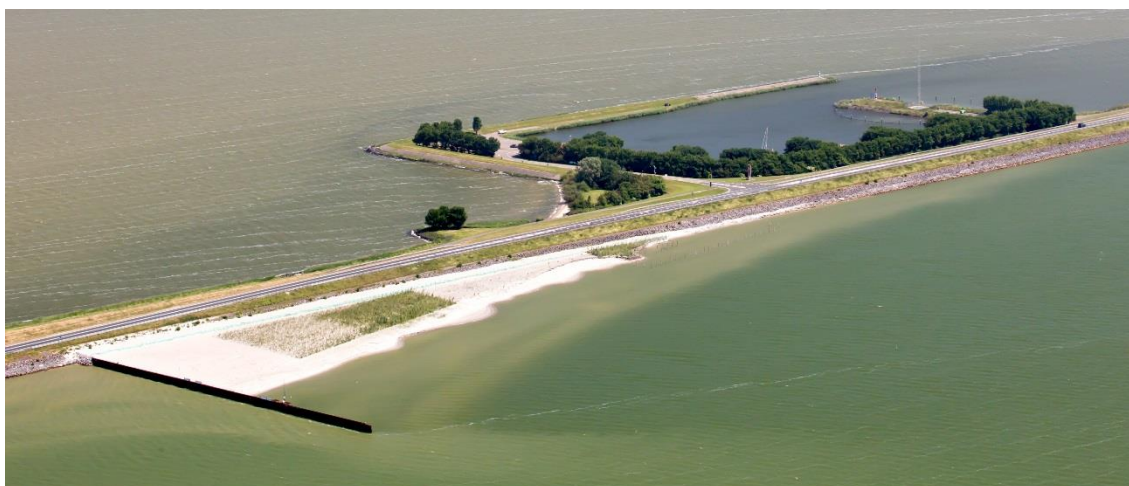
Figuur 1-2 Overzicht proefsectie langs Houtribdijk in juni 2015 na aanbrengen van de vegetatie en een tijdelijke beschermingsdam op het centrale deel van de proefsectie [bron: GoogleEarth-opname 30 juni 2015].

Figuur 1-2 laat zien ter illustratie zien hoe de proefsectie er medio 2015 bij lag. Te zien is de aangebrachte vegetatie (de donkere vlekken) en de structurele destructie van de zogenaamde rijsmatconstructie aan de rechterzijde (oostzijde) van de proefsectie. Ook is de tijdelijke beschermingsdam op het centrale deel van de proefsectie goed te zien, inclusief het effect ervan op de momentane ligging van de waterlijn.

In Hoofdstuk 5 tot en met 8 zijn de binnen WP3 gevalideerde basisresultaten nader beschouwd en beschreven (EcoShape/Deltares/WEnR/HKV, 2018). Het gaat daarbij dus om respectievelijk de meteorologische en hydrodynamische gegevens (Hoofdstuk 5), de bodemligging en zettingsinformatie (Hoofdstuk 6), de sedimentinformatie (Hoofdstuk 7) en de vegetatiedata (Hoofdstuk 8).

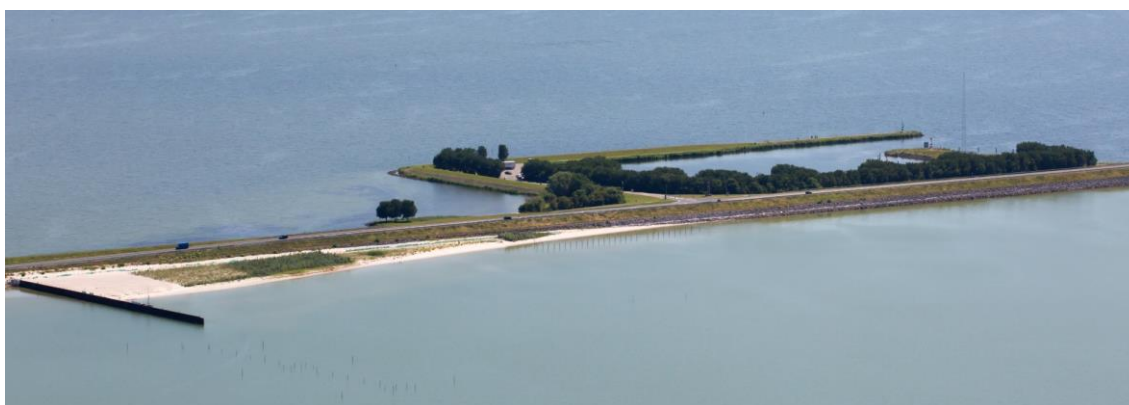
Ook is hier het resultaat beschreven van een eerste verwerkings- en analyseslag. Deze zogenaamde 'opgewerkte' resultaten zullen vervolgens worden gebruikt voor de opstelling van de verschillende basisrapportages en de daaruit afgeleide producten.

In aansluiting op de in 2014 gemaakte luchtopname van de pilot (zie Figuur 1-1 op pagina 27) is in juni 2016 opnieuw een opname gemaakt. Het resultaat hiervan staat in Figuur 1-3 en laat, naast een meer ontwikkelde vegetatie in de proefvakken, tevens de morfologische ontwikkeling goed zien.



Figuur 1-3 Overzicht proefsectie langs Houtribdijk in juni 2016, twee jaar na de aanleg met ingestelde evenwichtsligging en duidelijk herkenbare vegetatie [bron: opname RWS, Jurriaan Brobbel].

Te zien is ook dat de initieel aangebrachte rijmstrucuurconstructie inmiddels grotendeels is verdwenen. Slechts een hoekje ervan was toen nog aanwezig.



Figuur 1-4 Overzicht proefsectie langs Houtribdijk in juni 2017, drie jaar na de aanleg duidelijk herkenbare vegetatievakken [bron: opname RWS, Jurriaan Brobbel].

In juni 2017 is opnieuw een opname gemaakt. Het in Figuur 1-4 weergegeven resultaat hiervan laat zien dat de vegetatie nog verder is aangeslagen waarbij de gehanteerde begrenzingen van de verschillende proefvakken steeds duidelijk herkenbaar zijn. De wijze van initiatie blijkt dus van zeer groot belang.

1.4.3 BASISRAPPORTEN IN ANNEXEN

De resultaten van de pilot zullen, conform het in maart 2015 vastgestelde werkplan, per onderzoeksthema worden vastgelegd in een vijftal basisonderdelen. Het gaat daarbij om de in Tabel 1-3 genoemde notities.

Onderzoeksthema	Toelichting	Locatie binnen rapportage
Ontwerp	Natuurlijke geometrie van voorlandoplossingen (rapport I)	Annex I
Aanleg	Aanleg voorlandoplossingen (rapport II)	Annex II
Beheer en onderhoud	Beheer en onderhoud (rapport III)	Annex III
Toetsing	Toetsing van voorlandoplossingen (rapport IV)	Annex IV
Opschaling	Opschaling en business-cases (rapport V)	Annex V

Tabel 1-3 Overzicht basisrapportages en plaats binnen de overkoepelende pilot-rapportage.

Deze rapportages zijn daarbij geclusterd rondom de vijf onderscheiden onderzoeksthema's. Het feit dat een deel van de hiervoor benodigde informatie voor meerdere basisrapporten van belang is en dat er de behoefte om (buiten de basisrapportages om) al een eerste overkoepelende analyse op de monitoringsresultaten te kunnen uitvoeren heeft mede geleid tot de opzet van de voorliggende rapportage en meer specifiek tot het invoegen van een algemeen deel (zie vorige paragraaf) aan deze rapportage. In het volgende is heel kort ingegaan op de inhoud van de vijf basisrapportages.

Rapport I – Geometrie van voorlandoplossingen (in Annex I)

In Annex I (vanaf pagina 175) van deze rapportage wordt op basis van data-analyse en toepassing van numerieke modellen inzicht gegeven in de natuurlijke helling van het voorland ter plaatse van de proefsectie en de mate waarin het morfologisch model XBeach deze helling kan reproduceren en de mate waarin vegetatie een voorlandoplossing kan helpen een vooroever te stabiliseren. Deze informatie moet uiteindelijk worden gebruikt voor de definitie van een ook voor andere locaties en omstandigheden geschikt veiligheidsontwerp. De resultaten van deze uitwerkingen komen voor een overgroot deel terug in de hiertoe opgestelde guideline (EcoShape/HKV, 2018).

Rapport II – Aanleg van voorlandoplossingen (in Annex II)

In Annex II (vanaf pagina 197) van deze rapportage wordt op basis van opgedane ervaringen en data-analyse verslag gedaan van het inzicht in het voor de aanleg van een voorland te doorlopen vergunningtraject en de wijze waarop een voorlandtalud op een efficiënte wijze kan worden aangelegd. Ook wordt hierbij aandacht gegeven aan de mogelijkheden voor het gebruik van een mengsel van zand en holoceen materiaal voor (de kern van) een voorlandoplossing en in hoeverre vegetatie op een voorland snel kan worden gerealiseerd.

Rapport III – Beheer en onderhoud van voorlandoplossingen (in Annex III)

In Annex III (vanaf pagina 213) wordt op basis van opgedane ervaringen en data-analyse verslag gedaan van het inzicht in de ontwikkeling van de morfologie, de effecten van structurele verliezen (door de aanwezigheid van een gradiënt in het langstransport) en de voorspelde en gerealiseerde ontwikkeling van de vegetatie.

Rapport IV – Toetsing van voorlandoplossingen (in Annex IV)

Op basis van technische kennis en nadere data-analyse is in Annex IV (vanaf pagina 243) verslag gedaan van nieuwe inzichten in de definitie van een toetsingsprotocol, de rol van de vegetatie binnen de toetsing en de voor de veiligheidstoetsing te hanteren monitoring (EcoShape/HKV, 2018).

Rapport V – Opschaling en business-cases (in Annex V)

Daar waar de kennisontwikkeling onder de benoemde thema's (ontwerp, aanleg, beheer en onderhoud, toetsing steeds de nadruk gelegd op het 'vertalen' van de waargenomen/afgeleide resultaten van de proefsectie voor de Houtribdijk, naar meer generieke kennis die toepasbaar is in andere omstandigheden en/of locaties is in Annex V (vanaf pagina 253) een meer integrale verkenning van de mogelijkheden voor voorlandoplossingen in meer concrete zin gepresenteerd. Het gaat hier dus om een op basis van de individuele guidelines gecombineerde verkenning van de (on)mogelijkheden voor de realisatie van een voorlandoplossing op andere locaties. Deze laatste kwestie is uitgewerkt in een separate notitie (EcoShape/RHDHV, 2018).

1.4.4 GUIDELINES IN BIJLAGEN

In aanvulling op de vijf 'basisrapportages' zijn in het kader van de pilot een aantal specifieke producten onderscheiden. Deze zeven producten zijn conform het werkplan gelinkt aan de eerdergenoemde basisrapportages en separaat opgenomen in een aantal bij deze rapportage gevoegde bijlagen (Bijlage 1 t/m Bijlage 7) zoals toegelicht in Tabel 1-4. Aan het als laatste genoemde onderzoeksthema was, in aanvulling op de in Annex V opgenomen basisrapportage, in eerste instantie geen product gekoppeld. Later er echter voor gekozen om dit wel te doen en een separaat document met de titel 'Business Case zandige vooroever' op te leveren (EcoShape/RHDHV, 2018).

Onderzoeksthema	Gerelateerd product	Locatie
Ontwerp	Guideline ontwerp en beoordeling	Bijlage 1
Aanleg	Lessons-learned vergunningen	Bijlage 2
	Guideline vergunningen	Bijlage 3
	Lessons-learned aanleg	Bijlage 4
	Guideline aanleg	Bijlage 5
Beheer en onderhoud	Guideline beheer en onderhoud	Bijlage 6
Toetsing (beoordeling)	Plan van aanpak toetsingsprotocol	Gecombineerd met Bijlage 1
Opschaling	Business Case zandige vooroever	Bijlage 7

Tabel 1-4 Overzicht producten en plaats binnen de overkoepelende pilot-rapportage.

In het volgende is een korte schets gegeven van deze producten.

Guideline ontwerp en beoordeling (Bijlage 1)

Deze rapportage beschrijft de wijze waarop voor een specifieke locatie een veiligheidsontwerp voor een voorland kan worden gedefinieerd. Daarbij is ook aandacht worden gegeven aan de rol van de achterliggende dijk bij het ontwerp van de (eventueel hybride) waterkering. In de eindfase van de pilot is deze gecombineerd wordt met richtlijnen voor de beoordeling van dijk-voorlandssystemen (EcoShape/HKV, 2018).

Lessons-learned vergunningen (Bijlage 2)

In deze rapportage zijn de tijdens de voorbereiding van de pilot met betrekking tot het vergunningentraject opgedane ervaringen vastgelegd. Daarbij is onder andere ingegaan op de wijze waarop de in een Natura2000-gebied benodigde vergunningen toch relatief snel konden worden verkregen (EcoShape/Arcadis, 2015b).

Guideline vergunningen (Bijlage 3)

Deze rapportage beschrijft een leidraad voor het te doorlopen vergunningen proces voor het realiseren van voorlandoplossingen. Hierin is beschreven welke vergunningen een rol spelen en op welke wijze het vergunningentraject zo soepel mogelijk kan worden doorlopen. Onderdeel daarvan is ook het inventariseren van de eisen die de vergunningen aan het ontwerp stellen en de wijze waarop er in het ontwerp reeds rekening mee kan worden gehouden (EcoShape/Arcadis, 2016a).

Lessons-learned aanleg (Bijlage 4)

Deze rapportage beschrijft de tijdens de aanleg van de zandaanvulling opgedane ervaringen. Onderdeel hiervan is ook de analyse van de opgetreden zettingen en de opgetreden verliezen en de mate waarin de in detail ontworpen geometrie daadwerkelijk is gerealiseerd (EcoShape/Arcadis, 2015c).

Guideline aanleg (Bijlage 5)

Dit rapport heeft betrekking op een guideline waarin wordt beschreven op welke wijze een grootschaliger voorlandoplossing zo adequaat mogelijk kan worden aangelegd en wat daarbij de meest kosteneffectieve uitvoeringsmethodieken zijn.

Inmiddels is een definitieve versie van deze guideline beschikbaar gesteld (EcoShape/RHDHV/Arcadis, 2016b).

Guideline beheer en onderhoud (Bijlage 6)

Deze rapportage betreft een guideline waarin is beschreven op welke wijze beheer en onderhoud van een voorlandoplossing zo adequaat mogelijk kan worden uitgevoerd. Daarbij komt tenminste het nut van het innemen van de holocene topklaar, de effecten van verschillende soorten vegetatie, de 'werking' van de rijsmatten en de effecten van begrazing aan de orde. De tussenstand van deze guideline is beschikbaar in de vorm van een in ontwikkeling zijnde werkrapportage (EcoShape/Deltares/WEnR/RHDHV, 2018).

Plan van Aanpak Toetsingsprotocol (als onderdeel van Bijlage 1)

Omdat de verschillende activiteiten per definitie niet tot een volwaardig toetsingsprotocol leiden is separaat product gedefinieerd dat een plan van aanpak voor de definitie van een dergelijk protocol beschrijft. Ook zal hierbij worden aangegeven of het nuttig en verantwoord lijkt de effecten van de aanwezigheid van vegetatie op de veiligheid van een voorlandoplossing in rekening te brengen. Richtlijnen voor de beoordeling van dijk-voorlandssystemen worden als onderdeel van het in Bijlage 1 genoemde document opgenomen.

Business Case zandige vooroever (Bijlage 7)

Een meer integrale verkenning van de mogelijkheden voor voorlandoplossingen is beschreven in de laatste bijlage van deze rapportage Het gaat hier dus om een op basis van de individuele guidelines gecombineerde verkenning van de (on)mogelijkheden voor de realisatie van een voorlandoplossing op andere locaties. Deze laatste kwestie is uitgewerkt in een separaat document (EcoShape/RHDHV, 2018).

1.5 TOTSTANDKOMING EN VERANTWOORDING

De achtste en laatste versie van deze als overkoepelend te beschouwen rapportage is (als update van de versie van meest recente versie van februari 2018 (EcoShape, 2018a) samengesteld door H.J. Steetzel. Voor de opstelling van deze rapportage is mede gebruik gemaakt van door de EcoShape-partners en/of onderaannemers (in het geval van Shore Monitoring & Research voor de monitoring) opgestelde (werk)documenten waaronder (EcoShape/Deltares/WEnR/HKV, 2018), (Shore Monitoring & Research, 2018), (HKV, 2018) en (Arcadis, 2018). In veel gevallen is daar voor de volledigheid (en om de omvang van dit document nog enigszins te beperken) ook naar verwezen.

Dit laatste geldt ook voor de resultaten van het uitgevoerde aanvullende onderzoek. De detailbeschouwingen ten aanzien van de in de afgelopen winter uitgevoerde metingen zijn beschreven in (EcoShape/Deltares/HKV, 2018), (EcoShape/Arcadis, 2018) en komen slechts op hoofdlijnen terug in het voorliggende document.¹

¹ Het voorliggende eindrapport is sinds 2015 gebaseerd op voorgaande versies van de interim-rapportage welke steeds een op Arcadis-rapportages gebaseerde EcoShape-format hadden. Bij het medio 2018 beschikbaar komen van het officiële EcoShape-rapportageformat is uit pragmatische overwegingen alleen het titelblad en het colofon aangepast van dit rapport aangepast. Detailaanpassingen in de oorspronkelijk gehanteerde huisstijl zijn (afgezien van een beperkte 'vergroening') niet doorgevoerd. De recent verschenen guidelines zijn overigens wel volledig in de nieuw ontwikkelde huisstijl opgeleverd.

Onderliggende documenten zijn inhoudelijk zowel intern als extern gereviewd. Dit laatste geldt specifiek voor de verschillende guidelines waarvoor steeds specifieke afspraken werden gemaakt. De inhoudelijke borging is vormgegeven door de (tussen)resultaten te bespreken met de zogenaamde kerngroep waarbij ook H. Senhorst van RWS aanwezig was.

1.6 SAMENVATTING EN CONCLUSIES

In het volgende is, in aanvulling op de voor in deze rapportage opgenomen managementsamenvatting een korte, meer technische samenvatting van het pilotproject gegeven.

De inmiddels afgeronde pilot voorlandoplossing Houtribdijk, bestaande uit de aanleg van een proefsectie met een voor de dijk gelegen zandaanvulling inclusief monitoringsprogramma, data-analyse en het opstellen van toets- en ontwerptools, was expliciet gericht op het bijdragen aan het sneller en beter onderbouwd kunnen realiseren van zandige versterkingswerken voor met name de belastingomstandigheden in de grotere meren.

De (tussen)resultaten van deze pilot (welke binnen het zogenaamde werkprogramma zijn vastgelegd in de vorm van verschillende rapportages en toets- en ontwerptools) hebben hun toepassing gevonden in zowel lopende als komende HWBP-projecten. Voorbeeld daarvan is de dijkversterking van de Markermeerdijken tussen Hoorn en Edam waarvan een deel van de versterkingsoplossing bestaat uit een zandige versterking (de zogenaamde oeverdijk). Ook is de in de pilot opgedane kennis zowel gebruikt voor de dimensionering van de zandige versterking van het westelijke deel van de Houtribdijk als de zandige buitenranden van de compartimenten van de Marker Wadden.

Deze rapportage betreft de eindversie van een 'levend' document waarin tijdens de afgelopen jaren de allerlaatste resultaten en inzichten vanuit de pilot in onderlinge samenhang zijn beschouwd. De voorliggende versie van deze overkoepelende rapportage betreft een update van de laatste interim-versie van februari 2018 (EcoShape, 2018a). Het aan deze uitwerkingen ten grondslag liggende werkplan is hierbij als basis gehanteerd (EcoShape, 2015a). Dit laatste is ook terug te vinden in de opzet en inrichting van deze overkoepelende rapportage waarin aan de uitwerking van elk van de beschouwde onderzoeksthema's een separate sectie in de rapportage en een of meerdere producten zijn gekoppeld.

Naast een algemeen deel omvat deze overkoepelende rapportage dan ook een vijftal (in annexen opgenomen) rapportage-onderdelen en een beschrijving van een zevental (in bijlagen opgenomen) producten. In het eerste, algemene deel van deze rapportage wordt met name ingegaan op de analyse van de monitoringsresultaten en de verwerking er van tot de voor de beantwoording van de onderzoeksvragen benodigde basisinformatie. In deze zin heeft deze rapportage tijdens de uitvoering van de pilot ook nadrukkelijk (aan)sturend gewerkt op de in de onderliggende werkdocumenten vastgelegde detailuitwerkingen.

De huidige versie van deze rapportage beschrijft de finale stand van zaken per oktober 2018 en ligt ter vaststelling voor in de stuurgroep-bijeenkomst van 28 november 2018. De rapportage is voor een overgroot deel inhoudelijk gebaseerd op een door de EcoShape-partners opgestelde werkdocumenten, dit onder andere aangevuld met algemene overwegingen die bij voorlandoplossingen spelen. In de laatste fase van het project is het hoofd rapport (algemeen deel), de annexen (basisrapportages) en bijlagen (producten) nader aangevuld waarbij steeds voor de details wordt verwezen naar de

onderliggende rapportages. Dit laatste geldt ook voor de gedetailleerde resultaten van het aanvullende onderzoek waarin de werking en functie van het zogenaamde plateau in meer detail is onderzocht.

Guidelines

Een belangrijk doel van de pilot was ook het beschikbaar maken van een aantal guidelines. Dit laatste was reeds het geval voor de zogenaamde lessons-learned van het doorlopen vergunningen-traject (zie Bijlage 2 en (EcoShape/Arcadis, 2015b)) en de gerealiseerde aanleg (zie Bijlage 4 en (EcoShape/Arcadis, 2015c)) alsmede voor de guidelines voor vergunningen (zie Bijlage 3 en (EcoShape/Arcadis, 2016a)) en aanleg (zie Bijlage 5 en (EcoShape/RHDHV/Arcadis, 2016b)). In de eindfase van het project zijn ook de overige guidelines opgeleverd, namelijk een gecombineerd document waarin oorspronkelijk genoemde guideline ontwerp en de bijdrage aan het toetsingsprotocol samenkomen (zie Bijlage 1 en (EcoShape/HKV, 2018)) en een guideline aangaande het beheer en onderhoud (zie Bijlage 6 en (EcoShape/Deltares/WEnR/RHDHV, 2018)). Ook is een notitie opgesteld aangaande de Business-Case Zandige Voorlanden (zie Bijlage 7 en (EcoShape/RHDHV, 2018)).

Aanvullend onderzoek

In de laatste maanden van het afgelopen jaar is het zogenaamde aanvullende onderzoek opgestart. Hiertoe werd medio 2017 besloten (EcoShape, 2017b) (EcoShape, 2017c). Dit onderzoek was gericht op de begripsvorming ten aanzien van de functie en werking van het zogenaamde plateau dat zich ontwikkelde op de vooroever. Dit onderzoek bestond uit twee onderdelen, namelijk het uitvoeren van fysische metingen (golfhoogten, snelheden) op dit plateau en het monitoren van het effect van een lokale afgraving van dit voorland

De gedetailleerde resultaten van de analyse van deze aanvullende metingen zijn beschreven in een tweetal achterliggende rapportages (EcoShape/Deltares/HKV, 2018), (EcoShape/Arcadis, 2018). Het eerste rapport bevat de resultaten van de fysische metingen en de hierop gebaseerde aanpassing van het morfologisch rekenmodel XBeach. De tweede rapportage gaat in meer detail in op de verklaring van de waargenomen effecten van het gedeeltelijk afgraven van deze vooroever. De hoofdlijnen van deze detailrapportages zijn wel opgenomen in de voorliggende rapportage.

Bevindingen en toepassing

De pilot heeft sinds de aanleg in juli 2014 een grote hoeveelheid aan informatie en inzichten opgeleverd welke ook al in andere projecten in met name de Markermeer-omgeving is ingezet. Te noemen zijn bijvoorbeeld het ontwerp van de verschillende zandranden van de Marker Wadden, het voorontwerp van de oeverdijk voor de Markermeerdijk-versterking en het rekenrecept voor de zandige versterking van het westelijke deel van de Houtribdijk.

Ten aanzien van de morfologische ontwikkeling kan de conclusie worden getrokken dat de profielsectie er, ondanks soms zware hydraulische omstandigheden met golven tot 1,2 m) tot het moment van verwijdering in april 2018 relatief stabiel bij heeft gelegen. Dit geldt niet alleen voor het geheel van de aangebrachte zandige driehoek, maar ook voor het loodrecht op de oeverlijn gelegen dwarsprofiel. Er is grofstoffelijk sprake van een sluitende sedimentbalans. Een nadere analyse van de samengestelde morfologie laat zien dat er expliciet onderscheid kan worden gemaakt tussen de ontwikkeling van de lagere vooroever welke geleidelijk aansluiting vindt bij de dwars op de dijk aangebrachte damwand en een sneller reagerend hoger gelegen deel dat zich qua oriëntatie instelt op de momentaan heersende golfval.

In dwarsrichting is binnen het direct door de golfaanval aangestuurde profieldeel (grosfeg boven het NAP-1 m niveau) sprake van een stabiele profielvorm welke bestaat uit een relatief steil deel (helling orde

1 : 10) rond de waterlijn met daarboven een zogenaamde swash-berm. De ontwikkeling van de profielvorm lijkt tenminste gerelateerd aan de aanwezigheid van relatief grof materiaal en uitzevingseffecten. Ook speelt de typische correlatie tussen de lokale waterstand en de golfhoogte op deze locatie hier een rol bij.

Ten aanzien van de vegetatie blijkt het lastig om deze te laten groeien op het rond de waterlijn gelegen deel van de proefsectie. De pogingen hiertoe zijn weinig succesvol gebleken en sluiten ook aan bij de ook elders opgedane inzichten die aangeven dat rietvegetatie niet bestand is tegen golven hoger dan grofweg 20 cm. Op het iets hoger gelegen deel slaat de vegetatie wel goed aan, mede dankzij de in de initiatie-fase ingezette berekening. Ook lijkt een positief effect uit te gaan van de inmenging van de holocene toplaag. Het effect van 'graas' op de vitaliteit van de aangebrachte beplanting is in ieder geval initieel duidelijk negatief. Uiteindelijk ontstond er ook steeds meer vegetatie op de initieel niet beplante delen van de proefsectie (EcoShape/Deltares/WEnR/HKV, 2018).

Overdracht en vervolg

Inmiddels is de proefsectie overgedragen aan het versterkingsproject en fungeert de opsluitdam als oostelijke bescherming van een hier thans ingerichte werkhaven. Van de proefsectie zijn zowel de holocene toplaag als de vegetatie afgevoerd en heeft zelfs het (relatief grove) zandpakket een andere bestemming binnen het versterkingsproject gekregen.

Met het oog op de verdere kennisontwikkeling wordt er thans gewerkt aan een doorstart van het analyse- en monitoringsprogramma voor de zandige randen van het Markermeer. In dit kader is er overleg gevoerd over het monitoringsprogramma voor de Houtribdijkversterking en wordt deze gekoppeld aan het onderzoek dat in het kader van het Kennis en Innovatieprogramma Marker Wadden (KIMa) plaatsvindt aan de zandige randen van de vogeleilanden (KIMa/Arcadis, 2018). Ook is er een directe koppeling gelegd met het nog nader te definiëren monitoringsprogramma voor de zogenaamde oeverdijk langs de noordelijke Markermeerdijken.

Op deze wijze wordt ook invulling gegeven aan de doelstelling van het door ENW opgestelde 'Beter leren keren'-voorstel waarbij de monitoring over de projecten heen wordt ingericht om zo op een meest effectieve wijze de nog openstaande kennisvragen te kunnen beantwoorden.

2 Voorlandoplossingen

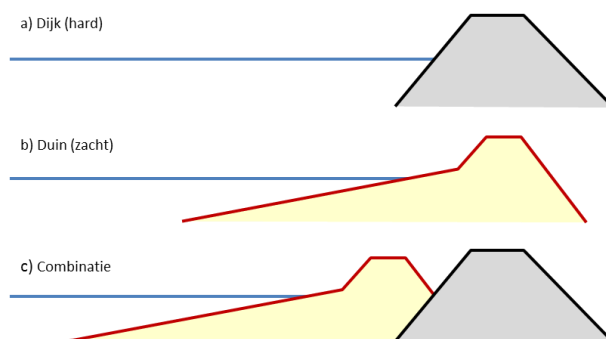
2.1 INLEIDING

In dit hoofdstuk is de algemene karakterisering van voorlandoplossingen beschreven (Paragraaf 2.2), de rol van vegetatie verkend (Paragraaf 2.3), de uitgangspunten voor het ontwerp van voorlandoplossingen tegen het licht gehouden (Paragraaf 2.4) en is de relatie met aanverwante projecten en onderzoeken benoemd (Paragraaf 2.5).

2.2 TYPERING VAN VOORLANDOPLOSSINGEN

2.2.1 INLEIDING

In Figuur 2-1 is een zeer schematische weergave gepresenteerd van de verschillende typen waterkeringen. Van boven naar beneden respectievelijk een normale dijk, een normaal duin en een combinatieoplossing waarbij de dijk aan de buitenzijde is voorzien van een zandige voorlandaanvulling.

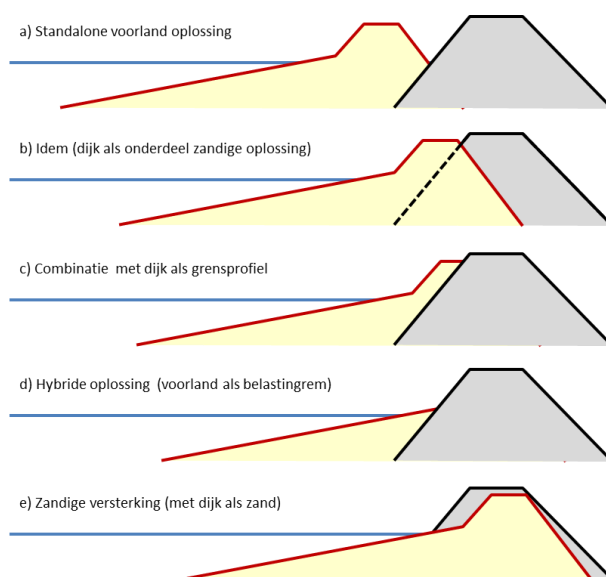


Figuur 2-1 Hoofdtypen waterkeringen, inclusief combinatie-oplossing met voorland.

De laatste combinatie-oplossing vormt het onderwerp van het uitgevoerde onderzoek en de voorliggende rapportage. Duidelijk mag zijn dat er veel mogelijkheden zijn voor de vormgeving en omvang van deze zandige aanvulling, dit afhankelijk van de rol die het voorland en de dijk moeten spelen binnen de totale waterkering.

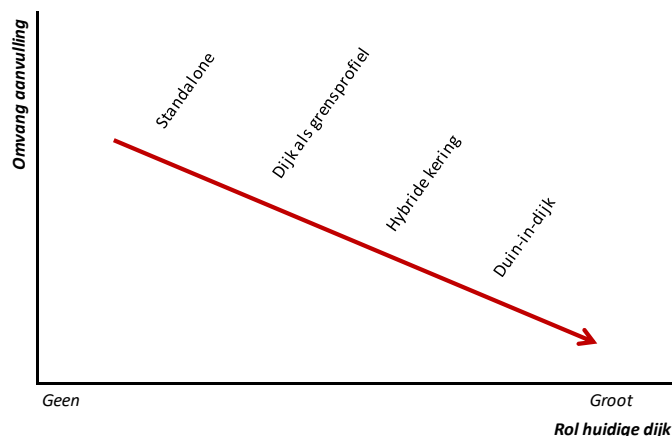
2.2.2 TYPES VOORLANDOPLOSSINGEN IN RELATIE TOT ROL VAN DE DIJK

Bij een (aanwezig of voorzien) veiligheidstekort van een waterkering kan er voor worden gekozen om deze zandig te versterken. Dit kan door het aan de voorzijde toevoegen van een zekere hoeveelheid zand. De omvang van de dan benodigde zandige veiligheidsversterking hangt nauw samen met de (resterende) rol van de aanwezige dijk binnen de nieuwe waterkering. De hierbij relevant geachte mogelijkheden zijn geschetst in Figuur 2-2.



Figuur 2-2 Schematische weergave mogelijke combinatieoplossingen met afnemende omvang benodigde zandige aanvulling.

Hierbij neemt de omvang van de (benodigde) zandige aanvulling van boven naar beneden geleidelijk af. De relatie tussen de rol van de aanwezige dijk en de benodigde versterkingsomvang is schematisch weergegeven in Figuur 2-3.



Figuur 2-3 Omvang benodigde aanvulling als functie van de rol van de huidige dijk.

Op grond van deze karakterisering kan onderscheid worden gemaakt worden tussen de volgende vier basis-typen voorlandoplossingen:

- De volledig zandige oplossingen: optie a) en b);
- Een 'dijk-als-grensprofiel'-oplossing: optie c);
- Een hybride oplossing: optie d);
- Een (meer theoretische) 'duin-in-dijk-oplossing' (met dijk als zandlichaam): optie e).

In de volgende secties zijn deze versterkingsoplossingen nader beschreven.

2.2.3 VOLLEDIG ZANDIGE OPLOSSINGEN

Optie a) heeft betrekking op een zogenaamde standalone zandige oplossing waarbij de dijk feitelijk geen waterkerende functie meer heeft. De voorliggende zandige waterkering neemt in de nieuwe situatie de waterkerende functie van de dijk volledig over.

Aandachtspunt hierbij is dan mogelijk nog wel de mate waarin de nieuwe zandige waterkering grondwaterdicht is, iets waarin de reeds aanwezige dijk alsnog een rol zou kunnen spelen.

Een dergelijke versterkingsoplossing komt bijvoorbeeld in beeld op het moment dat de dijk een serieus geotechnisch probleem heeft en dus niet meer kan worden gegarandeerd dat deze onder maatgevende omstandigheden stabiel is en blijft.

Optie b) verwijst naar een oplossing waarbij het zandige versterkingsprofiel iets verder richting de dijk is verschoven. De achterzijde van de zandige waterkering vertoont hierbij een zekere overlap met de huidige dijk. Feitelijk wordt dit deel van de dijk in deze oplossing dus als zandig beschouwd. Dit deel van het zandvolume behoeft natuurlijk niet te worden aangebracht en daarmee neemt het benodigde aanvulvolume ten opzichte van de vorige optie enigszins af.

Ook in dit geval wordt de sterkte van de nieuwe waterkering nagenoeg volledig overgenomen door de zandige oplossing. Indien de huidige dijk 'slechts' een kruinhoogte en/of bekledings-probleem heeft, mag duidelijk zijn dat de reststerkte van de huidige, achterliggende dijk dan niet volledig wordt aangesproken.

Voorbeelden

Geaccepteerde voorbeelden van de eerste variant van een dergelijke oplossing zijn de zogenaamde oeverdijkoplossing voor de Markermeerdijk (Arcadis/RHDHV/HHNK, 2015a) (Arcadis/RHDHV/HHNK, 2015b) en de reeds uitgevoerde zandige versterking van de Hondsbossche en Pettemer Zeewering. In beide gevallen speelt de huidige dijk geen rol meer binnen de nieuwe waterkering.

Een dergelijke versterkingsoplossing is ook voorzien voor de nog uit te voeren versterking van de Prins Hendrikdijk op Texel. Bedoeling is hier om voor de dijk een standalone duinwaterkering in de vorm van een zanddijk aan te leggen.

2.2.4 DIJK ALS GRENSPROFIEL

Optie c) schetst een oplossing waarbij de huidige dijk een meer expliciete rol vervult binnen de nieuwe waterkering. Van belang hierbij is dat voor het ontwerp en toetsen van een zandige waterkering in een technische uitwerking (in principe conform het zogenaamde Technisch Rapport Duinafslag 2006) onderscheid wordt gemaakt tussen het profieldeel dat onder invloed van de maatgevende belasting zal vervormen/afslaan (feitelijk het deel landafwaarts van het maatgevende afslagpunt) en het daarachter nog aanwezige extra benodigde volume dat een daadwerkelijke doorbraak van de waterkering moet voorkomen.

Dit laatste volume wordt in de reguliere uitwerking veelal als het zogenaamde grensprofiel(volume) aangeduid. In deze versterkingsuitwerking wordt dit deel van de waterkering dus overgenomen door een deel van de huidige dijk. De maatgevende afslag mag in een dergelijke oplossing dus reiken tot op het buitentalud van de dijk. In plaats van een zandig grensvolume is er nu dus sprake van een deel van de dijk dat puur rekentechnisch als zandig wordt beschouwd. Omdat het hier primair gaat om een volume-eis en omdat het aangesproken deel van het dijklichaam sowieso 'sterker' is dan los zand, is dit acceptabel. Ten opzichte van optie a) en b) levert dit dus enige extra dijkwaartse verschuiving op van de zandige aanvulling en vraagt dit dus ook om een geringer aanvulvolume.

Voorbeelden

Voorbeelden van geaccepteerde versterkingsoplossingen die gebruik maken van het principe 'dijk-als-grensprofiel' bevinden zich in Zeeuws-Vlaanderen. Hier is voor een aantal strekkingen van de Zwakke Schakel de zandige versterking (tenminste in eerste aanleg) zo ontworpen dat de maatgevende afslag precies tot de voorzijde van de oude dijk reikt (Alkyon, 2007). De achterliggende dijk neemt dan de functie van het grensprofiel over.

2.2.5 HYBRIDE KERINGEN (INCLUSIEF DIJK-IN-DUIN-OPLOSSING)

Bij het nog verder opschuiven van de zandige aanvulling zou de afslag tot ergens in het dijkprofiel reiken. Indien de dijk, ook in de versterkte situatie, als constructief element wordt beschouwd, leidt het aanwezig zijn van het zandige voorland tot een beperking van de maatgevende golfbelasting op de dijk. Onder de maatgevende belasting (waterstand en golven) zal het voorland niet alleen afslaan en vervormen, maar ook leiden tot een zekere reductie van de maatgevende golfaanval op het buitentalud van de dijk. Afhankelijk van de omvang van het voorland kan bij een initieel afgekeurde dijk de golfaanval op deze constructie dus worden teruggebracht tot een omvang waarbij de aanwezige bekleding en/of de hoeveelheid golfoverslag over de kruin van de dijk alsnog voldoet aan de gestelde criteria. Deze zogenaamde hybride oplossing is in Figuur 2-2 weergegeven als optie d).

Bij een te zwak duin kan het sterktekort ook worden opgelost door het inpassen van een nieuwe dijkconstructie aan de achterzijde van de duinwaterkering. De benodigde omvang van de zandige kering neemt is dan geringer ten opzichte van de eerdergenoemde optie iets wat in een kustplaats-omgeving voordelen kan bieden.

Voorbeelden

Voorbeelden van dergelijk versterkingsoplossingen zijn de Zwakke Schakel versterkingen in Scheveningen-Dorp ('dijk-in-boulevard'), Noordwijk en Katwijk ('dijk-in-duin'). In deze gevallen is een nieuwe dijk gecombineerd met een zandig voorland en is de omvang van het benodigde voorland gekwantificeerd door uit te gaan van een kritieke golfbelasting op de nieuwe dijk.

Een dergelijke hybride versterking is in eerste instantie ook voorgesteld voor de versterking van de Hondsbossche en Pettemer Zeewering (HPZ) waarbij de benodigde omvang van de zandige aanvulling is afgestemd op de nog toelaatbare belasting op de aanwezige dijk (Arcadis, 2011).

Uiteindelijk is hier, mede op basis van geotechnische argumenten en de veel eenvoudiger toetsingsprocedure, gekozen voor een standalone zandige versterking conform optie a).

2.2.6 DUIN-IN-DIJK-OPLOSSING

Daar waar in optie c) slechts een deel van het dijklichaam als zandig wordt beschouwd, kan er natuurlijk ook worden gekozen voor een oplossing waarbij het zandige ontwerpprofiel nog verder in de dijk wordt geschoven. De in optie e) gegeven schets heeft daarbij betrekking op de situatie waarbij het eerdergenoemde grensprofiel helemaal achter in het dijklichaam is gepositioneerd. Duidelijk mag zijn dat een dergelijke benadering slechts vraagt om een relatief beperkte zandige aanvulling voor de dijk. De combinatie van voorland en dijk moet nu dus als duin worden doorgerekend.

Aandachtspunt hierbij is wel het bezwijkgedrag van de voorzijde van de aanwezige dijk. Indien er rekening moet worden gehouden met een in langsrichting afwijkend gedrag (bijvoorbeeld als gevolg van het lokaal falen van de bekleding), moet een extra (bres)toeslag op de benodigde duin/dijkvolume in

rekening worden gebracht. In voorkomende gevallen kan zelfs worden overwogen om de bekleding van de voorzijde van de dijkconstructie (deels) te verwijderen.

Voorbeelden

Een dergelijke benadering is ook aan de orde geweest rondom de inpassing van het grensprofiel in de zandige versterking van de Hondsbossche en Pettemer Zeewering, dit mede ingegeven door het feit dat een dergelijke insteek in principe het meest sober en doelmatig is. Zoals al eerder aangegeven is daar, mede op basis van geotechnische argumenten en de veel eenvoudiger toetsingsprocedure, uiteindelijk gekozen voor een standalone zandige versterking conform optie a).

Mogelijk kan een dergelijke (in principe zeer doelmatige en sobere) oplossing voor een deel van de versterking van de Houtribdijk worden overwogen.

2.2.7 OVERZICHT TYPEN VOORLANDOPLOSSINGEN EN IMPLICATIES

Tabel 2-1 geeft een samenvattend overzicht van de verschillende typen voorlandoplossingen.

Versterkingsoptie	Indicatieve aanduiding	Rol dijklichaam	Opmerking
a) Volledig zandig	Duin als waterkering	Geen	Grensprofiel vóór dijk
b) Idem; verschoven		Beperkt (volume)	Overlap grensprofiel/dijk
c) Combinatie	Dijk als grensprofiel	Grensprofiel	Grensprofiel voor in de dijk
d) Hybride kering	Duin-in-dijk-oplossing	Regulier	Belastingreductie op de dijk
e) Duin-in-dijk	Dijk als duin rekenen	'Duinvolume'	Grensprofiel achter in de dijk

Tabel 2-1 Overzicht mogelijke typen zandige versterkingen en relatie tot de (resterende) rol van de aanwezige dijkconstructie.

Zoals al aangegeven is de (nieuwe) rol van het dijklichaam hierin bepalend.

2.3 ROL VAN VEGETATIE BINNEN VOORLANDOPLOSSINGEN

2.3.1 INLEIDING

Vegetatie op een zandig voorland kan, hetzij direct dan wel indirect, een rol spelen binnen de waterkering. Hierbij valt bijvoorbeeld te denken aan bijvoorbeeld:

- Het vasthouden van het ondiepe deel van de vooroever waardoor er relatief gezien minder (morfologisch) onderhoud nodig is;
- Het invangen van materiaal waardoor het volume sneller groeit;
- Het toevoegen van natuurlijke waarde aan een zandige omgeving;
- Het verminderen van de erodeerbaarheid van het sedimentpakket;
- Het reduceren van de golfaanval op de achterliggende kering door de vegetatie zelf.

In het geval dat de vegetatie ook onder maatgevende omstandigheden, hetzij door reductie van de inkomende golfaanval en/of verminderde erodeerbaarheid van de bodem, een bijdrage levert, resteert natuurlijk nog de discussie of het wel verstandig is om deze mee te nemen in de veiligheidsbeschouwing. Ook als hiertoe niet wordt besloten, kan vegetatie een bijdrage geven aan de groei van het volume en daarmee indirect alsnog van belang zijn voor de ontwikkeling van de veiligheid.

2.3.2 CATEGORIEËN BIJDRAGEN

In onderstaande tabel is getracht de mogelijke bijdragen van vegetatie aan, en functies binnen een waterkering op hoofdlijnen te categoriseren.

Rol vegetatie	Effect op dagelijks beheer	Rol in toetsing en ontwerp
Aanwezigheid	Specifiek onderhoud nodig?	Meerwaarde ontwerp/acceptatie
Invang/vasthouden sediment	Ontwikkeling duinvolume	Gunstig voor volume/veiligheid
	Reductie verliezen/stuifoverlast	Gunstig voor volume/veiligheid
Stabilisatie ondergrond	Reductie beheer door verminderde erosie?	Nog te beoordelen
Reductie golfaanval	Reductie beheer door verminderde belasting?	Nog te beoordelen

Tabel 2-2 Overzicht mogelijke bijdragen van vegetatie aan de functies en veiligheid van de waterkering.

De eerste, basale rol verwijst simpelweg naar de aanwezigheid van vegetatie en de rol die de waardering ervan speelt bij het ontwerp van een nieuwe waterkering. Het invangen en vasthouden van sediment heeft betrekking op een indirect effect van de vegetatie en draagt positief bij aan de volumebalans van de waterkering en daarmee ook aan de mate van veiligheid. De twee laatste rollen van de vegetatie betrekking op de directe fysische effecten van vegetatie op toetsing en mogelijk ook het ontwerp van een waterkering met een voorland.

In het volgende is nog iets verder ingegaan op de verschillende effecten en rollen.

2.3.3 BIJDRAGE AAN NATUURWAARDE

De aanwezigheid van (bepaalde soorten van) vegetatie leidt veelal tot een hogere waardering van de waterkering. Bij het ontwerp van een nieuwe of te versterken waterkering kan deze waardering een rol spelen binnen de afweging die moet worden gemaakt tussen verschillende versterkingsvarianten. Deze waarderingsproblematiek maakt geen onderdeel uit van de voorliggende uitwerkingen.

2.3.4 INDIRECTE BIJDRAGE

De aanwezigheid van vegetatie kan een positief effect hebben op het binnen de waterkering aanwezige zandvolume door het gunstig beïnvloeden van het effect op het windgedreven sedimenttransport. Deze bijdrage kan bestaan uit het tegengaan van verliezen door het voorkomen van uitstuiwen van materiaal naar achteren en/of juist door het invangen van materiaal aan de voorzijde van de waterkering. Deze bijdrage speelt ook een rol in de tijdsontwikkeling van de veiligheid en daarmee mogelijk ook bij het optimaliseren van het ontwerp van voorlandoplossingen (zie ook Paragraaf 2.4.4). Daarnaast leidt een beperking van de verstuiving natuurlijk ook tot een afname van de stuifoverlast, iets wat juist in de afweging en acceptatie van zandige versterkingen een belangrijke rol speelt.

2.3.5 DIRECTE BIJDRAGE

Zoals al beschreven kan de aanwezigheid van vegetatie ook een direct effect hebben op de veiligheid van de waterkering, namelijk door het vergroten van de erosiebestendigheid en of het reduceren van de hydraulische belasting. Op dit moment bestaan er nog geen gevalideerde procedures waarmee deze effecten op een betrouwbare wijze kunnen worden gekwantificeerd.

Doel van deze pilot is om hier juist een stap in te zetten en zelfs te komen tot een voorstel voor de wijze waarop dergelijke gunstige effecten in de toetsing zouden kunnen worden meegenomen (zie Hoofdstuk 3 van Annex IV en Bijlage 7 (Business Case zandige vooroever)).

2.4 ONTWERP VAN ZANDIGE VERSTERKINGEN

2.4.1 INLEIDING

Voor het ontwerp van de in Paragraaf 2.2 beschreven typen voorlandoplossingen gelden voor het ontwerp van het zandige deel van de versterkingsoplossing thans vrij specifieke richtlijnen.

Bij het ontwerp van zandige versterkingen wordt thans bijvoorbeeld uitgegaan van:

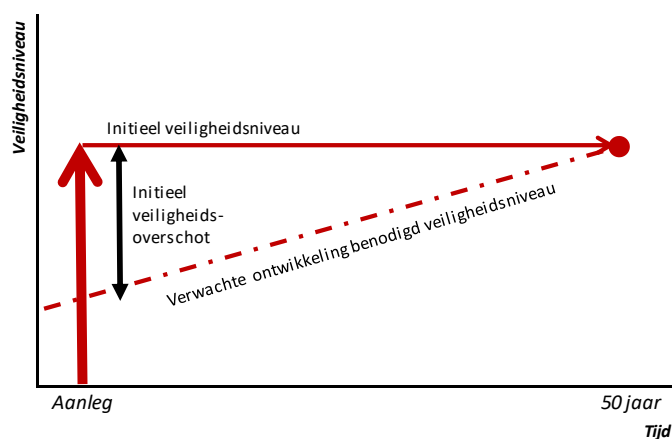
- Een zichttermijn voor de (zandige) versterking van 50 jaar (planperiode);
- Het ontwerpprofiel van de versterking dient te worden gebaseerd op de dan (over 50 jaar) van toepassing veronderstelde hydraulische randvoorwaarden;
- Deze hebben ten minste betrekking op het toepassen van een correctie op de ontwerppeilen voor de verwachte zeespiegelstijging (voor de kust 0,6 m per eeuw conform het zogenaamde middenscenario) en de bij deze hogere ontwerppeilen behorende golfaanval;
- Ook dient er op voorhand te worden gecompenseerd voor de tijdens de planperiode te verwachten zettingen;
- Daarnaast worden er, enigszins afhankelijk van het watersysteem, ook nog soms opslagen (voor waterstand, golfhoogte en golfperiode) in rekening gebracht voor het reduceren van de met onzekerheden samenhangende risico's.

Een dergelijk recept is ook gebruikt ten behoeve van de versterkingsoplossingen voor de zwakke schakels in Noord-Holland (Rijkswaterstaat, 2004).

2.4.2 HUIDIGE ONWERPMETHODIEK

2.4.2.1 BASISPRINCIPE

De genoemde uitgangspunten leiden er toe dat de versterkingsoplossing direct na oplevering per definitie een overmaat aan veiligheid bezit. Dit laatste is geïllustreerd aan de hand van de in Figuur 2-4 gegeven afbeelding waarin de tijdsontwikkeling van het zowel het benodigde als het gerealiseerde veiligheidsniveau is gegeven.



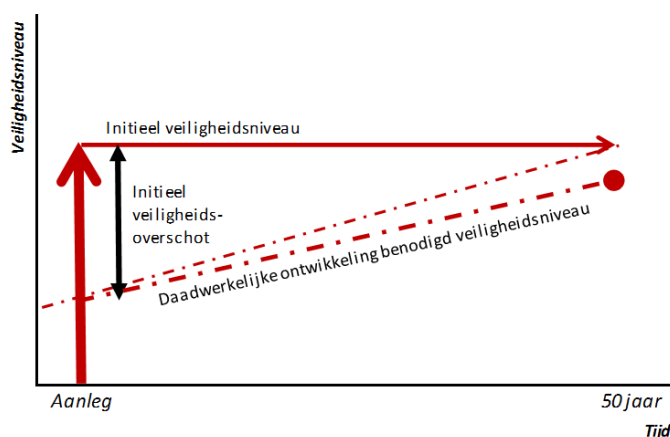
Figuur 2-4 Ontwikkeling veiligheidsoverschot bij directe realisatie maatgevend geacht veiligheidsniveau.

In dit geval wordt het uiteindelijk gewenste veiligheidsniveau (op basis van de verwachte ontwikkeling van het benodigde niveau) direct na aanleg gerealiseerd. Daarbij wordt dus een deel van de kosten die nodig zijn om de waterkering over 50 jaar precies veilig te laten zijn, reeds bij aanleg gemaakt. Voordeel van deze methode is overigens wel dat de versterking in de periode na aanleg geen grote ingrepen meer behoeft en dat er reeds kan worden begonnen met optimaal inpassen van de zogenaamde

'ruimtelijke kwaliteit'. Ook kan het soms goedkoper zijn om het uiteindelijk (volgens de huidige inzichten) benodigde volume in een keer aan te leggen.

2.4.2.2 DAADWERKELIJK VERSUS VERWACHT BENODIGD VEILIGHEIDSNIVEAU

Het moet niet worden uitgesloten dat de versterking over 50 jaar nog steeds een overmaat aan veiligheid heeft. Reden hiervoor kan zijn dat de zeespiegelstijging en/of de zetting alsnog beperkter van omvang is en dat er geen onverwachte ontwikkelingen optreden die aanspraak maken op de onzekerheidsopslagen. Deze situatie is voor de situatie zonder natuurlijke trend geschetst in Figuur 2-5.



Figuur 2-5 Ontwikkeling veiligheidsoverschot bij directe realisatie maatgevend geacht veiligheidsniveau en afwijkend daadwerkelijke ontwikkeling van het benodigde veiligheidsniveau.

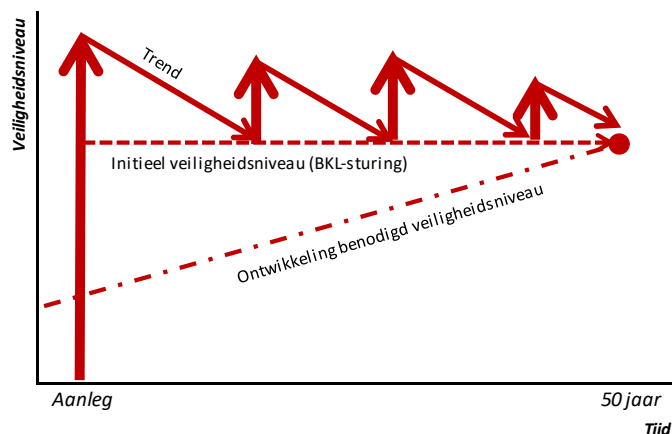
Na 50 jaar is er dan nog steeds sprake van een veiligheidsoverschot.

Hierbij moet worden opgemerkt dat ook tal van niet fysische oorzaken ten grondslag kunnen liggen aan de ontwikkeling van het benodigde veiligheidsniveau. Te noemen zijn bijvoorbeeld het herzien van de wijze van veiligheidstoetsing door aanpassing van de aard (overstromingskansen in plaats van overschrijdingskansen), de zwaarte van de norm alsmede de voor de toetsing te gebruiken procedures en rekenmodellen. Dergelijke beleidsaanpassingen hebben, zeker relatief gezien, een veel grotere impact op het uiteindelijk benodigde veiligheidsniveau.

2.4.2.3 TOEPASSING HUIDIGE METHODIEK BIJ EROSIEF KUSTVAK

Bij het in Figuur 2-4 gepresenteerde voorbeeld is verondersteld dat het benodigde veiligheidsniveau niet in de tijd wijzigt. Bij het beschouwen van een erosief kustvak is dit natuurlijk een niet realistisch beeld. In een dergelijk geval is er sprake van een negatieve trend en zal het veiligheidsniveau zonder ingrepen in de tijd afnemen.

Door het aanbrengen van onderhoudsbuffers kan hierop worden geanticipeerd. Dit leidt dan tot de in Figuur 2-6 gegeven ontwikkeling van het veiligheidsniveau.



Figuur 2-6 Ontwikkeling veiligheidsoverschot bij directe realisatie maatgevend geacht veiligheidsniveau inclusief aanbrengen onderhoudsbuffers bij erosief kustvak.

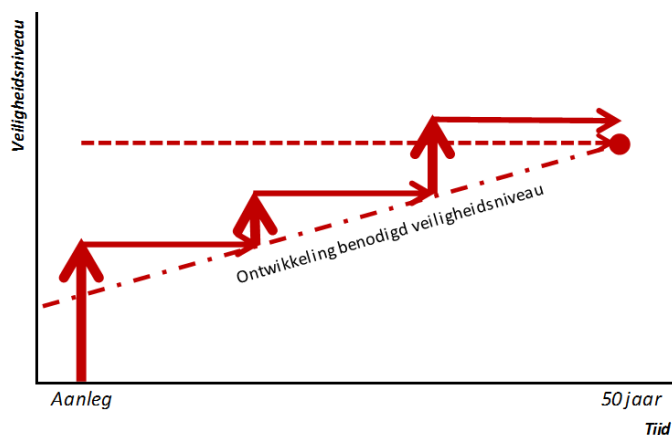
De eerdergenoemde nadelen van deze methode gelden in dit geval natuurlijk ook. Het tijdsgemiddelde veiligheidsoverschot ligt hier zelfs nog hoger.

2.4.3 ALTERNATIEVE METHODE

2.4.3.1 GELEIDELIJKE VERSTERKING

Een logische vraag is dan wel of het gelijk aanbrengen van de '50-jaars veiligheid' eigenlijk wel nodig is en of het niet effectiever zou zijn de benodigde toename van de omvang van de zandige versterking geleidelijk aan te brengen. Dit laatste heeft bovendien het voordeel dat de versterkingsomvang precies kan worden afgestemd op de daadwerkelijke ontwikkeling van de maatgevende condities waardoor over 50 jaar precies wordt aangesloten op de dan daadwerkelijk aanwezige omstandigheden.

In Figuur 2-7 is deze wijze van werken bij het geleidelijk ophogen van het veiligheidsniveau schematisch weergegeven voor een situatie zonder erosieve trend.



Figuur 2-7 Ontwikkeling veiligheidsoverschot bij stapsgewijs verhogen van het veiligheidsniveau.

In dit voorbeeld is de er zelfs sprake van een beperkt veiligheidsoverschot na 50 jaar en kan de laatste versterking dus nog een paar jaar extra mee.

Tijdens de beschouwde periode is er gemiddeld min of meer sprake van een beperkt veiligheidsoverschot, daar waar in de oorspronkelijke uitwerking (van Figuur 2-3) dit veiligheidsoverschot in de tijd afnam.

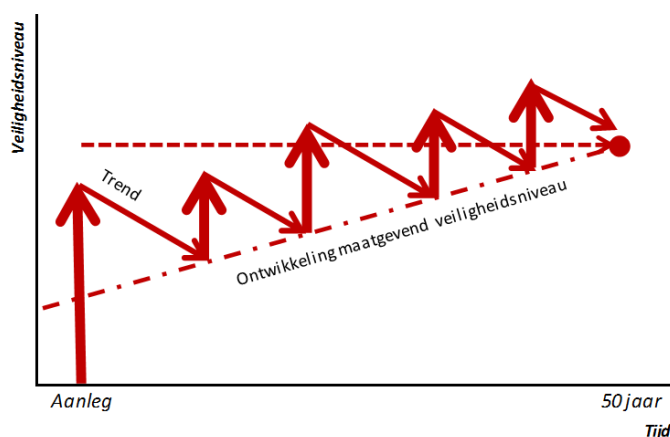
Voor beide opties (Figuur 2-6 en Figuur 2-7) moet, voor het verkrijgen van een vergelijkbaar eindniveau, uiteindelijk een gelijke versterkingsomvang te worden aangebracht.

Voordeel van de laatste, stapsgewijze methode is natuurlijk wel dat een groot deel van de totale versterkingsopgave in de toekomst kan worden uitgevoerd. In de veronderstelling dat er ook op andere plaatsen onderhoud moet worden uitgevoerd (en daarmee de vaste kosten relatief laag zullen zijn), lijkt het een redelijke aanname te veronderstellen dat de deze insteek tot enige kostenbesparing leidt.

2.4.3.2 TOEPASSING ALTERNATIEVE METHODE BIJ EROSIEF KUSTVAK

In lijn met de eerdere uitwerking kan een stapsgewijze versterking natuurlijk ook worden toegepast voor een erosief kustvak.

Dit leidt tot het in Figuur 2-8 geschetste verloop van het veiligheidsniveau.



Figuur 2-8 Ontwikkeling veiligheidsoverschot bij stapsgewijs verhogen van het veiligheidsniveau inclusief aanbrengen onderhoudsbuffers bij erosief kustvak.

De totale versterkingsopgave is ook hier weer gelijk aan de situatie van Figuur 2-6 en Figuur 2-7. Ook hier geldt echter weer geldt dat een groter deel van de versterkingsopgave naar de toekomst kan worden verschoven.

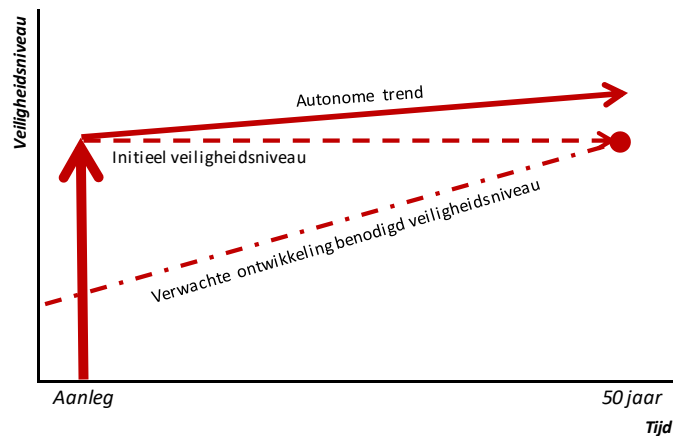
Conclusie is dan ook dat, onafhankelijk of er al dan niet sprake is van een autonome erosieve trend het stapsgewijs versterken van de waterkering mogelijkheden biedt voor kostenbesparingen.

2.4.4 MOGELIJKE OPTIMALISATIES

2.4.4.1 STIMULERING VAN NATUURLIJKE AANGROEI (GEOMETRIE)

In de eerdere uitwerkingen is steeds uitgegaan dat er geen sprake is van een zekere autonome ontwikkeling in de sterkte van de waterkering, waarbij de benodigde toename van de sterkte van de waterkering in de loop van de komende 50 jaar 'eigenhandig' zal moeten worden toegevoegd.

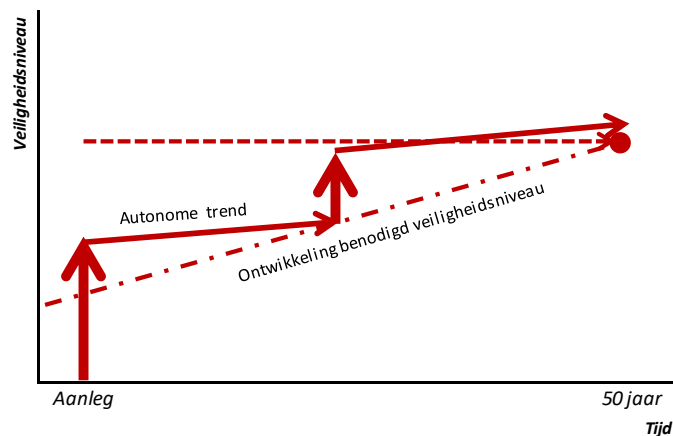
Indien dit wel het geval is (en de waterkering als het ware groeit), neemt het gemiddelde veiligheidsoverschot nog verder toe (zie Figuur 2-9).



Figuur 2-9 Ontwikkeling veiligheidsoverschot bij directe realisatie maatgevend geacht veiligheidsniveau en aanwezigheid autonome aangroei.

Daar waar er per definitie sprake is van een natuurlijke aangroei van het dwarsprofiel is het natuurlijk niet nodig om het volledige tekort ‘eigenhandig’ aan te vullen. Deze natuurlijke aangroei is voor een situatie langs de Noordzeekust enigszins afhankelijk van de breedte van het voorliggende strand en bedraagt orde 10 tot 20 m³/m¹/jaar. Deze ‘gratis’ aanrijking maakt het kiezen voor de ‘geleidelijk toevoegen’-optie natuurlijk nog interessanter.

Dit leidt tot het in Figuur 2-10 geschetste ontwikkeling.



Figuur 2-10 Ontwikkeling veiligheidsoverschot bij stapsgewijs verhogen van het veiligheidsniveau en aanwezigheid autonome trend.

Het totaal nog ‘eigenhandig’ toe te voegen volume neemt hiermee immers nog verder af en de hiermee samenhangende kosten dus ook.

2.4.4.2 INZET VEGETATIE TER STIMULERING VAN VOLUMETOENAME (INDIRECT EFFECT)

Voor het nog een stapje verder reduceren van het ontbrekende volume kan de aanwezigheid van vegetatie worden gebruikt. Door de aanwezigheid van vegetatie kan de invang/aangroei van het volume (en daarmee de sterkte van de waterkering) nog worden versterkt. De mate waarin hangt hierbij af van de omvang van de vegetatie en is weer afhankelijk van de ontwikkelingsfase van de vegetatie.

Dit leidt tot een nog verdere reductie van het nog toe te voegen volume.

2.4.4.3 GEBRUIK VAN VEGETATIE TER VERGROTING VAN DE VEILIGHEID (DIRECT EFFECT)

De aanwezigheid van vegetatie kan ook een direct positief effect hebben op de veiligheid van de waterkering, De mate waarin hangt af ook af van het ontwikkelingsstadium van de vegetatie.

De mate waarin er met deze effecten kan en mag worden rekening gehouden is onderwerp van de pilot. In het geval dat vegetatie een daadwerkelijke bijdrage kan leveren, kan het ook van belang zijn om deze veiligheidsbijdrage te gebruiken voor de toetsing en het ontwerp van voorlandoplossingen.

2.5 RELATIE MET ANDERE PROJECTEN EN ONDERZOEK

2.5.1 BWN/ECOSHAPE-PROJECTEN

2.5.1.1 OVERZICHT

Binnen het Building with Nature (BwN) innovatieprogramma worden zogenaamde waterbouwkundige infrastructuren ontwikkeld, die zowel aan de eisen van de samenleving voldoen, als dat ze nieuwe kansen creëren voor de natuur. Het belangrijkste resultaat van het programma zijn ontwerprichtlijnen om 'Bouwen met de Natuur' in praktijk te brengen. Het programma wordt uitgevoerd door EcoShape, een consortium van overheden, kennisinstellingen en private partijen.

In EcoShape-kader zijn er meerdere projecten in uitvoering welke zijn thans ingedeeld naar de fysieke waar deze worden uitgevoerd. Daarbij worden onderscheiden:

- Zandige oevers;
- Estuaria;
- 'Tropical coastal seas';
- 'Shallow coastal seas';
- Meren ('Delta lakes').

De pilot Houtribdijk maakt deel uit van de als laatste genoemde categorie. Hieronder vallen ook het NWO BE-SAFE-project en de 'Zachte zandmotor Friese IJsselmeerkust'.

Het is met name het BE-SAFE-project dat een nauwe relatie heeft met het voorliggende onderzoeksprogramma.

Verder is er een verbondenheid met de binnen de categorie 'Zandige oevers' lopende projecten. Dit betreft de Delflandse zandmotor en de Hondsbossche en Pettemer Zeewering (HPZ).

Tabel 2-3 geeft een overzicht van de EcoShape-projecten die een relatie hebben met de pilot Houtribdijk.

Project	Status	Toelichting
Zandmotor	Lopend project	Veel relevante onderzoeksporen
NWO BE-SAFE	Lopend project	Richt zich o.a. op de effecten van kwelders en schorren
HPZ-innovatieproject	Inmiddels lopend project	Met name een relatie met thema B (optimalisatie veiligheidsoplossing)

Tabel 2-3 Overzicht relevante EcoShape-projecten.

Een korte toelichting op deze projecten is gegeven in het volgende.

2.5.1.2 ZANDMOTOR

Binnen het zandmotorproject worden de voordelen van zandige suppleties geconcentreerd in ruimte en tijd verkent. Dit betreft een nieuwe strategie voor kustonderhoud gericht op het gebruik van de krachten van de natuur zoals de wind, golven en stromingen om zo de Nederlandse kust te versterken.

Tegelijkertijd stimuleert deze oplossing de ontwikkeling van nieuwe duinen en bijbehorende waardevolle

flora en fauna. De eerste resultaten laten zien dat deze strategie effectief is in het tegengaan van kusterosie terwijl het de mogelijkheden van natuur en recreatie stimuleert.

Sinds de oplevering van het project in 2011 vindt regelmatig monitoring van de ontwikkeling van de zandmotor plaats. Voorlopige resultaten laten zien dat deze zich gedraagt zoals verwacht. Sediment wordt verspreid langs de kust en naar de duinen, zeehonden bezoeken het gebied en er groeien zeldzame planten op nieuw gevormde jonge duinen. Daarnaast is de zandmotor zeer in trek bij wind- en kitesurfers.

Een traditioneel ontwerp van een zandige suppletie heeft als hoofddoel het onderhouden van de kustlijn, gebruik makend van middelgrote zandvolumes (2 tot 5 miljoen m³). De levensduur van de suppletie is typisch zo'n vijf jaar, wat betekent dat de suppletie elke vijf jaar herhaald moet worden resulterend in een frequente verstoring van het aanwezige ecosysteem. Het zandmotor experiment bestaat uit een geconcentreerde zandsuppletie van 21,5 miljoen m³ die tot ongeveer 5 meter boven zeeniveau is aangelegd. Het zand wordt door de natuurlijke processen geleidelijk verdeeld over de vooroever, strand en duinen. Deze innovatieve aanpak streeft ernaar om de verstoring van het ecosysteem te beperken door gebruik te maken van de natuurlijke processen, terwijl het nieuwe plekken biedt voor natuur en recreatie.

De strategie van geconcentreerde suppleties wordt gezien als een klimaat-robuste en natuurvriendelijke oplossing van het tegengaan van kusterosie, terwijl het (tijdelijke) surplus van zand ook nieuwe gebieden voor natuur en recreatie met zich mee brengt. Aangezien de frequentie van verstoring veel lager is dan de traditionele suppleties, krijgt de natuur langer de tijd om zich te ontwikkelen naar nieuwe ecosystemen met meer biodiversiteit.

Vanaf het begin is het zandmotorexperiment een samenwerkingsverband tussen publieke instanties, private ondernemingen en onderzoeksinstituten. Dit heeft geresulteerd in het feit dat de zandmotor een speerpunt vormt voor kustonderzoek en wordt gezien als een innovatieve oplossing voor het beheer van de kust. In de komende vijf jaar zal het project veelvuldig gemonitord worden en zijn er uitgebreide onderzoeksprogramma's opgesteld die de ontwikkeling van de zandmotor nauwkeurig zullen onderzoeken evenals de drijvende krachten – zowel fysisch, ecologisch als sociaal.

In het kader van het zandmotorexperiment worden de volgende producten ontwikkeld:

- Praktische richtlijnen voor het ontwerp en implementatie van kustbeheerprojecten;
- Instrumenten voor een snelle inschatting van optimale locaties, volumes, frequentie en vorm van suppleties;
- Gedetailleerde simulatiemodellen voor de voorspelling van de morfologische ontwikkeling in de tijd, het proces van duinvorming en de effecten op het milieu;
- Lessons-learned, inclusief de potentie van geconcentreerde suppleties om de kustveiligheid te vergroten terwijl het mogelijkheden biedt voor natuur en recreatie;
- Advies op het gebied van bestuurskunde, zoals hoe identificeer (en betrek) je alle relevante eindgebruikers en hoe zorg je ervoor dat de publieke, private en academische partners deelnemen.

Rijkswaterstaat en de provincie Zuid-Holland zijn initiatiefnemers. Boskalis en Van Oord hebben de pilot uitgevoerd, terwijl de monitoring wordt uitgevoerd door Deltares, Imares en Witteveen+Bos.

2.5.1.3 BE SAFE

Het BE SAFE programma heeft tot doel bij te dragen aan de "vergroening van de waterveiligheid" en richt zich op het benutten van begroeide vooroevers, zoals schorren en kwelders, om overstromingsrisico's te

reduceren. Het doel is om meer inzicht te krijgen in de werking van vooroever systemen en de wijze waarop deze kunnen bijdragen aan hoogwaterbescherming. Het project zal resulteren in nieuwe kennis en methoden om vooroeversystemen te kunnen beoordelen, ontwerpen, aanleggen en beheren.

Het project integreert daarbij kennis op het gebied van ecologie, morfologie, waterbouwkunde en bestuurlijke implementatie. Aan de hand van verschillende casestudies wordt het fundamentele gedrag van vooroeversystemen in het veld, in het laboratorium en met computermodellen bestudeerd. In een toegepaste case wordt onderzocht hoe een vooroever kan bijdragen aan een geplande dijkversterking in Nederland en hoe de samenwerking tussen diverse betrokken partijen kan worden vormgegeven. Door de samenwerking van de onderzoekers met Rijkswaterstaat, het bedrijfsleven en natuurorganisaties kunnen de oplossingen die uit het onderzoek volgen direct in de praktijk geïmplementeerd worden.

Het doel is dus het ontwikkelen van nieuwe methoden voor het beoordelen hoe en hoeveel begroeide vooroevers kunnen bijdragen aan het verminderen van overstromingsrisico's. Het project zal leiden tot een beter begrip van (de onzekerheden in) de werking en stabiliteit van deze ecosystemen en de ontwikkeling van nieuwe bestuurlijke afspraken. Dit vereist de integratie van kennis uit de ecologie, biogeomorfologie, waterbouw en governance.

Door veldwaarnemingen en stroomgoot metingen zullen we fundamentele ecologische en fysische processen analyseren van verschillende soorten vooroever vegetaties. De verkregen kennis zal in één implementatie casestudy worden toegepast voor een locatie in Nederland waar dijkversterking nodig is in de toekomst. Deze casestudy integreert fundamentele kennis uit alle disciplines.

Het project zal zorgen voor de kennis, methoden en hulpmiddelen (bijvoorbeeld een interactieve ontwerptool) die nodig zijn voor het ontwerp en de uitvoering van begroeide vooroevers als een veilige, ecologisch wenselijk en kosteneffectief alternatief in waterveiligheid.

2.5.1.4 HPZ INNOVATIEPROJECT

Op dit moment vindt er nog overleg plaats over het definitief invullen van een innovatieproject gerelateerd aan het aanleggen van een vooroever, duin en strandsuppletie zoals deze recent is uitgevoerd bij de Hondsbossche en Pettemer Zeewering. Het innovatieproject heeft als doel het analyseren van meet- en monitoringsgegevens afkomstig van dit "zachte" kustverdedigingsproject, alsmede het opschalen van de resultaten voor mogelijke toepassingen elders.

Binnen het op hoofdlijnen gedefinieerde werkprogramma worden drie verschillende themalijnen gedefinieerd, te weten:

- A. Habitatontwikkeling;
- B. Optimalisatie veiligheidsontwerp;
- C. Beleving.

Binnen de themalijn B 'Optimalisering Veiligheidsontwerp' ligt de focus op de profielontwikkeling. Belangrijke vragen zijn daarbij: welke elementen en maatregelen zijn gebruikt in het ontwerp, wat was hun functie en wat was hun effect op de veiligheid van de kustverdediging? Dit leidt tot vragen zoals:

- Hadden sommige elementen optimaler kunnen worden ingezet om de gewenste veiligheid te krijgen?
- Waren eisen van de Opdrachtgever hierin beperkend?
- Welke eisen dient een opdrachtgever te stellen om optimaal gebruik van maatregelen en ontwerp-principes mogelijk te maken?
- Hoe zeker is het effect van de maatregelen?

- Hoe kunnen deze inzichten landen in het toetsen?

Er wordt hierbij gekeken naar de verschillende elementen, zoals:

- De aangebrachte maatregelen zelf (e.g. rijshout, helm),
- De functie van het geometrisch profiel (e.g. een breder duin zal meer doorstuif tegengaan dan een smal duin).

2.5.2 VERSTERKINGSPROJECTEN

2.5.2.1 OVERZICHT

Relevante lopende projecten zijn samengebracht in Tabel 2-4. Het gaan hier zowel om versterkingsprojecten als projecten in (komende) realisatie waar een zandig voorland deel uit maakt van de oplossing.

Project	Status	Toelichting
Marker Wadden (MW)	Inmiddels gerealiseerd	Mogelijkheden voor aanvullende monitoring ten aanzien van met name de zogenaamde zachte randen.
Versterking Markermeerdijken (MMD)	Detaillering van de voorbereiding van de uitvoering	Met name de totaal 10 km zandige versterking (oeverdijk-oplossing) bestaande uit een 4-tal hoofdsecties. Aanleg start in 2019 en afronding voorzien in 2022.
Versterking Houtribdijk	In uitvoering	Zandige randen zijn grotendeels ontworpen op basis van inzichten uit pilot. Aanleg in 2018 gestart en wordt afgerond in 2019.
Versterking Prins Hendrikzanddijk (PHZD)	In uitvoering	Aanleg zanddam/duin voor dijk in combinatie met natuurontwikkeling

Tabel 2-4 Voorbeelden relevante lopende (versterkings)projecten.

2.5.2.2 REALISATIE MARKER WADDEN (ZACHTE RANDEN)

Dit betreft een uniek project dat zorgt voor natuurherstel van het Markermeer door de aanleg van eilanden met zand klei en slib uit het Markermeer. Met de aanleg van Marker Wadden worden meerdere problemen aangepakt.

Zand, klei en slib uit het Markermeer worden gebruikt om op grote schaal paaiplaatsen, eilanden en natuurlijke oevers te maken. Bedreigde dieren en planten profiteren hiervan. Met dit herstel wordt een robuust natuurgebied in het hart van Nederland gecreëerd dat voor de hele Nederlandse natuur van groot belang is. Tegelijkertijd wordt het Markermeer zo aantrekkelijker. Zo zijn de nieuwe natuureilanden straks toegankelijk voor natuurliefhebbers en watersporters.

Het project Marker Wadden is een initiatief van Natuurmonumenten en kan in de loop van de tijd doorgroeien tot 10.000 hectare en is daarmee een van de grootste natuurherstelprojecten van West-Europa.

Tijdens de voorbereiding van de aanbiedingen is eind mei 2015 door de pilot/EcoShape een presentatie gegeven aan de belangstellende partijen. Doel van deze bijeenkomst was het delen van de laatste inzichten en daarmee ook het gelijkschakelen van de kennis vanuit de pilot.

In de zomer van 2015 is het project gegund aan Boskalis en inmiddels is het werk grotendeels gerealiseerd. In relatie tot de pilot Houtribdijk is met name het ontwerp en de aanleg van de zogenaamde zachte randen

van belang. Voor de detaillering van het ontwerp is gebruik gemaakt van de in het kader van de pilot opgedane inzichten. Omdat er nog veel onzekerheden aanwezig zijn lijkt het voor de hand te liggen de morfologische ontwikkeling van de aangelegde randen intensief te monitoren.

Hiervoor zijn inmiddels afspraken gemaakt in het kader van het Kennis en Innovatieprogramma Marker Wadden (KIMa) en er zijn zelfs al specifieke profielmetingen uitgevoerd (KIMa/Arcadis, 2018).

2.5.2.3 VERSTERKING MARKERMEERDIJKEN (OEVERDIJKTRAJECTEN)

De zogenaamde oeverdijk betreft een alternatieve dijkversterkingsmethode, waarbij de waterkerende functie van de thans aanwezige dijk wordt overgenomen door een nieuwe, voor de huidige dijk aan te leggen waterkering. Dit alternatief voor de dijkversterking tussen Hoorn en Amsterdam, is als voorkeursvariant gekozen voor een aantal langere dijktrajecten op het noordelijke deel tussen Hoorn en Volendam (HHNK, 2014). In het totaal gaat het om 10 km oeverdijk verdeeld over een vijftal trajecten (Hoorn, Hoornse Hop Noord en Zuid, Zeevang en Volendam).

Voorjaar 2015 is er door Arcadis gewerkt aan de laatste versie van de technische onderbouwing van de zogenaamde oeverdijk rapportages. Deze zijn eind mei opgeleverd. In met name het zogenaamde veiligheidsrapport zijn de laatste inzichten vanuit de pilot Houtribdijk al verwerkt.

Kern daarvan is dat het basisontwerp van de oeverdijk (met een korreldiameter van 0,2 mm) niet zonder meer bruikbaar is als er gebruik wordt gemaakt van veel grover zand. Dit lijkt een van de meest belangrijke eerste uitkomsten van de pilot. In deze zin is de kennis uit de pilot direct geland binnen het versterkingsproject MMD. In het kader van de pilot is inmiddels verkend in hoeverre de modellen (en dan met name het zogenaamde XBeach-model) geschikt kan worden gemaakt om deze vertaling te doen.

Inmiddels is de zogenaamde projectalliantie (aannemerscombinatie, HHNK/RWS, adviseurs) ingesteld en ligt er ook een planning voor de vervolgitwerkingen. Daarbij is het de bedoeling om in het voorjaar van 2016 een keuze te maken voor de definitieve hoofdlijn van het ontwerp (het zogenaamde Voorontwerp Projectplan; VOPP+) en rond de zomer voldoende informatie te hebben voor het opstarten van het vergunningentraject. Aansluitend volgt het detailontwerp (DO) en het uitvoeringsontwerp (UO) gevolgd door start uitvoering medio 2019. Ten behoeve van de afstemming op de pilot is in het voorjaar van 2016 reeds een workshop georganiseerd.

Inmiddels wordt er gewerkt aan het definitief ontwerp en is de planning dat de aanleg medio 2019 wordt opgestart.

2.5.2.4 VERSTERKING HOUTRIBDIJK (DEEL ZANDIGE VERSTERKING)

De Houtribdijk ligt tussen Lelystad en Enkhuizen en tussen Markermeer en IJsselmeer. Bij de landelijke toetsing aan de norm voor de waterveiligheid in 2006 is gebleken dat verbeteringen nodig zijn om het achterland ook op lange termijn veilig te houden. Deze dijk moet dan ook over een lengte van ruim 25 km versterkt worden.

In april 2014 heeft de minister van Infrastructuur en Milieu het voorkeursalternatief voor de versterking van de dijk vastgesteld. Dit voorkeursalternatief gaat uit van een overslagbestendige dijk met een stenen bekleding tussen Lelystad en Trintelhaven aan beide zijden van de dijk en een versterking met zand tussen Trintelhaven en Enkhuizen. De zandige versterking 'raakt' zowel technisch inhoudelijk als qua locatie direct aan de pilot.

De afstemming op het versterkingsproject is meerdere keren doorgesproken met de verantwoordelijk technisch en projectmanager. Daarbij is ook steeds de actuele stand van zaken en de vooralsnog door het project aangehouden planning (met start aanbesteding begin 2016) aan de orde geweest.

De reeds beschikbare pilot-inzichten die van nut kunnen zijn voor de definitie van het voorontwerp van de zandige versterking zijn beschikbaar gesteld.

Inmiddels is de proefsectie overgedragen aan het versterkingsproject en wordt de opsluitdam gebruikt als afmeerlocatie. Verder vindt er overleg plaats over de inrichting van een project-overkoepelend monitoringsprogramma waarbij de koppeling is gelegd met het onderzoek op de Marker Wadden (KIMa/Arcadis, 2018) en het monitoringsplan voor de oeverdijken bij Hoorn.

2.5.2.5 AANLEG PRINS HENDRIKZANDDIJK

Voor de versterking van de Prins Hendrikdijk op Texel (dijktraject 9) wordt een zandige oplossing voorzien, bestaande uit een zanddam/veiligheidsduin voor de dijk in combinatie met een natuurontwikkeling op het hier relatief brede voorland.

Inmiddels is dit project in uitvoering.

2.5.3 ONDERZOEKSPROJECTEN

2.5.3.1 OVERZICHT

De in de pilot opgedane kennis is relevant voor de in Tabel 2-5 opgenomen onderzoeksprojecten.

Project	Status	Toelichting
POV-Waddenzeedijken	Opgestart in 2017 en afronding voorzien in 2018	Thema voorlanden binnen HR-spoor
Definitie onderzoeksplannen WTI2023	Verkenning onderzoeksthema's	Voorlandproblematiek binnen duinenspoor

Tabel 2-5 Overzicht relevante onderzoeksprojecten (per maart 2016).

2.5.3.2 POV-WADDENZEEDIJKEN (VOORLANDEN)

In het kader van de POV-Waddenzeedijken heeft een onderdeel van een van de drie studiesporen (het spoor dat zich richt op de hydraulische randvoorwaarden) betrekking op voorlanden. In het betreffende projectvoorstel is reeds een directe link gelegd met de pilot Houtribdijk. Inmiddels is ook afgesproken dat dit studieproject direct zal worden gekoppeld aan een 'naar voren gehaald' HWBP-versterkingsproject langs de Noord Friese Waddenkust (Arcadis, Deltares, HKV, 2018).

2.5.3.3 DEFINITIE ONDERZOEKSPLANNEN WTI2023 (VOORLANDEN)

Binnen het thans in ontwikkeling zijnde Wettelijk Toetsingsinstrumentarium (WTI2017) hebben voorlanden en hybride keringen helaas geen plaats gekregen.

Voor het daaropvolgende WTI is dit vooralsnog wel de bedoeling.

Inmiddels zijn er, ten behoeve van het opstellen van de kennisagenda waterveiligheid, meerdere onderzoeksvoorstellen voor het WTI2023 voorbereid. Onderdeel daarvan is ook een onderzoeksvoorstel voor de studies rondom voorlanden en hybride keringen. Insteek is dat deze optimaal zal aansluiten op de resultaten van onze pilot. De in het kader van de pilot opgestelde guideline Ontwerp en beoordeling van dijk-voorland-systemen speelt hier een belangrijke rol in (EcoShape/HKV, 2018).

3

Koppeling met onderzoeksvragen

3.1 INLEIDING

Binnen het zogenaamde werkprogramma zijn in de opstartfase van de pilot in 2014 de aan de opdracht ten grondslag liggende onderzoeksvragen opgesteld alsmede de aan de doelen gekoppelde producten gedefinieerd. Het voorliggende hoofdstuk gaat iets dieper in op deze koppeling en legt daarmee een direct verband tussen de oorspronkelijk gedefinieerde onderzoeksvragen, de nagestreefde (en op te leveren) producten alsmede het onderdeel van de rapportage waarin deze resultaten zijn beschreven.

3.2 ONDERZOEKSTHEMA'S EN VRAGEN

Het in het werkplan aangehouden startpunt voor de inhoudelijke invulling van het werkprogramma was dat er een zo groot mogelijke bijdrage moest worden geleverd aan de voor de pilot geformuleerde doelen (zie Paragraaf 1.2).

Met name het inhoudelijke deel van het werkprogramma geeft hier invulling aan, waarbij onder meer data uit het monitoringsprogramma nader geanalyseerd wordt teneinde zo veel mogelijk generieke inzichten en guidelines te kunnen ontwikkelen.

Onderzoeksvragen

Om invulling te geven aan de drie operationele doelen van Paragraaf 1.2, zijn reeds in de voorstudie een aantal onderzoeksvragen geformuleerd die gekoppeld zijn aan een vijftal thema's (EcoShape, 2013).

Het betreft de volgende 13 vragen:

1. Wat is de invloed van de taludhelling van het voorland op de effectiviteit en de stabiliteit van het voorland?
2. Wat is de invloed van vegetatie in het dwarsprofiel op de effectiviteit en de stabiliteit van het voorland?
3. Hoe kan een dijk-voorlandstelsel worden ontworpen dat voldoet aan de veiligheidsnormen?
4. Hoe ziet het vergunningenproces voor de aanleg van een voorland eruit?
5. Hoe kan het beoogde talud worden aangelegd met minimale inspanning?
6. Kan er gebruik worden gemaakt van een mengsel van zand en holocene klei bij de aanleg van het voorland?
7. Hoe kan de beoogde vegetatie zo snel mogelijk worden gerealiseerd?
8. Welk beheer en onderhoud is benodigd voor het behoud van een stabiel talud?
9. Welk beheer en onderhoud is gewenst voor de ontwikkeling en instandhouding van vegetatie?
10. Hoe kan getoetst worden of een dijk-voorlandstelsel voldoet aan de veiligheidsnormen?
11. Wat is de rol van vegetatie in de toetsing?
12. Welke monitoringsfrequentie is nodig om de veiligheid van het systeem te waarborgen?

13. Hoe kan de proefsectie worden opgeschaald naar locaties met andere karakteristieken?

Onderzoeksthema's

Deze 13 vragen zijn gekoppeld aan de volgende onderzoeksthema's:

- A. Het ontwerp van een veilig en stabiel voorland,
- B. De efficiënte aanleg van een voorland (inclusief vergunningen),
- C. Het optimale beheer en onderhoud,
- D. Het definiëren van geschikte toetsingsmethoden,
- E. De opschaalbaarheid van de resultaten van deze proefsectie naar locaties met andere karakteristieken.

De thema's A en B zijn gekoppeld aan het als eerste genoemde operationele doel (het komen tot geoptimaliseerde uitvoeringsvormen), thema C en D respectievelijk aan doel 3 (inzicht in beheer- en onderhoudsfase) en 2 (toetsbaar maken van een zandige oplossing).

De onder E genoemde opschaalbaarheid heeft een meer algemeen karakter en betreft de vertaling van de resultaten van de pilot/proefsectie naar andere locaties met andere omstandigheden, locaties en/of toepassingen.

In Tabel 3-1 is de relatie gelegd tussen de verschillende doelen, thema's en onderzoeksvragen.

Doelen	Thema's	Onderzoeksvragen
Geoptimaliseerde uitvoeringsvormen	A - Ontwerp	1 – Invloed taludhelling
		2 – Invloed vegetatie op stabiliteit
		3 – Veiligheidsontwerp
	B - Aanleg	4 – Vergunningenproces
		5 – Efficiënte aanleg talud
		6 – Gebruik mengsel als kern
		7 – Realisatie vegetatie
Beheer en onderhoud	C – Beheer en onderhoud	8 – Behoud stabiel talud
		9 – Instandhouding vegetatie
Toetsing	D - Toetsing	10 – Toetsprotocol veiligheidsontwerp
		11 – Rol vegetatie
		12 – Monitoringsfrequentie
	E - Opschaalbaarheid	13 – Toepassingsbereik

Tabel 3-1 Relatie tussen doelen, onderzoeksthema's en geformuleerde onderzoeksvragen.

3.3 PRODUCTEN GEKOPPELD AAN DOELEN

Omdat onder het eerste doel (geoptimaliseerde uitvoeringsvormen) meerdere subdoelen zijn ondergebracht, is er voor gekozen om dit onderwerp ook in meerdere producten te laten terugkomen.

Verder moeten de producten ook aansluiten op de beschikbaar komende 'input'. Hierbij valt te denken aan:

- Ervaringen opgedaan tijdens het ontwerp- en vergunningentraject (WP1);
- Ervaringen opgedaan tijdens het aanleggen van de proefsectie (WP2);
- Resultaten van de analyses van de basisresultaten van het monitoringsprogramma (WP3).

Tabel 3-2 geeft (vergelijkbaar met Tabel 3-1) een overzicht van de doelen, onderzoeksthema's en onderzoeksvragen, echter nu met de toevoeging van een extra vierde kolom waarin de in het werkplan afgeleide producten zijn benoemd.

Doelen	Thema's	Onderzoeksvragen	Producten
Geoptimaliseerde uitvoeringsvormen	A - Ontwerp	1 - Invloed taludhelling	1 - Rapport I
		2 - Invloed vegetatie op stabiliteit	2 - Guidelines ontwerp
		3 - Veiligheidsontwerp	3 - <i>XBeach-module</i> 4 - <i>Bijdrage DMS</i>
	B - Aanleg	4 - Vergunningenproces	5 - Rapport II
		5 - Efficiënte aanleg talud	6 - Guidelines vergunningen
		6 - Gebruik mengsel als kern	7 - Guidelines aanleg
		7 - Realisatie vegetatie	
Beheer en onderhoud	C - Beheer en onderhoud	8 - Behoud stabiel talud	8 - Rapport III
		9 - Instandhouding vegetatie	9 - Guidelines B&O
Toetsing	D - Toetsing	10 - Toetsprotocol veiligheidsontwerp	10 - Rapport IV 11 - Plan van aanpak
		11 - Rol vegetatie	
		12 - Monitoringsfrequentie	
	E - Opschaalbaarheid	13 - Toepassingsbereik	12 - Roadmaps (Rapport V)

Tabel 3-2 Relatie tussen doelen, onderzoeksthema's en onderzoeksvragen, inclusief koppeling met de verschillende producten.

De producten zijn gecategoriseerd naar de onderzoeksthema's A t/m E waarbinnen aan een aantal onderzoeksvragen wordt gewerkt en waaruit de producten volgen die in de vierde kolom zijn beschreven. In het totaal worden er in het werkplan 12 producten onderscheiden. Hiervan is product 11 (Plan van aanpak) in de eindfase gecombineerd met product 2 zijnde de guideline ontwerp.

Het gaat daarbij om vijf basisrapportages (Rapport I t/m V; zie ook Paragraaf 1.4.3 voor plaats binnen voorliggend rapport), een viertal guidelines, een plan van aanpak (zie Paragraaf 1.4.4 voor plaats binnen voorliggend rapport) en twee cursief aangegeven producten die niet expliciet terugkomen in deze rapportage. Deze laatste hebben betrekking op de XBeach-module (software) en de bijdrage aan het DMS (dataopslag).

3.4 PRODUCTCATEGORIEËN

Binnen de in het werkplan genoemde producten is onderscheid gemaakt naar een vijftal categorieën/types, te weten:

- Achtergrondrapportages;
- Generieke rekenmodules;
- Generieke guidelines;
- Roadmaps en business-cases;
- Datamanagementsysteem bijdragen (DMS).

Achtergrondrapportages

In de achtergrondrapportages worden de ervaringen, analyses en inzichten uitgewerkt op basis van input uit de pilot Houtribdijk. Deze rapportages zijn bedoeld als basis voor de afleiding van de meer generieke guidelines.

De vier op te leveren rapportagedelen zijn:

- Rapport I: Natuurlijke geometrie van voorlandoplossingen
- Rapport II: Aanleg voor voorlandoplossingen
- Rapport III: Beheer en onderhoud
- Rapport IV: Bijdrage ontwikkeling toetsingsprotocol voor zandige voorlanden.

In de voorliggende rapportage komen deze rapportages terug als separate, in annexen opgenomen, onderdelen van het overkoepelende rapport. Hierbij wordt waar mogelijk verwezen naar onderliggende meer uitgebreide detailrapportages zoals het rapport over de monitoring dat in het kader van WP3 is opgesteld (EcoShape/Deltares/WEnR/HKV, 2018).

Generieke rekenmodules

Dit product heeft betrekking op generieke rekenmodules en standaard settings in het XBeach-model op basis waarvan het gemonitorde gedrag van de voorlandoplossing op een generieke manier gereproduceerd kan worden. De op te leveren producten betreffen:

- Gekalibreerd morfologisch model (standaard settings);
- XBeach -module effect vegetatie.

De software zelf is beschikbaar via de open source XBeach -site (<http://oss.deltares.nl/web/XBeach>).

Het model speelt een belangrijke rol in de toetsing- en ontwerpprocedures.

De toepassing voor de pilot-omstandigheden is uitgebreider beschreven in het rapport over de aanvullende metingen (EcoShape/Deltares/HKV, 2018). In dit kader is het rekenmodel voorzien van een speciale module waarmee de ontwikkeling van met name het strandprofiel veel beter kan worden gesimuleerd. De ontwikkeling van de vegetatie-module is in het kader van de pilot uiteindelijk geen stap verder gebracht. De reden hiervoor is simpel, namelijk dat er geen sprake was van de voorziene interactie tussen de hydraulische belasting en voldoende stabiele vegetatie rond en net boven de oeverlijn.

Generieke guidelines

Generieke guidelines kunnen worden toegepast in vervolginiciatieven en projecten. De op te leveren guidelines hebben betrekking op:

- Guidelines voor ontwerp van een voorlandoplossing;
- Guidelines voor het vergunningetraject van een voorlandoplossing;
- Guidelines voor de aanleg van een voorlandoplossing;
- Guidelines voor het beheer & onderhoud van een voorlandoplossing.

Zowel voor de guideline voor het vergunningetraject als de aanleg zijn, als 'voorloper' op de guideline, ook nog een de lessons-learned van de voorbereidings- en aanlegfase op schrift gesteld.

Roadmaps en business-cases

Een zogenaamde roadmap heeft betrekking op het opschalen van de toepassing van de ontwikkelde guidelines en eventueel rekenmodules voor een aantal nader te bepalen opschalingslocaties. Feitelijk moet hieruit blijken wat de pilot heeft opgeleverd voor de ruimere toepassing van voorlandoplossingen. Als

onderdeel hiervan zal per opschalingslocatie ook een eerste-orde business-case worden geformuleerd. Dit kan gezien worden als een belangrijk en overkoepelend eindproduct van de pilot en is qua rapportage ondergebracht in het vijfde basisrapport.

Data Management Systeem

Het zogenaamde Data Management Systeem (DMS) heeft betrekking op de omgeving waarin nader geanalyseerde verbanden en data opgeslagen worden en welke toegankelijk is voor de project partners. In een later stadium zal deze ook toegankelijk worden gemaakt voor derden. Inmiddels zijn er afspraken gemaakt voor de langjarige opslag van deze data en de wijze waarop deze (ook voor derden) toegankelijk zal worden gemaakt.

4

Monitoringsprogramma

4.1 INLEIDING

Het monitoringsprogramma levert input voor de nadere analyses die vereist zijn voor het ontwikkelen van de gevraagde producten. De inrichting van het monitoringsprogramma is beschreven in het zogenaamde monitoringsplan (EcoShape, 2014). Het monitoringsplan geeft een gedetailleerd beeld van de uitgevoerde en nog uit te voeren metingen en geeft tevens aan welke kennisvragen op basis van deze metingen beantwoord kunnen worden. Voor meer informatie kan vooralsnog worden verwezen naar dit in 2014 opgestelde (en vastgestelde) plan.

4.2 VOORTGANG EN RESULTATEN (WP3)

De eindresultaten van de monitoring zijn beschreven in een door Deltares en Alterra opgestelde rapportage (EcoShape/Deltares/WEnR/HKV, 2018). In dit document is ingegaan op de uitgevoerde werkzaamheden en is een overkoepelende beschrijving gegeven van de hierbij opgedane inzichten. In een tweede rapport is ook verslag gedaan van zowel de monitoring als de analyses van de zogenaamde aanvullende metingen (EcoShape/Deltares/HKV, 2018). In deze laatste rapportage komen de WP3- en WP4-activiteiten samen.

4.3 INPUT VOOR NADERE ANALYSES (WP4)

De monitoring is onderdeel van WP3 en levert de input voor de binnen WP4 uit te voeren analyses. Binnen WP3 vindt daartoe reeds een eerste verwerkingsslag van de basisdata plaats. Zo worden bijvoorbeeld de resultaten van de druksensor (als output van een van de sensoren in het meetframe) al omgezet via een hoogfrequente tijdserie van waterstanden naar een golfhoogte en tijdsgemiddelde waterstanden. Ook de ingemeten bodems zullen een eerste verwerkingsslag hebben ondergaan. Deze informatie is daarbij omgezet naar een voor verdere analyses bruikbaar format. Ook de waargenomen vegetatieontwikkeling is vastgelegd, zowel op basis van de inmetingen als meer globaal op basis van de camerabeelden.

Dit onderdeel van de voorliggende rapportage gaat met name in op de beschrijving van de monitoringsresultaten op hoofdlijnen en de opwaardering van specifieke monitoringsresultaten. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen de volgende vier clusters:

- De hydro/meteo-data
- De bodemligging;
- Het sediment;
- De vegetatie.

Deze laatste onderdelen komen terug in Hoofdstuk 5 tot en met 8 van dit algemene rapportagedeel. Daar waar op onderdelen niet kan worden verwezen naar onderliggende rapportages, zijn de detailuitwerkingen opgenomen in het voorliggende eindrapport.

5

Basisinfo hydro/meteo

5.1 INLEIDING

In dit hoofdstuk wordt een algemeen beeld geschetst van de gemeten wind, waterstanden, golf- en stroomcondities. Daarbij worden de afhankelijkheden tussen deze grootheden inzichtelijk gemaakt, en wordt een duiding gegeven van de kwaliteit van de data. Een beschrijving van de meetinstrumenten en data-inwinning is de monitoringsrapportage (EcoShape/Deltares/WEnR/HKV, 2018).

Het meetstation bevindt zich op $(x,y) = (156445.280, 516524.292)$ (RD coördinaten). De bodemligging ter plekke is NAP-2,75 m. De ADV-sensor, waarmee onder water met 8 Hz drukken en horizontale snelheden worden gemeten, bevindt zich 1,20 m boven de bodem. De windmeter bevindt zich op NAP+9,98 m. De data is gebruikt bij de analyse van onder meer de morfologische ontwikkeling van de proefsectie.

5.2 GEBRUIKTE INFORMATIE IN OVERDRACHTSTABEL

Zoals al aangegeven worden binnen WP3 de resultaten van de gemeten wind, waterstanden en golfcondities reeds vertaald naar een voor de verdere analyses te gebruiken waarden. Voor het eenduidig toeleveren van deze verwerkte en gecontroleerde informatie is overeengekomen dat deze wordt samengebracht in een zogenaamde overdrachtstabel.

In Tabel 5-1 is de thans vigerende versie van deze tabel benoemd. Deze tabel is beschikbaar op de zogenaamde repository.

Versie	Benaming	Bereik
27 maart 2018	Houtribdijk-hydrometeo_2017-asc	1 januari 2014 (0:30 uur) - 20 maart 2018 (7:30 uur)
27 februari 2017	Hydrometeodata.asc	19 november 2014 (17:30 uur) – 24 februari 2017 (5:30 uur)

Tabel 5-1 Versiebeheer overdrachtstabel hydro/meteogegevens (relevante versies per oktober 2018).

In de huidige versie van deze tabel zijn de volgende gegevens opgenomen:

- De datum en tijdstip (per uur);
- De waterstand in m t.o.v. NAP;
- De significante golfhoogte in m;
- De golfperiode (piekwaarde) in s;
- De golfrichting in ° t.o.v. Noord;
- De windsnelheid in m/s;
- De windrichting in ° t.o.v. Noord;
- De tijdsgemiddelde stroomsnelheid in m/s;
- De stroomrichting in ° t.o.v. Noord.

Hierbij moet worden opgemerkt dat de verwerking en toevoeging van de informatie over de langs de voorzijde van de pilot aanwezige stroomsnelheden pas vanaf 16 maart 2016 is toegevoegd.

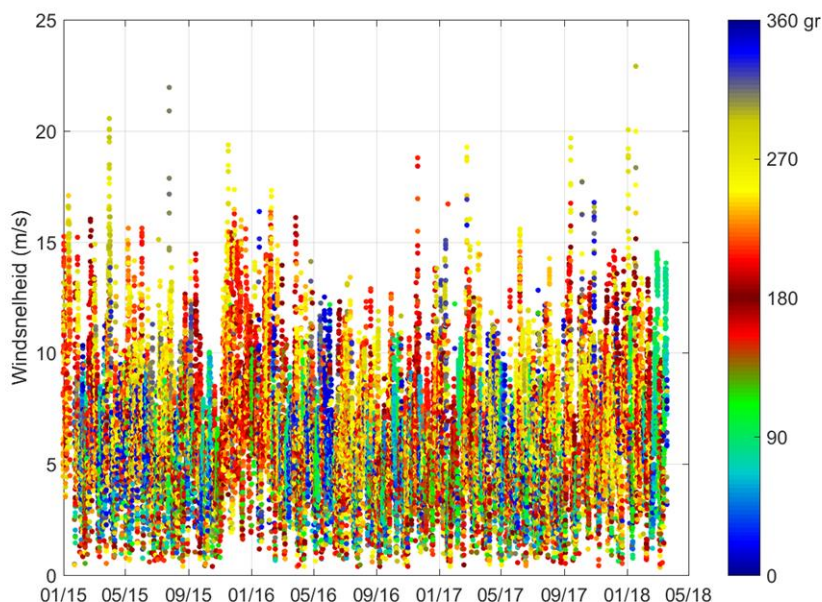
In aanvulling van de reeds in het genoemde werkdocument opgenomen beschrijvingen is in het volgende per karakteristiek een korte analyse gegeven van deze gegevens. Deze informatie is deels ontleend aan een door HKV opgesteld werkdocument (HKV, 2018).

5.3 BASISANALYSES MEETRESULTATEN

5.3.1 WIND

Op de damwand naast het zandige voorland is een windmeter geïnstalleerd op de daar aanwezige monitoringsmast. Deze levert informatie over zowel de windrichting als de windsnelheid (EcoShape/Deltares/WEnR/HKV, 2018).

In Figuur 5-1 is een overzicht gegeven van de tijdsontwikkeling van de windsnelheid. De kleuren van de gebruikte datapunten zijn hierbij gerelateerd aan de aanwezige windrichting.



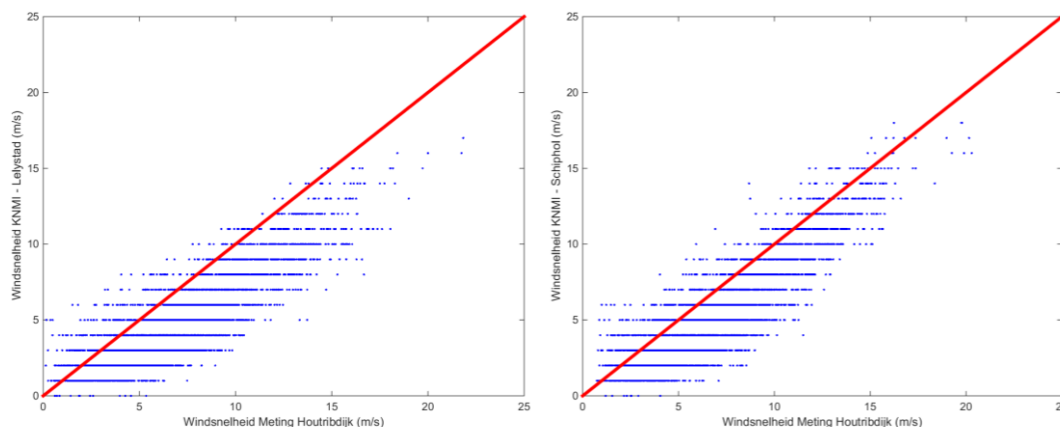
Figuur 5-1 Gemeten windsnelheid (m/s), gekleurd op windrichting (graden t.o.v. Noord).

Te zien is dat de maximale windsnelheid orde 20 m/s (72 km/uur) bedraagt. De eerste piek valt samen met het optreden van de zware storm van eind maart 2015. Begin oktober 2015 is er nog een iets extremere windsnelheid gemeten (22 m/s). De maximale windsnelheid van 23 m/s is gemeten op 18 januari 2018 tijdens de uitvoering van het tweede deel van het aanvullende onderzoek (monitoring afgraving).

Validatie/verificatie

Ter verificatie van deze informatie is een vergelijking gemaakt tussen windsnelheden zoals deze zijn geregistreerd door het KNMI en de lokaal gemeten windsnelheid. De hierbij gebruikte figuren tonen deze vergelijking voor de stations Lelystad en Schiphol.

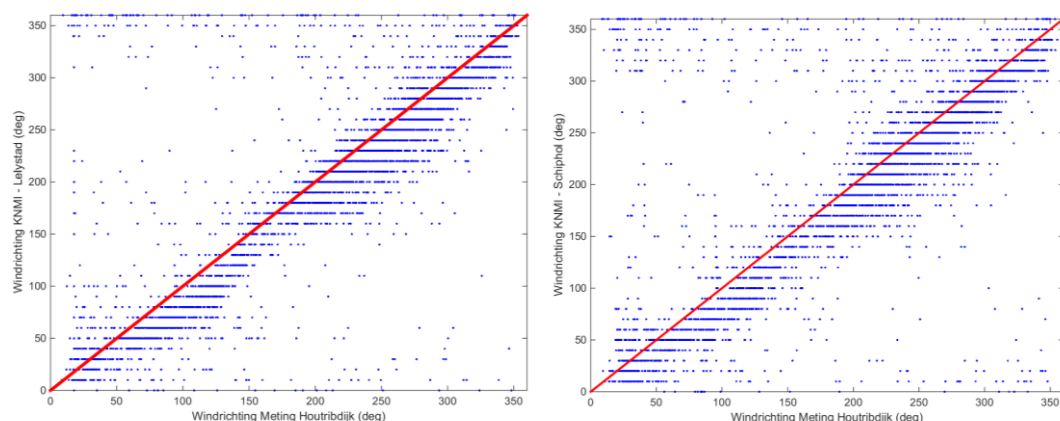
Figuur 5-2 geeft een vergelijking van de windsnelheden waarbij de windsnelheid op de proeflocatie op de horizontale as staat.



Figuur 5-2 Vergelijking windsnelheid KNMI (verticale as) en lokaal gemeten (horizontale as). Links station Lelystad, rechts station Schiphol.

Uit deze figuur blijkt dat de lokaal gemeten windsnelheid gemiddeld hoger ligt dan de windsnelheid gemeten bij de beide landmeetstations van het KNMI. Het verschil in beschutting en ruwheid is een aannemelijke oorzaak voor dit verschil. De overeenkomst met Schiphol is sterker dan met Lelystad

In Figuur 5-3 is een vergelijking gegeven tussen de windrichtingen.

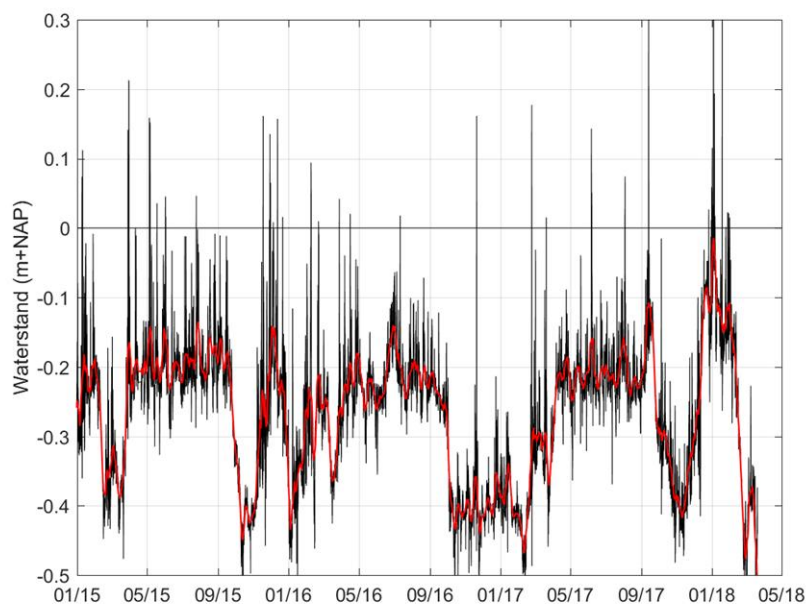


Figuur 5-3 Vergelijking windrichting KNMI (verticale as) en lokaal gemeten (horizontale as). Links station Lelystad, rechts station Schiphol.

Voor beide KNMI-stations gold in eerste instantie dat er lagere getallen voor de windrichting geregistreerd werden, ofwel de lokaal gemeten windrichting was iets groter, met de klok mee. Aan de hand van dit verschil is de registratie van de windrichting opnieuw gekalibreerd, en is alle data aangepast.

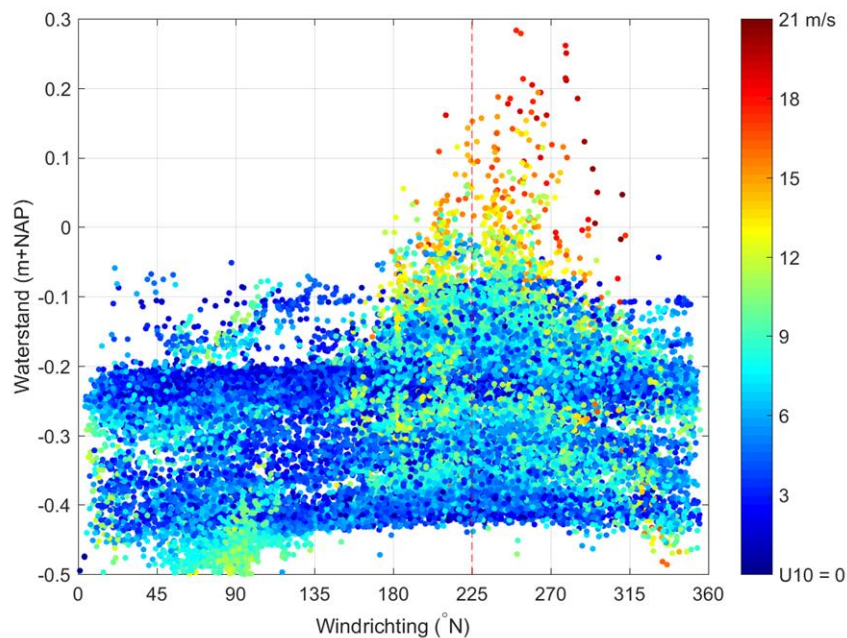
5.3.2 WATERSTAND

In Figuur 5-4 is de ontwikkeling van de lokale waterstand gegeven. Duidelijk herkenbaar zijn de in het Markermeer aangehouden streefpeilen; NAP-0,4 m in de winterperiode en NAP-0,2 m in de zomerperiode. De overgang van winterpeil naar zomerpeil vindt ongeveer plaats tussen 15 maart en 15 april, en de overgang van zomerpeil naar winterpeil tussen 20 september en 15 oktober.



Figuur 5-4 Gemeten waterstand (zwart) en een lopend gemiddelde met een middelingsperiode van een week (rood).

Ook is te zien dat er door windopzet tijdelijk hogere waterstanden kunnen optreden. De maximale waterstand van NAP+0,43 m trad op op 3 januari 2018, wederom tijdens de tweede fase van het aanvullende onderzoek. Deze variatie is ook herkenbaar in Figuur 5-5 waar de lokale waterstand als functie van de windrichting is gepresenteerd.

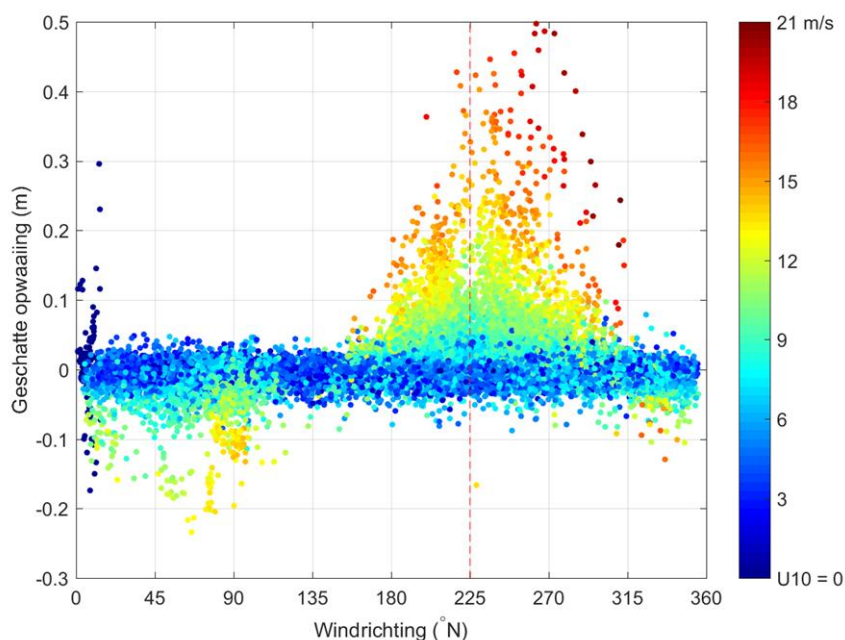


Figuur 5-5 Relatie tussen waterstand (verticale as) en windrichting (horizontale as), gekleurd op windsnelheid. Gestippelde lijn: indicatie voor de oriëntatie van oeverlijn van de pilot.

Duidelijk is te zien dat de waterstanden zich bij lage waterstanden primair bevinden rondom de eerdergenoemde streefpeilen. Voor grotere windsnelheden treden hier afwijkingen op. Bij oostelijke winden is er sprake van afwaaiing en dalen de waterstanden onder de streefpeilwaarde van NAP-0,4 m. Voor zuidwestelijke winden is er juist sprake van opwaaiing en worden waterstanden tot ongeveer NAP+0,2 m (maar soms dus ook iets hoger) bereikt.

De lokale waterstand is dus een combinatie van het ruimtelijk gemiddelde meerpeil en lokale opwaaiing. Om het effect van de opwaaiing beter te kunnen duiden, zijn perioden geselecteerd met een windsnelheid lager dan 10 m/s. Voor deze selectie van de data is een lopend gemiddelde berekend met een middelingsperiode van een maand. De schatting voor de opwaaiing is vervolgens het verschil tussen de gemeten waterstand en dit lopende gemiddelde.

De aldus geconstrueerde relatie tussen geschatte opwaaiing en windrichting is weergegeven in Figuur 5-6. Uit deze figuur blijkt des te duidelijker dat de lokale waterstanden sterk gedomineerd worden door de lokale windcondities.

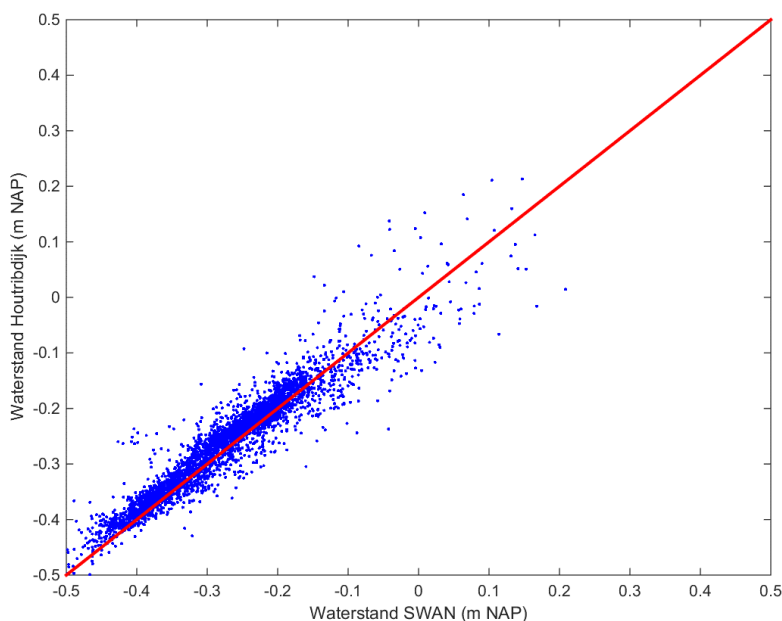


Figuur 5-6 Relatie tussen geschatte opwaaiing (verticale as) en windrichting (horizontale as), gekleurd op windsnelheid. Gestippelde lijn: indicatie voor de oriëntatie van oeverlijn van de pilot.

Validatie/verificatie

Op 22 januari 2015 is om 14h30 uur met behulp van een GPS-installatie een waterstand gemeten van NAP-0,254 m (Ref: (EcoShape/Deltares/WEnR/HKV, 2018)). In de tijdreeks in 'houtribdijk-150612-data.asc' is op dat moment een waterstand van NAP-0,268 m opgenomen. Het verschil bedraagt 1,4 cm.

Ter verificatie zijn de opgeleverde waterstanden vergeleken met de resultaten van het operationele model voor het Markermeer, een gecombineerd WAQUA+SWAN-instrumentarium van Rijkswaterstaat. Het resultaat van deze vergelijking is weergegeven in Figuur 5-7.



Figuur 5-7 Vergelijking tussen waterstanden uit het operationele WAQUA-model voor het Markermeer en lokale waterstandsmetingen.

Uit de figuur blijkt dat de overeenkomst gemiddeld genomen sterk is. In het geval van hoge windsnelheden en relatief sterke opwaaiing, nemen de afwijkingen tussen model en metingen echter toe, tot verschillen in de orde van 10 cm.

5.3.3 GOLFHOOGTE

Allereerst beschrijven we kort de verwerking van de ADV data ten behoeve van het verkrijgen van de golfparameters golfhoogte, golfperiode en golfrichting.

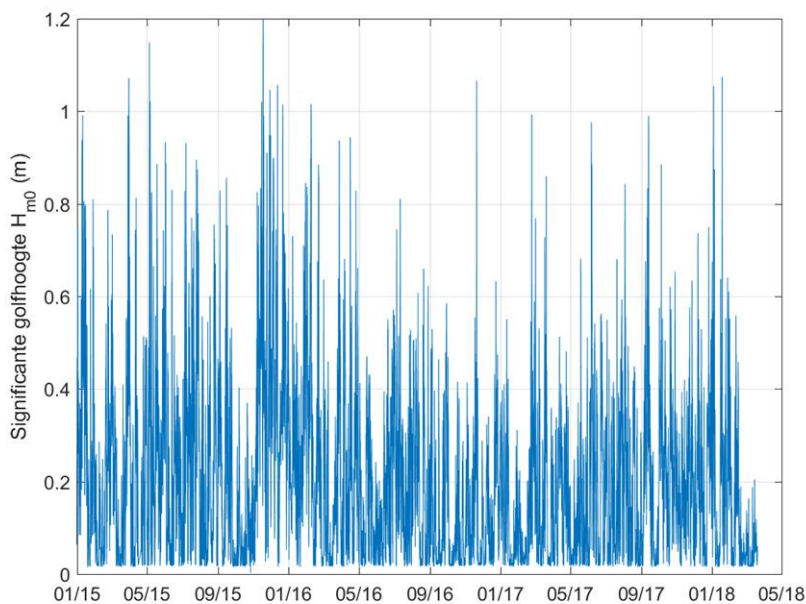
Het werkproces voor het bepalen van de golfparameters is als volgt:

- data inlezen;
- zogenaamde outliers wegfilteren;
- laagfrequente componenten beneden 0,18 Hz wegfilteren (dit zijn geen windgolven meer)
- waterdruk vertalen naar variaties van het vrij oppervlak. Hiervoor wordt lineaire golftheorie gebruikt, met een maximale drukversterkingsfactor van 25. Dit betekent, gegeven de verticale positie van de druksensor op 1,20 boven de bodem en de totale waterdiepte (veelal orde 2,55 m, omdat de waterstand vaak ongeveer NAP-0,20 m is), dat de bovengrens van het spectrum zich rond de 0,77 Hz bevindt. Alle energie hierboven wordt niet meegenomen (op nul gesteld).
- het 1D-spectrum wordt gladgestreken om het gebruikelijke 'gras' te verwijderen en binnen het genoemde frequentiebereik worden de volgende golfparameters bepaald:
 - significante golfhoogte.
 - piekperiode.
- daarnaast worden de snelheidsgegevens gebruikt om de golfrichting bij de piek van het spectrum te bepalen.

We hebben in bovenstaande werkproces de gevoeligheden voor enkele min of meer subjectieve keuzes onderzocht. Zowel het omlaag brengen van de ondergrens naar 0,10 Hz als de maximale versterkingsfactor naar 10 heeft slechts marginale effecten op de golfparameters. Met andere woorden, de resultaten zijn voldoende ongevoelig voor de gemaakte keuzes.

Van belang is het volgende. Indien men de gemeten golfhoogte met die van SWAN wil vergelijken, kan men niet zomaar de door SWAN weggeschreven golfhoogte gebruiken. Dit komt omdat laatstgenoemde bepaald is over een (veel) groter frequentiebereik. De correcte werkwijze is dan om het door SWAN berekende golfspectrum te gebruiken om daaruit, door integratie over het frequentiebereik [0.18 Hz, 0.77 Hz], de golfhoogte te bepalen. Deze SWAN- golfhoogte kan dan wel vergeleken worden met de gemeten golfhoogte, omdat de golfhoogte dan op identieke wijze gedefinieerd is.

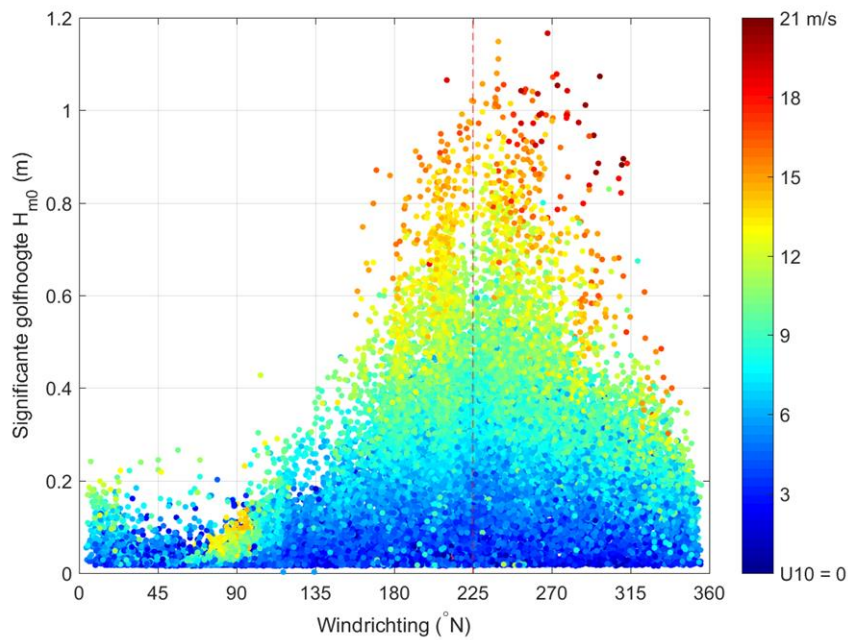
Figuur 5-8 geeft een weergave van de opgeleverde (significante) golfhoogte.



Figuur 5-8 Gemeten significante golfhoogte Hm0 (m).

De maximaal waargenomen golfhoogte bedraagt 1,27 m en is gemeten tijdens een stormevent op 17 november 2015 (zie ook Tabel 5-13 op pagina 91). Meer recent (november 2016) werd nog een golfhoogte van 1,07 m gemeten.

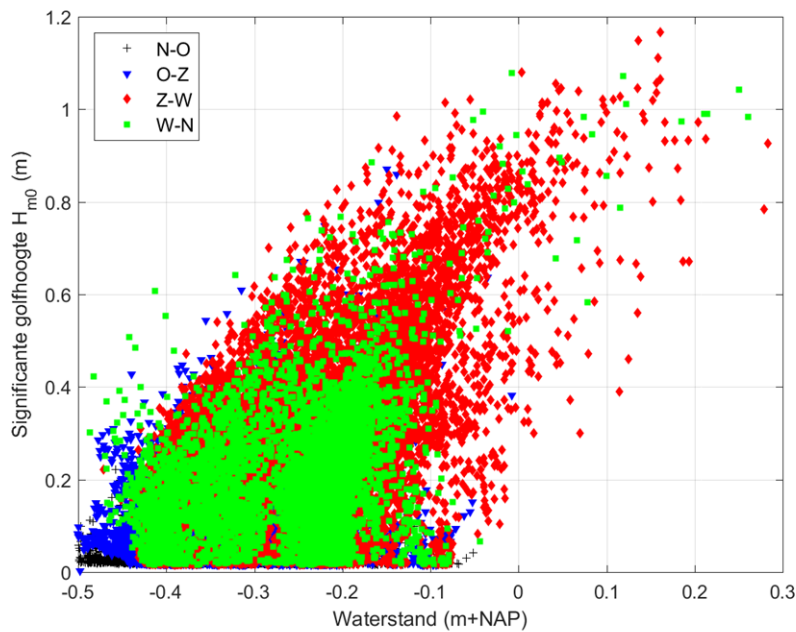
De lokaal optredende golfhoogte is natuurlijk gekoppeld aan de optredende windcondities. De resultaten van een basisanalyse van deze relatie zijn samengebracht in Figuur 5-9.



Figuur 5-9 Relatie tussen significante golfhoogte (verticale as) en windrichting (horizontale as), gekleurd op windsnelheid. Gestippelde lijn: indicatie voor de oriëntatie van oeverlijn van de pilot.

Te zien is dat de maximale golfhoogtes met name optreden bij condities met harde wind uit zuidwestelijke tot westelijke richtingen.

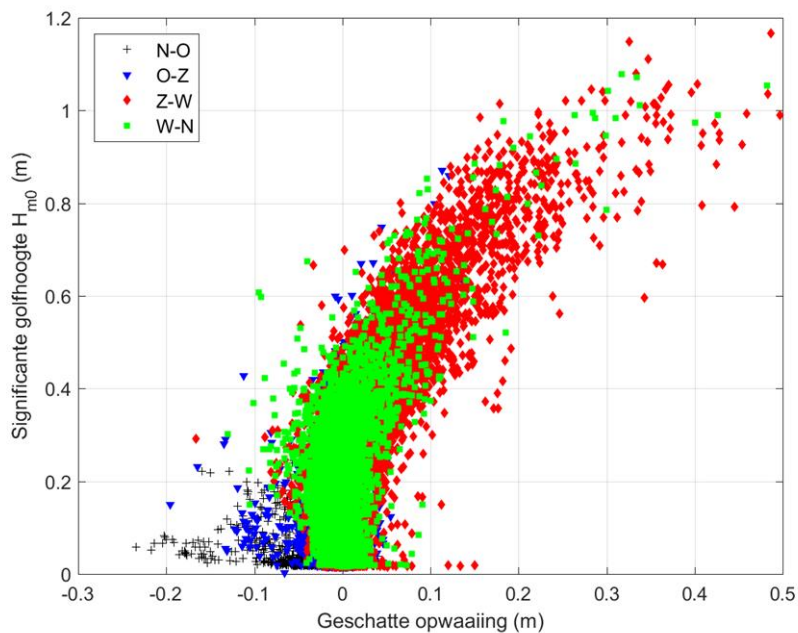
Dat laatste is ook te zien bij het beschouwen van de relatie tussen de lokale waterstand en de golfhoogte zoals weergegeven in Figuur 5-10.



Figuur 5-10 Combinaties van waterstand en significante golfhoogte voor vier windsectoren.

Te zien is dat met name de westelijke winden zorgen voor de grotere opzetten en golfhoogten.

Dit is nog duidelijker te zien in Figuur 5-11 waarin de golfhoogte is uitgezet als functie van de geschatte omvang van de opwaaiing.

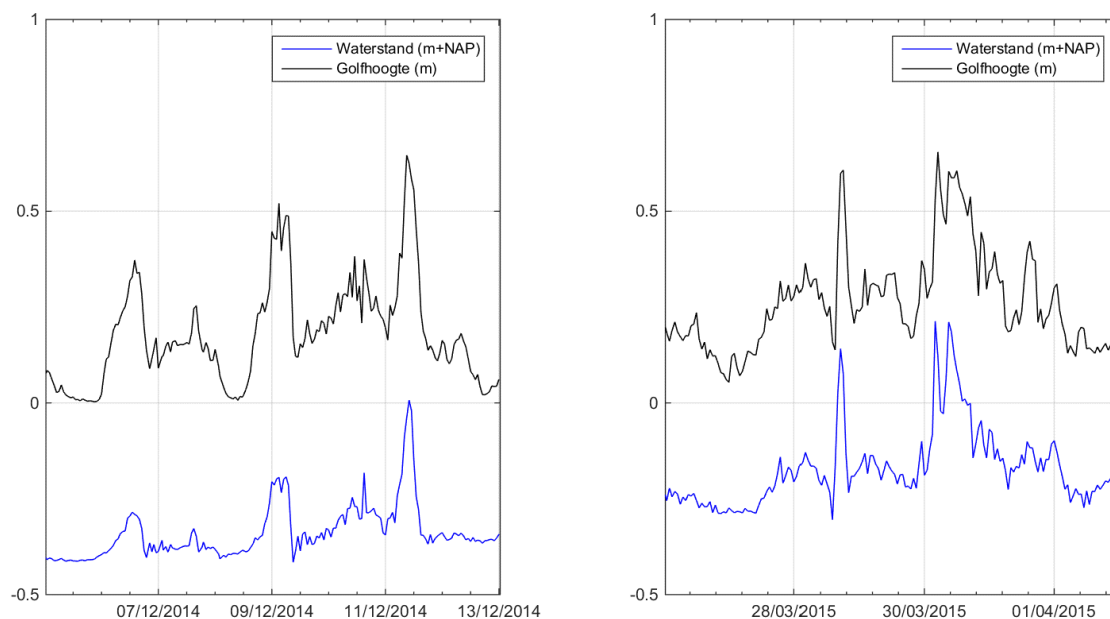


Figuur 5-11 Combinaties van berekende opwaaiing en significante golfhoogte voor vier windsectoren.

Op basis van deze resultaten kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Er is een sterke relatie tussen opwaaiing en golfhoogte vanwege het wind-gedomineerde karakter van het systeem;
- Bij windrichtingen vanuit de oostelijke helft van de windrichtingen zijn de golfhoogtes beperkt, en treedt enige afwaaiing op;
- De respons van golfhoogtes en waterstanden kent een vergelijkbare tijdschaal, want er worden geen combinaties gemeten van hoge opwaaiing en lage golven of hoge golven en weinig opwaaiing;
- Er zijn enkele afwijkende golfhoogtes zichtbaar in Figuur 5-9.

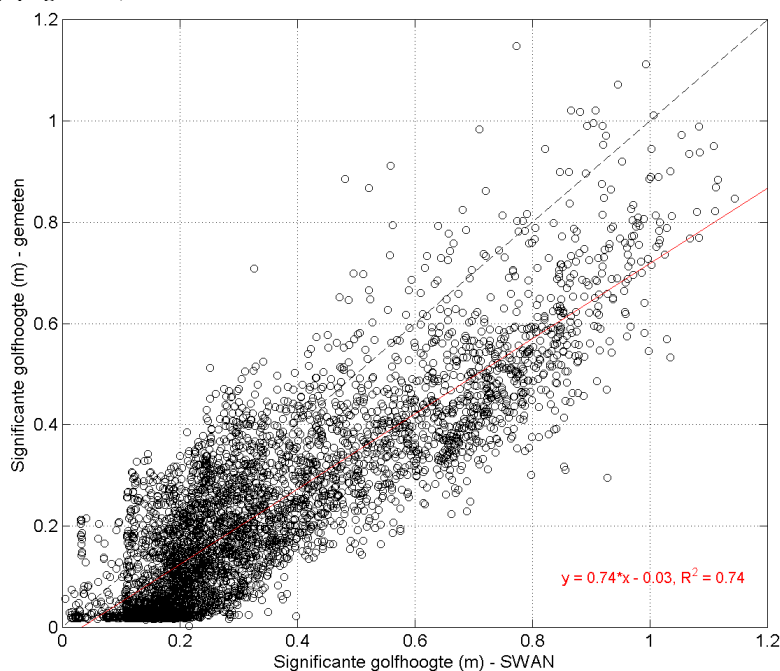
In Figuur 5-12 is een voorbeeld gegeven van de snelle respons van zowel de waterstand als de golfhoogte op de momentane windcondities. De rechter figuur heeft hierbij betrekking op de zware storm van eind maart 2015 waarbij de lokale waterstand binnen zeer korte tijd met ruim 0,4 m toenam.



Figuur 5-12 Verloop in de tijd van waterstand en significante golfhoogte gedurende een tweetal stormen.

Validatie/verificatie

Ter verificatie van de absolute waarde van de significante golfhoogte (uit de overdrachtstabel) zijn de golfhoogtes vergeleken met de resultaten van het operationele model voor het Markermeer, een gecombineerd WAQUA+SWAN-instrumentarium van Rijkswaterstaat. Uit onderstaande figuur blijkt dat de golfhoogtes in SWAN structureel hoger liggen dan de waarden in de gebruikte overdrachtstabel (Tabel 5-1 op pagina 63).

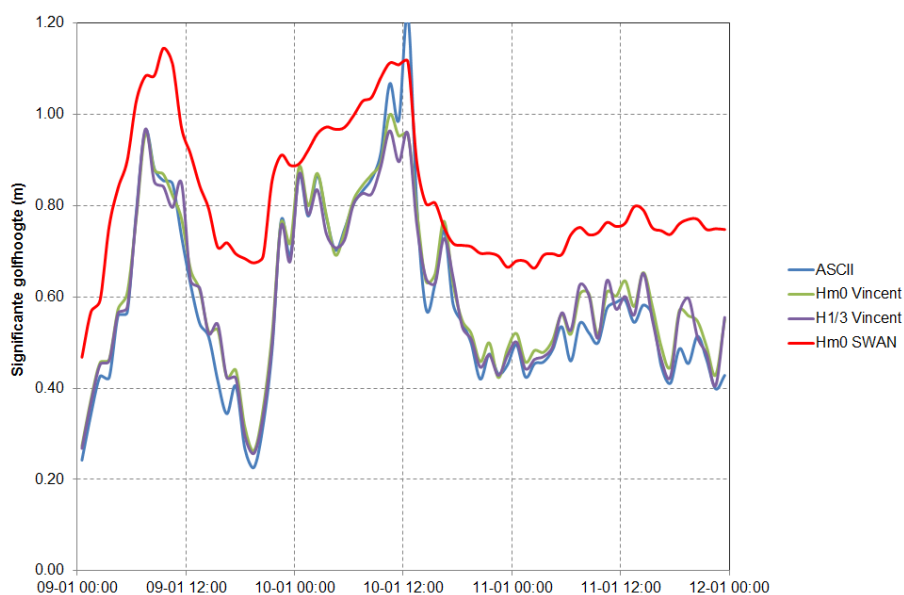


Figuur 5-13 Vergelijking tussen de berekende golfhoogte volgens SWAN en op basis van lokale metingen

Nadere analyses

Deze observatie gaf aanleiding tot een vergelijking met andere berekeningen van de significante golfhoogte. Onderstaande figuur toont voor de ZW-storm van januari 2015 de golfhoogte volgens:

1. De data in 'houtribdijk-150902-data.asc',
2. De significante golfhoogte, berekend met spectraalanalyse met scripts van HKV,
3. De significante golfhoogte, berekend met zero-crossing analyse met scripts van HKV,
4. De resultaten van het operationele SWAN-model van Rijkswaterstaat.



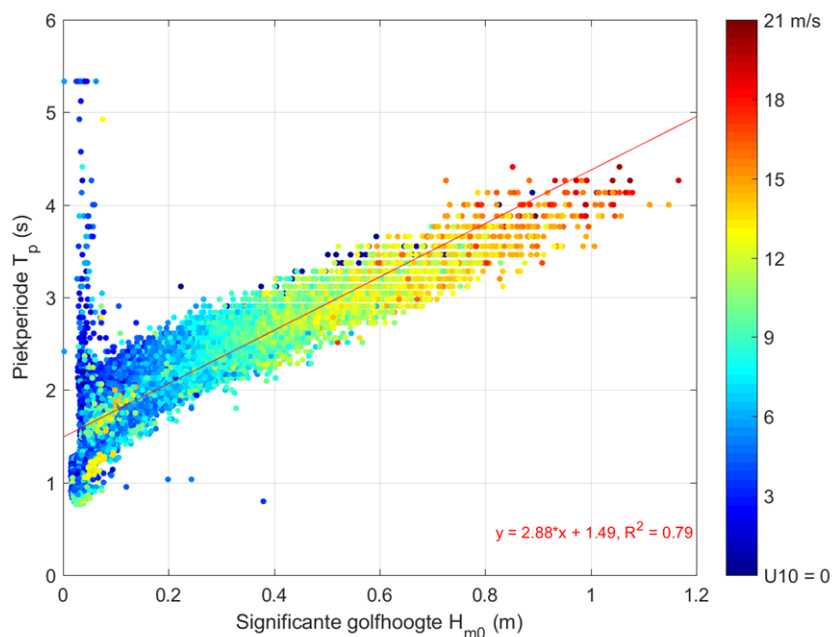
Figuur 5-14 Vergelijking diverse databronnen voor de significante golfhoogte voor de storm van januari 2015.

De vergelijking laat zien dat verschillende methoden tot vrijwel hetzelfde resultaat leiden. Dit geeft vertrouwen in de nabewerking van de ruwe meetdata van de gemeten drukfluctuaties. Het resultaat van het SWAN-model ligt ook tijdens deze storm structureel hoger dan de gemeten waarden.

Deze hogere uitkomsten van het SWAN-model komen door het (veel) grotere frequentiebereik waarmee SWAN rekent. De correcte werkwijze is om het door SWAN berekende golfspectrum te gebruiken om daaruit, door integratie over het frequentiebereik [0.18 Hz, 0.77 Hz], de golfhoogte te bepalen. Deze SWAN-golfhoogte kan dan wel vergeleken worden met de gemeten golfhoogte, omdat de golfhoogte dan op identieke wijze gedefinieerd is.

5.3.4 GOLFPERIODE

De golfperiode is direct gekoppeld aan de golfhoogte. Dit blijkt ook uit de in Figuur 5-15 opgenomen relatie.



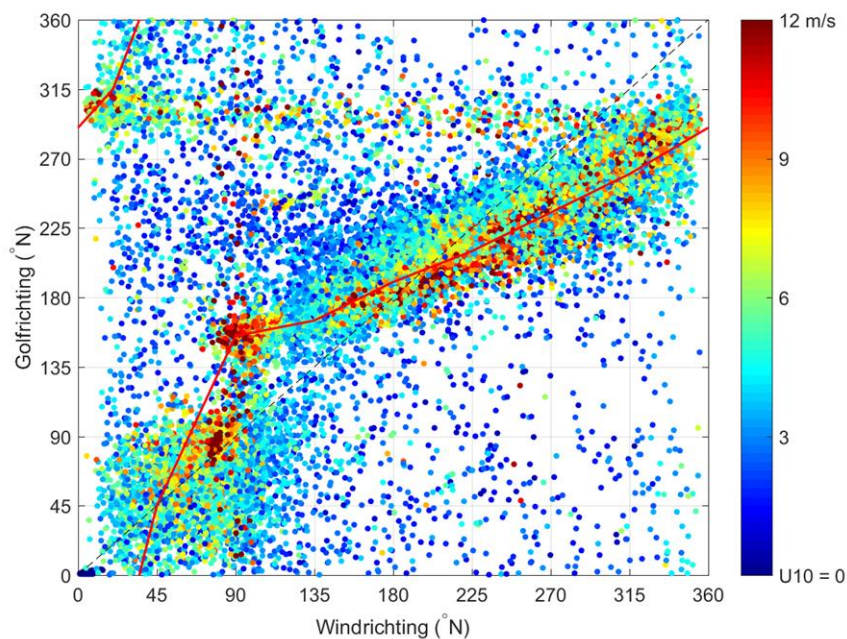
Figuur 5-15 Vergelijking significante golfhoogte H_{m0} (horizontale as) en piekperiode T_p (verticale as), waarbij de markers zijn gekleurd op windsnelheid.

Deze resultaten leiden tot de volgende conclusie:

- De verhouding tussen golfhoogte en golfperiode is vrij consistent.
- Een deel van de golven heeft een grote periode bij een lage golfenergie. Dit is waarschijnlijk een gevolg van het feit dat bij zeer lage golfhoogtes andere processen (zoals stroming, ruis, beperkte luchtdrukfluctuaties als gevolg van windfluctuaties) zichtbaar worden. Hoe dan ook, de invloed van deze laag-energetische golven op de morfologische veranderingen is gering.

5.3.5 GOLFRICHTING

In Figuur 5-16 is de relatie gegeven tussen de gemeten windrichting en de uit de meetresultaten afgeleide gemiddelde golfrichting op de piek van het golfspectrum. Voor het bepalen van de golfrichting is de veelgebruikte methode van Longuet-Higgins et al (1963) gebruikt.



Figuur 5-16 Verhouding tussen windrichting (horizontale as) en golfrichting (verticale as), waarbij de markers zijn gekleurd op windsnelheid.

Conclusies per windrichting:

- Bij windrichtingen tussen Noord en Noordoost (van de dijk afwaaiend) is de golfrichting overwegend Noordwest (parallel aan de dijk). Mogelijk beïnvloedt circulatiestroming in het Markermeer hier de gepresenteerde golfrichting.
- Bij windrichtingen tussen Noordoost en Oost komen windrichting en golfrichting gemiddeld genomen overeen.
- Bij windrichtingen tussen Oost en Zuid is een bijdraaiing van de golven richting Zuid te zien, mogelijk door refractie.
- Tussen zuid en noord is een vrij duidelijke curve aanwezig, waarbij de golven ten opzichte van de windrichting meer in de richting haaks op de dijk bewegen. Ook hier speelt mogelijk refractie een rol.

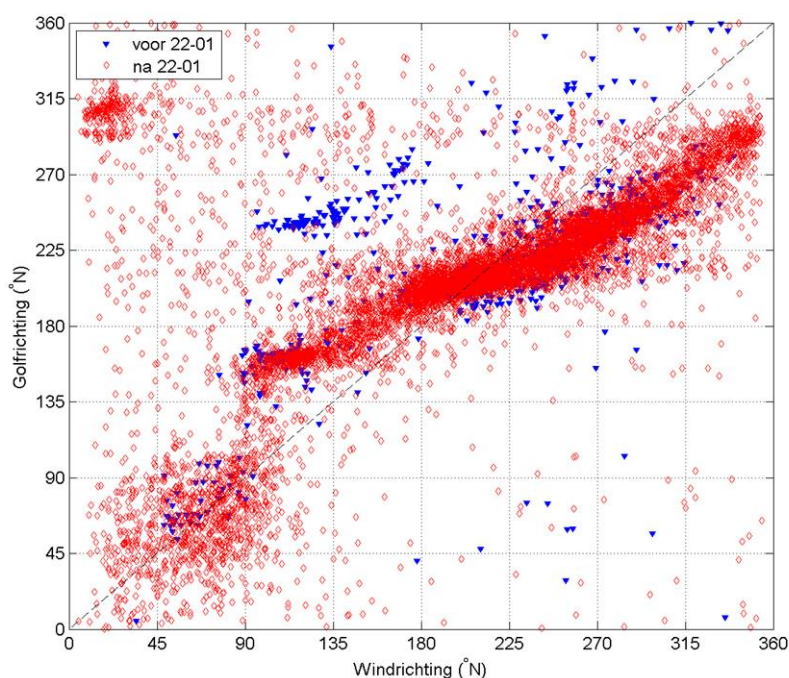
Algemene conclusies:

- De windrichting is mogelijk niet zeer nauwkeurig (zie de paragraaf over wind).
- Er zijn punten in de data aanwezig met een sterk afwijkende golfrichting bij een hoge windsnelheid en een richting tussen 200 en 300 graden t.o.v. Noord.

Nadere interim-analyses

Vóór 22 januari 2015 werd de watersnelheid gecorrigeerd met de uitlezing van het kompas om de richting van de snelheid te krijgen in ENU assenstelsel. Deze automatische procedure bleek tot foutieve golfrichtingen te leiden. Na 22 januari is de automatische, variabele correctie vervangen door een vaste correctie. Alleen golfrichtingen na 22 januari kunnen als betrouwbaar worden gezien (werkdokument). Uit onderstaande figuur blijkt dat in de huidige dataset het beeld vóór en na 22 januari vrij consistent is. Alleen in de periode van voor 22 januari zijn perioden met flinke oostenwind (90-135 graden) opgetreden.

Het is op dit moment nog niet duidelijk welke correcties er zijn toegepast op de data van vóór 22 januari, om deze consistent te krijgen met de data na 22 januari.



Figuur 5-17 Vergelijking van de verhouding tussen windrichting en golfrichting vóór en na 22 januari 2015.

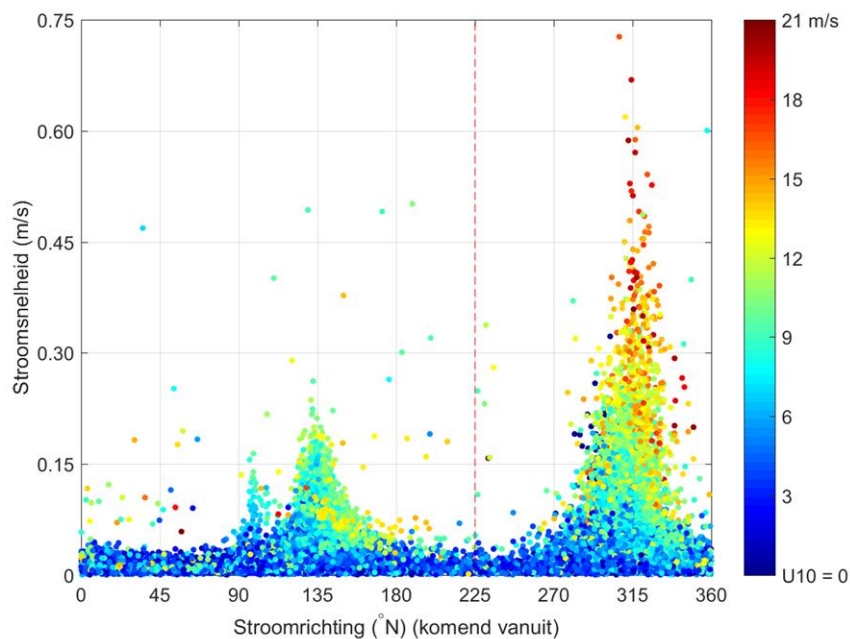
5.3.6 LANGSSTROOMSNELHEID

Onder invloed van de golfaanval is er ook sprake van een (netto) langsstroom langs de dijk. Deze hangt deels ook samen met de grootschalige circulatie die in het Markermeer aanwezig is.

Figuur 5-18 geeft een vergelijking tussen de stroomrichting en de stroomsnelheid ter plaatse van de ADCP op het meetframe. De weergegeven waarden zijn per interval het gemiddelde over een zogenaamde burst van 4096 metingen. Bij een meetfrequentie van 8 Hz is dat 8 minuten en 32 seconden.

Deze snelheidsmeter bevindt zich op ongeveer 1 m boven de bodem bij een waterdiepte van ongeveer 2,5 m. De gemeten snelheden zijn representatief voor de dieptegemiddelde snelheid op deze locatie.

De wind veroorzaakt een circulatiestroming in het Markermeer. Ter plaatse van de proefsectie is dit merkbaar als een stroming parallel aan de Houtribdijk, ofwel een stroming van zuidoost naar noordwest (circa 135 graden, richting damwand), ofwel van noordwest naar zuidoost (richting rijsmatconstructie; circa 315 graden). De stroomsnelheid vanuit zuidoostelijke richting is beperkt tot maximaal 0,25 m/s, terwijl de stroomsnelheid vanuit noordwestelijke richting (richting Lelystad) op kan lopen tot 0,50 m/s (met een incidentele piek tot 0,75 m/s). Hogere stroomsnelheden gaan ook samen met hogere windsnelheden.

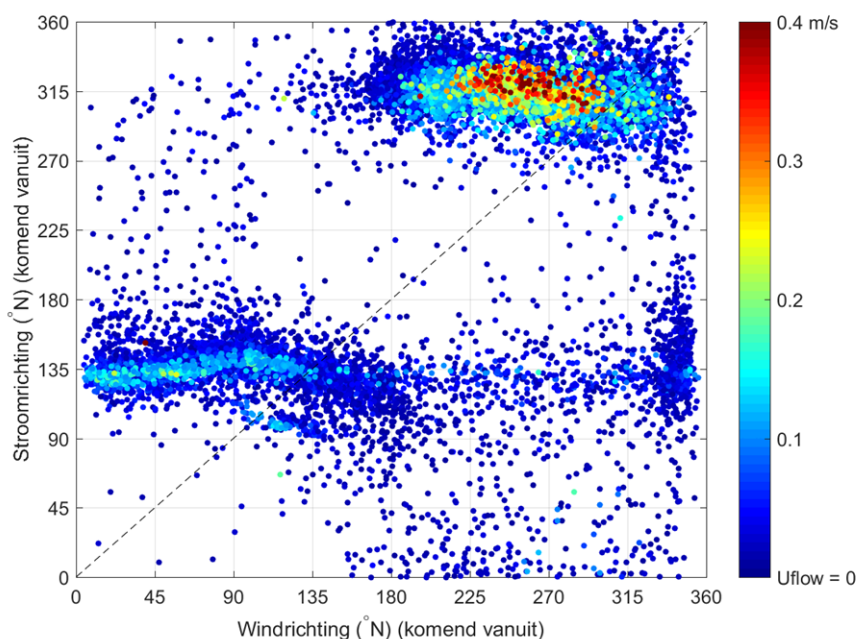


Figuur 5-18 Vergelijking stroomrichting (in graden ten opzichte van noord, gedefinieerd als 'komend vanuit') en stroomsnelheid (verticale as), waarbij de markers zijn gekleurd op windsnelheid.

Opvallend is daarbij de dubbele piek in de noordwestelijke stroomrichting.

Nadere beschouwing van deze oriëntaties laat zien dat de oriëntatie van de proefsectie loodrecht op de 225 graden richting staat en dat er dus stroming evenwijdig aan de oeverlijn van de pilot te verwachten is rond de richtingen 135 en 315 graden. Verder oostelijk van de proefsectie zouden (gegeven het verschil in oriëntatie tussen de proefsectie en het tracé van de Houtribdijk van ongeveer 15 graden) deze richtingen eerder 150 en 330 graden moeten bedragen.

Figuur 5-19 geeft een vergelijking tussen de windrichting en de stroomrichting. Stroomsnelheden lager dan 0,01 m/s zijn weg gelaten in deze figuur.



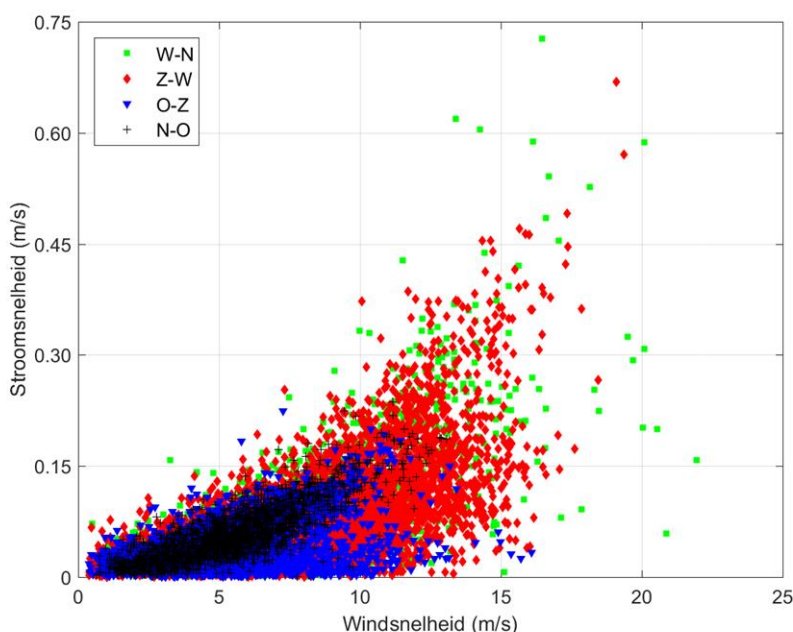
Figuur 5-19 Vergelijking windrichting (horizontale as) en stroomrichting (verticale as, beide in graden ten opzichte van noord, gedefinieerd als 'komend vanuit'), waarbij de markers zijn gekleurd op stroomsnelheid in m/s. Stroomsnelheden onder 0,01 m/s zijn niet weergegeven.

Bij windrichtingen tussen 160 en 330 graden (de westelijke windsector) beweegt de circulatiestroming met de klok mee. In dat geval wordt het water in de noordhoek van het Markermeer opgestuwd en stroomt dan rechtsof langs de Houtribdijk weer terug. Bij de proefsectie resulteert dit in een stroming (met snelheden tot 0,5 m/s) van noordwest naar zuidoost (richting rijmatconstructie, Lelystad). De relatief hoge snelheden kunnen mogelijk voor een deel worden verklaard uit de aanwezigheid van de damwandconstructie (contractie-effect).

Te zien is dat de circulatiestroming in het Markermeer tegen de klok in beweegt bij windrichtingen tussen ongeveer 330 en 160 graden (de oostelijke windsector). Bij de Houtribdijk resulteert dit in een stroming van zuidoost naar noordwest (richting damwand, Enkhuizen).

Figuur 5-20 geeft een vergelijking tussen de windsnelheid en de stroomsnelheid bij de proefsectie. Te zien is dat de stroomsnelheid in absolute zin toeneemt bij toenemende windsnelheid.

Hoge stroomsnelheden (boven 0,30 m/s) treden alleen op bij hoge windsnelheden (10 m/s, windkracht 6). Het verband tussen windsnelheid en stroomsnelheid lijkt niet sterk te verschillen tussen de verschillende windsectoren.



Figuur 5-20 Vergelijking windsnelheid (horizontale as) en stroomsnelheid (verticale as) voor vier verschillende windsectoren

Te zien is ook dat de hogere snelheden met name optreden bij zuidwesterlijke winden en de daarbij optredende grootschalige stroming met de klok mee.

5.4 OPVULLEN VAN GATEN IN TIJDREEKS

Opmerkingen:

- De data in 'houtribdijk-150902-data.asc' start op 19 november 2014. Volgens het werkdocument is de ADV vanaf deze datum continu operationeel. Het meetframe was echter al aanwezig vanaf 2 oktober 2014. Mogelijk is er ook data beschikbaar tussen 2 oktober en 19 november.
- De monitoringsmast met windmeter en waterstandsmeter is al op 3 september 2014 geplaatst, en er is data beschikbaar vanaf 8 september 2014 op de repository. Deze data is niet verwerkt in 'houtribdijk-150902-data.asc'.
- Van de windrichting, golfrichting, golfhoogte, golfperiode en waterstand ontbreekt data begin december 2014, en medio april 2015. In de tijdreeks van de windsnelheid ontbreekt daarnaast nog data medio januari 2015.
- De tijdreeks van de waterstand heeft vóór begin december geen goede resultaten (waterstand ca. -99 m)

Gaten in de winddata kunnen worden aangevuld met de KNMI-data van Schiphol, met eenzelfde windrichting, maar waarbij voor de windsnelheid een correctie moet worden gehanteerd:

- $U_{HRD} = U_{10_Schiphol} * 1.27$.

Gaten in de hydrodynamica kunnen worden aangevuld op basis van de resultaten van het operationele model van Rijkswaterstaat, met de volgende correcties:

- $Hm0_{HRD} = 0.74 * Hm0_{SWAN} - 0.03$ (Figuur 5-13);
- $Tp_{HRD} = 2.88 * Hm0_{HRD} + 1.49$ (Figuur 5-15);
- Waterstand gelijk aan waterstand in WAQUA;

- Golfrichting o.b.v. gemeten windrichting via de rode curve in Figuur 5-16.

De data van het operationele model is bij Rijkswaterstaat verloren gegaan voor de periode 4 september tot 13 oktober 2014. Voor deze periode is een richtingsafhankelijke inschatting gemaakt van de opwaaiing en de significante golfhoogte. De geschatte opwaaiing Δh is bij het streefpeil in het Markermeer opgeteld om tot een schatting van de opgetreden waterstand bij de pilot te komen. De coëfficiënten in onderstaande tabel zijn bepaald op basis van regressie.

Windsector	H_{m0}/U_{10}	$\Delta h/U_{10}^2$
0-30	0.02	-0.0004
30-60	0.01	-0.0007
60-90	0.01	-0.0005
90-120	0.02	-0.0004
120-150	0.02	-0.0002
150-180	0.04	0.0001
180-210	0.04	0.0004
210-240	0.05	0.0007
240-270	0.05	0.0006
270-300	0.04	0.0004
300-330	0.03	0.0001
330-360	0.02	-0.0002

Tabel 5-2 Richtingsafhankelijke opwaaiing als functie van karakteristieke golfhoogte/windsnelheidsverhouding).

5.5 KARAKTERISTIEKE CONDITIES PER MEETINTERVAL

5.5.1 INLEIDING

De metingen van de morfologische veranderingen zijn in de periode september 2014 tot en met april 2015 maandelijks uitgevoerd. In totaal zijn er in deze periode 8 morfologische metingen uitgevoerd (zie Hoofdstuk 6 voor meer informatie). De meetfrequentie is daarna, conform het overeengekomen monitoringsprogramma, teruggebracht. Verder zijn er in het kader van het aanvullende onderzoek netto nog drie extra inmetingen toegevoegd waardoor het totaal aantal inmetingen op 23 uit komt.

Periode	Interval	Opmerkingen
T1-T2	18-9-14 tot 25-10-14	Eerste periode na aanleg van de proefsectie
T2-T3	25-10-14 tot 19-11-14	
T3-T4	19-11-14 tot 28-12-14	
T4-T5	28-12-14 tot 23-01-15	
T5-T6	23-01-15 tot 15-02-15	
T6-T7	15-02-15 tot 18-03-15	
T7-T8	18-03-15 tot 06-04-15	
T8-T9	06-04-15 tot 21-08-15	
T9-T10	21-08-15 tot 15-01-16	Periode met zwaarste storm met golfhoogte van 1,27 m.
T10-T11	15-01-16 tot 28-02-16	
T11-T12	28-02-16 tot 27-05-16	
T12-T13	27-05-16 tot 23-08-16	
T13-T14	23-08-16 tot 23-11-16	
T14-T15	23-11-16 tot 06-03-17	
T15-T16	06-03-17 tot 17-05-17	
T16-T17	17-05-17 tot 31-08-17	Tot einde standaard monitoring
T17-T18	01-09-17 tot 09-10-17	Eerste fase met extra instrumentatie
T18-T19	10-10-17 tot 30-11-17	Tweede fase met extra instrumentatie
T19-T20	01-12-17 tot 20-12-17	Ten tijde van uitvoering ontgraving (niet bruikbaar)
T20-T21	20-12-17 tot 05-01-18	Start monitoring ontgraving met maximale waterstand op NAP+0,43 m
T21-T22	06-01-18 tot 20-02-18	Periode met hoogste windsnelheid van 22,9 m/uur.
T22-T23	20-02-18 tot 20-03-18	

Tabel 5-3 Overzicht beschouwde perioden tot en met laatste inmeting T23, inclusief duiding projectfase en opgetreden maximale omstandigheden.

Deze paragraaf gaat in op de karakteristieke hydrodynamica in de periodes tussen de metingen. Deze kan vervolgens worden gebruikt voor de analyse van de profielvormen (zie Hoofdstuk 2 in Annex I) en de aansturing van het morfologisch model dat de waargenomen morfologische veranderingen zal moeten simuleren (zie Hoofdstuk 3 in Annex I).

Pas vanaf T3 is lokaal gemeten hydrodynamische data beschikbaar. Voor de eerste twee intervallen T1-T2 en T2-T3 is de analyse gebaseerd op data van het KNMI, volgens de in de vorige paragraaf beschreven relaties tussen de verschillende parameters.

5.5.2 ALGEMENE KARAKTERISTIEKEN

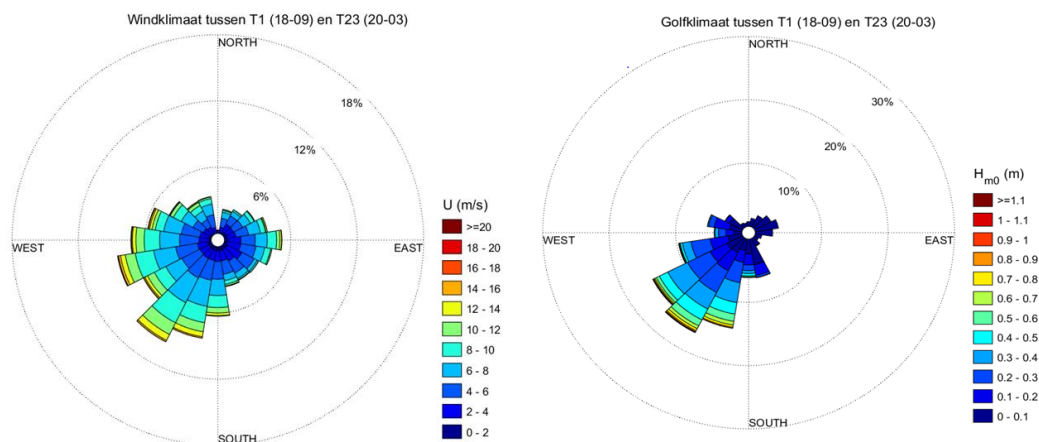
Tabel 5-4 en Figuur 5-21 geven een overzicht van de karakteristieken van de volledige meetperiode.

Grootheid	Symbool	Eenheid	Minimum	5% perc.	Gemiddeld	95% perc.	Maximum
Windsnelheid	U	m/s	0,40	2,1	6,3	11,8	22,9
Waterstand	h	m+NAP	-0,55	-0,43	-0,27	-0,11	0,43
Golfhoogte	H _{m0}	m	0,00	0,02	0,20	0,54	1,27
Golfperiode	T _p	s	0,76	0,92	1,99	3,05	5,33

Tabel 5-4 Algemene karakteristieken tot nu toe beschouwde meetinterval (18-9-2014 t/m 20-03-2018).

De maximale gemeten windsnelheid bedraagt bijna 23 m/s (83 km/uur).

De waterstand zit tijdsgemiddeld (NAP-0,27 m) tussen winterpeil en zomerpeil in. De maximale waterstand tijdens een storm bedraagt NAP+0,43 m en is gemeten op 3 januari 2018.



Figuur 5-21 Wind- en golfklimaat voor het hele meetinterval tussen T1 en T23.

De golfaanval laat een duidelijke dominantie uit zuidzuidwestelijke richtingen zien.

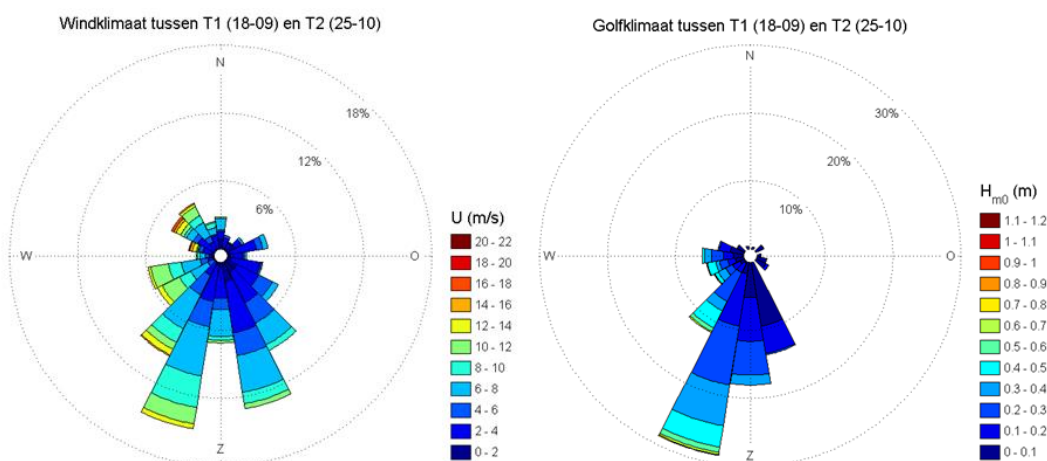
In de volgende secties is per periode tussen opeenvolgende morfologische metingen de karakteristieken van het meteorologische en hydrodynamische klimaat bij de proefsectie beschreven.

Daarbij zijn ook de events beschouwd. Een event is daarbij gedefinieerd als het overschrijden van de 95% percentielwaarde van windsnelheid en/of golfhoogte. Boxplots, windrozen en golfrozen zijn voor elke periode beschikbaar als losse figuren beschikbaar voor detailanalyses.

5.5.3 MEETINTERVAL T1-T2 (18-9-14 TOT 25-10-14)

Beschikbaarheid data

Geen lokaal gemeten hydrodynamische of meteorologische data beschikbaar. Resultaten van operationele model (WAQUA/SWAN) bij Rijkswaterstaat verloren gegaan tot en met 12-10-14. Golfkarakteristieken en waterstanden voor de periode 18-9-14 t/m 12-10-14 zijn gebaseerd op de winddata van het KNMI, en voor de periode 13-10-14 t/m 25-10-14 op de resultaten van het operationele model.



Figuur 5-22 Wind- en golfklimaat tussen T1 en T2.

Windklimaat

Voornamelijk wind vanuit richtingen tussen ZO en ZW. Windsnelheden tot 12 m/s vanuit ZO sector, tot 15 m/s vanuit ZW sector, en tot 17 m/s vanuit NW sector. Gemiddelde windsnelheid 5,8 m/s, iets onder het jaargemiddelde.

Waterstanden

Waterstanden zijn grotendeels gebaseerd op een schatting van het meerpeil en een schatting, vanwege het ontbreken van lokaal gemeten data en resultaten van het operationele model. In deze periode wordt normaal gesproken het zomerpeil (NAP-0,2 m) in het winterpeil (NAP-0,4 m) gewijzigd. De gemiddelde waterstand in deze periode is geschat op NAP-0,3 m.

Golven

Door refractie draaien golven bij windrichtingen tussen ZO tot W bij naar ZZW richting. Het overgrote deel van de tijd kwamen de golven in deze periode dan ook binnen vanuit Z, ZZW en ZW richting. Tijdens de NW-storm waren de golven aanzienlijk lager dan tijdens meer gematigde winden vanuit ZW sector. Het grootste deel van de tijd vielen de golven in onder een hoek (ca. 180 graden) ten opzichte van de oorspronkelijke oriëntatie van de oeverlijn van de pilot (ca. 225 gr).

Belangrijkste events

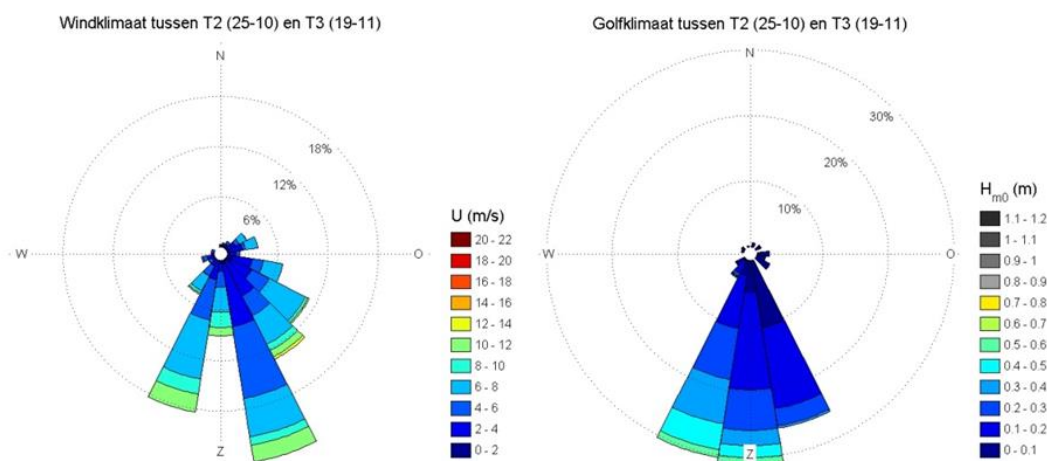
Datum	Windrichting gr. N.	Max. windsnelheid m/s	Max. waterstand m+NAP	Max. H_{m0} (golfr.) m
7-10-2014	210	15,2	-0,24	0,72 (200)
19-10-2014	240	12,7	-0,25	0,47 (215)
21-10-2014	200 → 300	14,0 → 16,5	-0,18 → -0,33	0,62 (215) → 0,46 (260)

Tabel 5-5 Overzicht events binnen meetinterval T1 – T2.

5.5.4 MEETINTERVAL T2-T3 (25-10-14 TOT 19-11-14)

Beschikbaarheid data

In deze gehele periode is de hydrodynamische data gebaseerd op de resultaten van het operationele model.



Figuur 5-23 Wind- en golfklimaat tussen T2 en T3.

Windklimaat

De wind kwam in deze periode voornamelijk uit de ZO-sector. De gemiddelde windrichting was 200 graden (ZZW) van 25-10 tot 29-10 met een gemiddelde windsnelheid van 5,7 m/s, daarna gemiddeld 145 graden (ZO) van 29-10 tot 19-11 met een bijbehorende gemiddelde windsnelheid van 5,5 m/s. Met een gemiddelde windsnelheid van 5,6 m/s lag de windsnelheid in deze periode duidelijk onder het gemiddelde van 6,3 m/s.

Waterstanden

De gemiddelde waterstand was NAP-0,36 m+, met een maximum van NAP-0,22 m.

Golven

Door refractie draaien de golven die vanuit ZO-sector komen bij naar Z richting. Vrijwel alle golven hadden een windrichting tussen ZZO en ZZW, met de hoogste golven (0,5-0,6 m) vanuit Z en ZZW richting. De volledige periode was er sprake van schuine golfinval ten opzichte van de oorspronkelijke oriëntatie van de oeverlijn van de pilot (ca. 225 graden).

Belangrijkste events

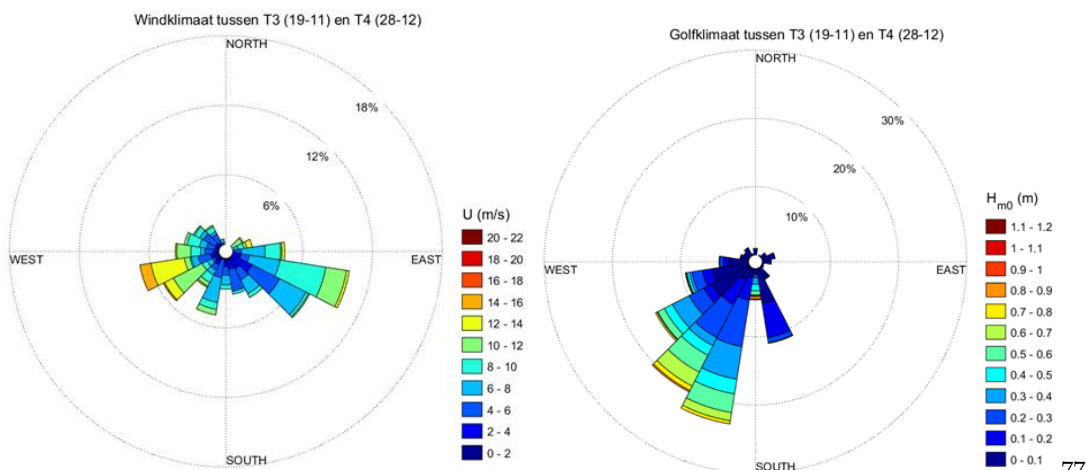
Datum	Windrichting gr. N.	Max. windsnelheid m/s	Max. waterstand m+NAP	Max. H _{m0} (golfr.) m
3-11-2014	170	11,4	-0,23	0,58 (185)
7-11-2014	150	12,7	-0,29	0,50 (180)

Tabel 5-6 Overzicht events binnen meetinterval T2 – T3.

5.5.5 MEETINTERVAL T3-T4 (19-11-14 TOT 28-12-14)

Beschikbaarheid data

Vanaf deze periode is er lokaal gemeten meteorologische en hydrodynamische data beschikbaar, behalve in de periode 29-11, 18:00 tot 3-12, 13:00. Voor deze periode is de hydrodynamische data gebaseerd op het operationele model van Rijkswaterstaat. De meteorologische data kende behalve deze periode nog enkele andere gaten. Deze zijn opgevuld op basis van data van KNMI-station Schiphol.



Figuur 5-24 Wind- en golfklimaat tussen T3 en T4.

Windklimaat

Deze periode kende een tweedeling: een kalme periode (19-11-14 t/m 5-12-14, gem. windsnelheid 5,8 m/s, OZO) en een periode met veel wind (6-12-14 tot 28-12-14, gem. windsnelheid 9,3 m/s, ZW).

Waterstanden

Gemiddelde waterstand NAP-0,40 m (19-11-14 t/m 5-12-14) en NAP-0,29 m (6-12-14 tot 28-12-14).

Golven

In de periode met OZO-wind (19-11-14 t/m 5-12-14) waren de golven laag (gemiddeld 0,07 m) vanwege het gebrek aan strijklengte en de lage windsnelheden. In de tweede periode, met ZW-wind, zijn er verschillende stormen opgetreden, en kwamen de golven voortdurend uit richtingen tussen Z en WZW. De gemiddelde significante golfhoogte in deze tweede periode was 0,32 m.

Belangrijkste events

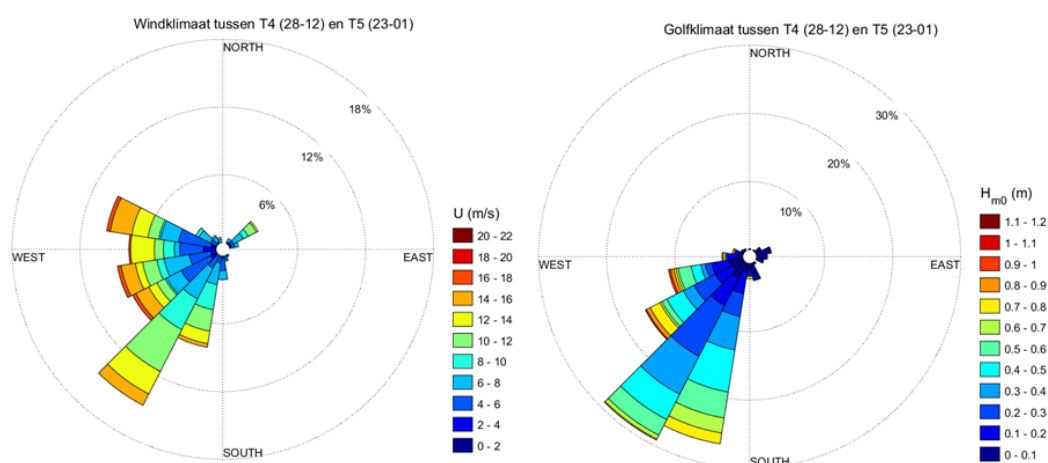
Datum	Windrichting gr. N.	Max. windsnelheid m/s	Max. waterstand m+NAP	Max. H_{m0} (golfr.) m
10-12-2014	200	15,2	-0,19	0,73 (200)
11-12-2014	250	16,5	-0,28	0,56 (240)
12-12-2014	210	20,3	+0,01	0,90 (180)
18-12-2014	240	19,1	-0,13	0,67 (220)
20-12-2014	270	16,5	-0,14	0,59 (240)
22 t/m 24-12	240	15,4	-0,02	0,81 (220)
27-12-2014	100	13,4	-0,41	0,23 (160)

Tabel 5-7 Overzicht events binnen meetinterval T3 – T4.

5.5.6 MEETINTERVAL T4-T5 (28-12-14 TOT 23-01-15)

Beschikbaarheid data

In deze hele periode was lokaal gemeten data beschikbaar voor de hydrodynamica. De tijdreeks voor de meteorologie bevatte een gat (14-1-15 tot 22-1-15), wat is gedicht op basis van data van KNMI-station Schiphol.



Figuur 5-25 Wind- en golfklimaat tussen T4 en T5.

Windklimaat

Met een gemiddelde windsnelheid 8,0 m/s duidelijk boven het gemiddelde van 6,3 m/s. Diverse stormen uit richtingen tussen ZZW en WNW.

Waterstanden

Lokale waterstanden gemiddeld (NAP-0,24 m) aanzienlijk boven het streefpeil in het gehele Markermeer van NAP-0,4 m. Hoogst gemeten waterstand NAP+0,11 m.

Golven

Golfrichtingen tussen ZZW en WZW, gemiddelde significante golfhoogte 0,31 m, maximaal 0,99 m significante golfhoogte.

Belangrijkste events

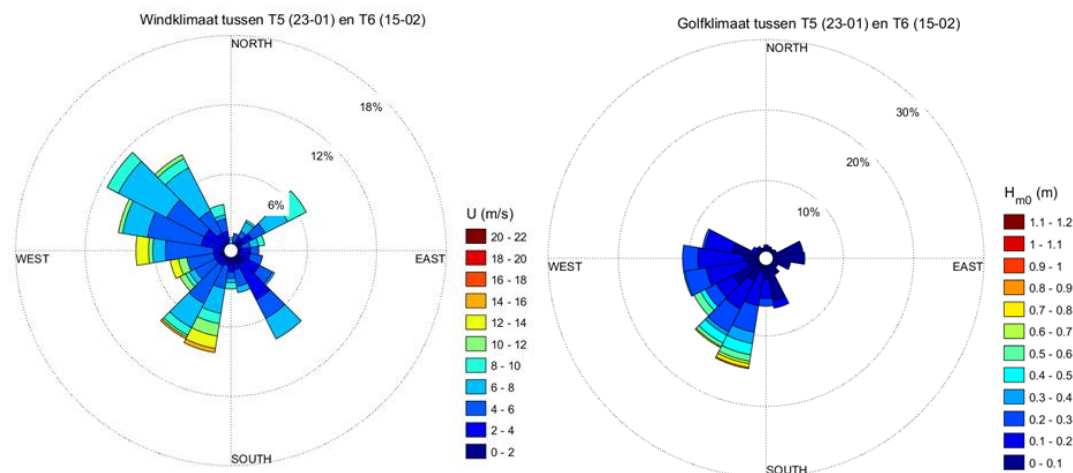
Datum	Windrichting gr. N.	Max. windsnelheid m/s	Max. waterstand m+NAP	Max. H _{m0} (golfr.) m
2-1-2015	210	15,3	-0,08	0,75 (200)
8-1-2015	200	13,6	-0,17	0,59 (200)
9-1-2015	240	16,6	0,07	0,94 (260)
10-1-2015	260	17,1	0,11	0,99 (230)
11-1-2015	280	15,9	-0,19	0,59 (250)
12-1-2015	230	14,3	-0,07	0,81 (250)
15-1-2015	200	17,8	-0,04	0,80 (200)

Tabel 5-8 Overzicht events binnen meetinterval T4 – T5.

5.5.7 MEETINTERVAL T5-T6 (23-01-15 TOT 15-02-15)

Beschikbaarheid data

In deze hele periode was lokaal gemeten data beschikbaar voor de hydrodynamica en de meteorologie.



Figuur 5-26 Wind- en golfklimaat tussen T5 en T6.

Windklimaat

Relatief rustige periode na de stormachtige periode tussen T4 en T5. Gemiddelde windsnelheid 5.8 m/s. Dit is onder het gemiddelde van 6,3 m/s. Windrichting afwisselend vanuit alle richtingen, maar voornamelijk vanuit de ZW- en NW-sector.

Waterstanden

Gemiddelde waterstand NAP-0,24 m. Dit is ruim boven het winterpeil van NAP-0,40 m.

Golven

Golven voortdurend vanuit richtingen tussen ZZW en W, golven hoger dan 0,4 m alleen vanuit richtingen tussen ZZW en WZW. Gemiddelde significante golfhoogte in deze periode 0,15 m.

Belangrijkste events

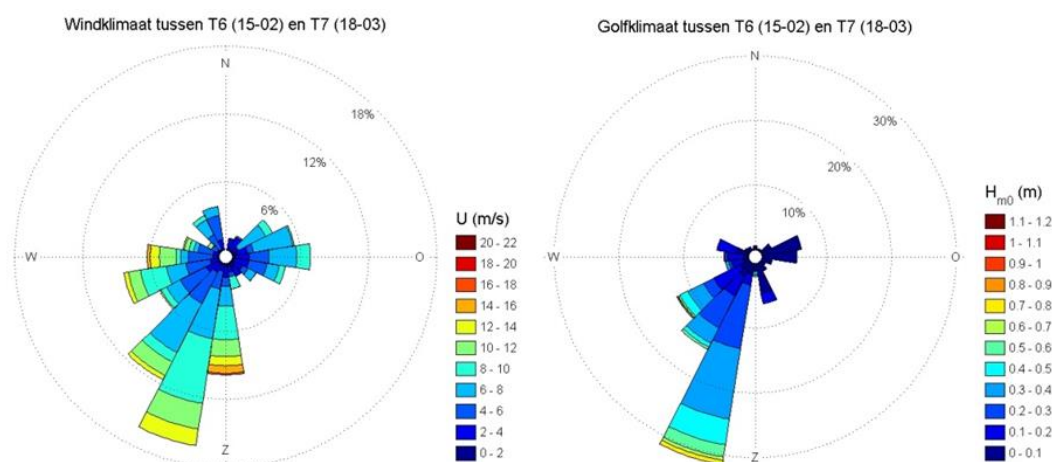
Datum	Windrichting gr. N.	Max. windsnelheid m/s	Max. waterstand m+NAP	Max. H_{m0} (golfr.) m
24-1-2015	190	13,1	-0,11	0,62 (200)
28-1-2015	200	15,2	-0,01	0,81 (200)

Tabel 5-9 Overzicht events binnen meetinterval T5 – T6.

5.5.8 MEETINTERVAL T6-T7 (15-02-15 TOT 18-03-15)

Beschikbaarheid data

In deze hele periode was lokaal gemeten data beschikbaar voor de hydrodynamica en de meteorologie.



Figuur 5-27 Wind- en golfklimaat tussen T6 en T7.

Windklimaat

Grootste deel van de periode wind uit ZW-sector, laatste paar dagen van de periode ook wind uit oostelijke sectoren. Gemiddelde windsnelheid 6.7 m/s; dit is rond het gemiddelde.

Waterstanden

In deze periode daalde de gemiddelde waterstand van het verhoogde meerpeil uit de voorgaande waarde naar een meer gebruikelijke waarde voor in de winter van NAP-0.36 m.

Golven

Gemiddelde golfhoogte 0,20 m. Golven met noemenswaardige energie alleen vanuit richtingen rond ZZW en ZW.

Belangrijkste events

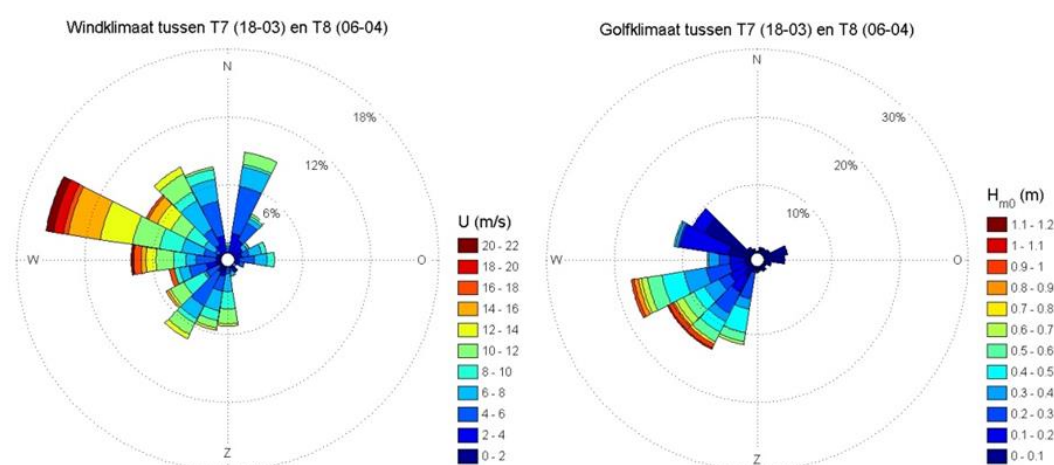
Datum	Windrichting gr. N.	Max. windsnelheid m/s	Max. waterstand m+NAP	Max. H _{m0} (golfr.) m
23-2-2015	180	16,0	-0,17	0,79 (190)
24-2-2015	200	13,5	-0,25	0,58 (200)
1-3-2015	185	13,4	-0,24	0,59 (200)
2-3-2015	270	14,9	-0,16	0,73 (235)

Tabel 5-10 Overzicht events binnen meetinterval T6 – T7.

5.5.9 MEETINTERVAL T7-T8 (18-03-15 TOT 06-04-15)

Beschikbaarheid data

In deze hele periode was lokaal gemeten data beschikbaar voor de hydrodynamica en de meteorologie.



Figuur 5-28 Wind- en golfklimaat tussen T7 en T8.

Windklimaat

Relatief veel wind voor deze tijd van het jaar, inclusief twee stormen eind maart vanuit WZW en WNW richting. Gemiddelde windsnelheid 7.9 m/s. Dit is ruimschoots hoger dan het gemiddelde van 6,3 m/s.

Waterstanden

Gemiddelde waterstand NAP-0,26 m. Aan het eind van deze periode werd het winterpeil weer gewijzigd in het zomerpeil. Het samenvallen met de stormen in deze periode leidde tot zeer hoge waterstanden tot NAP+0,21 m, de hoogste gemeten waarde voor de periode september 2014 tot september 2015.

Golven

Gemiddelde golfhoogte 0,26 m. Zware golven vanuit richtingen tussen ZW en WZW tijdens enkele events. Maximale significante golfhoogte 1.07 m. Dit is nog niet de maximale significante golfhoogte in de periode september 2014 tot september 2015. Deze werd gemeten na de laatste morfologische meting T8, tijdens een storm met een windrichting van 240 graden (en daarmee een grotere strijklengte) op 5 mei 2015 (1.15 m).

Belangrijkste events

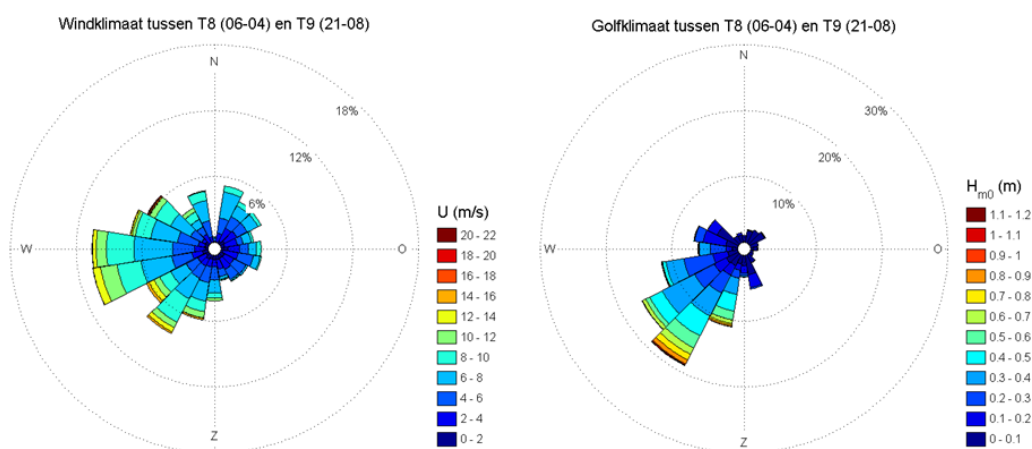
Datum	Windrichting gr. N.	Max. windsnelheid m/s	Max. waterstand m+NAP	Max. H_{m0} (golfr.) m
29-3-2015	250 → 300	16,5 → 14,8	0,14 → -0,15	0,99 (215) → 0,58 (250)
31-3-2015	270-290	20,6	0,21	1,07 (220)
1-4-2015	290	16,1	-0,10	0,69 (250)

Tabel 5-11 Overzicht events binnen meetinterval T7 – T8.

5.5.10 MEETINTERVAL T8-T9 (06-04-15 TOT 21-08-15)

Beschikbaarheid data

In deze hele periode was lokaal gemeten data beschikbaar voor de hydrodynamica en de meteorologie.



Figuur 5-29 Wind- en golfklimaat tussen T8 en T9.

Windklimaat

Gemiddelde windsnelheid 6,2 m/s. Dit is iets lager dan het gemiddelde van 6,3 m/s.

Gedurende deze periode zijn enkele uitzonderlijk zware zomerstormen langs gekomen, zoals de ZW-stormen op 5-7 mei en 2 juni en de storm vanuit NW op 25 juli. In Nederland was de storm van 25 juli de zelfs zwaarste zomerstorm sinds het begin van de metingen in 1901.

Waterstanden

Gemiddelde waterstand NAP-0,20 m. Dit is gelijk aan het streefpeil in de zomer.

Golven

Gemiddelde golfhoogte 0,24 m. Zware golven vanuit richtingen tussen ZW en WZW tijdens enkele events. Maximale significante golfhoogte 1,15 m. Dit is de hoogste golfhoogte die tot nu toe werd gemeten sinds het plaatsen van de meetopstelling.

Belangrijkste events

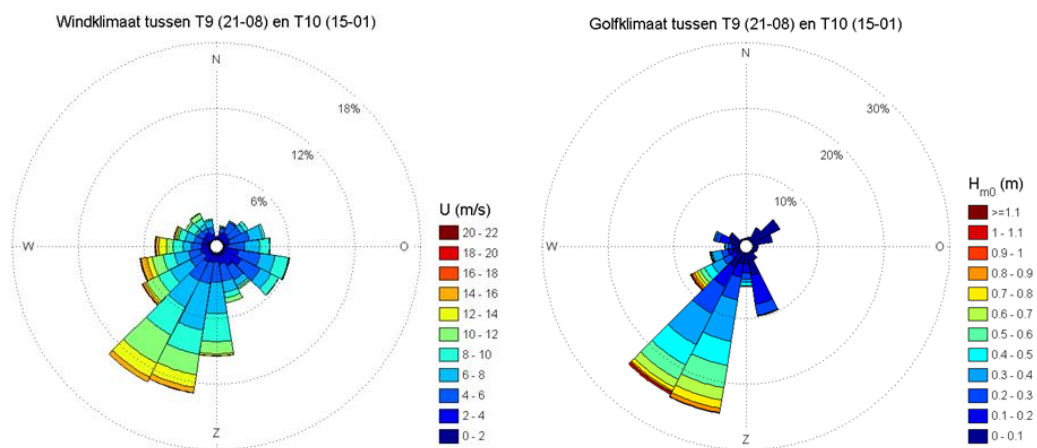
Datum	Windrichting gr. N.	Max. windsnelheid m/s	Max. waterstand m+NAP	Max. H_{m0} (golfr.) m
5-5-2015	240	15,1	0,16	1,15
6-5-2015	230	15,6	0,15	1,02
18-5-2015	210	14,2	0,04	0,89
2-6-2015	210	15,6	0,05	0,93
7-7-2015	215	13,3	-0,01	0,93
25-7-2015	310	21,9	0,05	0,90

Tabel 5-12 Overzicht events binnen meetinterval T8 – T9.

5.5.11 MEETINTERVAL T9-T10 (21-08-15 TOT 15-01-16)

Beschikbaarheid data

In deze hele periode was lokaal gemeten data beschikbaar voor de hydrodynamica en de meteorologie.



Figuur 5-30 Wind- en golfklimaat tussen T9 en T10.

Windklimaat

Gemiddelde windsnelheid 7,0 m/s. Dit is iets hoger dan het gemiddelde van 6,3 m/s. Diverse events in najaar en winter, vrijwel allemaal vanuit ZW richting.

Waterstanden

Gemiddelde waterstand NAP-0.28 m. In deze periode heeft de overgang van zomerpeil naar winterpeil plaatsgevonden.

Golven

Gemiddelde golfhoogte 0,27 m. Zware golven vanuit ZZW-ZW tijdens enkele events. Maximale significante golfhoogte 1,27 m. Dit is de hoogste golfhoogte die tot dusver werd gemeten.

Belangrijkste events

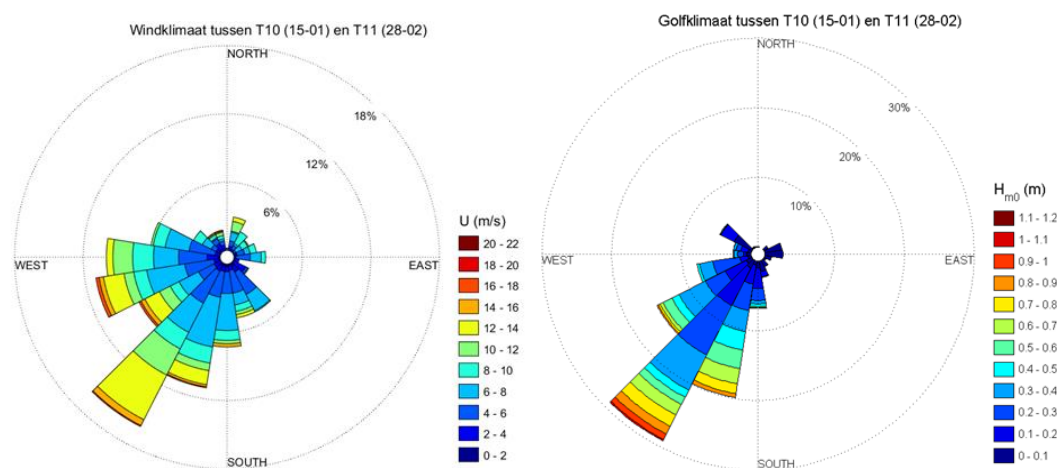
Datum	Windrichting gr. N.	Max. windsnelheid m/s	Max. waterstand m+NAP	Max. H _{m0} (golfr.) m
15-11-2015	250	15,9	-0,05	1,02
17-11-2015	250	19,4	0,16	1,27
24-11-2015	200	15,4	-0,08	0,91
28-11-2015	205	16,3	0,01	0,95
29-11-2015	270	17,4	0,14	1,05
30-11-2015	260	15,5	0,07	0,95
05-12-2015	210	15,0	0,01	0,90
12-12-2015	235	16,0	0,16	1,06
21-12-2015	220	15,6	0,02	1,01

Tabel 5-13 Overzicht events binnen meetinterval T9 – T10 (met de maximaal gemeten golfhoogte van 1,27 m).

5.5.12 MEETINTERVAL T10-T11 (15-01-16 TOT 28-02-16)

Beschikbaarheid data

In deze hele periode was lokaal gemeten data beschikbaar voor de hydrodynamica en de meteorologie.



Figuur 5-31 Wind- en golfklimaat tussen T10 en T11.

Windklimaat

Gemiddelde windsnelheid 6,8 m/s. Dit is rond het gemiddelde van 6,3 m/s. Enkele ZW-stormen, maar niet bijzonder zwaar voor deze tijd van het jaar.

Waterstanden

Gemiddelde waterstand bedroeg NAP- 0,26 m.

Golven

Gemiddelde golfhoogte 0,24 m. Maximale golfhoogte 1,02 m.

Belangrijkste events

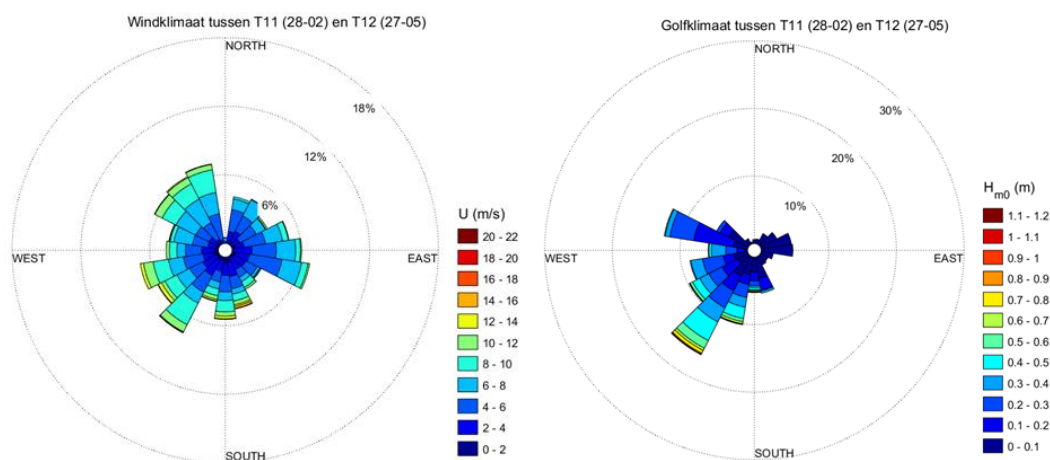
Datum	Windrichting gr. N.	Max. windsnelheid m/s	Max. waterstand m+NAP	Max. H _{m0} (golfr.) m
01-02-2016	220	14,2	-0,05	0,84
07-02-2016	210	17,3	0,09	1,02
21-02-2016	235	14,8	0,01	0,88

Tabel 5-14 Overzicht events binnen meetinterval T10 – T11.

5.5.13 MEETINTERVAL T11-T12 (28-02-16 TOT 27-05-16)

Beschikbaarheid data

In deze hele periode was lokaal gemeten data beschikbaar voor de hydrodynamica en de meteorologie.



Figuur 5-32 Wind- en golfklimaat tussen T11 en T12.

Windklimaat

Gemiddelde windsnelheid 6,0 m/s. Dit is iets lager dan het gemiddelde van 6,3 m/s.

Waterstanden

Gemiddelde waterstand bedroeg NAP- 0,25 m.

Golven

Gemiddelde golfhoogte 0,18 m. Maximale golfhoogte 0,94 m. Geen grote stormen kwamen voor in de periode tussen 28 februari en 27 mei 2016.

Belangrijkste events

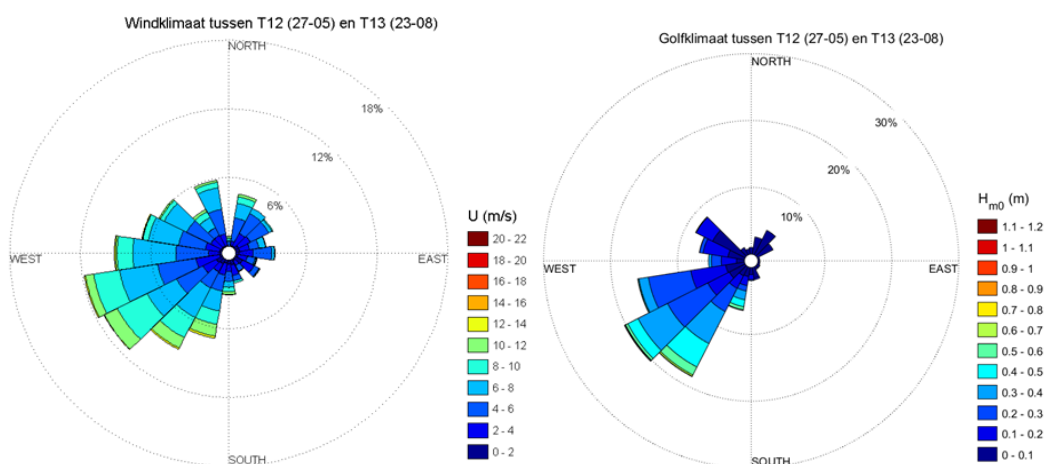
Datum	Windrichting gr. N.	Max. windsnelheid m/s	Max. waterstand m+NAP	Max. H _{m0} (golfr.) m
28-03-2016	190	16,0	0,09	0,94
16-04-2016	210	13,0	0,02	0,94
26-04-2016	300	14,1	-0,18	0,5

Tabel 5-15 Overzicht events binnen meetinterval T11 – T12.

5.5.14 MEETINTERVAL T12-T13 (27-05-16 TOT 23-08-16)

Beschikbaarheid data

In deze hele periode was lokaal gemeten data beschikbaar voor de hydrodynamica en de meteorologie.



Figuur 5-33 Wind- en golfklimaat tussen T12 en T13.

Windklimaat

Gemiddelde windsnelheid 5,75 m/s. Dit is lager dan het gemiddelde van 6,3 m/s. Dit komt doordat de periode tussen T12 en T13 in de zomerperiode valt wanneer het weer over het algemeen rustig is.

Waterstanden

Gemiddelde waterstand bedroeg NAP- 0,21 m.

Golven

Gemiddelde golfhoogte 0,19 m. Maximale golfhoogte 0,81 m.

Belangrijkste events

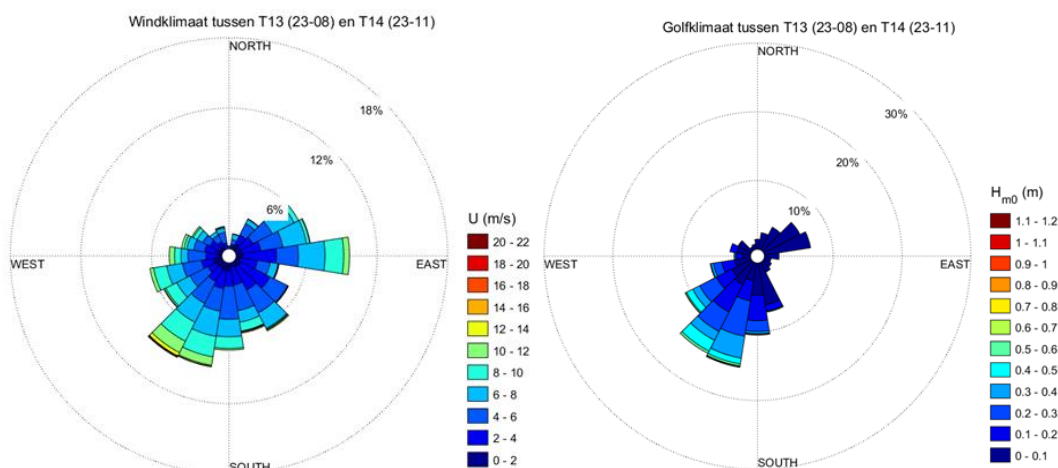
Datum	Windrichting	Max. windsnelheid	Max. waterstand	Max. H _{m0} (golfr.)
	gr. N.	m/s	m+NAP	m
05-07-2016	270	13,1	-0,06	0,75
11-07-2016	227	13,4	0,02	0,81

Tabel 5-16 Overzicht events binnen meetinterval T12 – T13.

5.5.15 MEETINTERVAL T13-T14 (23-08-16 TOT 23-11-16)

Beschikbaarheid data

In deze hele periode was lokaal gemeten data beschikbaar voor de hydrodynamica en de meteorologie.



Figuur 5-34 Wind- en golfklimaat tussen T13 en T14.

Windklimaat

Gemiddelde windsnelheid 5,4 m/s. Dit is lager dan het jaargemiddelde van 6,4 m/s. Hoewel er een zuidwesterstorm is opgetreden op 20 november met windsnelheden tot 18,8 m/s, is de rest van de periode relatief rustig verlopen. De gemiddelde windrichting was 171 graden.

Waterstanden

Gemiddelde waterstand NAP-0,33 m. Het winterpeil is correct gehandhaafd in deze periode.

Golven

Gemiddelde golfhoogte 0,13 m. Maximale golfhoogte 1,07 m.

Belangrijkste events

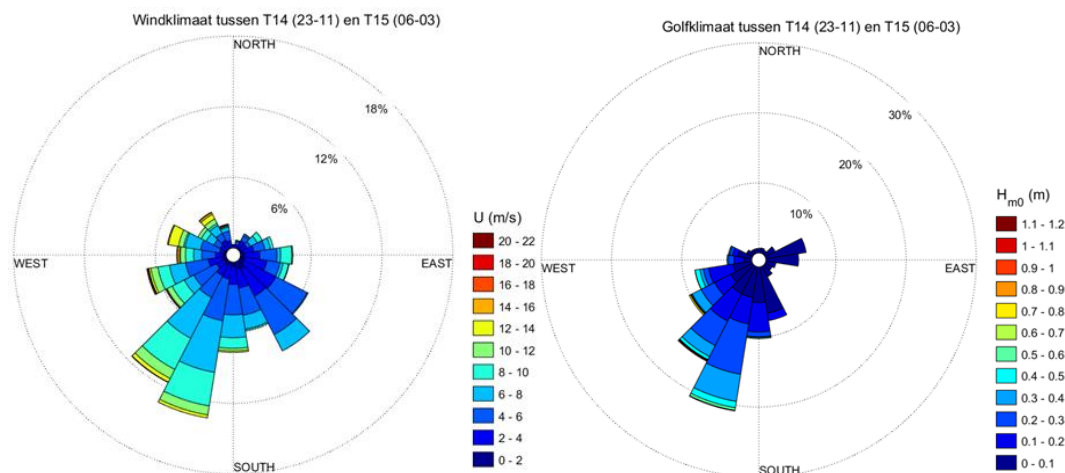
Datum	Windrichting gr. N.	Max. windsnelheid m/s	Max. waterstand m+NAP	Max. H_{m0} (golfr.) m
28-08-2016	250	10,3	-0,14	0,62
04-09-2016	270	11,0	-0,15	0,50
29-09-2016	220	12,7	-0,17	0,59
20-11-2016	210	18,8	0,16	1,07

Tabel 5-17 Overzicht events binnen meetinterval T13 – T14.

5.5.16 MEETINTERVAL T14-T15 (23-11-16 TOT 06-03-17)

Beschikbaarheid data

In deze hele periode was lokaal gemeten data beschikbaar voor de hydrodynamica en de meteorologie.



Figuur 5-35 Wind- en golfklimaat tussen T14 en T15.

Windklimaat

Gemiddelde windsnelheid 5,9 m/s. Dit is lager dan het jaargemiddelde van 6,3 m/s. In deze periode zijn verschillende stormen opgetreden. Hiervan was de storm van 23 februari 2017 het heftigst met windsnelheden tot 19,3 m/s. De gemiddelde windrichting was 192 graden

Waterstanden

Gemiddelde waterstand NAP-0,38 m. Het winterpeil is correct gehandhaafd in deze periode.

Golven

Gemiddelde golfhoogte 0,14 m. Maximale golfhoogte 0,99 m.

Belangrijkste events

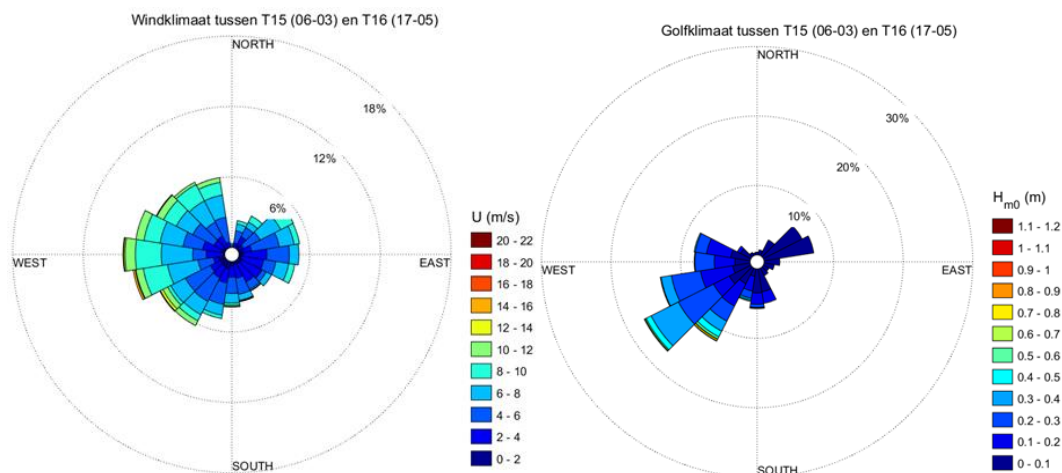
Datum	Windrichting gr. N.	Max. windsnelheid m/s	Max. waterstand m+NAP	Max. H_{m0} (golfr.) m
23-12-2016	200	13,8	-0,21	0,63
18-01-2017	210	16,7	-0,37	0,03
23-02-2017	250	19,3	0,18	0,99
02-03-2017	260	16,0	-0,03	0,77

Tabel 5-18 Overzicht events binnen meetinterval T14 – T15.

5.5.17 MEETINTERVAL T15-T16 (06-03-17 TOT 17-05-17)

Beschikbaarheid data

In deze hele periode was lokaal gemeten data beschikbaar voor de hydrodynamica en de meteorologie.



Figuur 5-36 Wind- en golfklimaat tussen T15 en T16.

Windklimaat

Gemiddelde windsnelheid 5,8 m/s. Dit is lager dan het jaargemiddelde van 6,3 m/s. Dit was een vrij rustige periode met weinig uitschieters in windsnelheid en golfhoogte. De gemiddelde windrichting was 204 graden.

Waterstanden

Gemiddelde waterstand NAP-0,26 m. Het winterpeil is correct gehandhaafd in deze periode.

Golven

Gemiddelde golfhoogte 0,14 m. Maximale golfhoogte 0,86 m.

Belangrijkste events

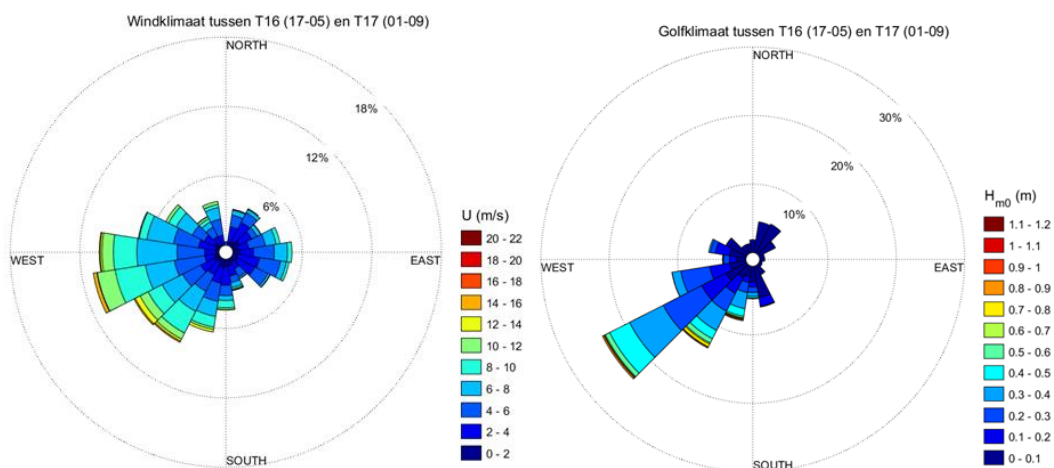
Datum	Windrichting gr. N.	Max. windsnelheid m/s	Max. waterstand m+NAP	Max. H_{m0} (golfr.) m
18-03-2017	250	14,9	-0,10	0,73
20-03-2017	230	14,4	0,02	0,86

Tabel 5-19 Overzicht events binnen meetinterval T15 – T16.

5.5.18 MEETINTERVAL T16-T17 (17-05-17 TOT 31-08-17)

Beschikbaarheid data

In deze hele periode was lokaal gemeten data beschikbaar voor de hydrodynamica en de meteorologie.



Figuur 5-37 Wind- en golfklimaat tussen T16 en T17.

Windklimaat

Gemiddelde windsnelheid 5,6 m/s. Dit is lager dan het jaargemiddelde. De gemiddelde windrichting was 207 graden.

Waterstanden

Gemiddelde waterstand NAP-0,21 m..

Golven

Gemiddelde golfhoogte 0,18 m. Maximale golfhoogte 0,98 m.

Belangrijkste events

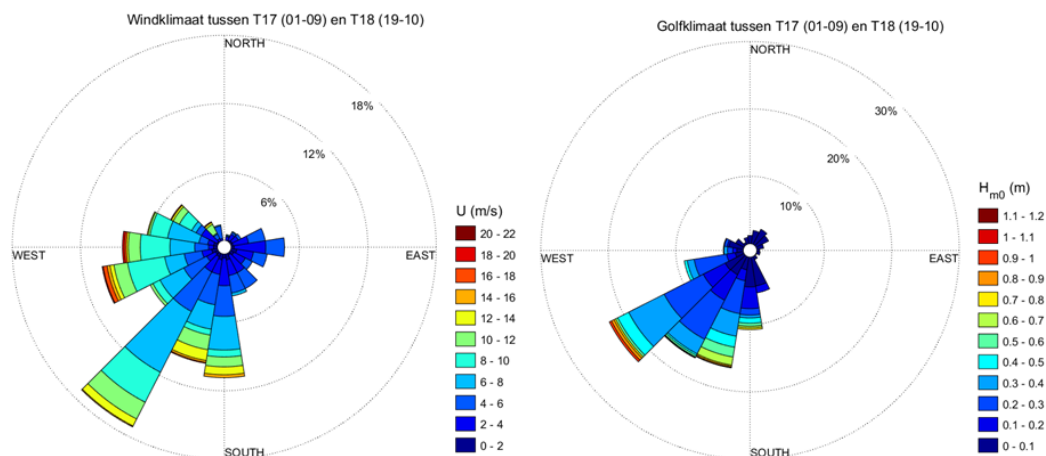
Datum	Windrichting gr. N.	Max. windsnelheid m/s	Max. waterstand m+NAP	Max. H _{m0} (golfr.) m
19-05-2017	205	12,8	-0,09	0,67
06-06-2017	216	15,4	0,14	0,98
03-08-2017	237	13,5	0,04	0,84

Tabel 5-20 Overzicht events binnen meetinterval T16 – T17.

5.5.19 MEETINTERVAL T17-T18 (01-09-17 TOT 09-10-17; EERSTE FASE EXTRA METINGEN)

Beschikbaarheid data

In deze hele periode was lokaal gemeten data beschikbaar.



Figuur 5-38 Wind- en golfklimaat tussen T17 en T18.

Windklimaat

Gemiddelde windsnelheid 6,3 m/s. Dit is ook het jaargemiddelde. In deze periode zijn twee stormen opgetreden. Hiervan was de storm van 13 september 2017 het heftigst met een windsnelheid van 19,7 m/s. De gemiddelde windrichting was 208 graden.

Waterstanden

Gemiddelde waterstand NAP-0,23 m.

Golven

Gemiddelde golfhoogte 0,21 m. Maximale golfhoogte 0,99 m.

Belangrijkste events

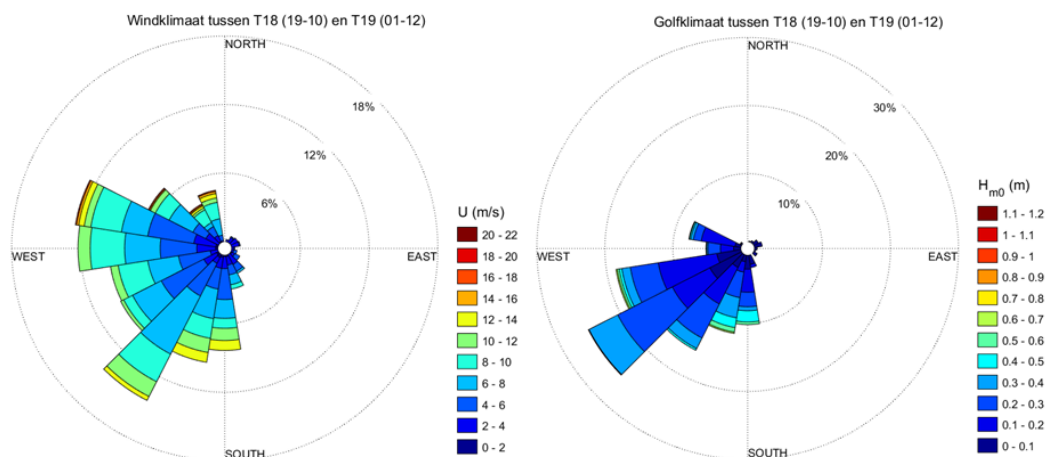
Datum	Windrichting gr. N.	Max. windsnelheid m/s	Max. waterstand m+NAP	Max. H_{m0} (golfr.) m
13-09-2017	263	19,7	0,34	0,99
05-10-2017	242	17,7	-0,17	0,88

Tabel 5-21 Overzicht events binnen meetinterval T17 – T18.

5.5.20 MEETINTERVAL T18-T19 (10-10-17 TOT 30-11-17; TWEDE FASE EXTRA METINGEN)

Beschikbaarheid data

In deze hele periode was lokaal gemeten data beschikbaar voor de hydrodynamica en de meteorologie.



Figuur 5-39 Wind- en golfklimaat tussen T18 en T19.

Windklimaat

Gemiddelde windsnelheid 6,8 m/s. Dit is hoger dan het jaargemiddeld. De gemiddelde windrichting was 239 graden.

Waterstanden

Gemiddelde waterstand NAP-0,37 m. Het winterpeil van NAP-0,40 m is correct gehandhaafd in deze periode.

Golven

Gemiddelde golfhoogte 0,20 m. Maximale golfhoogte 0,65 m.

Belangrijkste events

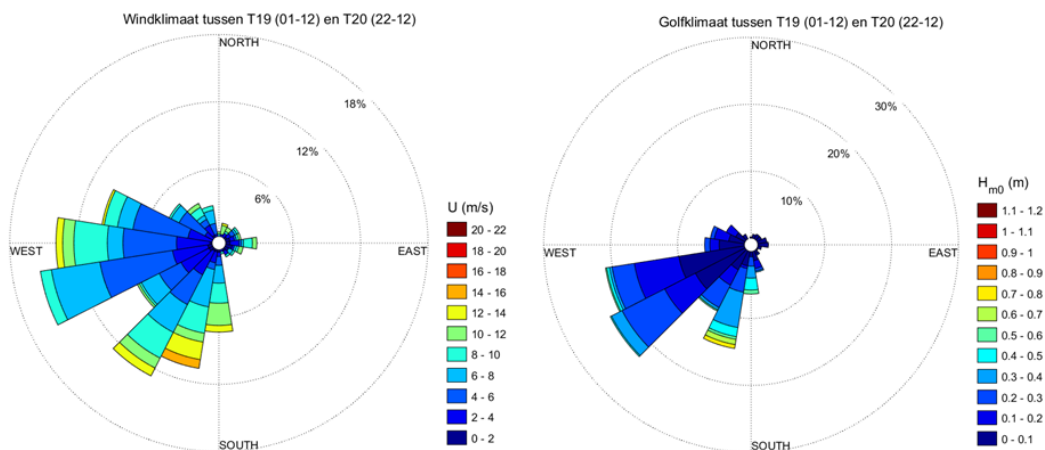
Datum	Windrichting gr. N.	Max. windsnelheid m/s	Max. waterstand m+NAP	Max. H _{m0} (golfr.) m
29-10-2017	295	16,0	-0,22	0,65
27-11-2017	201	13,5	-0,21	0,63

Tabel 5-22 Overzicht events binnen meetinterval T18 – T19.

5.5.21 MEETINTERVAL T19-T20 (01-12-17 TOT 19-12-17; TIJDENS UITVOERING INGRAVING)

Beschikbaarheid data

In deze hele periode was lokaal gemeten data beschikbaar. Feitelijk zijn deze voor de verdere uitwerking niet echt relevant omdat er tijdens deze periode graafwerkzaamheden zijn uitgevoerd.



Figuur 5-40 Wind- en golfklimaat tussen T19 en T20.

Windklimaat

Gemiddelde windsnelheid 6,3 m/s. De gemiddelde windrichting was 229 graden.

Waterstanden

Gemiddelde waterstand NAP-0,11 m. Dit is ruim boven het winterpeil van -0,40 m.

Golven

Gemiddelde golfhoogte 0,17 m. Maximale golfhoogte 0,74 m.

Belangrijkste events

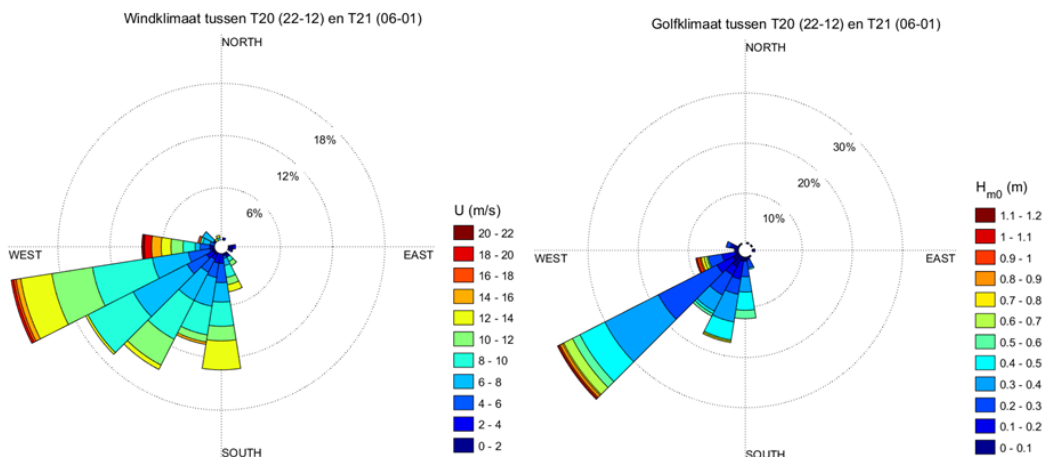
Datum	Windrichting	Max. windsnelheid	Max. waterstand	Max. H_{m0} (golfr.)
	gr. N.	m/s	m+NAP	m
07-12-2017	196	13,5	-0,11	0,74

Tabel 5-23 Overzicht events binnen meetinterval T19 – T20.

5.5.22 MEETINTERVAL T20-T21 (20-12-17 TOT 05-01-18; EERSTE FASE NA AFGRAVING)

Beschikbaarheid data

In deze hele periode was lokaal gemeten data beschikbaar voor de hydrodynamica en de meteorologie.



Figuur 5-41 Wind- en golfklimaat tussen T20 en T21.

Windklimaat

Gemiddelde windsnelheid 8,4 m/s. Dit is veel hoger dan het jaargemiddelde van 6,3 m/s. In deze periode zijn twee events opgetreden, waaronder een storm op 3 januari 2018, met windsnelheden tot 20,1 m/s. De gemiddelde windrichting was 223 graden.

Waterstanden

Gemiddelde waterstand NAP-0,7 m. Dit is ruim boven het winterpeil van NAP-0,40 m. De waterstand van NAP+0,43 m op 3 januari 2018 is de hoogste waterstand die opgetreden is gedurende de gehele meetperiode.

Golven

Gemiddelde golfhoogte 0,31 m. Maximale golfhoogte 1,05 m.

Belangrijkste events

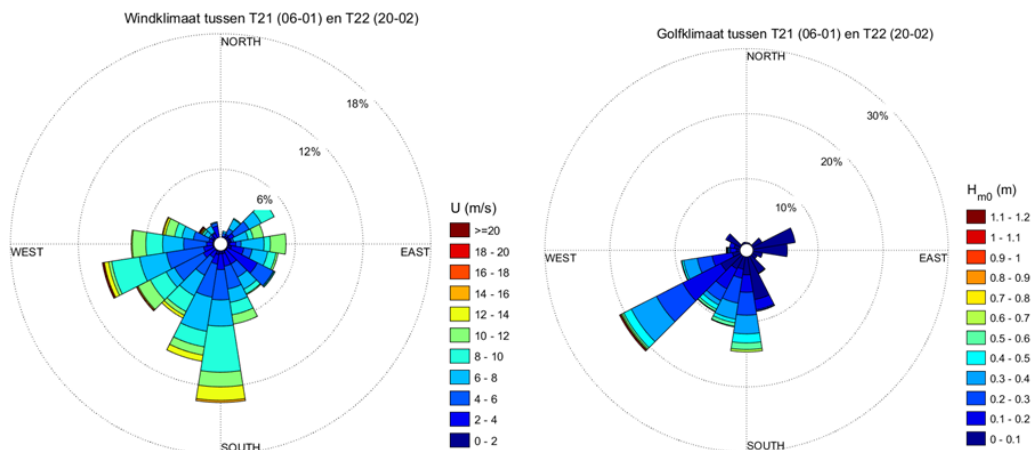
Datum	Windrichting gr. N.	Max. windsnelheid m/s	Max. waterstand m+NAP	Max. H_{m0} (golfr.) m
26-12-2017	240	12,9	0,03	0,75
03-01-2018	273	20,1	0,43	1,05

Tabel 5-24 Overzicht events binnen meetinterval T20 – T21 (met maximaal gemeten waterstand van NAP+0,43 m).

5.5.23 MEETINTERVAL T21-T22 (06-01-18 TOT 20-02-2018)

Beschikbaarheid data

In deze hele periode was lokaal gemeten data beschikbaar voor de hydrodynamica en de meteorologie.



Figuur 5-42 Wind- en golfklimaat tussen T21 en T22.

Windklimaat

Gemiddelde windsnelheid 6,7 m/s. Dit is hoger dan het jaargemiddelde van 6,3 m/s. Op 18 januari 2018 is een storm gemeten, met windsnelheden tot 22,9 m/s. Dit is de hoogste windsnelheid die gemeten is gedurende de gehele meetperiode. De gemiddelde windrichting in deze periode was 187 graden.

Waterstanden

Gemiddelde waterstand NAP-0,16 m. Dit is ruim boven het winterpeil van NAP-0,40 m.

Golven

Gemiddelde golfhoogte 0,17 m. Maximale golfhoogte 1,07 m.

Belangrijkste events

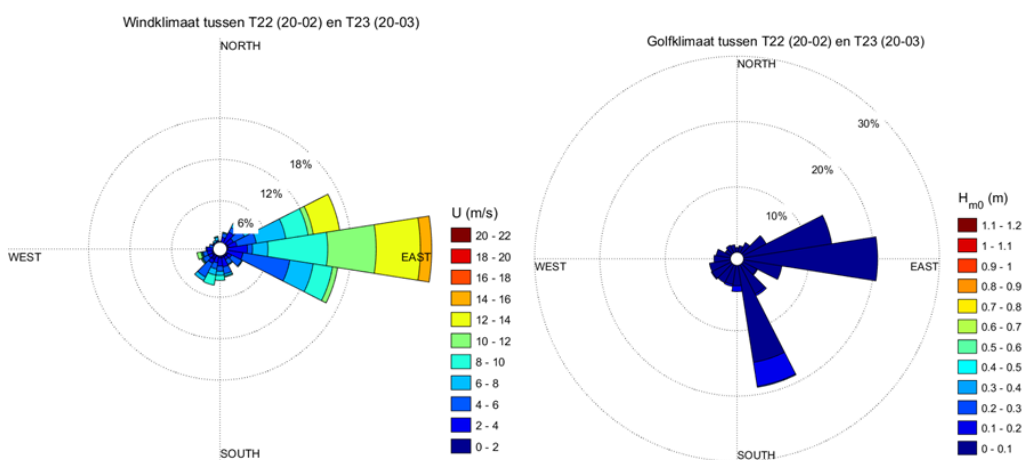
Datum	Windrichting gr. N.	Max. windsnelheid m/s	Max. waterstand m+NAP	Max. H_{m0} (golfr.) m
18-01-2018	270	22,9	0,38	1,07
27-01-2018	210	12,7	0,01	0,64

Tabel 5-25 Overzicht events binnen meetinterval T21 – T22 (met maximaal gemeten windsnelheid).

5.5.24 MEETINTERVAL T22-T23 (20-02-2018 TOT 20-03-2018; LAATSTE PERIODE)

Beschikbaarheid data

In deze hele periode was lokaal gemeten data beschikbaar voor de hydrodynamica en de meteorologie.



Figuur 5-43 Wind- en golfklimaat tussen T22 en T23.

Windklimaat

Gemiddelde windsnelheid 722 m/s. Dit is een stuk hoger dan het jaargemiddelde. Toch zijn in deze periode geen hoge golven of waterstanden gemeten. Dit komt vanwege ijsvorming door de strenge vorst en dominante wind uit het oosten in deze periode. De gemiddelde windrichting was 117 graden.

Waterstanden

Gemiddelde waterstand NAP-0,42 m. Het winterpeil is correct gehandhaafd in deze periode.

Golven

Gemiddelde golfhoogte slechts 0,04 m. De maximale golfhoogte bedroeg slechts 0,20 m.

Belangrijkste events

Door ijsvorming was er geen sprake van relevante golfaanval op de proefsectie hetgeen ook de nadere analyse van de profielontwikkeling in deze periode overbodig maakt.

6

Basisinfo bodemligging

6.1 INLEIDING

Het inmeten van de lokale bodemligging is in de periode september 2014 tot en met april 2015 maandelijks uitgevoerd door Shore Monitoring. Daarna is een lagere meetfrequentie gehanteerd en zijn opnames uitgevoerd in augustus 2015, januari, februari, mei, augustus en november 2016, maart, mei, september, oktober en december 2017. De laatste meting van 1 december 2017 markeerde het eind van de monitoring van de oorspronkelijke proefsectie. Aansluitend is een deel van de vooroever afgegraven.

In het kader van het eerder genoemde aanvullende onderzoek zijn vervolgens nog metingen uitgevoerd in de tweede helft van december 2017 en in januari, februari en maart 2018 zoals vastgelegd in (EcoShape/Deltares/HKV, 2018) en (EcoShape/Arcadis, 2018).

Dit heeft totaal geleid tot een 23-tal veldrapportages alsmede een oplevering van de onderliggende bodemdata (Shore Monitoring & Research, 2018). Deze laatste zijn beschikbaar gemaakt op de repository en kunnen zo worden gebruikt voor de verdere analyses.

Zoals eerder aangegeven kan er bij de pilot onderscheid worden gemaakt tussen een drietal fasen. Deze zijn weergegeven in Tabel 6-1.

Opname	Datum	Opmerkingen
T01-T17	18 september 2014 – 31 augustus 2017	Regulier monitoringsprogramma
T17-T19	1 september 2017 – 30 november 2017	Monitoring aanvullende instrumentatie
	1 december 2017 – 19 december 2017	Afgraving deel onderwaterplateau proefsectie
T20-T23	20 december 2017 – eind maart 2018	Monitoring impact voorland

Tabel 6-1 Overzicht beschouwde meetperioden.

De periode van 1 tot en met 19 december 2017 speelt bij de verdere analyses natuurlijk geen rol van betekenis.

In Tabel 6-2 is een overzicht gegeven van alle door Shore Monitoring & Research uitgevoerde inmetingen.

Opname	Datum	Opmerkingen
T1	18 september 2014	Eerste volledige inmeting
T2	25 oktober 2014	
T3	19 november 2014	
T4	28 december 2014	
T5	23 januari 2014	
T6	15 februari 2015	
T7	18 maart 2015	Onderwaterdeel metingen aangevuld op 21 maart 2015
T8	6 april 2015	
T9	21 augustus 2015	Vlak voor verwijdering tijdelijke beschermingswandje
T10	15 januari 2016	
T11	28 februari 2016	
T12	27 mei 2016	
T13	23 augustus 2016	
T14	23 november 2016	
T15	6 maart 2017	
T16	17 mei 2017	
T17	1 september 2017	Eind basismonitoring en start eerste fase aanvullende instrumentatie
T18	10 oktober 2017	Start tweede fase aanvullende instrumentatie
T19	1 december 2017	Einde tweede fase aanvullende instrumentatie
		<i>Uitvoering lokale afgraving van vooroever</i>
T20	20 december 2017	Start monitoring effect gedeeltelijk afgraving voorliggend plateau
T21	6 januari 2018	Eerste tussenopname
T22	20 februari 2018	Tweede tussenopname
T23	20 maart 2018	Einde monitoring effect gedeeltelijk afgraving voorliggend plateau

Tabel 6-2 Overzicht uitgevoerde (en geplande) bodempeilingen tot en met de laatste inmeting in maart 2018.

In aanvulling op de gebiedsdekkende inmetingen zijn door Shore Monitoring & Research ook zettingen van de ondergrond gemeten (6 zakbakens) en sedimentmonsters genomen. De resultaten van de sedimentmonsters komen samen met de resultaten van de opnames van Alterra/WEnR aan de orde in Hoofdstuk 7 van deze rapportage. De basisanalyse van de zettingsinformatie is ondergebracht in Paragraaf 6.4.

6.2 BESCHRIJVING MORFOLOGISCHE ONTWIKKELING OP HOOFDLIJNEN

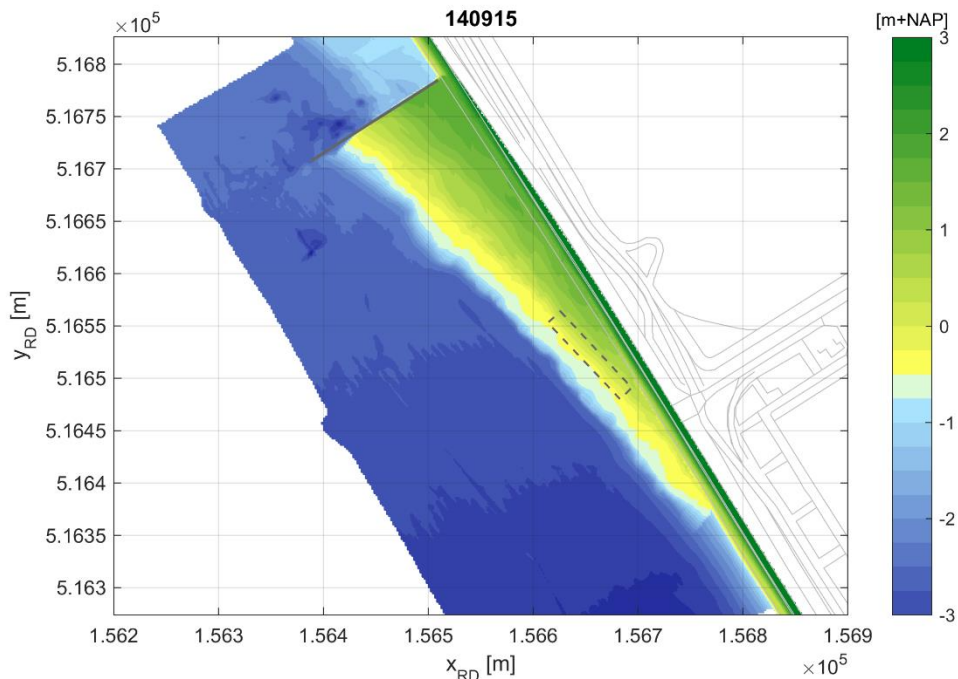
6.2.1 INLEIDING

In het volgende is een korte schets gegeven van de waargenomen morfologische ontwikkelingen. Voor meer gedetailleerde informatie kan worden verwezen naar de door Shore Monitoring opgestelde veldrapportages (Shore Monitoring & Research, 2018).

Bij deze uitwerkingen is onderscheid gemaakt tussen de monitoring voor en na de afgraving. In lijn met Tabel 6-1 gaat het daarbij om respectievelijk T01 tot en met T19 (of eigenlijk T17) en T20 tot en met T23.

6.2.2 INITIELE BODEMLIGGING

Figuur 6-1 geeft de situatie zoals deze aanwezig was ten tijde van de eindpeiling van de aannemers-combinatie.



Figuur 6-1 Bodemligging conform eindpeiling DE Combinatie van 15 september 2014.

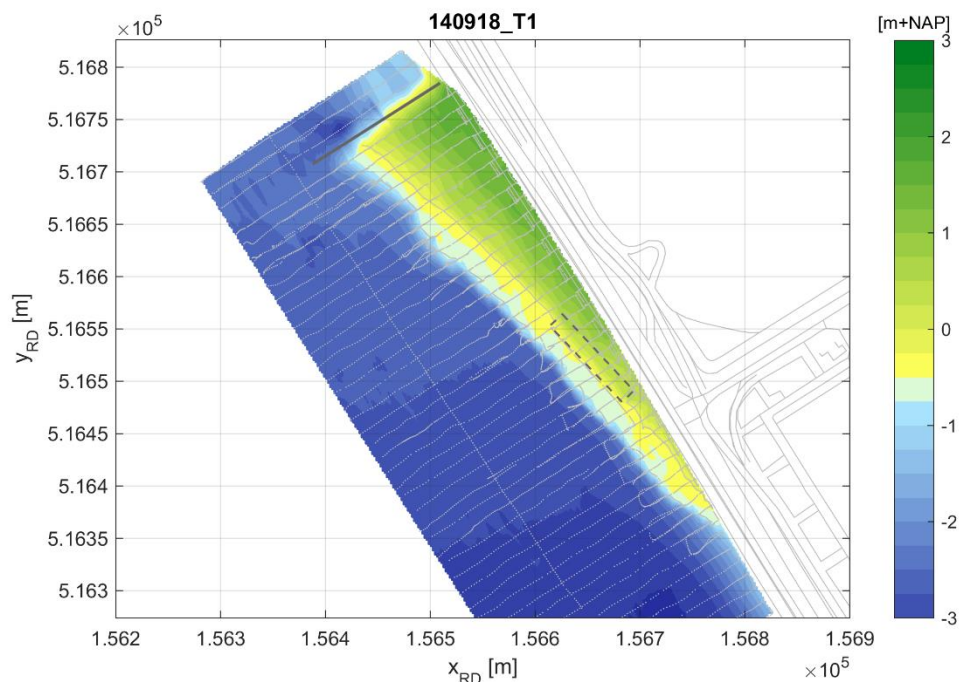
Deze bodemligging heeft dus betrekking op de situatie voor de feitelijke start van het monitoringsprogramma. In deze (en de volgende) figuren is naast de positie van de damwand tevens de locatie van de zogenaamde rijsmatconstructie aangegeven. Deze was alleen in de eerste fase aanwezig, maar heeft de aanwezige condities niet weerstaan.

6.2.3 BODEMLIGGING PER OPNAME TIJDENS ONGESTOORDE ONTWIKKELING

Resultaten van de uitgevoerde inmetingen zijn in bovenaanzicht samengebracht in Figuur 6-2 tot en met Figuur 6-15. Hierin zijn ook de door Shore Monitoring aangehouden meettracks (grijze lijntjes) herkenbaar. In het totaal gaat het om 43 verschillende dwarsprofielen die reiken tot op een afstand van maximaal 250 m uit de dijk.

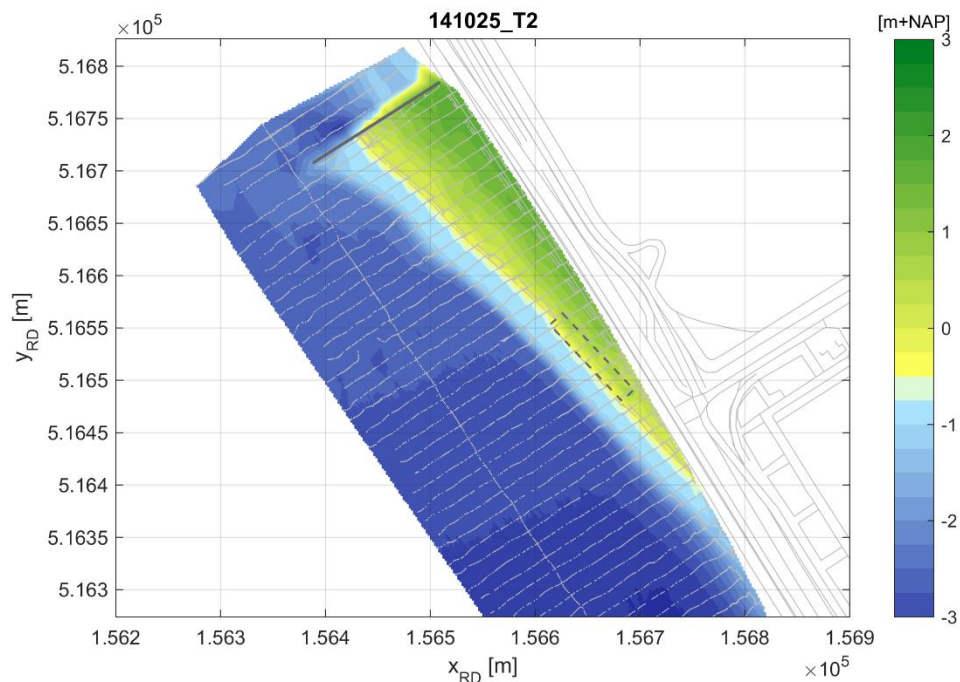
De onderlinge afstand tussen deze profielen bedraagt 15 m. Het meest noordwestelijke profiel (#01) bevindt zich op een afstand van 45 m noordwestelijk van de damwand. Profiel #04 heeft betrekking op het eerste profiel aan de proefsectiezijde naast de damwand terwijl profiel #19 zich (op 240 m) nog net noordwestelijk van de (oorspronkelijke) rijsmatconstructie bevindt. De profielen #11 en #12 liggen centraal op het tussengelegen vak en geven mogelijk een zo ongestoord mogelijk beeld van de ontwikkeling van het dwarsprofiel.

Het meest zuidoostelijke profiel (#43) ligt op een afstand van 600 m van de damwand.

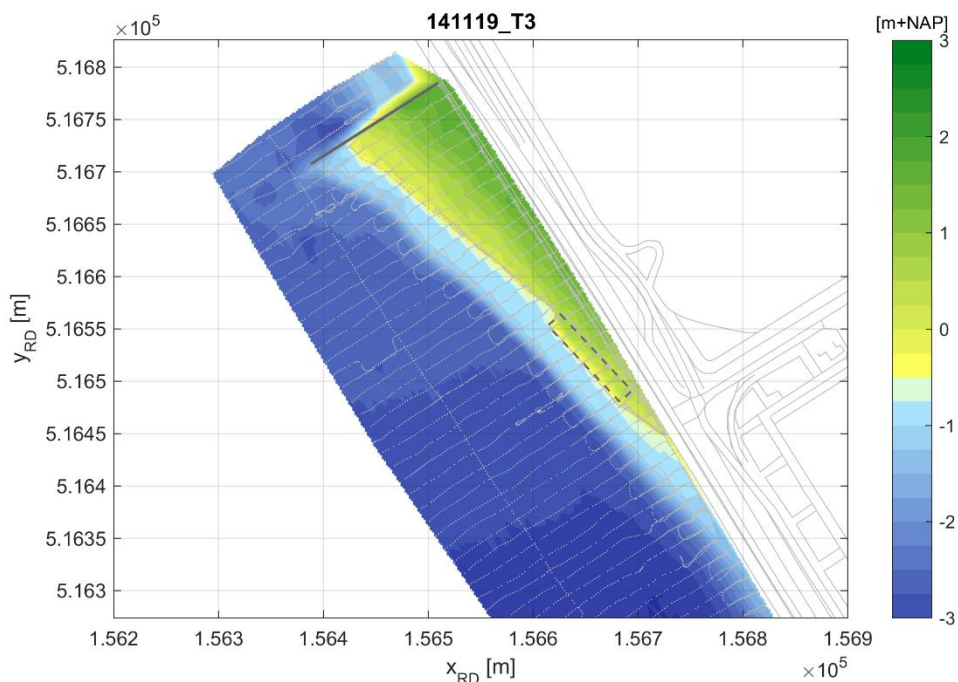


Figuur 6-2 Overzicht bodemligging T1-inmeting op 18 september 2014.

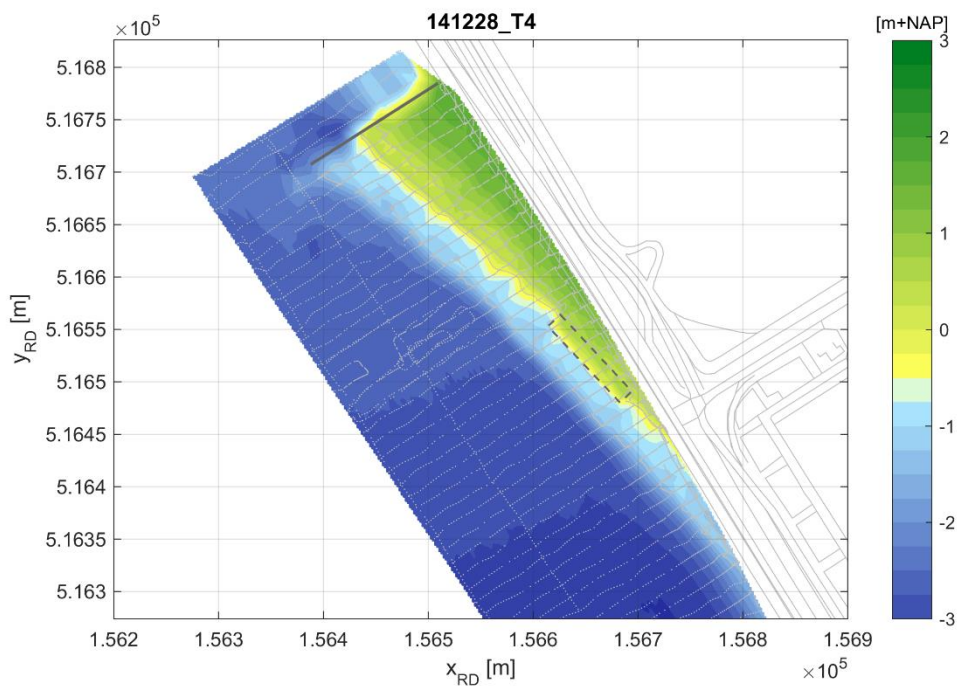
De T1-meting vormde de feitelijke start van het monitoringsprogramma. De wijzigingen tussen de uitmeting van de aannemer en de T1-meting zijn verder niet in beschouwing genomen.



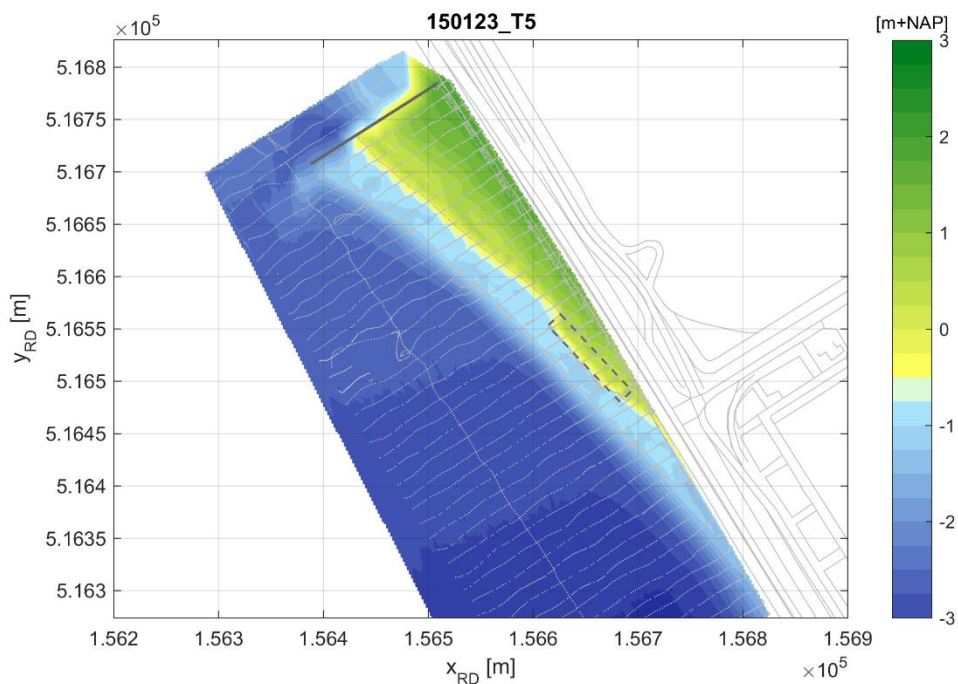
Figuur 6-3 Overzicht bodemligging T2-inmeting op 25 oktober 2014.



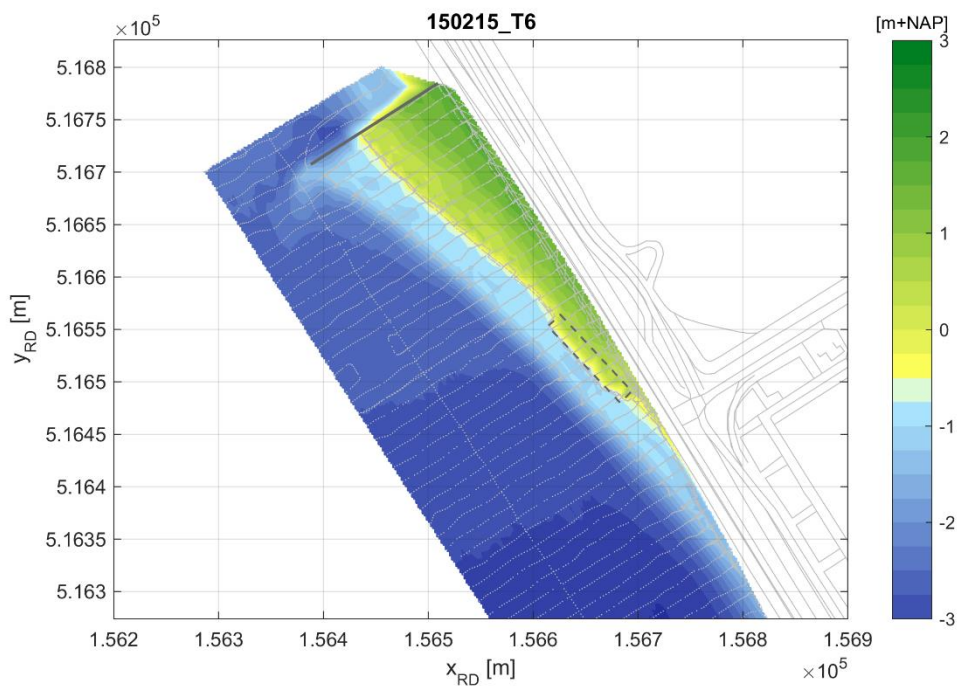
Figuur 6-4 Overzicht bodemligging T3-inmeting op 19 november 2014.



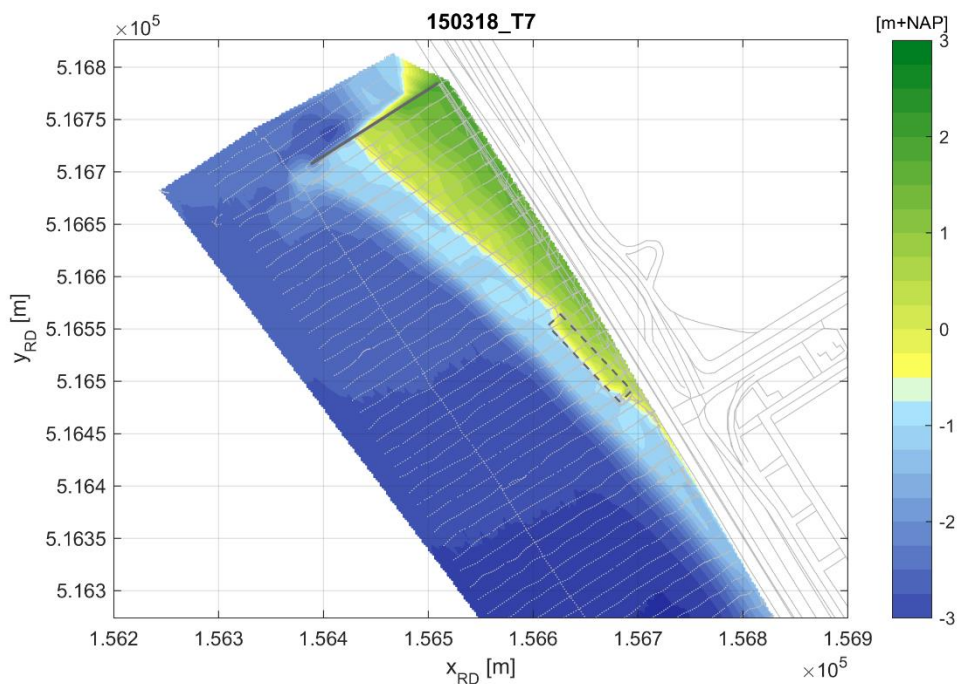
Figuur 6-5 Overzicht bodemligging T4-inmeting op 28 december 2014.



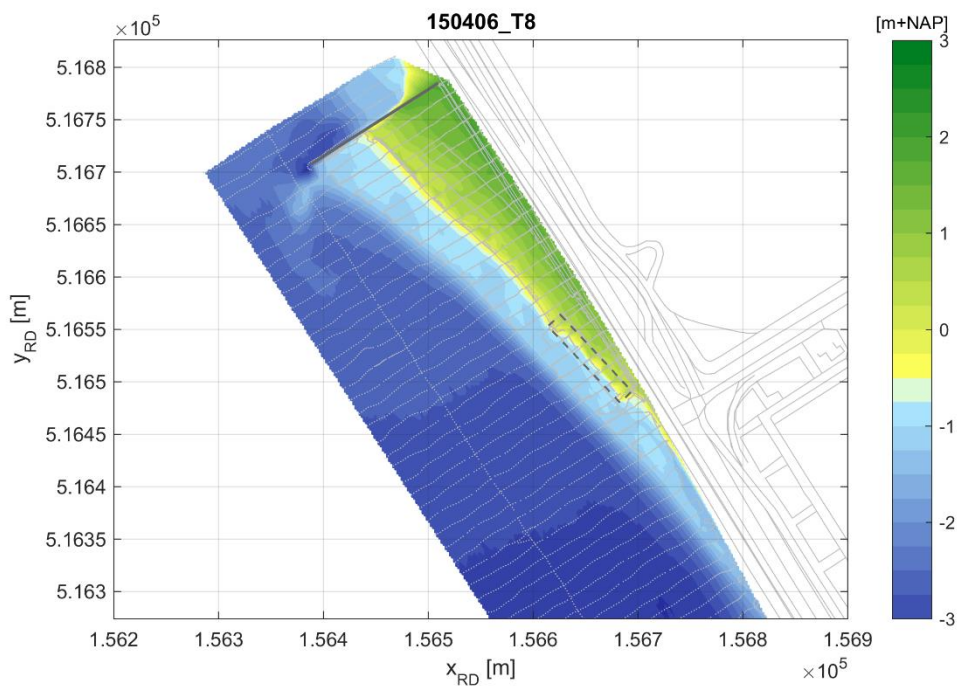
Figuur 6-6 Overzicht bodemligging T5-inmeting op 23 januari 2015.



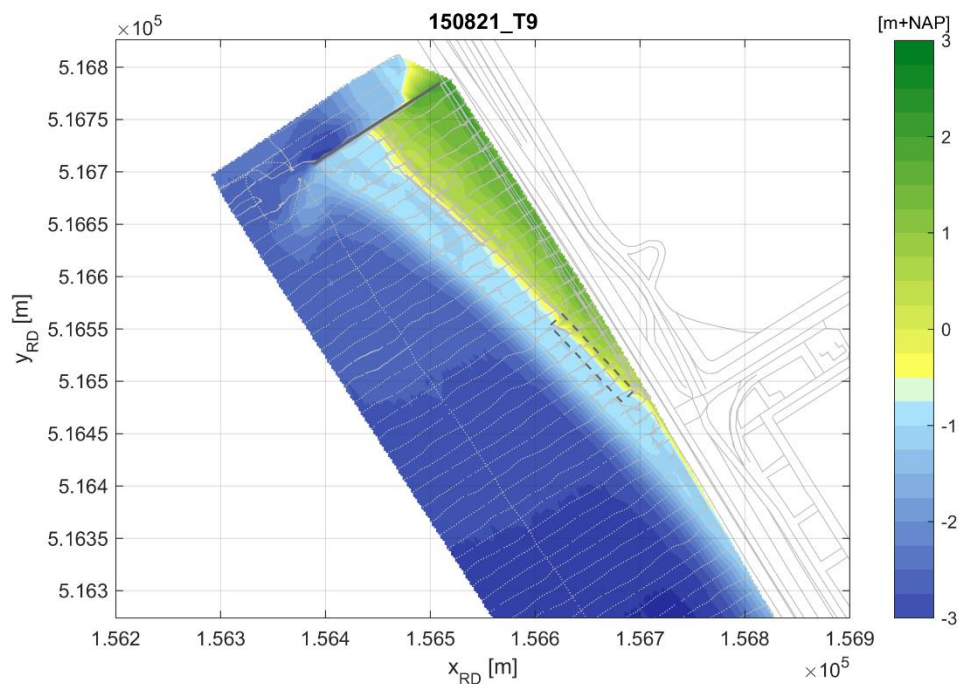
Figuur 6-7 Overzicht bodemligging T6-inmeting op 14 februari 2015.



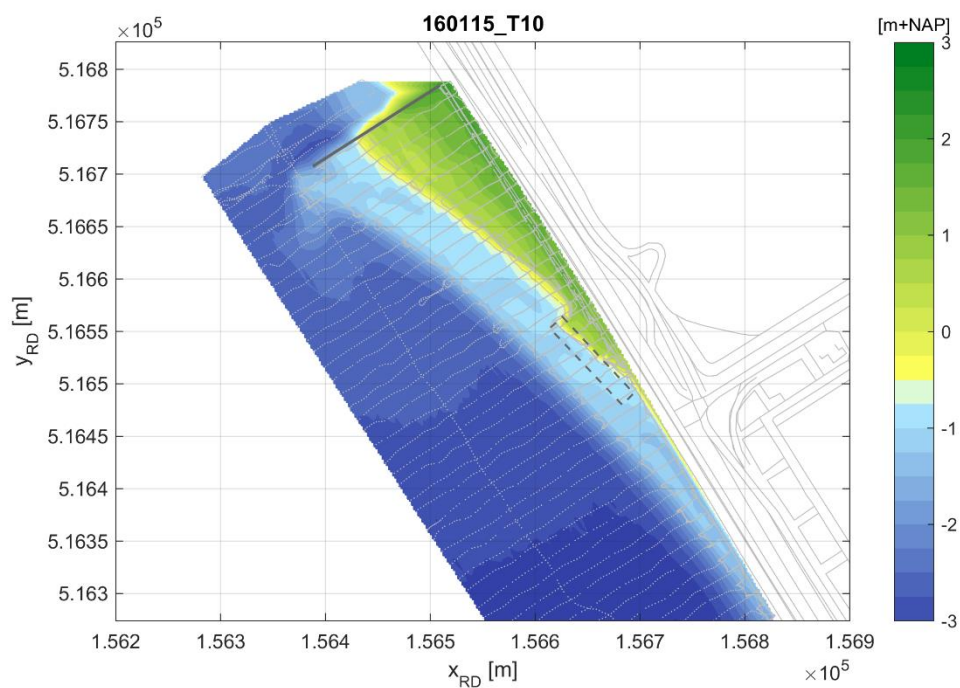
Figuur 6-8 Overzicht bodemligging T7-inmeting op 18 (en 21) maart 2015.



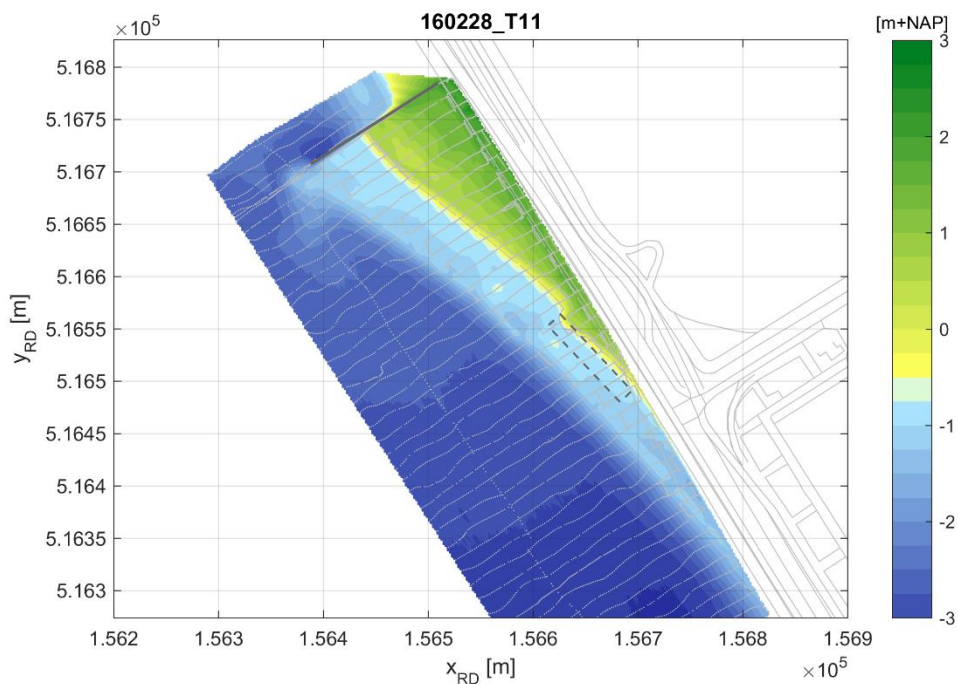
Figuur 6-9 Overzicht bodemligging T8-inmeting op 6 april 2015.



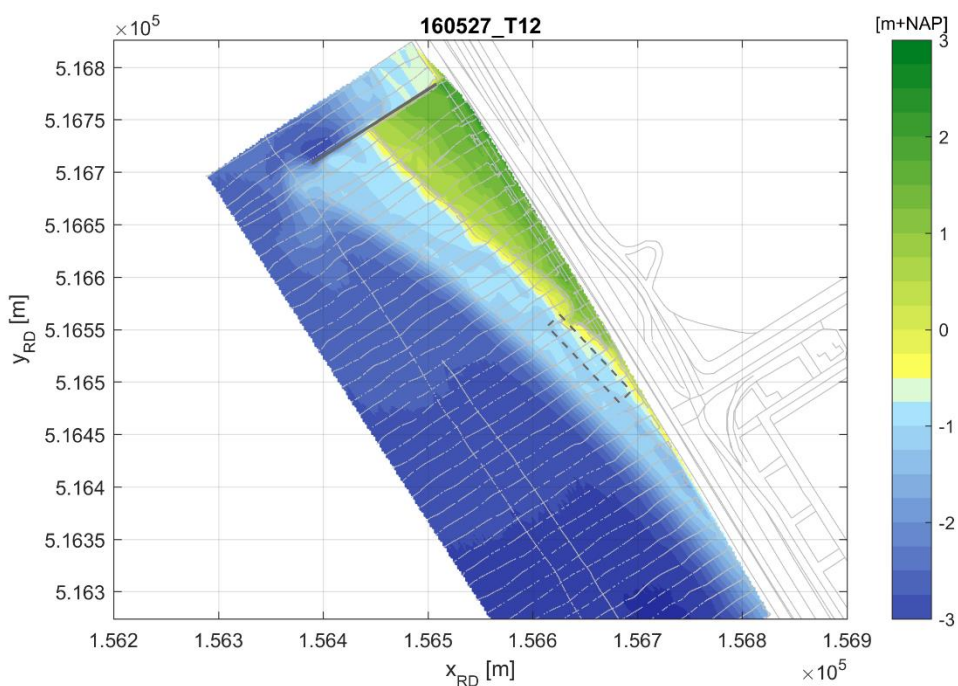
Figuur 6-10 Overzicht bodemligging T9-inmeting op 21 augustus 2015.



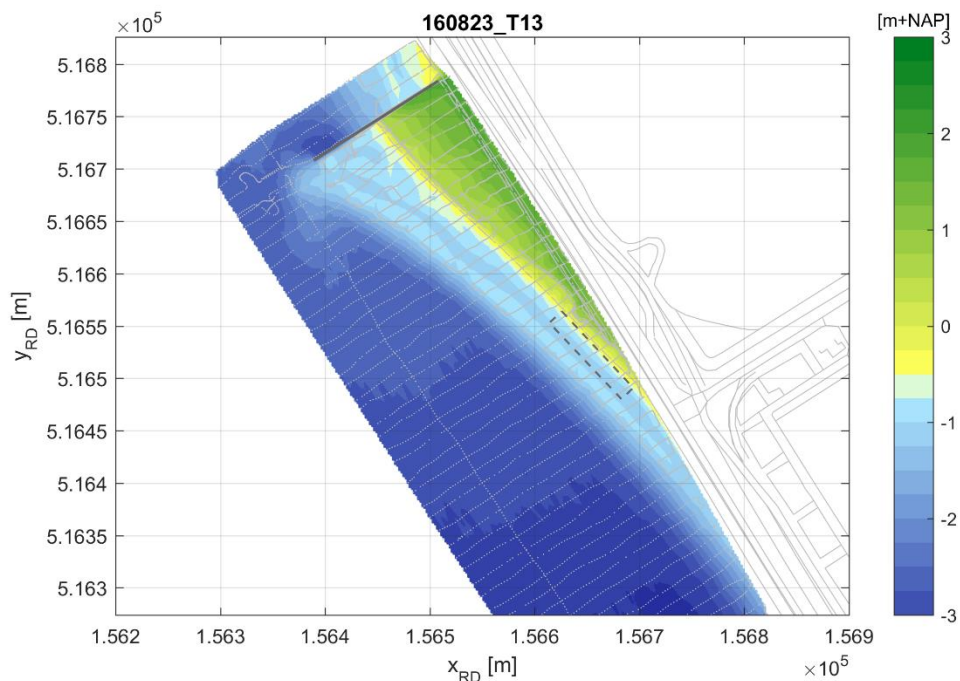
Figuur 6-11 Overzicht bodemligging T10-inmeting op 15 januari 2016.



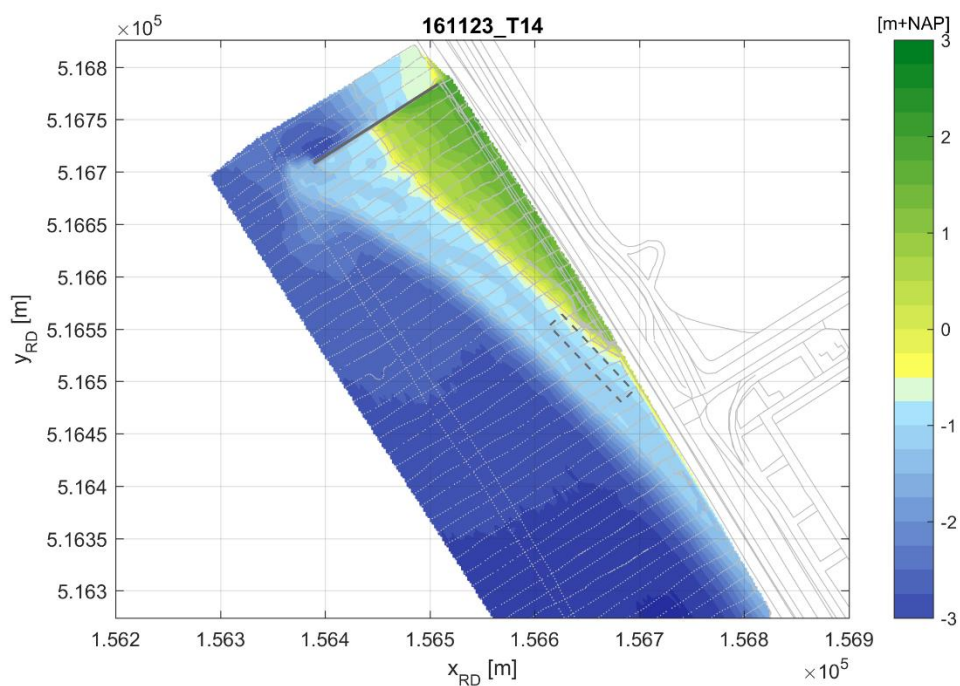
Figuur 6-12 Overzicht bodemligging T11-inmeting op 28 februari 2016.



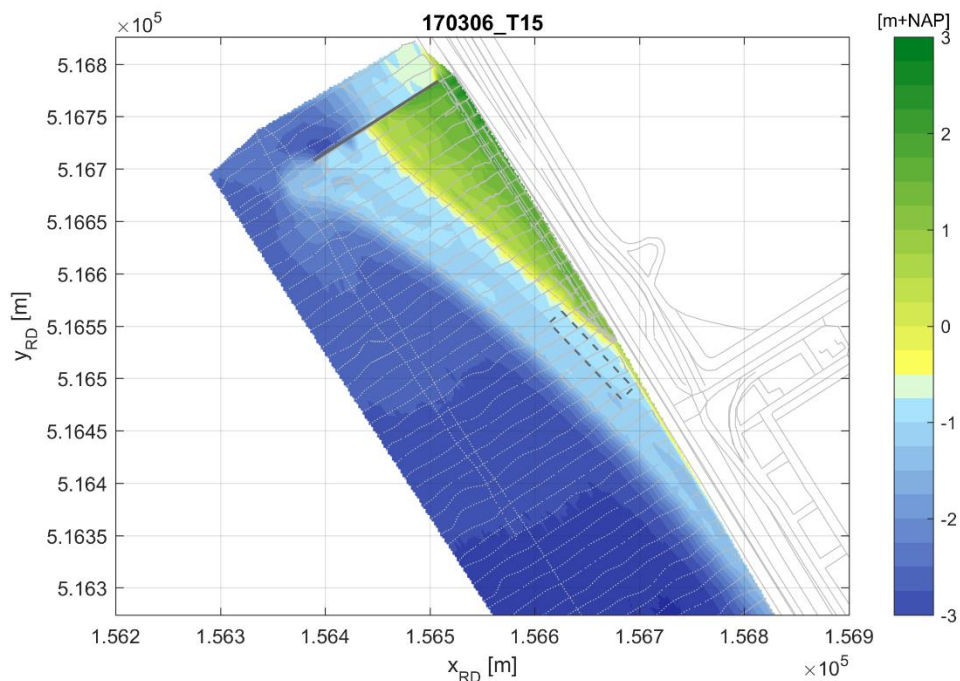
Figuur 6-13 Overzicht bodemligging T12-inmeting op 27 mei 2016.



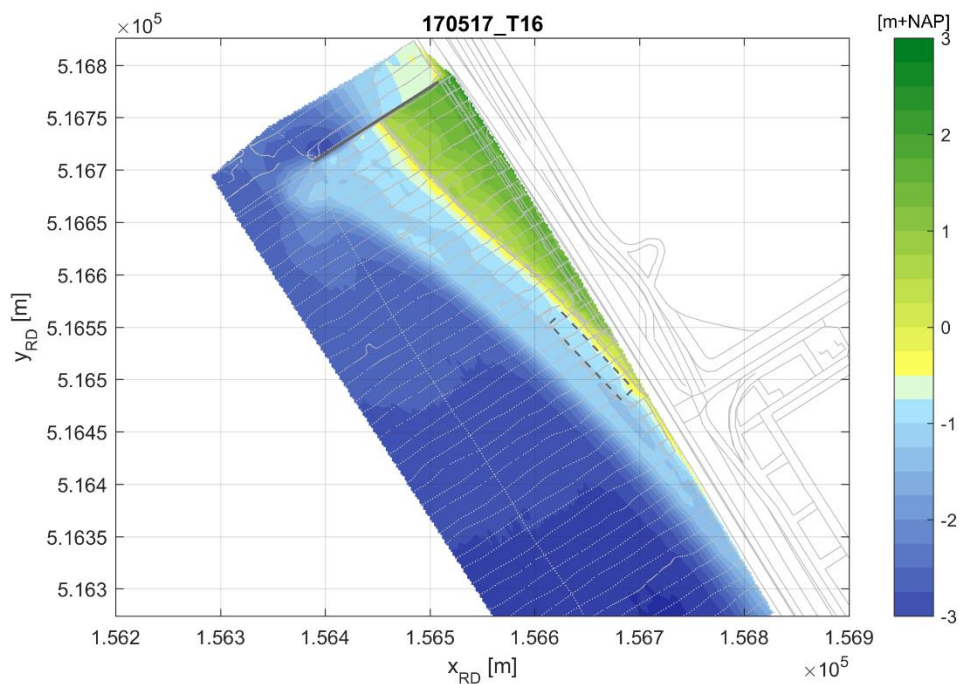
Figuur 6-14 Overzicht bodemligging T13-inmeting op 23 augustus 2016.



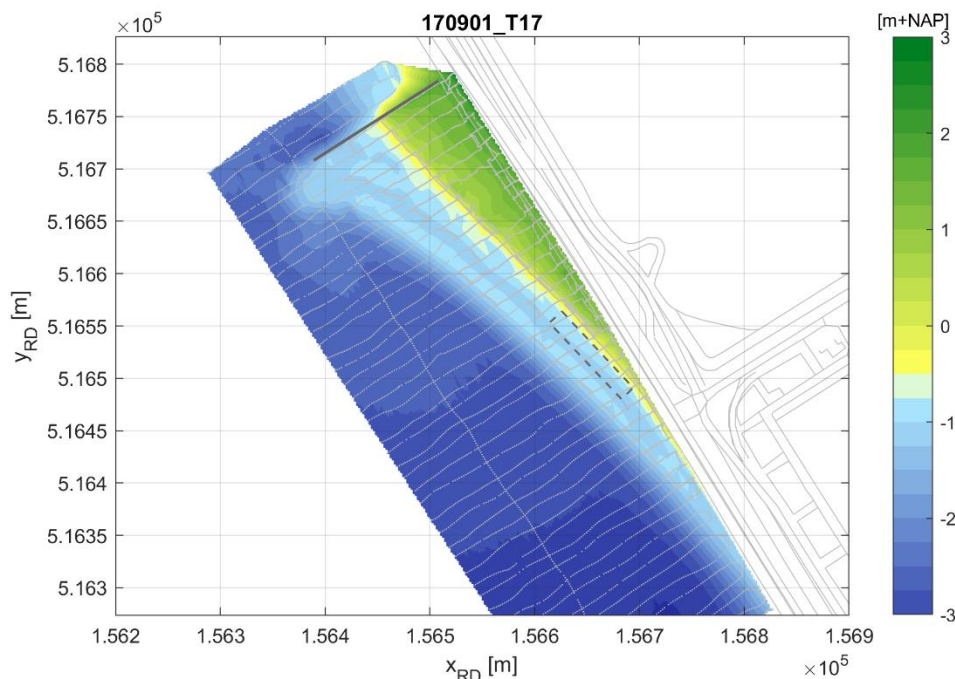
Figuur 6-15 Overzicht bodemligging T14-inmeting op 23 november 2016.



Figuur 6-16 Overzicht bodemligging T15-inmeting op 6 maart 2017.



Figuur 6-17 Overzicht bodemligging T16-inmeting op 17 mei 2017.



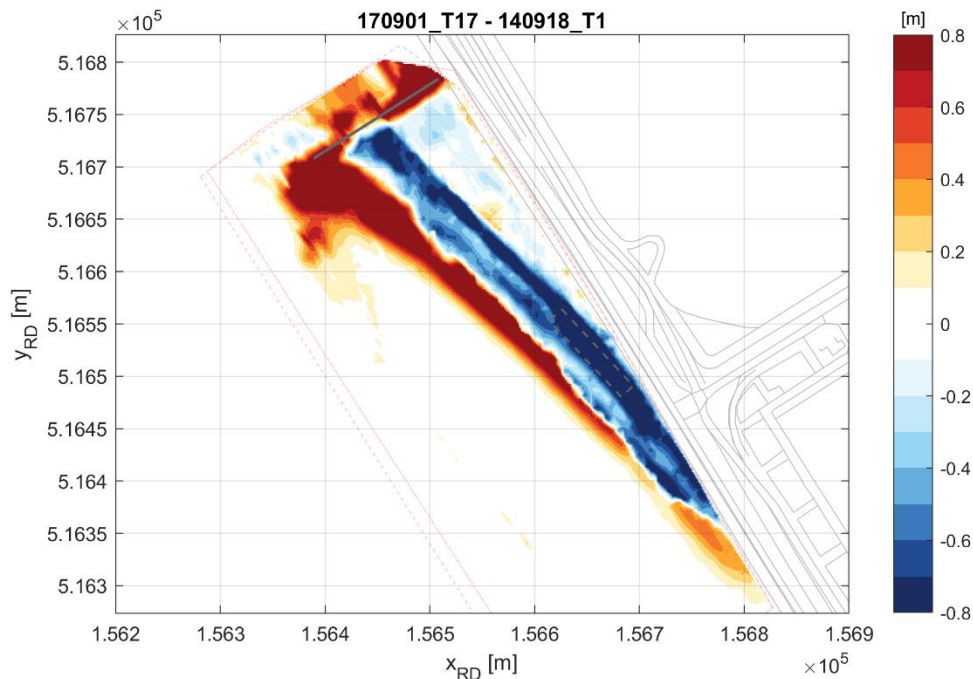
Figuur 6-18 Overzicht bodempligging T17-inmeting op 1 september 2017 (laatste reguliere inmeting).

6.2.4 BESCHRIJVING ONTWIKKELING OP HOOFDLIJNEN

Een nadere analyse van de gepresenteerde ontwikkeling laat zien dat:

- Het aangebrachte materiaal grotendeels in de proefsectie blijft liggen;
- Er geen echte verliezen optreden;
- Er wel sprake is van een interne herverdeling van het aangebrachte materiaal;
- Er significante erosie plaatsvindt bij de rijsmatconstructie en dat deze inmiddels (zomer 2016) volledig is verdwenen;
- Er rond de waterlijn en hoger primair sprake is van een ontwikkeling in dwarsrichting;
- De oriëntatie van de buitenrand van deze bovenlaag direct gekoppeld is aan het (in het voorliggende tijdsinterval) aanwezige golfklimaat;
- De verliezen naar dieper water met name ten goede komen aan de vorming van een op het uiteinde van de damwand aansluitende onderwaterrand.

Dit laatste komt ook naar voren in de zogenaamde verschilbodem (zie Figuur 6-19). Deze geeft het verschil in bodempligging tussen de eerste T1-opname van 18 september 2014 en de laatste reguliere inmeting (T17) van 1 september 2017.



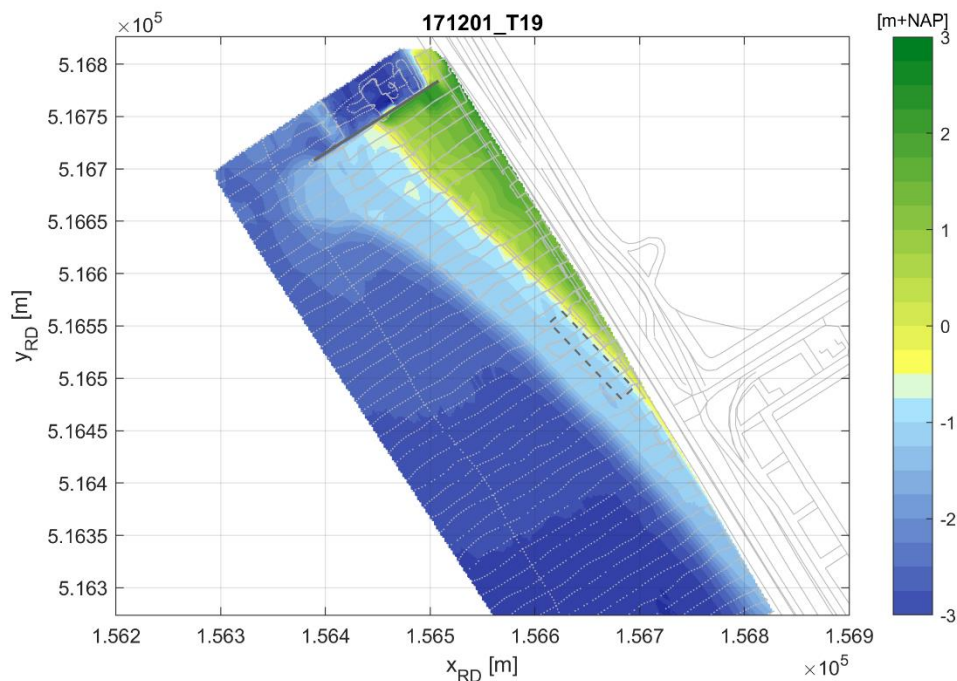
Figuur 6-19 Verschillen in bodemligging tussen eerste (T1) en de als laatste uitgevoerde inmeting van de reguliere monitoring (T17).

Op deze verschilkaart kunnen een aantal ontwikkelingen worden onderscheiden, te weten:

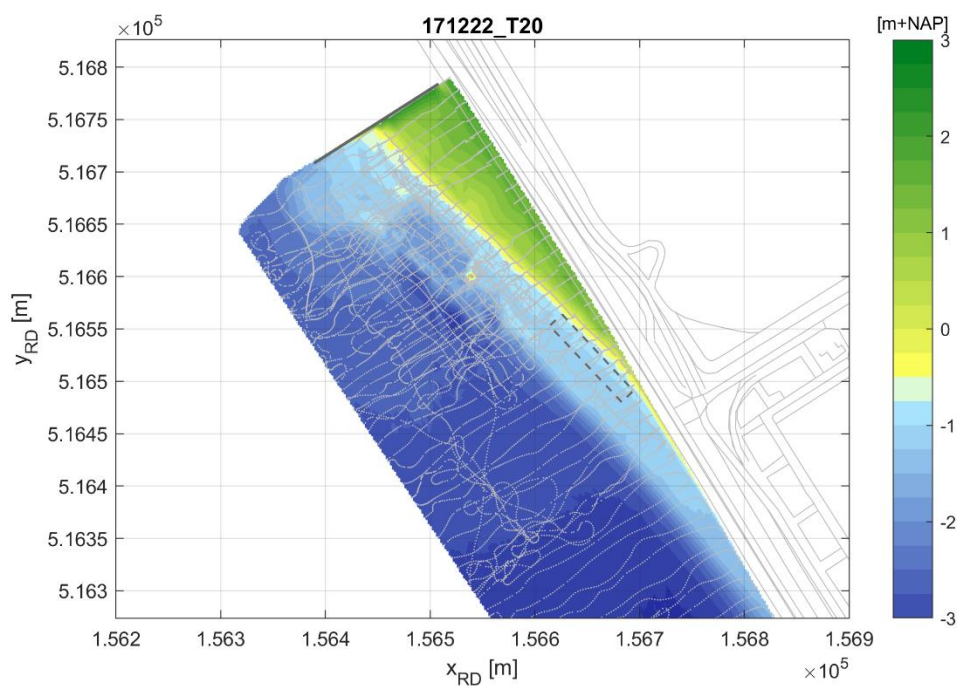
- De ontwikkelingen rond de damwandconstructie (welke deels toe te schrijven zijn aan interpolatieproblemen) waarbij er sprake is van een wind-geïnduceerde afzetting op de proefsectie tegen de damwand alsmede een zandige opvulling van de hoek noordwestelijk van de opsluitconstructie;
- De afzetting boven op het talud, parallel aan de dijk ter plaatse van het hier aanwezige windscherm dat zorgde voor een netto invang van het soms optredende windtransport;
- De erosie ter plaatse van de rijsmattenconstructie, deels als gevolg van de overgang van de kale dijk naar het zandige voorland, ook samenhangt met de netto bijdraaiing van het bovenplateau (waardoor deze positie relatief gezien verder uitsteekt);
- De ontwikkeling van de oeverlijn op het centrale deel van de proefsectie (tussen damwand en rijsmatconstructie) welke, gemiddeld genomen, primair het gevolg is van dwarstransportprocessen maar inmiddels (zomer 2016) overloopt in een ongestoorde ontwikkeling van de volledige proefsectie.
- De ontwikkeling van een doorgaande onderwaterrand die aansluit op de afzetting net voor de beëindiging van de damwand.

6.2.5 BODEMLIGGING PER OPNAME NA GEDEELTELIJKE AFGRAVING VOORLAND

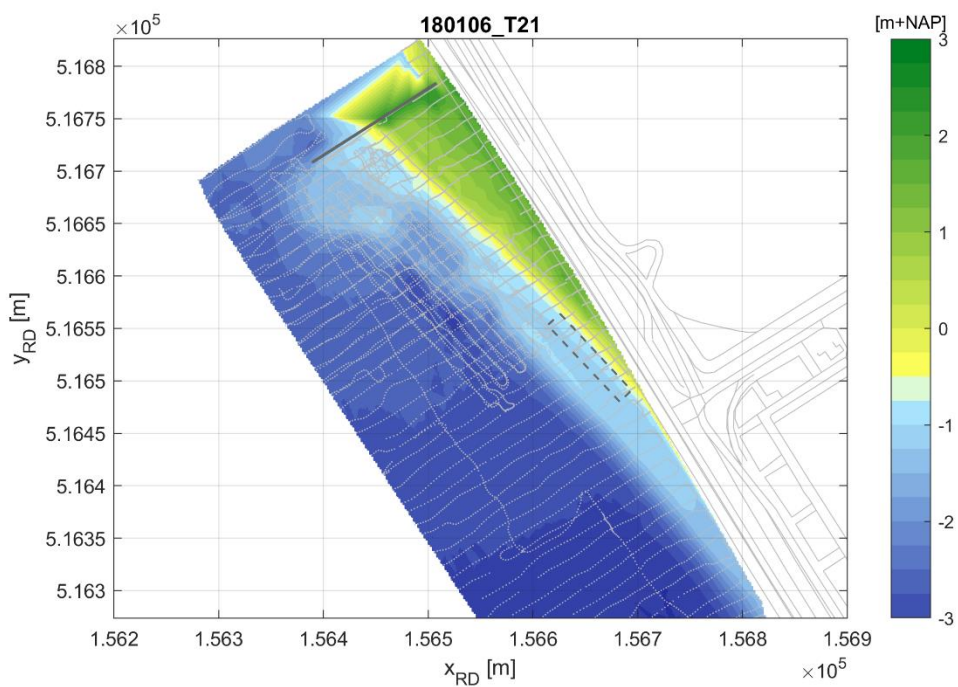
In de periode tussen 1 en 22 december is door de aannemer een door Arcadis gespecificeerd deel van de vooroever afgegraven. De details inzake deze afgraving zijn te vinden in (EcoShape/Arcadis, 2018). De betreffende inmetingen zijn weergegeven in Figuur 6-20 tot en met Figuur 6-23.



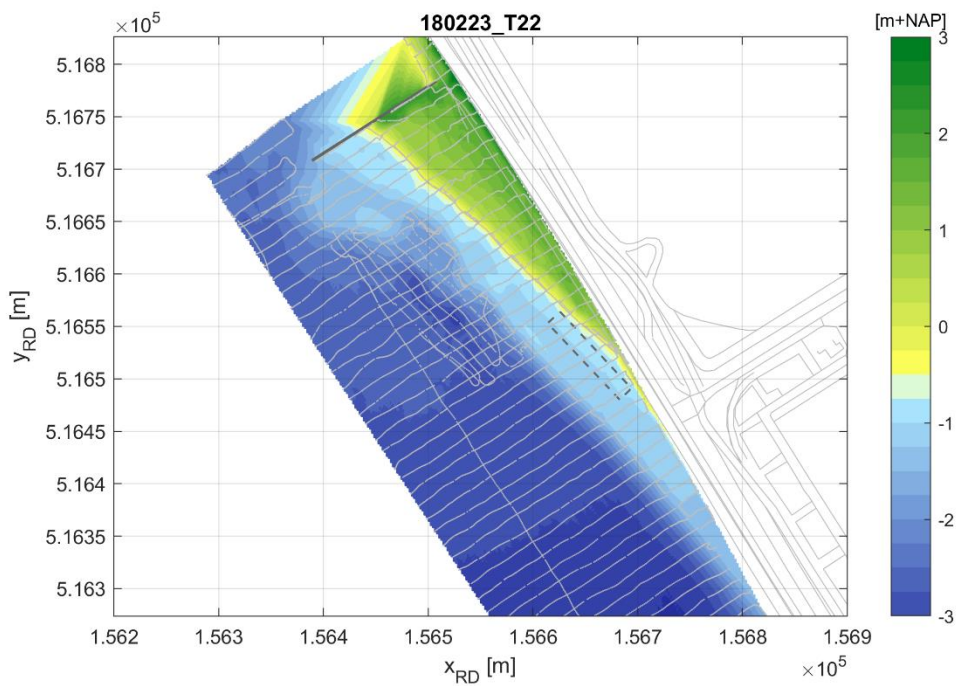
Figuur 6-20 Overzicht bodemligging T19-inmeting op 1 december 2017 (voor uitvoering afgraving).



Figuur 6-21 Overzicht bodemligging T20-inmeting op 20 december 2017 (na uitvoering afgraving).



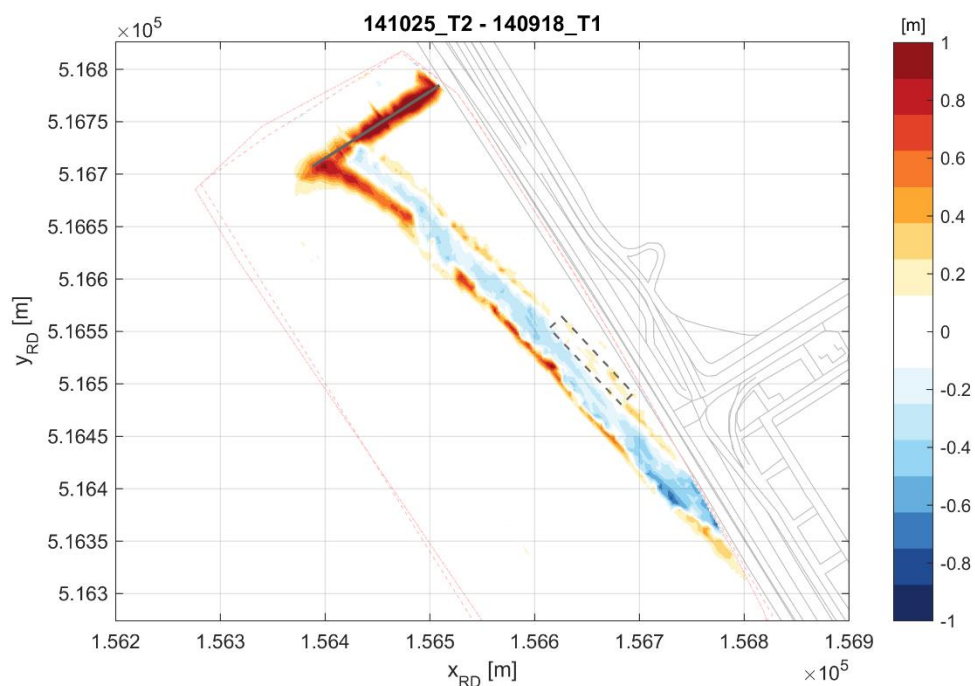
Figuur 6-22 Overzicht bodemligging T21-inmeting op 6 januari 2018.



Figuur 6-23 Overzicht bodemligging T22-inmeting op 23 februari 2018 (voorlaatste inmeting).

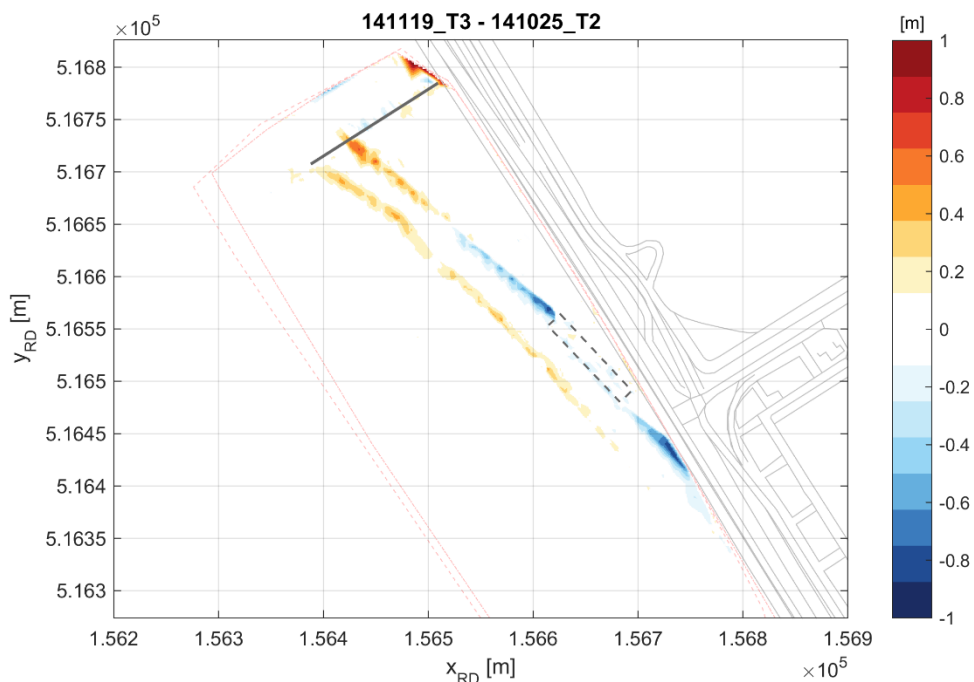
6.2.6 BESCHRIJVING REGULIERE ONTWIKKELING PER INTERVAL

In Figuur 6-24 tot en met Figuur 6-33 is een overzicht gegeven van de tijdens de opeenvolgende meetintervallen opgetreden verschillen in bodemligging. Feitelijk is dit aanvullend op de ontwikkeling tijdens de aanleg zoals beschreven in de 'lessons learned' notitie over de aanleg (EcoShape/Arcadis, 2015c).



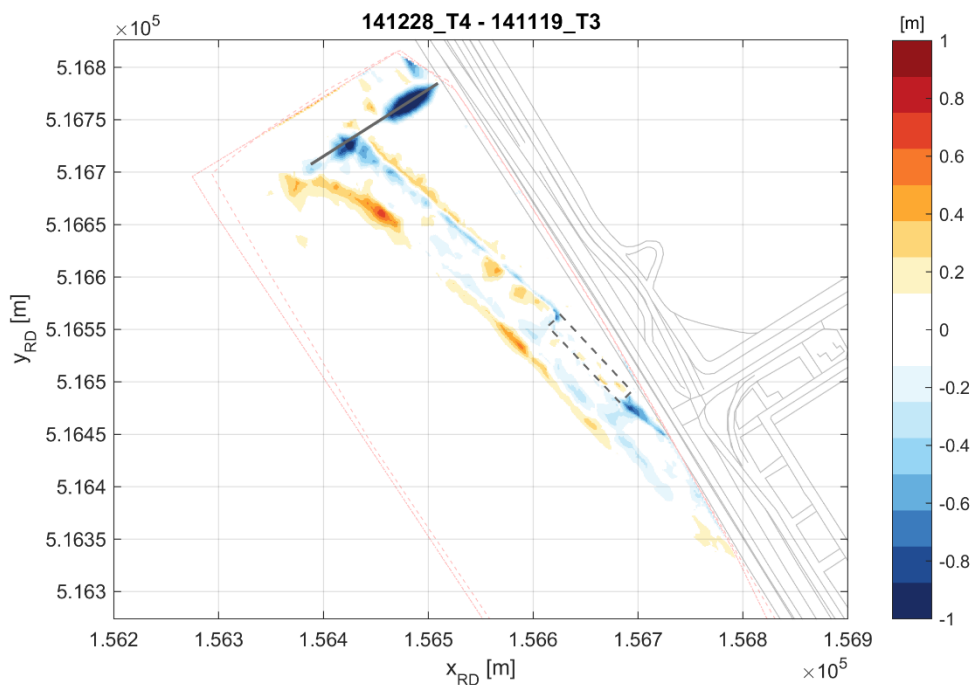
Figuur 6-24 Verschil in bodemligging tussen T1- en T2-opname.

Tijdens de eerste periode (18 september tot 14 oktober; Figuur 6-24) is er duidelijk sprake van een instelling van een stabiele oeverligging. Dit lijkt met name te gelden voor de profielontwikkeling in dwarsrichting. De afzetting in de omgeving van de damwand is in deze figuur nog gerelateerd aan een numeriek interpolatie-probleem.

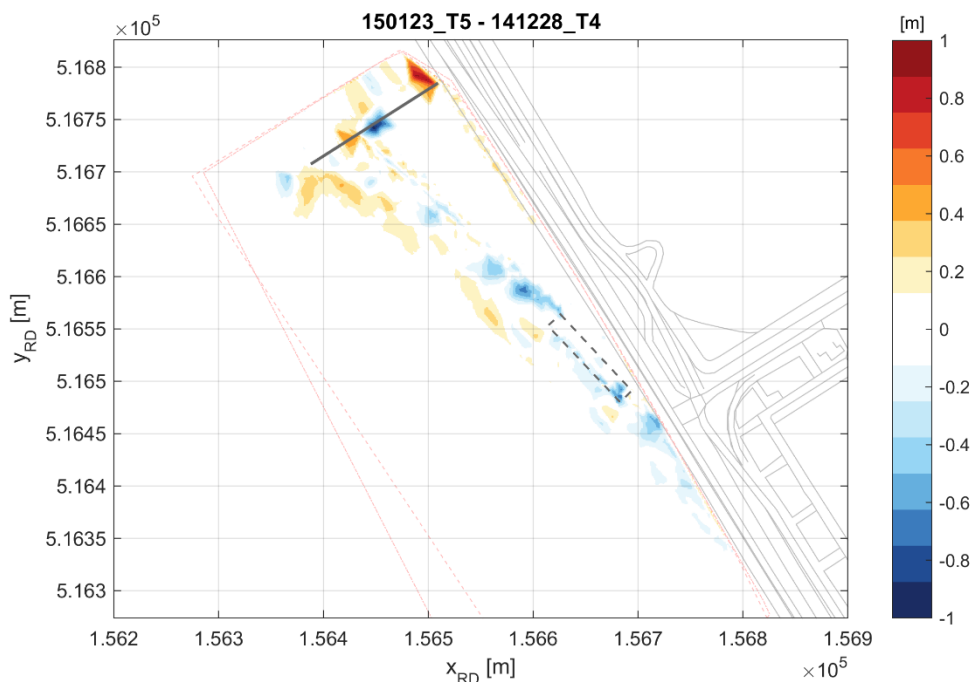


Figuur 6-25 Verschil in bodemligging tussen T2- en T3-opname.

De tweede periode (Figuur 6-25) laat primair het effect zien van een bijdraaiing van het centrale deel van de proefsectie (tegen de klok in). Dit is het gevolg van de tijdens deze periode overheersend oostelijke windrichtingen (zie ook Paragraaf 5.5). In dwarsrichting gebeurt er (zeker ten opzichte van de eerste periode) niet heel erg veel.

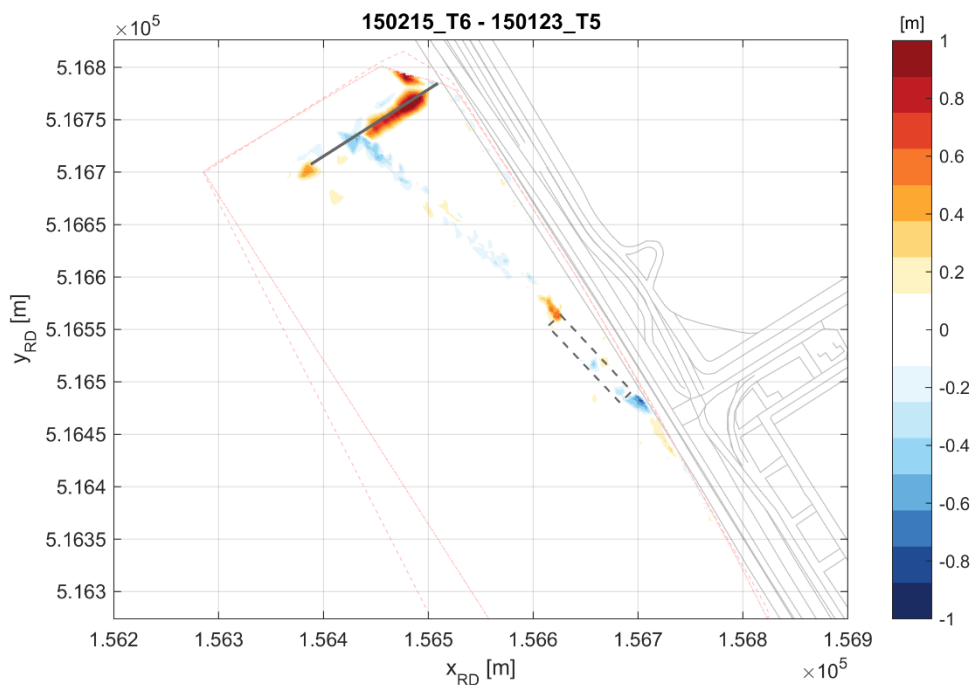


Figuur 6-26 Verschil in bodemligging tussen T3- en T4-opname.

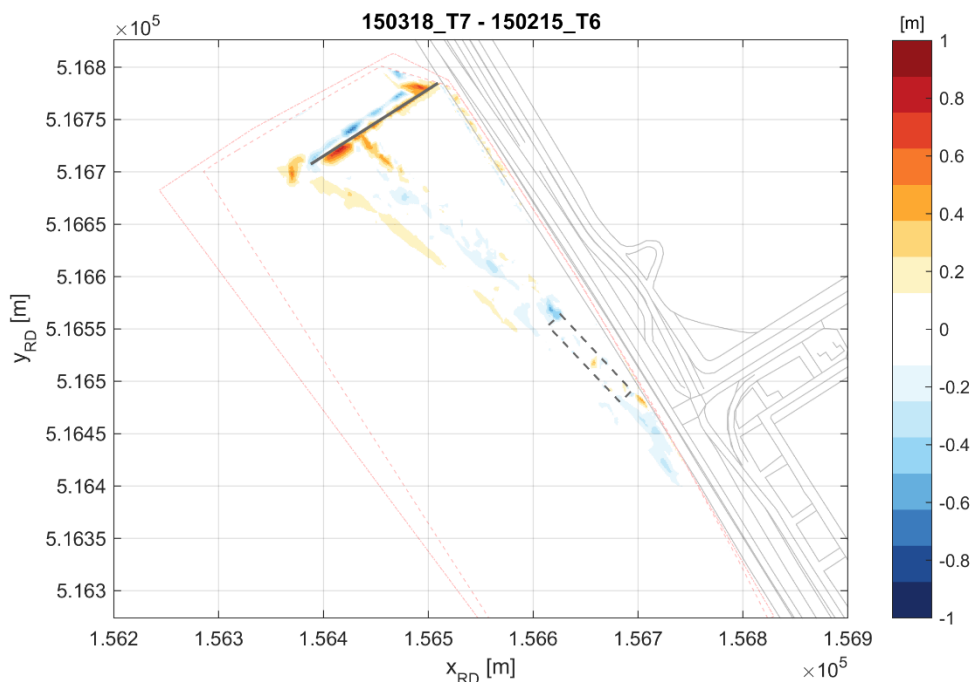


Figuur 6-27 Verschil in bodemligging tussen T4- en T5-opname.

Zowel tijdens de derde (Figuur 6-26) als de vierde periode (Figuur 6-27) zijn de veranderingen relatief beperkt en lijkt er al sprake te zijn van een min of meer stabiele bodemligging. Wel is zichtbaar dat zich ten zuidwesten van de kop van de damwand enige afzetting gaat ontwikkelen.



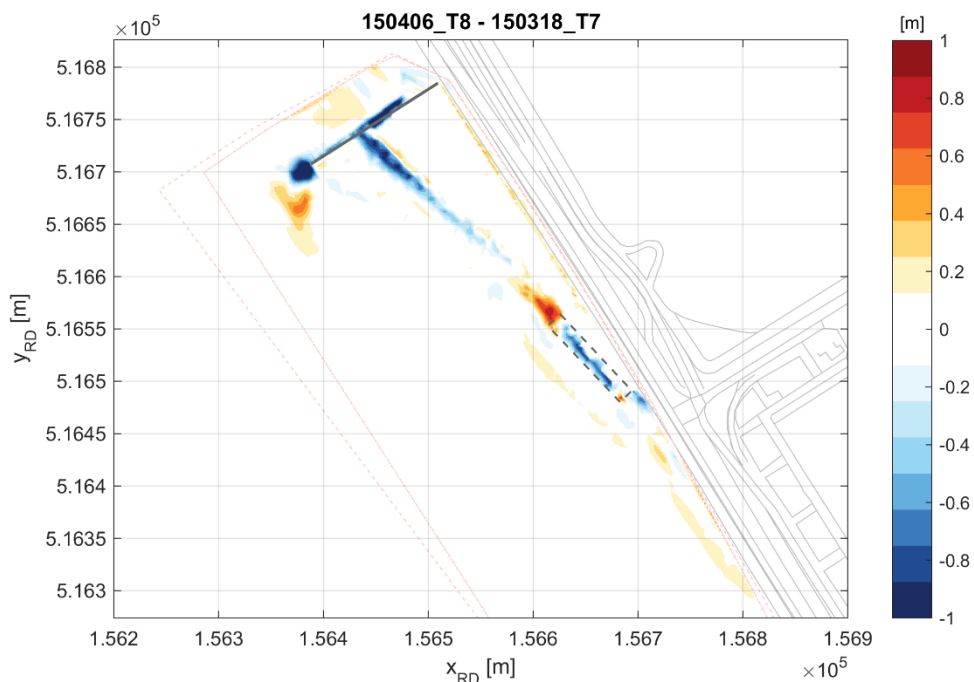
Figuur 6-28 Verschil in bodemligging tussen T5- en T6-opname.



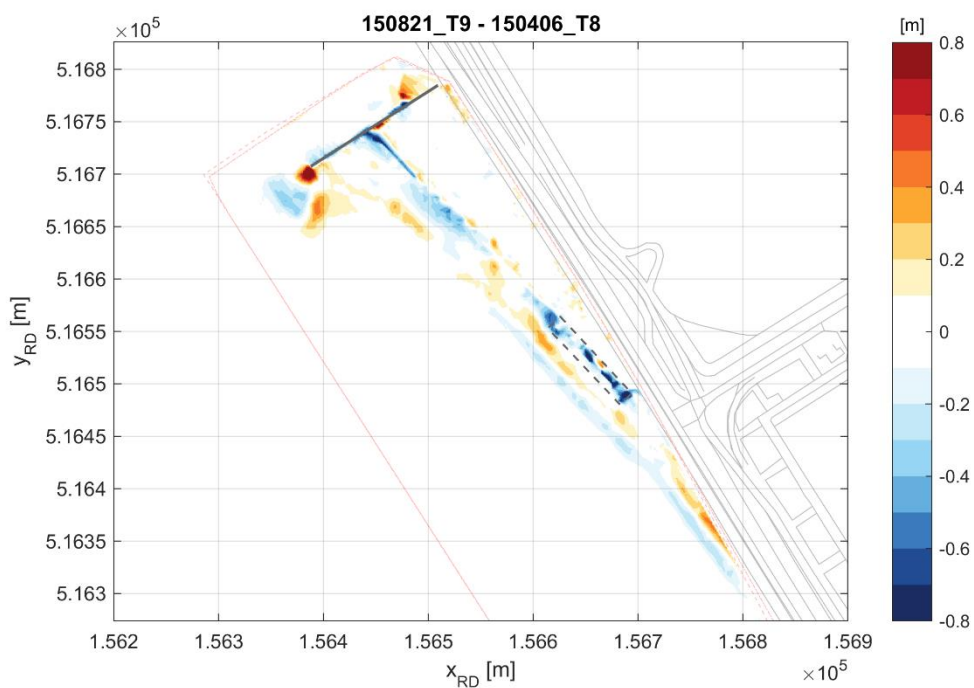
Figuur 6-29 Verschil in bodemligging tussen T6- en T7-opname.

Dit laatste geldt ook voor vijfde en zesde periode (Figuur 6-28 en Figuur 6-29).

In de zevende periode (Figuur 6-30) was er eind maart 2016 sprake van een vrij zware storm met een significante golfhoogte van 1,07 m uit het westen (zie Tabel 5-11 op pagina 89). Deze had als gevolg dat de oriëntatie van de oeverlijn in het centrale deel van de proefsectie enigszins met de klok mee draaide. Dit leidde tot een achteruitgang van het dwarsprofiel bij de damwand een enige aanzanding tegen en op de noordwestelijke beëindiging van de rijsmatconstructie. Ook heeft dit geleid tot de ontwikkeling van een ontgrondingskuil bij de beëindiging van de damwand. Het hier geërodeerde materiaal heeft zich vervolgens zuidelijk van deze verdieping weer afgezet.

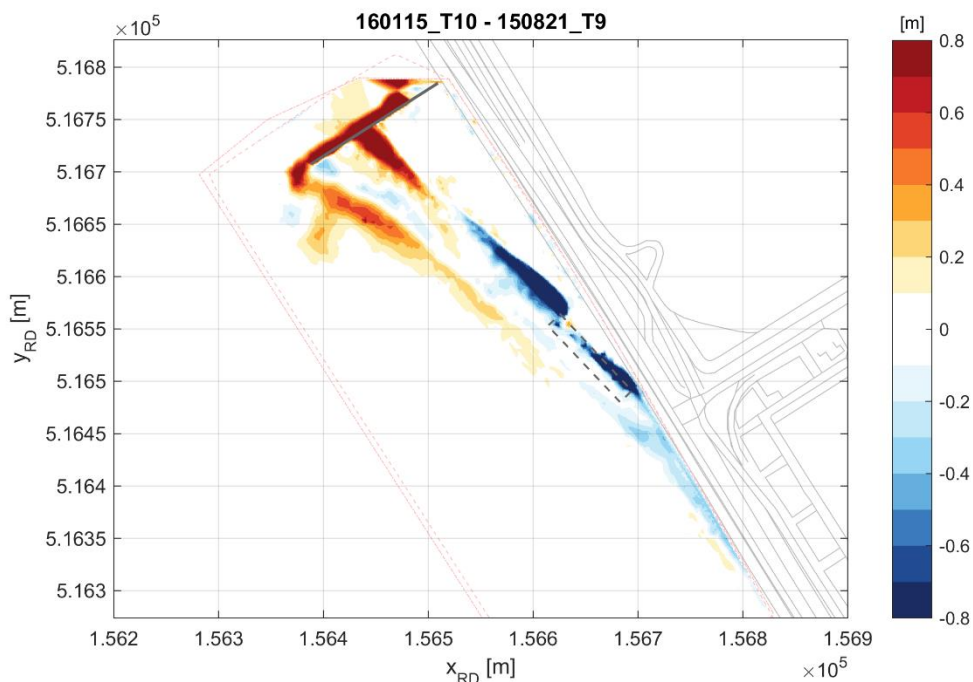


Figuur 6-30 Verschil in bodemligging tussen T7- en T8-opname.



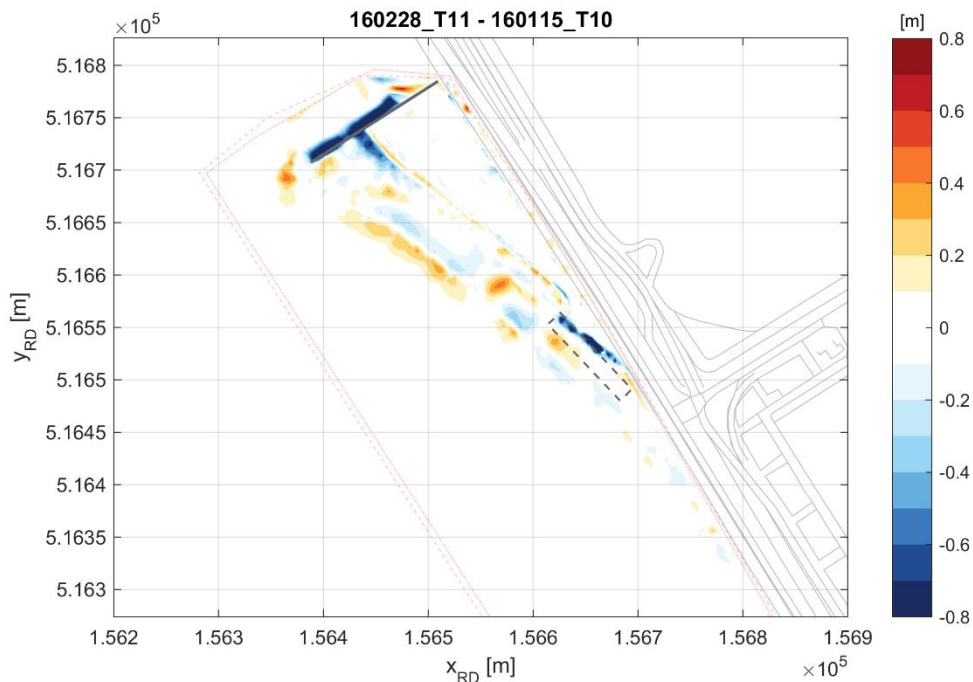
Figuur 6-31 Verschil in bodemligging tussen T8- en T9-opname.

Figuur 6-31 laat zien dat de eerder gevormde kuil bij de damwand in deze periode weer grotendeels is gedicht. Ook zien we (vergelijkbaar met Figuur 6-30) de doorgaande vorming van een doorlopende onderwateroever op het gebied zuidoostelijk van de rijsmatconstructie.



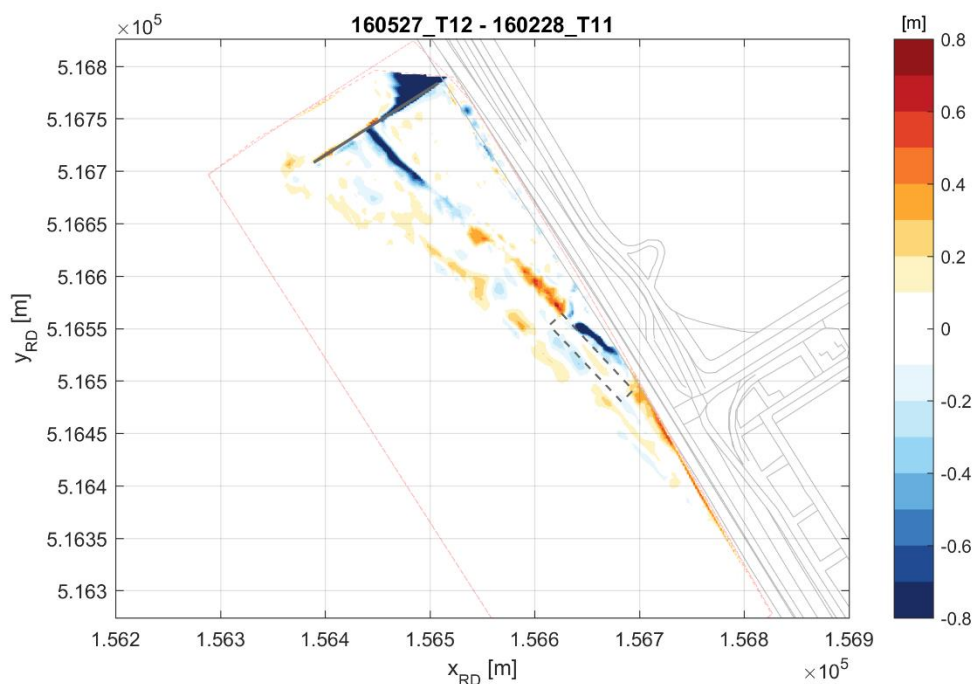
Figuur 6-32 Verschil in bodemligging tussen T9- en T10-opname.

Tijdens de lange periode tussen augustus 2015 (T9) en januari 2016 (T10) was er met name in de maand december sprake van een meer zuidoostelijk georiënteerde golfaanval (zie Figuur 6-32) en Tabel 5-13. Dit heeft geleid tot een zeer sterke bijdraaiing (tegen de klok in) van het tussen damwand en rijsmatconstructie gelegen bovenste deel van het profiel, met aanzanding/uitbouw bij de damwand en erosie naast de noordwestelijke beëindiging van de rijsmatconstructie. Ook de onderlaag laat in het noordwestelijke deel een verdere uitbouw zien met afzettingen tot orde 0,6 m.



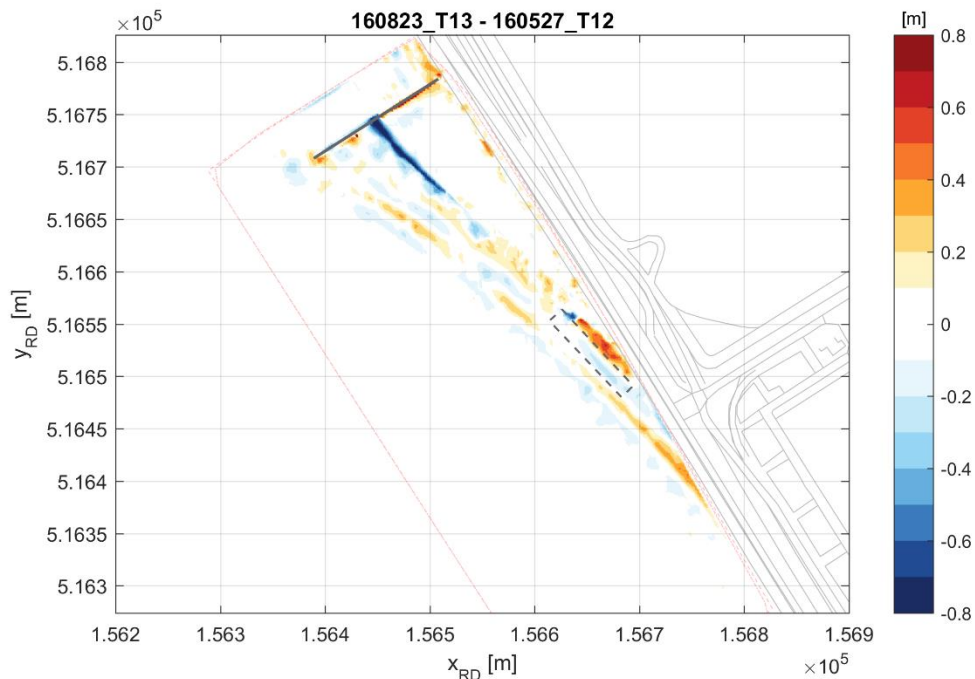
Figuur 6-33 Verschil in bodemligging tussen T10- en T11-opname.

In de daaropvolgende relatief korte periode tussen januari 2016 (T10) en februari 2016 (T11) draait de oeverlijn weer iets terug met een vrij lokale teruggang direct naast de damwand (zie Figuur 6-33). Verder is er sprake van een uitbouw van de onderwaterrand met op het centrale deel een aanzanding tot orde 0,3 m.



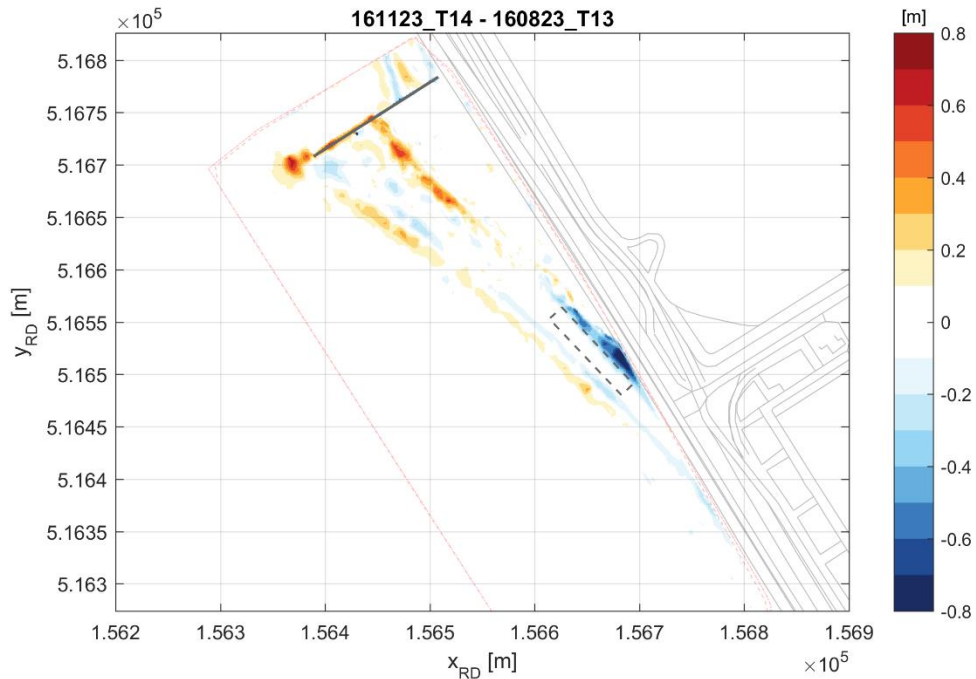
Figuur 6-34 Verschil in bodemligging tussen T11- en T12-opname.

Figuur 6-34 laat de verandering zien zoals deze zijn opgetreden tussen februari en mei 2016. Te zien is dat er ter plaatse van de rijsmatconstructie wederom sprake is van een achteruitgang van de waterlijn. In het centrale vak tussen de damwand en de rijsmatconstructie is sprake van een beperkte bijdraaiing (met de klok mee) van de buitenrand van de bovenlaag. De uitbouw van de onderlaag blijft lokaal beperkt tot maximaal 0,2 m hetgeen zou kunnen duiden op het ontstaan van een min of meer stabiele evenwicht voor deze diepere contour.



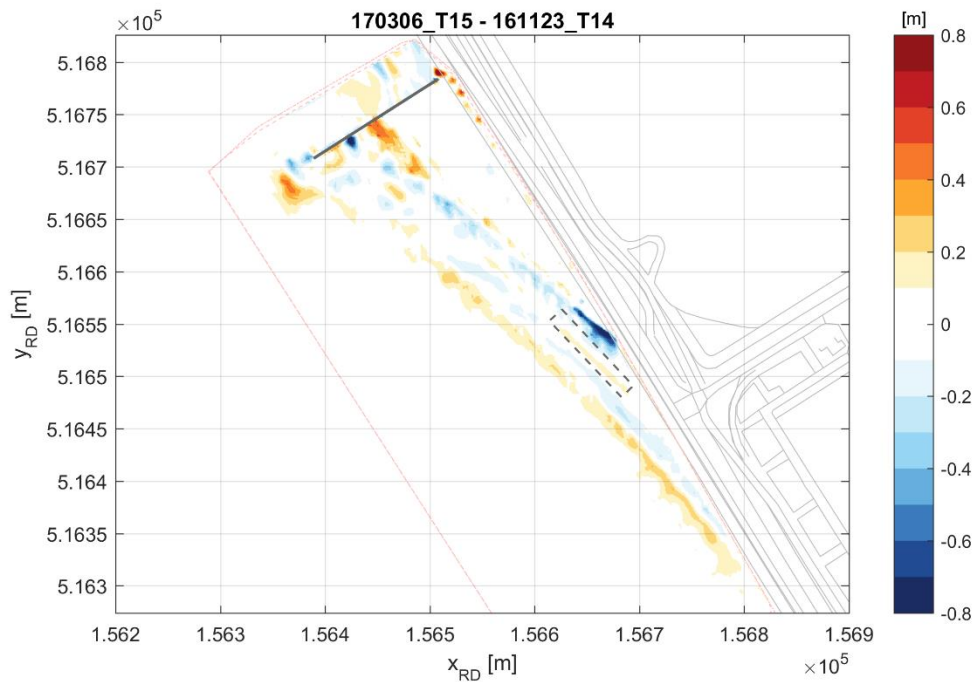
Figuur 6-35 Verschil in bodemligging tussen T12- en T13-opname.

Figuur 6-35 toont de verandering tussen mei en augustus 2016. Te zien is dat er ter plaatse van de eerst nog aanwezige hoek van de rijsmatconstructie nu ook erosie plaatsvindt. De functie als ‘ophanging’ van het eerdergenoemde centrale deel van de proefsectie komt daarmee dan ook te vervallen. Vanaf dat moment is er in toenemende mate dan ook sprake van een uniforme proefsectie. De eerder aanwezige erosiespot (zie Figuur 6-34) komt hiermee te vervallen en wordt nu weer opgevuld. Deze herverdeling van materiaal gaat ten koste van het in de centrale sectie aanwezige zandvolume. Daarnaast is er in deze periode opnieuw een beperkte bijdraaiing (met de klok mee) van de buitenrand van de bovenlaag aanwezig die dit effect waarschijnlijk nog iets versterkt. Combinatie van beide mechanismen zal mogelijk leiden tot enige extra achteruitgang van de oeverlijn in het bredere deel van de proefsectie (zie ook Paragraaf 2.2 in Annex III; pagina 217). Ook zien we dat de onderlaag in dit deel van de proefsectie zich ook nog iets uitbouwt.



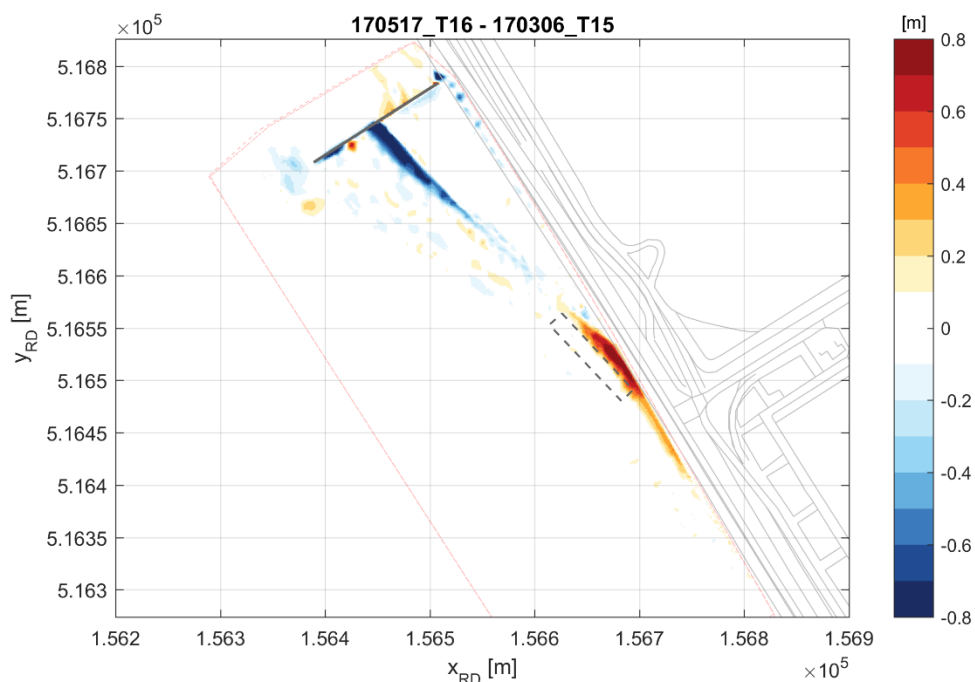
Figuur 6-36 Verschil in bodemligging tussen T13- en T14-opname.

In Figuur 6-36 is de ontwikkeling van augustus tot november 2016 te zien. Onder invloed van de overheersende golfvalsrichting heeft in deze periode een netto verdraaiing tegen de klok in plaatsgevonden. Als gevolg hiervan is de waterlijn bij de damwand iets uitgebouwd. Als gevolg daarvan is de ontgrondingskuil voor de damwand enigszins opgevuld. De bijdraaiing heeft ook geresulteerd in een verdergaande erosie van de bij de rijsmatconstructie gelegen deel van de proefsectie.



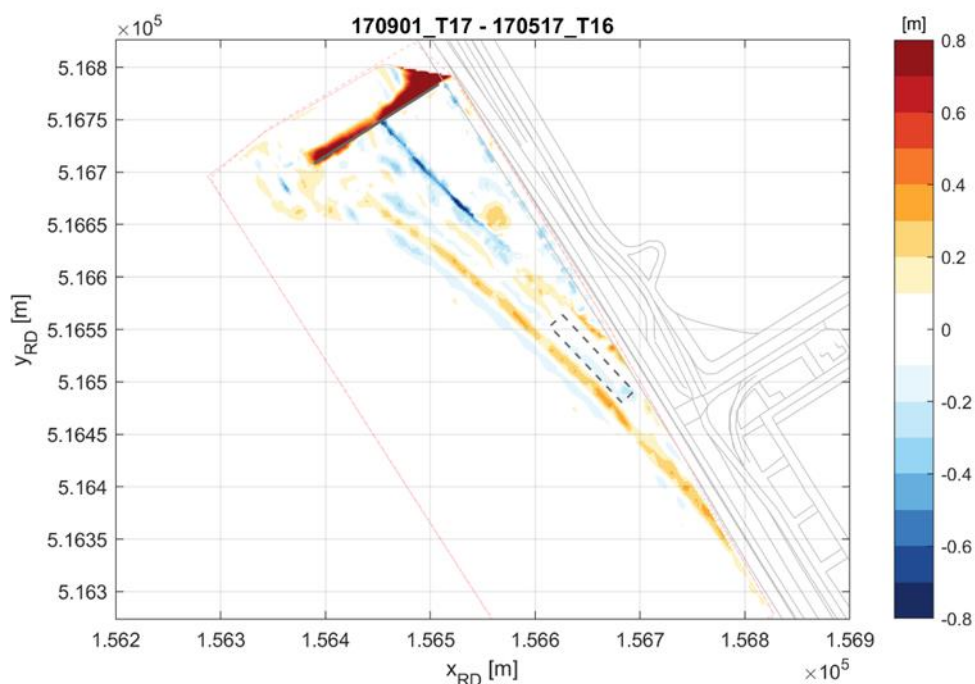
Figuur 6-37 Verschil in bodemligging tussen T14- en T15-opname.

Figuur 6-37 laat de ontwikkeling van november 2016 tot maart 2017 zien. Onder invloed van de overheersende golfvalsrichting heeft in deze periode enige netto verdraaiing tegen de klok in plaatsgevonden. Als gevolg hiervan is de waterlijn bij de damwand iets uitgebouwd. In de diepere zone is er alleen sprake van enige aanzanding aan de uiteinden en lijkt de centrale sectie steeds stabielier te worden.



Figuur 6-38 Verschil in bodemligging tussen T15- en T16-opname.

In Figuur 6-38 is de ontwikkeling van maart tot half mei 2017 te zien. Onder invloed van de overheersende golfvalsrichting heeft in deze periode een netto verdraaiing met de klok mee plaatsgevonden. Als gevolg hiervan is de waterlijn bij de damwand iets achteruitgegaan en heeft er aan de andere zijde juist een extra afzetting plaatsgevonden. In de diepere zone is weinig verandering zichtbaar.



Figuur 6-39 Verschil in bodemligging tussen T16- en T17-opname.

In Figuur 6-38 is de ontwikkeling van half mei tot eind augustus 2017 te zien. Ook hier wederom enige teruggang ter plaatse van de damwand en een afzetting in het lagere deel aan de andere zijde, dit waarschijnlijk onder invloed van een dominante aanval van de zuidwestzijde en een rotatie met de klok mee.

De over de gehele periode (vanaf 18 september 2014 tot en met eind augustus 2017/T17) waargenomen ontwikkeling is combinatie van:

- Profielontwikkeling in dwarsrichting als gevolg van waterstand en golfaanval;
- Bijdraaiing proefsectie als gevolg van een tijdsvariatie in golfrichtingen en interactie met 'constructies';
- Het afnemend (en inmiddels zelfs volledig afwezig) belang van de rijsmatconstructie als 'tijdelijke' opsluiting van de centrale sectie.
- De vorming van een doorgaande onderwaterrand;
- Transport richting dijk en damwand als gevolg van transport door wind;
- Zettingen van de ondergrond.

Voor elk van de genoemde processen zijn verschillende tijdschalen van toepassing. Voor de eerste twee, zijnde de ontwikkeling van het dwarsprofiel en het instellen op de momentaan dominante golfinvalsrichting is deze kort. Voor de vorming van een doorgaande onderwaterrand en de zettingen gelden weer langere tijdschalen.

De resultaten van de nadere verwerking van deze resultaten komen terug in de inzichten in de stabiele profielvorm (zie Hoofdstuk 2 in Annex I) alsmede een beschrijving van de morfologische veranderingen (zie Hoofdstuk 2 in Annex III).

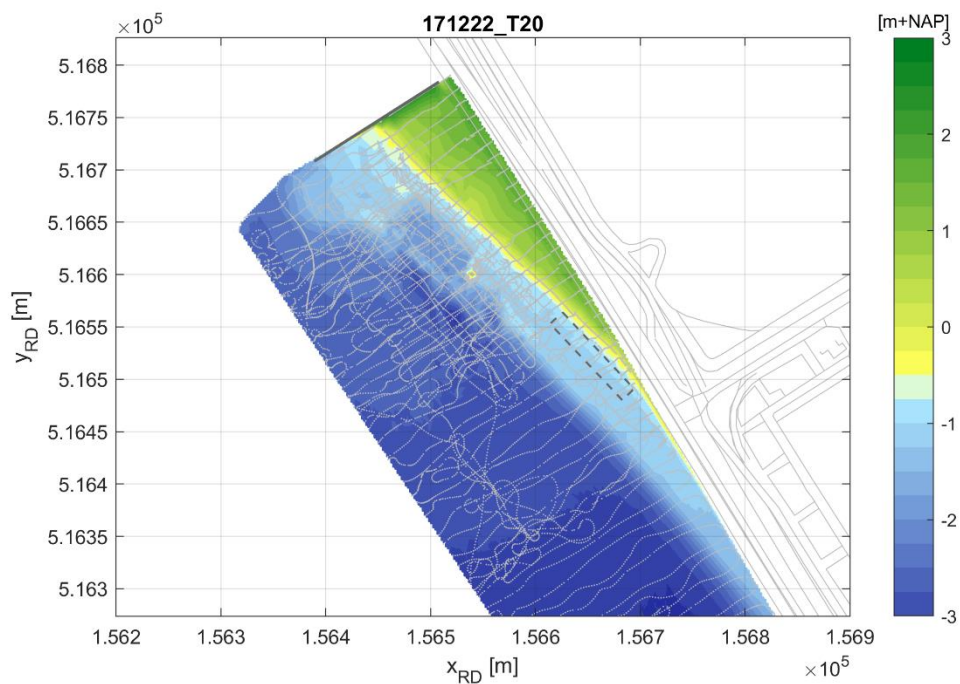
In de periode na 1 september 2017 vormen de metingen een expliciet onderdeel van het zogenaamde aanvullende onderzoek en zijn in meer detail uitgewerkt in de onderliggende detailrapportages

(EcoShape/Deltares/HKV, 2018), (EcoShape/Arcadis, 2018). In het Deltares-rapport worden de ontwikkelingen in de eerste fase van het aanvullend onderzoek in meer detail beschouwd. In het volgende zijn name de resultaten van het morfologisch effect van de uitgevoerde afgraving iets verder toegelicht.

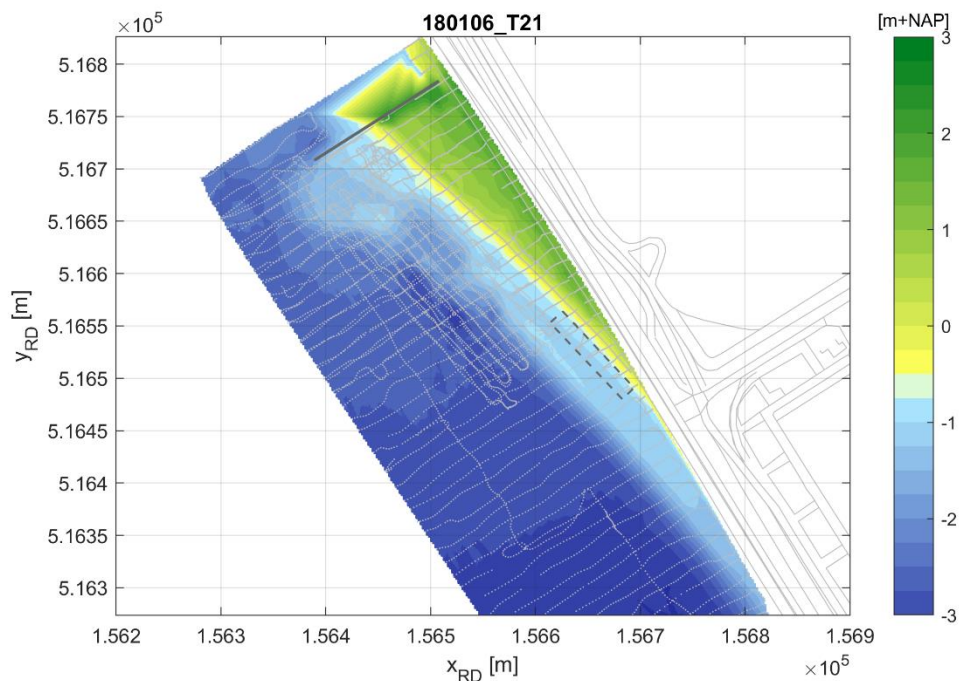
6.2.7 BESCHRIJVING ONTWIKKELING PER INTERVAL NA AFGRAVING (TWEDE FASE AANVULLEND ONDERZOEK)

Resultaten van de na afgraving uitgevoerde inmetingen (de tweede fase van het aanvullend onderzoek) zijn in bovenaanzicht samengebracht in Figuur 6-40 tot en met Figuur 6-42 (de voorlaatste inmeting). De allerlaatste inmeting (T23) is in dit verband nauwelijks interessant omdat er tijdens de voorliggende periode geen effectieve belasting van de proefsectie aanwezig was (zie Paragraaf 5.5.24).

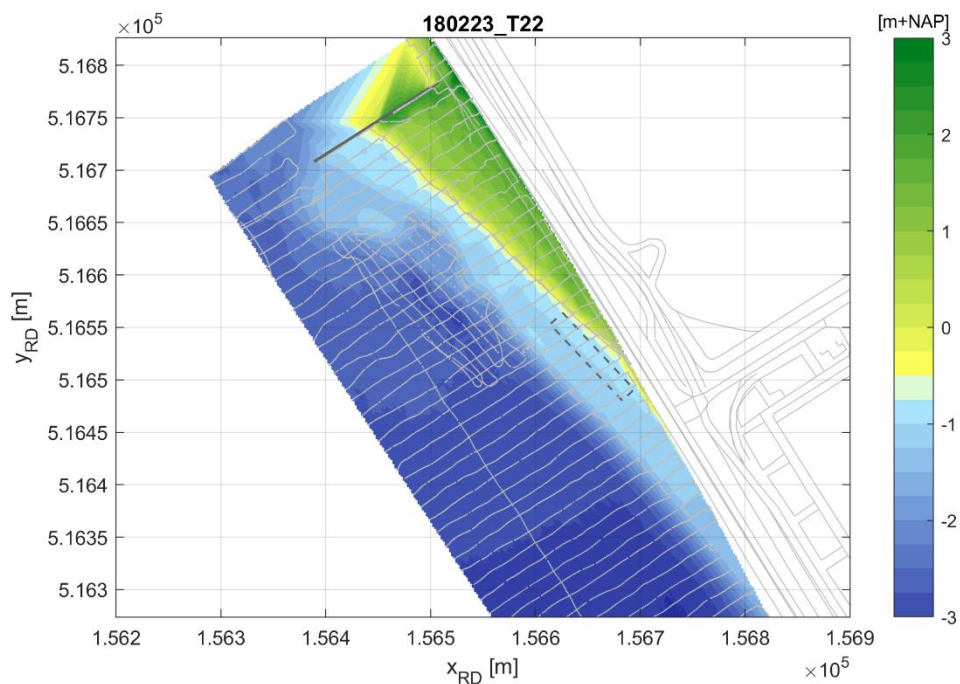
In de figuren zijn wederom de door Shore Monitoring & Research aangehouden meettracks (grijze lijntjes) herkenbaar. In de eerste opname is ook de ingraving herkenbaar (zie ook verschil in Figuur 6-43 op pagina 131).



Figuur 6-40 Overzicht bodemligging T20-inmeting op 22 december 2017 (direct na ingraving).

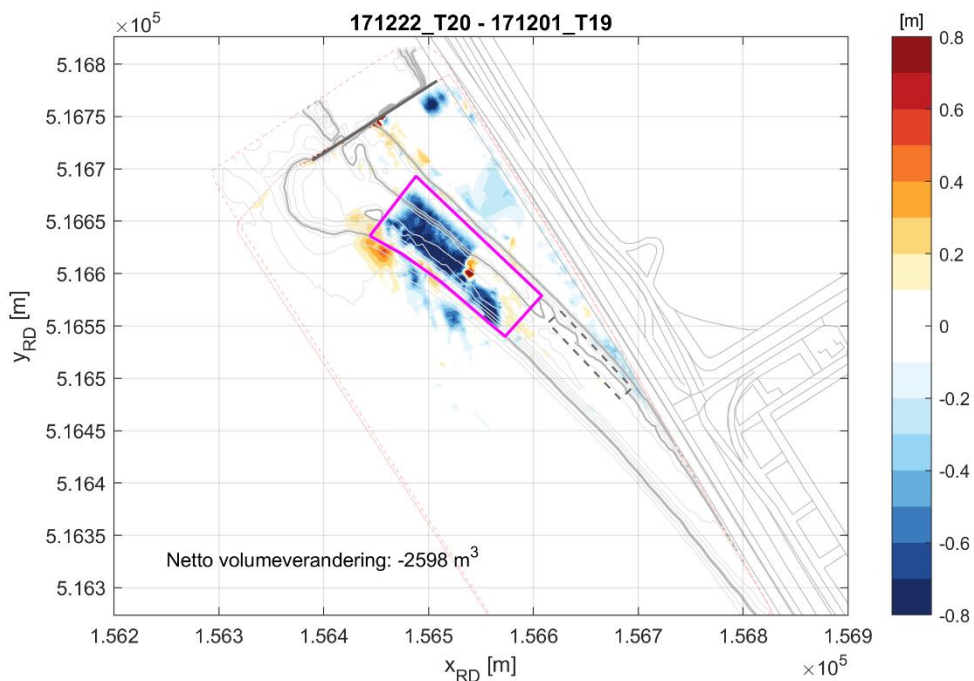


Figuur 6-41 Overzicht bodemligging T21-inmeting op 6 januari 2018.

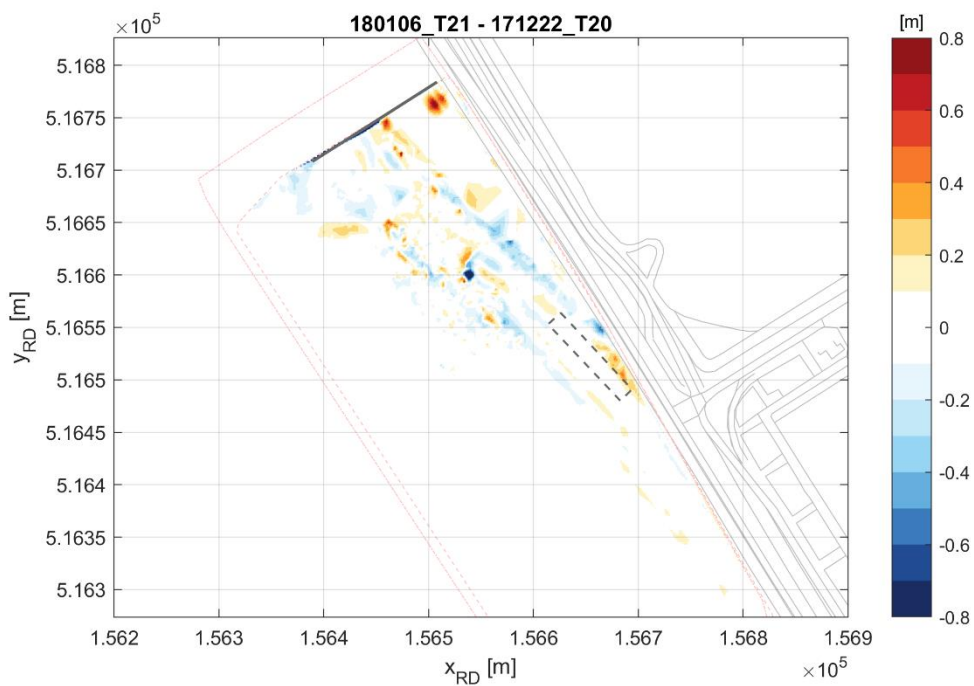


Figuur 6-42 Overzicht bodemligging T22-inmeting op 23 februari 2018 (laatste relevante inmeting).

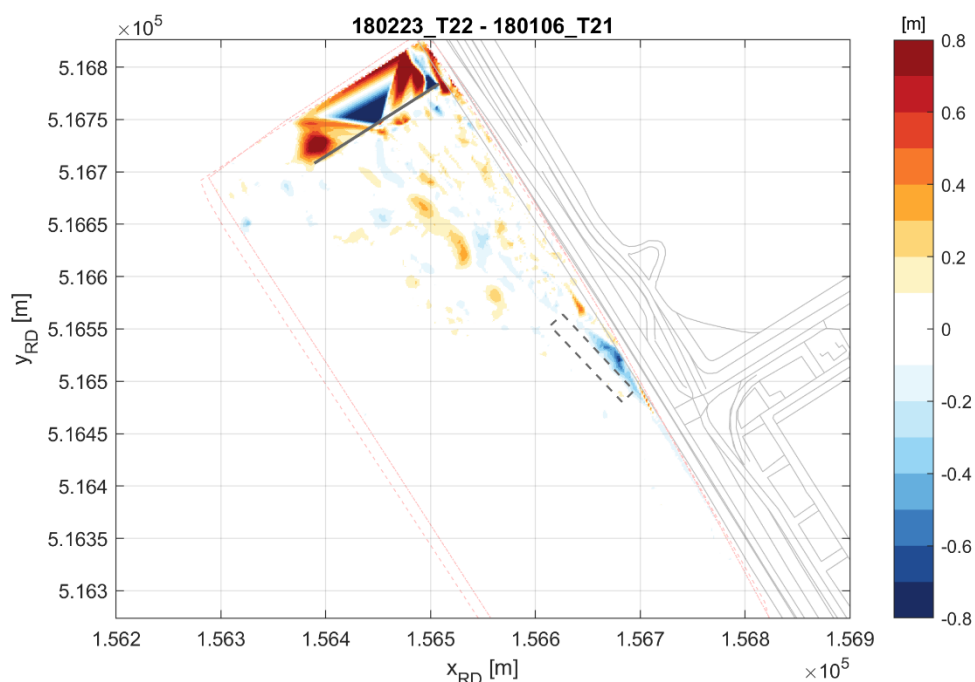
Het initiële effect van de ingraving is duidelijker te zien aan de hand van het verschil tussen de T19-meting van 1 december 2017 en de T20-meting (zie Figuur 6-43). In het totaal is er ten behoeve van het tweede deel van het aanvullend onderzoek 2.600 m³ van het plateau afgegraven.



Figuur 6-43 Verschil in bodemligging tussen T19- en T20-opname (omvang ontgraving).



Figuur 6-44 Verschil in bodemligging tussen T20- en T21-opname.



Figuur 6-45 Verschil in bodemligging tussen T21- en T22-opname.

Tijdens de laatste periode (na de T22-opname) hebben zich als gevolg van de aanwezigheid van ijs en voornamelijk oostenwind feitelijk geen morfologische ontwikkelingen voorgedaan. Deze laatste verschilkaart, met het verschil in bodemligging tussen de T22- en T23-opname, is dan ook niet opgenomen.

Uit de waargenomen verschillen in de periode tot 23 februari 2018 blijkt dat er geen grote impact aanwezig is van het plaatselijk verwijderen van het voorliggende plateau. De opvulling van het 'gat' vindt primair aan de beide zijkanten plaats en wordt dus veroorzaakt door langstransportprocessen. Het plateau heeft derhalve geen duidelijke beschermende werking voor het achterliggende strandprofiel. Hier is immers geen significante extra achteruitgang waarneembaar. Gegeven het feit dat er gedurende deze periode wel degelijk sprake was van meer extreme hydraulische condities met de hoogste windsnelheid (tot 23 m/s op 18 januari 2018), de hoogste waterstand (tot NAP+0,43 m op 3 januari 2018) en golfhoogten tot ruim 1 m, ondersteunt dit de hypothese dat de vorming van het brede plateau voor tenminste een deel samenhangt met de specifieke configuratie van de proefsectie, namelijk de tweezijdige aanwezigheid van de opsluitconstructies (damwand en dijk).

In de achterliggende rapportage wordt hier veel uitgebreider op ingegaan (EcoShape/Arcadis, 2018). Deze conclusie maakt overigens dat het beschouwen van de profielontwikkeling in een situatie waarbij dergelijke constructies niet aanwezig zijn extra interessant. Het recent opgestarte onderzoek op een aantal strandsecties van de Marker Wadden geeft hier overigens invulling aan (KIMa/Arcadis, 2018).

6.3 ALTERNATIEVE DATA-INWINNING VIA ANALYSE SATELLIETBEELDEN

6.3.1 INLEIDING

In de vorige paragraaf zijn de resultaten gepresenteerd van de fysieke inmeting van de bodemgeometrie aan de hand van de door Shore Monitoring & Research uitgevoerde metingen (Shore Monitoring &

Research, 2018). Parallel hieraan is in het kader van WP3 ook onderzocht in hoeverre de ontwikkeling van de morfologie op een innovatieve manier kon worden afgeleid door toepassing van remote sensing technieken. Hiervoor is gebruik gemaakt van de satellietbeelden uit het Nationaal Satelliet Dataportaal. Deze informatie is ook gebruikt voor het in op een innovatieve manier in kaart brengen van de ontwikkeling van de biomassa van de vegetatie (zie Paragraaf 8.4).

Voor meer achtergronden kan worden verwezen naar de door Alterra opgestelde deel van de achtergrondrapportage (EcoShape/Deltares/WEnR/HKV, 2018). In het volgende is deze ontwikkeling slechts kort geschetst.

6.3.2 GEBRUIKTE INFORMATIE

Als input-bestanden voor deze analyse is gebruikt gemaakt van satellietbeelden uit het Nationaal Satelliet Dataportaal. Deze beelden zijn maandelijks beschikbaar en getracht wordt om met behulp van de weersvoorspelling de te gebruiken opnamedagen zo te kiezen dat de kans op bewolking klein is. Dat dit meestal goed lukt laat het grote aantal beelden vanaf november 2014 zien.

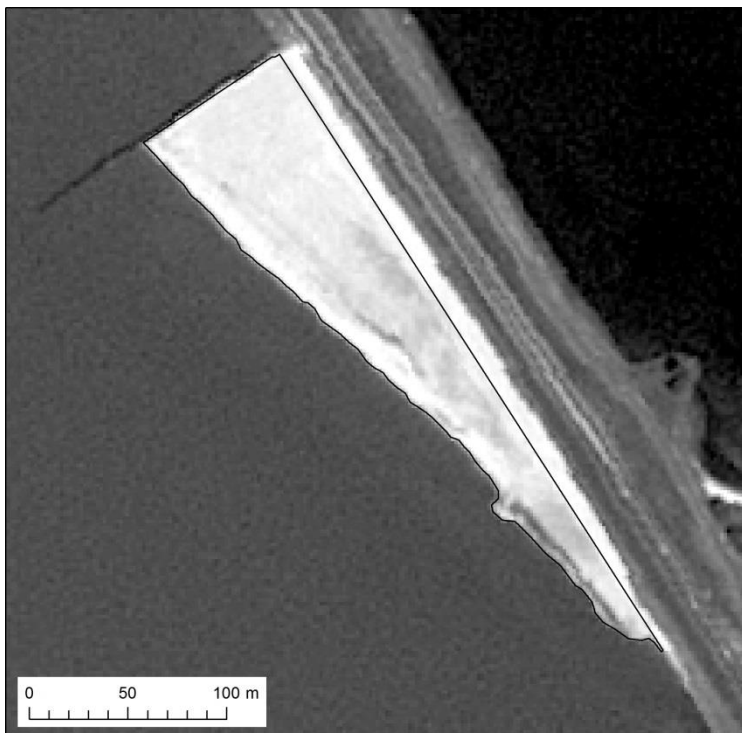
De Spot satelliet heeft de beschikking over vier spectrale banden in het blauw, groen, rood en NIR-licht met een ruimtelijke resolutie van 6 m en één panchromatische band die zwartwit opnames maakt met een ruimtelijke resolutie van 1,5 m. De hoge resolutie panchromatische band wordt gebruikt om zo gedetailleerd mogelijk het zandoppervlak van de vooroever te bepalen. De omtrek van het zandlichaam wordt gedigitaliseerd en de oppervlakte berekend. Zo kan bijna maandelijks de zandafslag (of toename) worden bepaald van de vooroever.

6.3.3 RESULTATEN

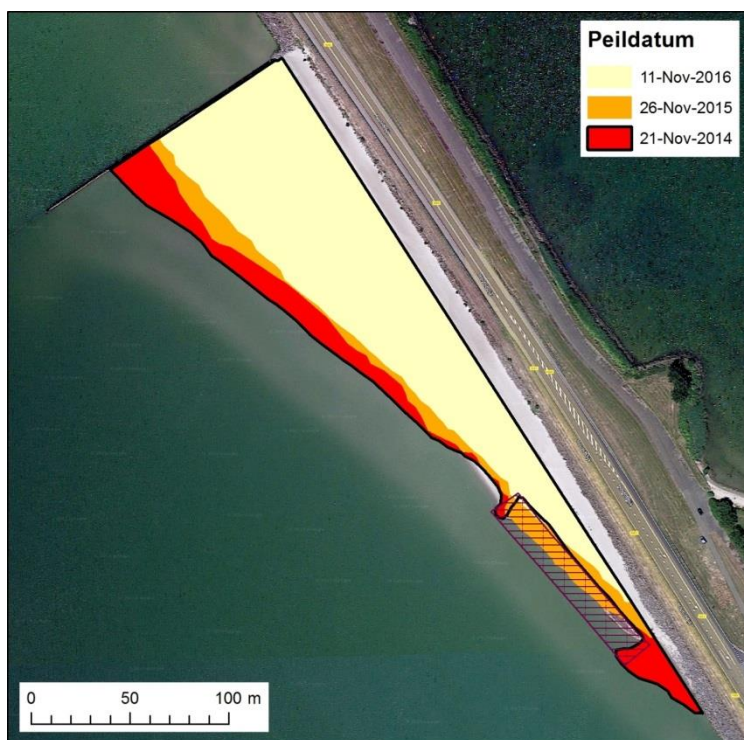
Zoals gezegd wordt de omtrek van het zandoppervlak handmatig gedigitaliseerd aan de hand van de panchromatische Spot satellietbeelden. Figuur 7.2 is een voorbeeld van een dergelijk satellietbeeld en de gedigitaliseerde omtrek. De boven- en rechterkant van het zandlichaam zijn vast begrenst middels de aangebrachte damwand en de oude grens tussen water en Houtribdijk, zodat variaties in zand op het oude dijklichaam niet worden meegenomen.

We kunnen nu verschillende gedigitaliseerde polygonen een kleur geven en over elkaar heen projecteren; zo wordt het mogelijk de dynamiek van de zandafslag en toename te visualiseren. Dit is ter illustratie gedaan in Figuur 7.3 voor de oppervlaktes in de maand november van de jaren 2014 t/m 2016. De oorspronkelijke omtrek van de vooroever op 21 november 2014 is als zwarte polygoon eroverheen geprojecteerd. Duidelijk is dat er overal een zandafslag plaatvond in de loop van deze jaren. In eerste instantie heeft de aanleg van de wilgenmatten nog een positief effect op de zandafslag gehad. Echter in november 2016 is vrijwel de gehele zuidelijke punt van het zandlichaam afgeslagen. Het oppervlak in november 2016 was nog 75% van het totale aangelegde oppervlak in november 2015.

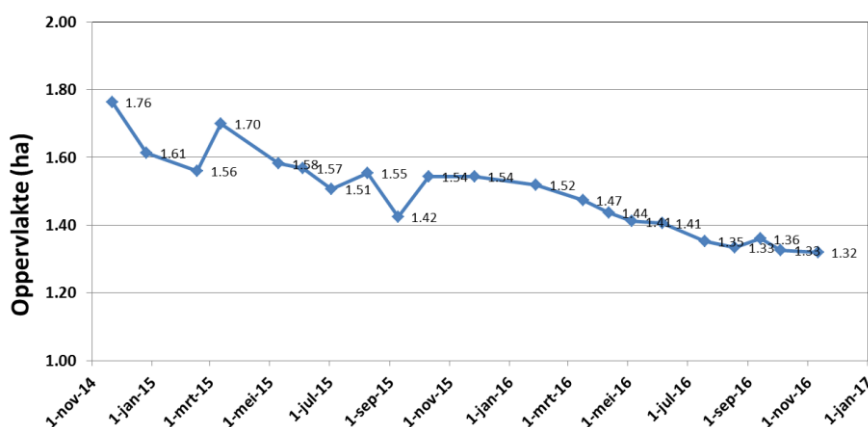
De gemeten oppervlaktes van het droge deel van zandlichaam, afkomstig van de maandelijkse satellietopnames zijn uitgezet tegen de tijd in Figuur 7.4. Na een eerste grillig verlopen jaar van zandafslag en soms ook zandtoename is vanaf najaar 2015 de zandafslag meer geleidelijk gegaan en lijkt zelfs af te vlakken naar een waarde van ongeveer 1,3 ha.



Figuur 7.2 Het satellietbeeld van 4 juni 2015 met de gedigitaliseerde omtrek als zwarte polygoon eroverheen geprojecteerd.



Figuur 7.3 De zandafslag en toename van de zandige vooroever aan de Houtribdijk in de november maand van 2014, 2015 en 2016. De zwarte polygoon geeft de oorspronkelijke vorm weer van de vooroever, zoals aanwezig op 21 november 2014. De gevlochten wilgenmatten zijn hierin gearceerd weergegeven.



Figuur 7.4 Tussenresultaat ontwikkeling oppervlakte van het boven water gelegen deel van de vooroever vanaf moment van oplevering in november 2014 tot november 2016.

De finale resultaten zijn terug te vinden in de monitoringsrapportage (EcoShape/Deltares/WEnR/HKV, 2018).

6.3.4 CONCLUSIES

Hoge resolutie satellietbeelden, zoals afkomstig van de Spot satelliet, bieden prachtige mogelijkheden tot het in detail monitoren van de dynamiek van een zandlichaam zoals de vooroever Houtribdijk. Vanaf november 2014 tot november 2017 zijn er beelden beschikbaar gekomen en geanalyseerd. Deze beelden laten een in het begin grillige, maar later geleidelijke afname van het zandoppervlak zien tot november 2016 (75% van de oorspronkelijke omvang).

Voor een meer gedetailleerde en volledige uitwerking wordt verwezen naar Hoofdstuk 5 in de het monitoringsrapport (EcoShape/Deltares/WEnR/HKV, 2018).

6.4 BASISRESULTATEN ZETTINGEN

6.4.1 INLEIDING

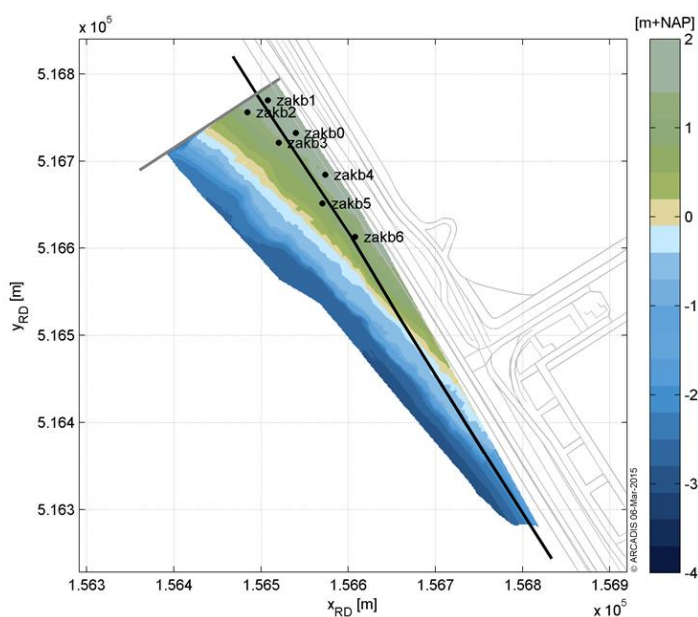
Deze paragraaf beschrijft de gebruikte methode voor de analyse van de zettingsmetingen. Ook worden de belangrijkste bevindingen beschreven. Een uitwerking met nog iets meer achtergronden is beschikbaar in een op speciaal op deze zettingsanalyse toegespitste werkrapportage (Arcadis, 2018).

6.4.2 GEBRUIKTE DATA

Voor het bepalen van de zettingen zijn zogenaamde zakbakens geplaatst in het droge gebied van de pilot. Zakbakens zijn lange metalen pijpen die zijn geplaatst op een voetplaat. Alle zakbakens hebben een totale lengte van 4 m en de voetplaat wordt op een zekere diepte ingegraven in het strand door deze voor het aanbrengen van het zandpakket aan te brengen. Door regelmatig de verticale positie van de top van het bakens te meten, wordt de lokale zakking bepaald van de ondergrond bepaald. Deze zakking is dus mede het effect van de toegenomen bovenbelasting.

Voor de pilot zijn in het totaal zeven bakens (zakb0 t/m zakb6) gebruikt. Figuur 6-46 toont de posities van de zakbakens zoals die zijn aangetroffen in het veld.

Zakbakens zakb2, zakb3 en zakb5 zijn het meest ver van de dijk afgelegd en liggen bovendien ter plaatse van de grotere ophogingen van het oorspronkelijk aanwezige profiel. Verwacht mag worden dat de zetting van de ondergrond op deze posities dan ook het grootst zal zijn.



Figuur 6-46 Overzicht positie van de zeven geplaatste zakbakens, inclusief de veronderstelde positie van de buitenbegrenzing van het onder de dijk aanwezige cunet (zwarte lijn in de figuur).

6.4.3 AANPAK DATA-ANALYSE

De zettingen worden op verschillende manieren geanalyseerd. Ten eerste wordt naar de absolute verticale posities en de bijbehorende zettingen van de zakbakens gekeken. Vervolgens wordt de relatie tussen de dikte van het lokale zandpakket en de zettingen in kaart gebracht. Door vervolgens de afstand van de meetstations tot de Houtribdijk in kaart te brengen, kan worden ingeschat of het meetstation zich al dan niet boven het cunet van de dijk bevindt. Op deze posities mag immers worden verwacht dat de zetting minder groot is (want dat was dan ook het doel van deze 'constructie').

Tot slot kunnen de gemeten zettingen met de verwachte zettingen worden vergeleken. Voor deze theoretische zettingen is in een eerder stadium een analyse gemaakt waarvan de resultaten zijn opgenomen in de rapportage over de aanleg (EcoShape/Arcadis, 2015c).

In Tabel 6-2 zijn de data van de beschikbare metingen getoond. Tijdens de aanleg van de proefsectie (vanaf begin juli en medio september 2014) zijn er waar mogelijk al enkele zettingsmetingen uitgevoerd. Daarna is er in eerste instantie maandelijks gemeten en is (in de eerste kolom van de tabel) ter referentie ook het volgnummer van de door Shore Monitoring uitgevoerde inmeting toegevoegd.

De finale zettingsanalyse heeft betrekking op de ontwikkelingen tot 1 september 2017 (opname #17). De ontwikkelingen tijdens aanvullende onderzoek worden (mede door de ook uitgevoerde ingrepen) niet meer als een ongestoorde verlenging van deze reeks gezien. Na deze datum is immers een aantal ingrepen uitgevoerd waardoor de zandmassa van de pilot is verstoord.

Opname	Zakb0	Zakb1	Zakb2	Zakb3	Zakb4	Zakb5	Zakb6
			17-7-2014	17-7-2014		17-7-2014	17-7-2014
			25-7-2014	25-7-2014			
			15-8-2014	15-8-2014			
	21-8-2014	21-8-2014		21-8-2014	21-8-2014	21-8-2014	21-8-2014
	28-8-2014	28-8-2014	28-8-2014	28-8-2014	28-8-2014	28-8-2014	28-8-2014
	30-9-2014	30-9-2014	30-9-2014	30-9-2014	30-9-2014	30-9-2014	30-9-2014
	15-9-2014	15-9-2014	15-9-2014	15-9-2014	15-9-2014	15-9-2014	15-9-2014
T1	18-9-2014	18-9-2014	18-9-2014	18-9-2014	18-9-2014	18-9-2014	18-9-2014
T2	25-10-2014	25-10-2014	25-10-2014	25-10-2014	25-10-2014	25-10-2014	25-10-2014
T3	19-11-2014	19-11-2014	19-11-2014	19-11-2014	19-11-2014	19-11-2014	19-11-2014
T4	28-12-2014	28-12-2014	28-12-2014	28-12-2014	28-12-2014	28-12-2014	28-12-2014
T5	23-01-2014	23-01-2014	23-01-2014	23-01-2014	23-01-2014	23-01-2014	23-01-2014
T6	15-02-2015	15-02-2015	15-02-2015	15-02-2015	15-02-2015	15-02-2015	15-02-2015
T7	18-03-2015	18-03-2015	18-03-2015	18-03-2015	18-03-2015	18-03-2015	18-03-2015
T8	06-04-2015	06-04-2015	06-04-2015	06-04-2015	06-04-2015	06-04-2015	06-04-2015
T9	21-08-2015	21-08-2015	21-08-2015	21-08-2015	21-08-2015	21-08-2015	21-08-2015
T10	15-01-2016	15-01-2016	15-01-2016	15-01-2016	15-01-2016	15-01-2016	15-01-2016
T11	28-02-2016	28-02-2016	28-02-2016	28-02-2016	28-02-2016	28-02-2016	28-02-2016
T12	27-05-2016	27-05-2016	27-05-2016	27-05-2016	27-05-2016	27-05-2016	27-05-2016
T13	23-08-2016	23-08-2016	23-08-2016	23-08-2016	23-08-2016	23-08-2016	23-08-2016
T14	23-11-2016	23-11-2016	23-11-2016	23-11-2016	23-11-2016	23-11-2016	23-11-2016
T15	06-03-2017	06-03-2017	06-03-2017	06-03-2017	06-03-2017	06-03-2017	06-03-2017
T16	17-05-2017	17-05-2017	17-05-2017	17-05-2017	17-05-2017	17-05-2017	17-05-2017
T17	01-09-2017	01-09-2017	01-09-2017	01-09-2017	01-09-2017		01-09-2017

Tabel 6-3 Overzicht data inmeting van de verschillende zakbakens tot en met einde reguliere monitoringsperiode op 1 september 2017.

Tijdens de laatste gebruikte opname (op 01-09-2017) is zakbaken 5 (zakb5) niet ingemeten. Voor de volledigheid zal de bijbehorende waarde worden geschat op basis van de voorgaande meting.

In Tabel 6-4 is ter informatie ook de ontwikkeling van dikte van het zandpakket ter hoogte van de zakbakens gedurende de aanleg van de proefsectie weergegeven.

Opname	Zakb0	Zakb1	Zakb2	Zakb3	Zakb4	Zakb5	Zakb6
07-07-2014	0	0	0	0	0	0	0
25-07-2014	2,14	2,59	2,61	2,17	0,71	0,18	0
15-08-2014	2,43	2,59	3,38	3,68	1,16	1,0	0,02
21-08-2014	2,57	2,57	2,53	2,38	2,45	2,08	1,36
28-08-2014	2,62	2,61	2,57	2,48	2,48	1,88	1,94
15-09-2014	2,52	2,58	2,45	2,41	2,42	2,09	2,20

Tabel 6-4 Dikte zandpakket (in meters) ter hoogte van de zakbakens gedurende de aanleg van de proefsectie.

Te zien is dat de proefsectie vanuit de damwand is aangelegd. Deze informatie is met name voor de analyses van de volumes in de aanlegfase gebruikt (zie ook (EcoShape/Arcadis, 2015c)).

6.4.4 ABSOLUTE NIVEAU-ONTWIKKELING

In Figuur 6-47 tot en met Figuur 6-53 is de ontwikkeling in de tijd van het niveau van de top van de zakbakens getoond. Daarnaast is ook de totaal opgetreden zetting weergegeven. De zetting is het verschil in verticale positie van de top van het bakken tussen de metingen.

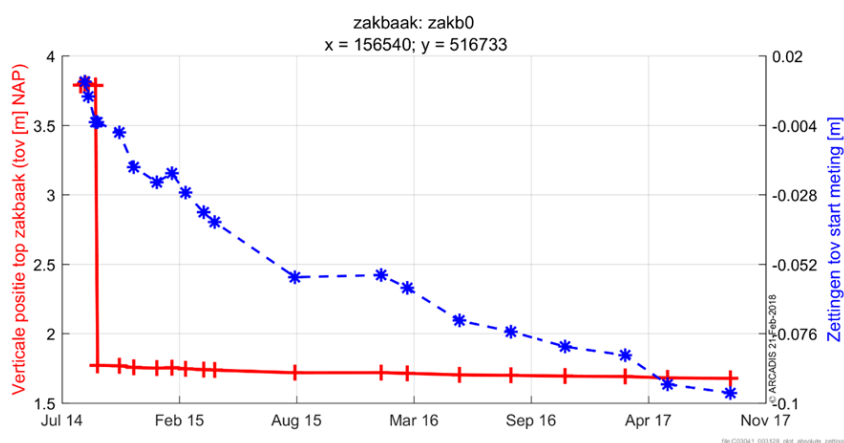
De hierbij weergegeven figuren hebben betrekking op de periode tot en met 1 september 2017. Voor zakb5 is het niveau op het laatste meetmoment dus bepaald op basis van voorgaande metingen, dit punt is in Figuur 6-52 aangegeven in grijs.

Figuur 6-47 en Figuur 6-48 tonen een grote sprong in de verticale positie van de top van de bakens zakb0 en zakb1. Dit komt doordat de lengte van deze bakens is ingekort met ongeveer twee meter.

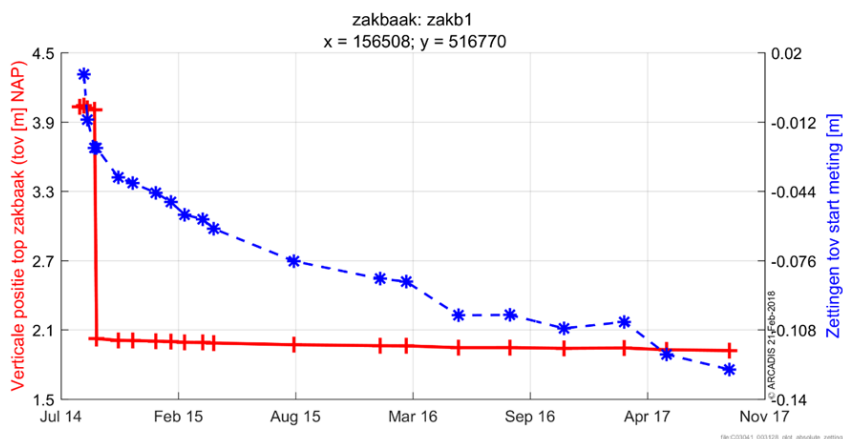
In het veld bleek dat deze bakens relatief ondiep zijn ingegraven, waardoor er een groot gedeelte van het bakken boven het zand uit stak. Hierdoor ontstaat het risico dat het bakken scheef gaat staan, wat de metingen kon beïnvloeden.

Figuur 6-47 laat zien dat op 15 september 2014 een meting is uitgevoerd met het originele (lange) bakken, terwijl op 18-9-2014 de eerste meting met het ingekorte bakken is uitgevoerd. Tussen deze metingen zit dus slechts drie dagen. Hierdoor kan met vrij grote zekerheid worden aangenomen dat de opgetreden zetting op 15-9-2014 drie dagen later nauwelijks is veranderd. Door dit aan te nemen en de positie van het bakken op 18-9-2014 als nieuwe referentie te gebruiken, is toch een zettingsverloop in de tijd afgeleid.

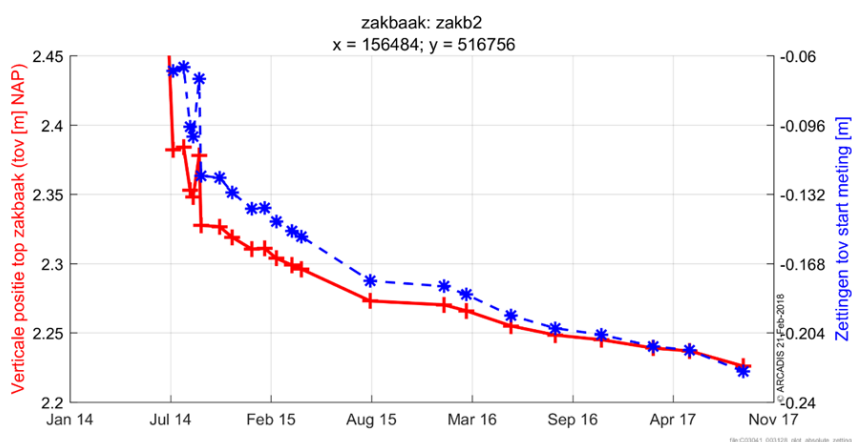
Voor alle bakens neemt de verticale positie van de top van het bakken af in de tijd. Dit geeft aan dat er dus inderdaad sprake is van zetting van het zandpakket. Voor bakens 3, 5 en 6 is goed te zien dat de toename van de zetting afneemt in de tijd tot april 2015. Daarna neemt de zetting voor deze bakens juist weer toe. De andere bakens tonen een mindere of zelfs helemaal geen afname van de zettingssnelheid. Dit zal vermoedelijk te maken hebben met lokale verschillen in de samenstelling van de ondergrond. Op hoofdlijnen laten de zakbakens zien dat de mate van zetting afneemt in de tijd. De mate van zetting verschilt wel tussen de meetmomenten. In sommige gevallen is er nauwelijks sprake van zetting, terwijl een meetmoment later juist wel weer zetting is opgetreden. Dit zal mogelijk te maken hebben met het verdichtingsproces in de ondergrond. Over het algemeen tonen de resultaten dat de ondergrond nog niet is gestabiliseerd.



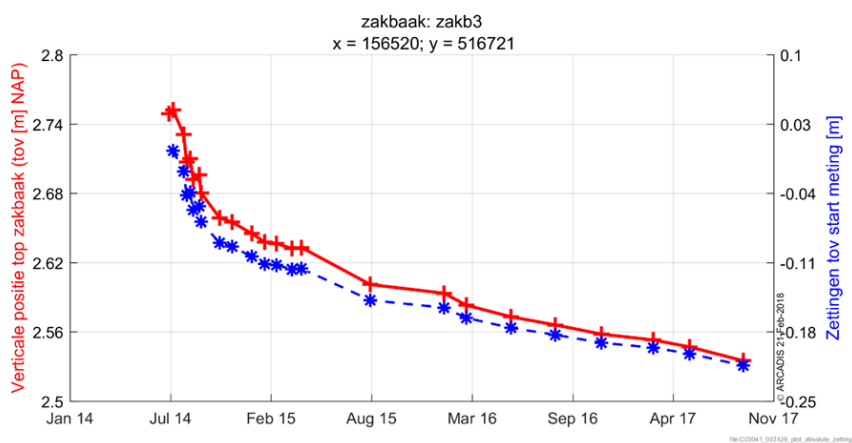
Figuur 6-47 Absolute ontwikkeling top van het zakbakken voor zakb0 (rode lijn), samen met de bijbehorende zetting (blauwe lijn).



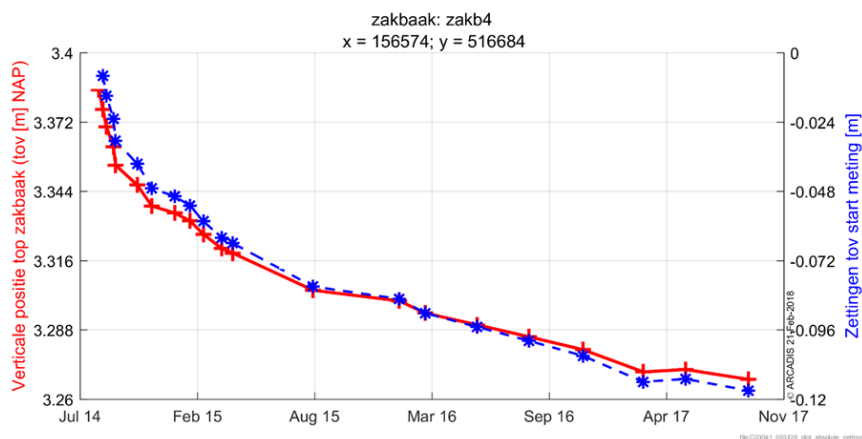
Figuur 6-48 Absolute ontwikkeling top van het zakbaken voor zakb1 (rode lijn), samen met de bijbehorende zetting (blauwe lijn).



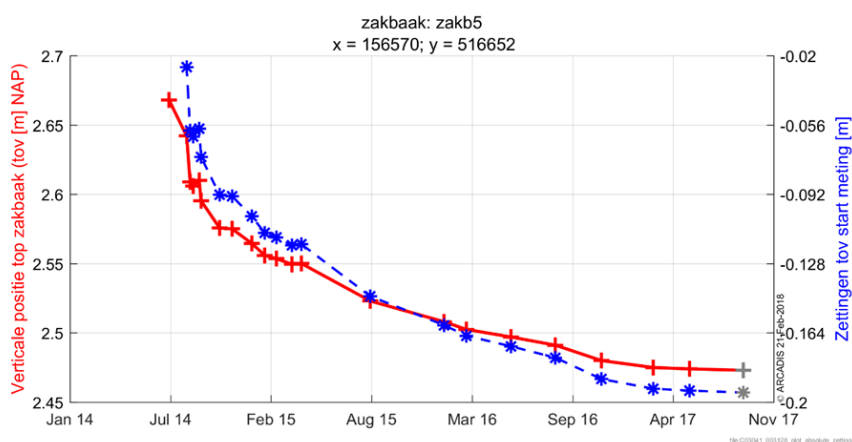
Figuur 6-49 Absolute ontwikkeling top van het zakbaken voor zakb2 (rode lijn), samen met de bijbehorende zetting (blauwe lijn).



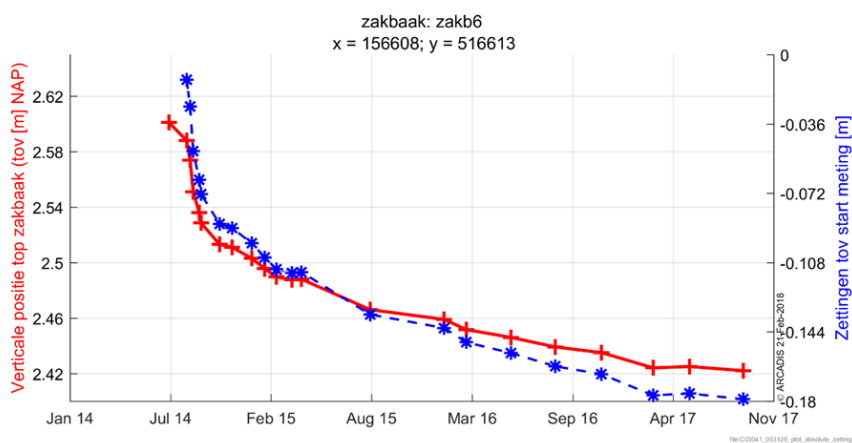
Figuur 6-50 Absolute ontwikkeling top van het zakbaken voor zakb3 (rode lijn), samen met de bijbehorende zetting (blauwe lijn).



Figuur 6-51 Absolute ontwikkeling top van het zakbaken voor zakb4 (rode lijn), samen met de bijbehorende zetting (blauwe lijn).



Figuur 6-52 Absolute ontwikkeling top van het zakbaken voor zakb5 (rode lijn), samen met de bijbehorende zetting (blauwe lijn).



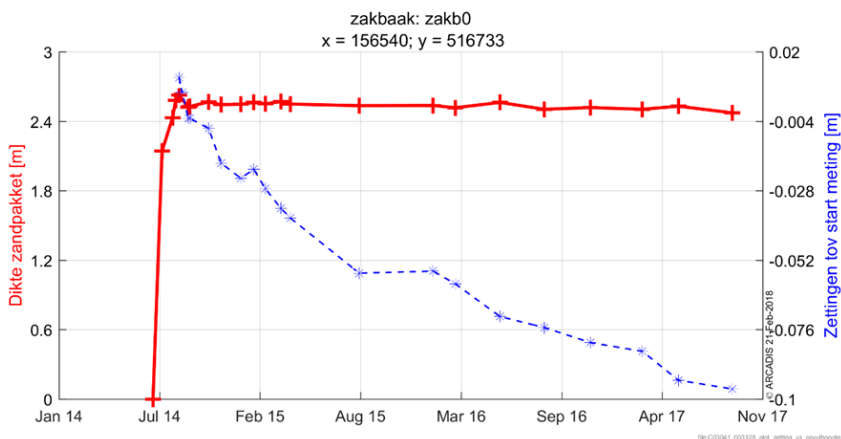
Figuur 6-53 Absolute ontwikkeling top van het zakbaken voor zakb6 (rode lijn), samen met de bijbehorende zetting (blauwe lijn).

De opgetreden zetting bedraagt, afhankelijk van de positie en bovenbelasting van het zakbaken, 10 tot 25 cm.

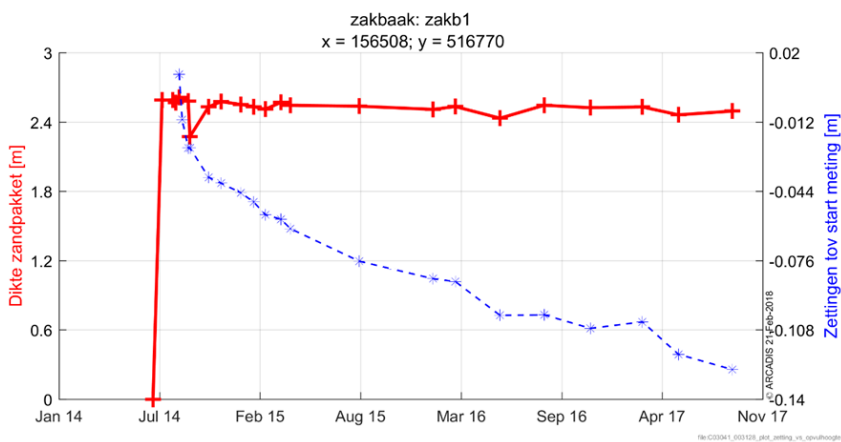
6.4.5 RELATIE ZETTINGEN EN DIKTE ZANDPAKKET

In Figuur 6-54 tot en met Figuur 6-60 is de ontwikkeling in de tijd van de top van de zakbakens getoond, in relatie met de dikte van het lokale zandpakket. Tijdens de aanlegfase (tot halverwege september 2014) is de bathymetrie en de zettingen niet in dezelfde frequentie gemeten (vergelijk ook Tabel 6-3 met Tabel 6-4). Tijdens de monitoringsfase is dat in het eerste jaar wel gebeurd.

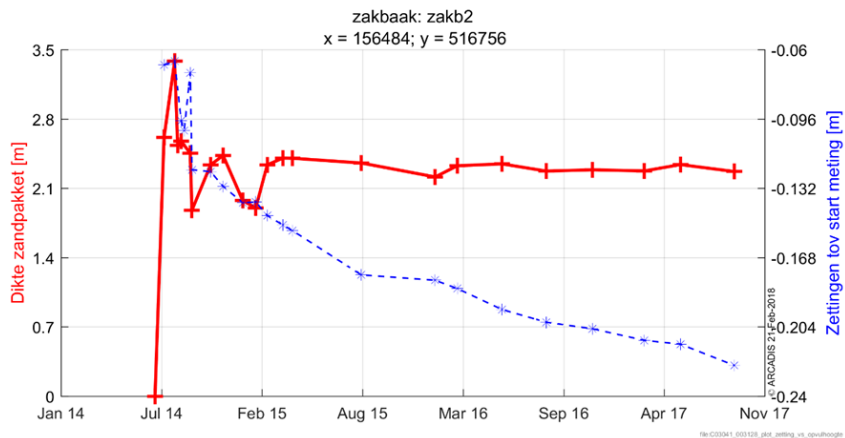
Voor vrijwel alle bakens geldt dat na aanleg de dikte van het zandpakket nauwelijks verandert. De zakbakens bevinden zich relatief hoog in het profiel, waardoor erosie door golfafslag of sediment langtransport nauwelijks voorkomt. Winderosie heeft hier potentieel wel enige invloed, maar dat is nauwelijks terug te zien in de profielen.



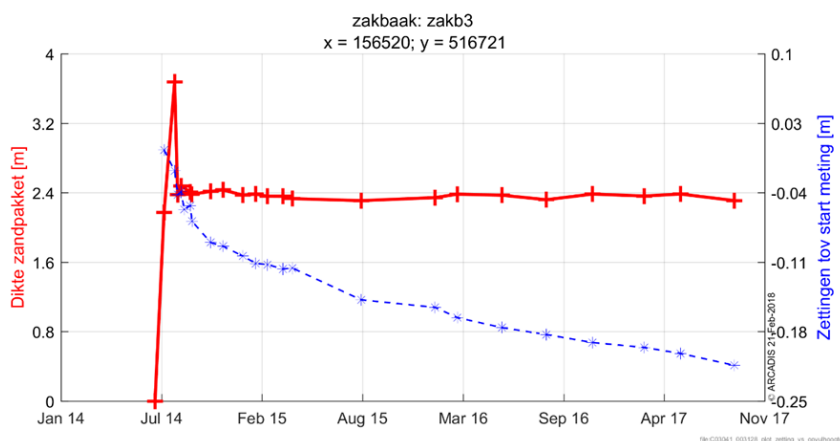
Figuur 6-54 Opgetreden zettingen in relatie met de dikte van het zandpakket in zakb0.



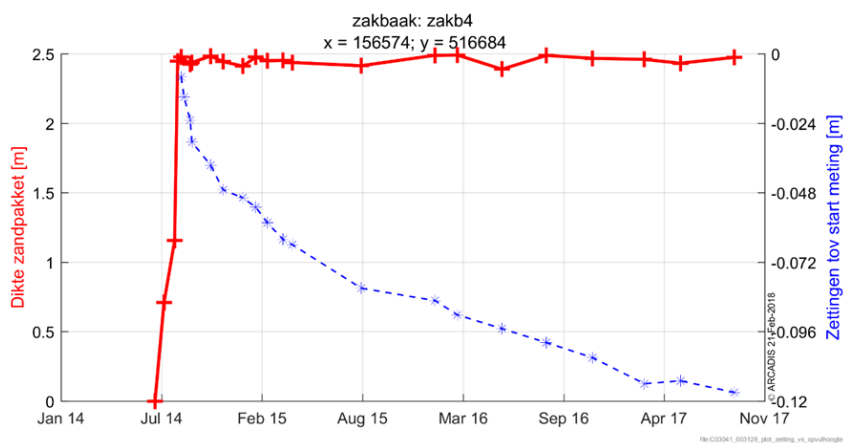
Figuur 6-55 Opgetreden zettingen in relatie met de dikte van het zandpakket in zakb1.



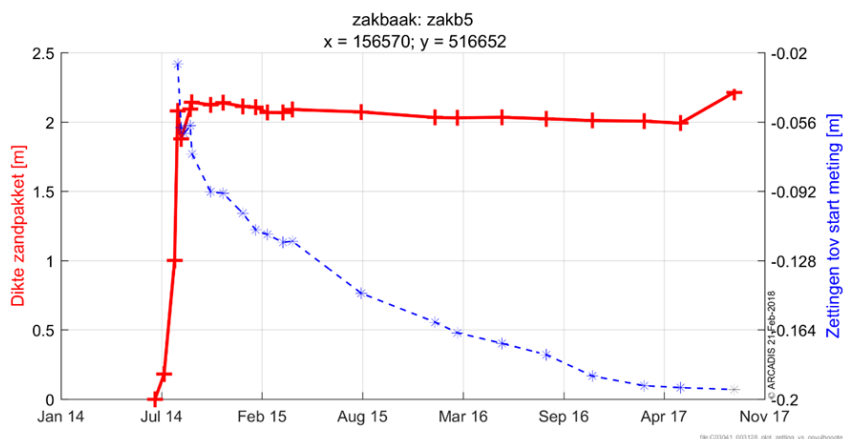
Figuur 6-56 Opgetreden zettingen in relatie met de dikte van het zandpakket in zakb2.



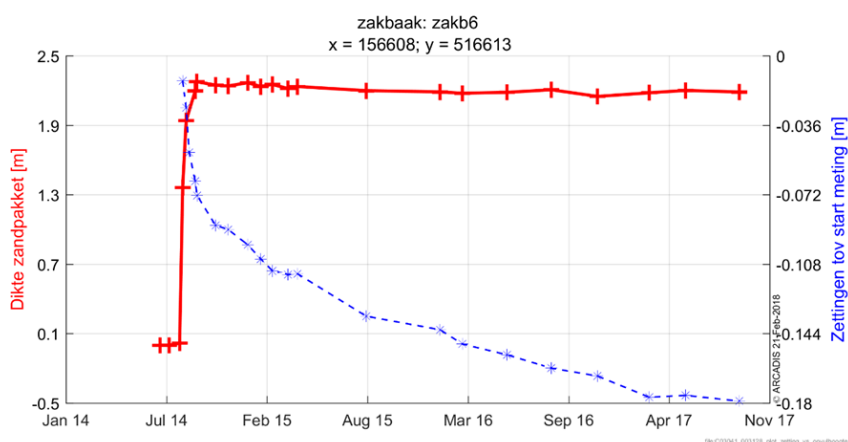
Figuur 6-57 Opgetreden zettingen in relatie met de dikte van het zandpakket in zakb3.



Figuur 6-58 Opgetreden zettingen in relatie met de dikte van het zandpakket in zakb4.



Figuur 6-59 Opgetreden zettingen in relatie met de dikte van het zandpakket in zakb5.



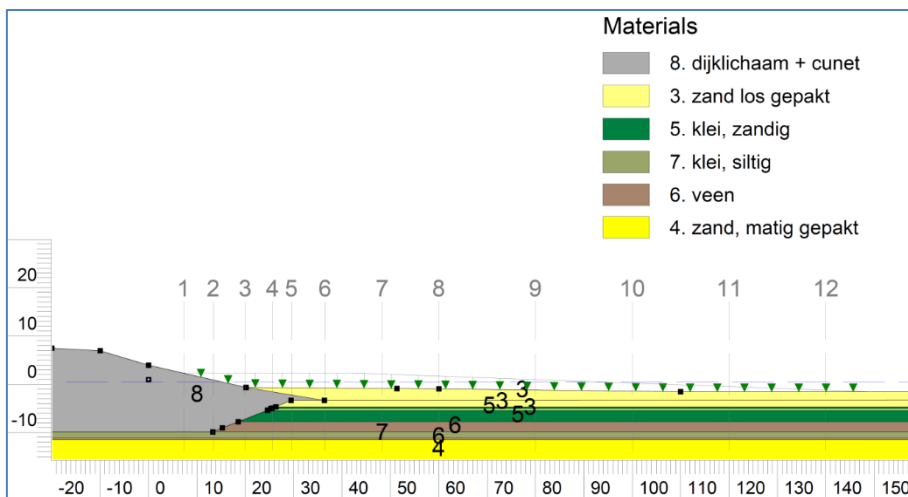
Figuur 6-60 Opgetreden zettingen in relatie met de dikte van het zandpakket in zakb6.

Alleen de dikte van het pakket bij zakb2 vertoont een wat grilliger verloop in de eerste maanden na aanleg (zie Figuur 6-56). Dit zakbaken bevindt zich van alle bakens het meest dicht bij de waterlijn. Wellicht dat golven hier wel enige invloed hebben gehad (zie Figuur 6-46). Desalniettemin zijn de verschillen in de laagdikte van het zandpakket te klein om dit te relateren aan het zettingsverloop. Voor zakb2 is de dikte van het zandpakket een klein beetje afgenomen tussen november 2014 en januari 2015. Dit lijkt invloed gehad te hebben op de gemeten zetting, welke tussen de meetpunten vrijwel constant is gebleven. Vervolgens is de dikte van het zandpakket tussen januari 2015 en maart 2015 weer toegenomen. Dit lijkt zich ook te hebben vertaald in de zetting welke in deze periode ook weer iets is versneld. De verschillen zijn overigens wel erg klein, dus een harde conclusie kan hier niet aan worden verbonden.

6.4.6 VOORSPELDE ZETTINGEN

Zoals eerder aangegeven is in de voorbereidingsfase, op basis van de resultaten van een zevental sonderingen als gerapporteerd in (Fugro Geoservices, 2014), de theoretische zetting langs een standaard zandig profiel voor de Houtribdijk bepaald (Arcadis, 2014). Dit profiel, inclusief de ondergrond, is getoond in Figuur 6-61.

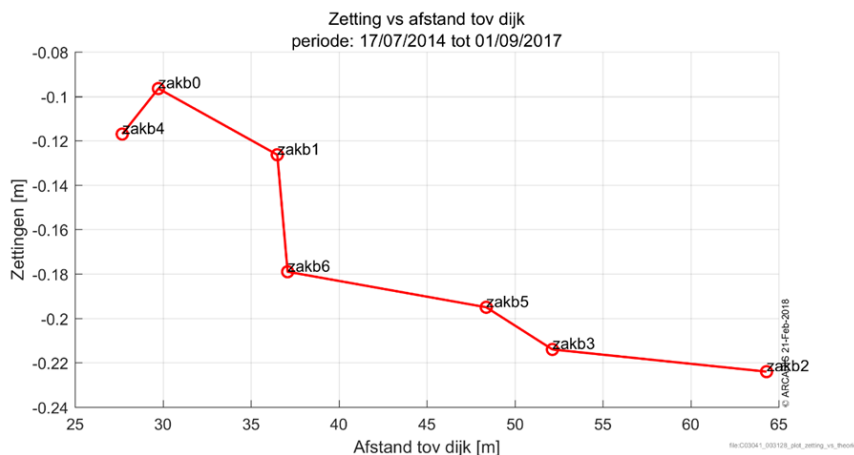
De afstand in kustdwarsrichting is bepaald ten opzichte van een referentiepunt op de dijk (nulpunt in het profiel), welke ligt op ongeveer NAP+4 m. Daarnaast is in de figuur te zien dat er zich onder de Houtribdijk een cunet bevindt en dat het profiel van het zandige voorland voor een gedeelte over dit cunet loopt, ongeveer tot 37 m in kustdwarsrichting, gemeten ten opzichte van het genoemde referentiepunt.



Figuur 6-61 Schematisatie ondergrond Houtribdijk ter plaatse van pilot.

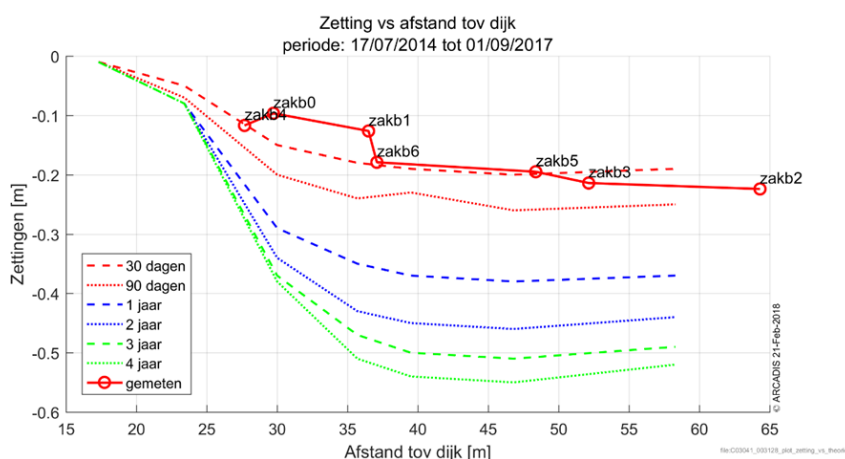
Om met meer nauwkeurigheid te bepalen welke zakbakens zich boven het cunet bevinden en welke niet, is het dus van belang om de afstand uit de dijk van de zakbakens te bepalen. Hiervoor is in de gemeten bathymetrie een referentielijn door het punt NAP+4 m bepaald. De hieruit volgende begrenzing van het cunet en de locaties van de zakbakens zijn weergegeven in de eerder gepresenteerde Figuur 6-46. De getoonde dieptekaart is zoals ingemeten op 15-9-2014 (T1-opname).

Een laatste detailleringstap is gemaakt door voor ieder zakbakens de positie ten opzichte van de referentielijn (de lijn door NAP+4 m) te bepalen (Figuur 6-62). Hieruit volgt dat het cunet zich onder zakbakens zakb0, zakb1 en zakb4 bevindt. Zakb6 bevindt zich waarschijnlijk net niet boven het cunet en onder zakb2, zakb3 en zakb5 bevindt zich zeker geen cunet. De figuur laat wel zien dat de zettingen in zakb0, zakb1 en zakb4 duidelijk achterblijven met de zetting in de overige punten. Hieruit blijkt de invloed van het cunet en de door de dijk aanwezige voorbelasting.



Figuur 6-62 Gemeten zettingen uitgezet tegen de afstand in kustwarsrichting.

De eerder afgeleide theoretische zettingen zijn in Figuur 6-63 vergeleken met de gemeten zettingen. In september 2014 is de pilot opgeleverd. Tot en met september 2017 betekent dit dus 3 jaar.



Figuur 6-63 Gemeten zettingen in kustwaarsrichting vergeleken met de voorspelde zettingen op meerdere momenten in de tijd.

De doorgetrokken rode lijn zou volgens de theorie rond de gestreepte groene 3-jaarslijn moeten liggen. De gemeten zettingen blijven dus overduidelijk (ongeveer 0,3 m) achter met de theoretisch verwachte zettingen. De reden voor dit grote verschil is waarschijnlijk gelegen in het feit dat de ondergrond als gevolg van de voorbelasting door de dijk relatief minder zettingsgevoelig is.

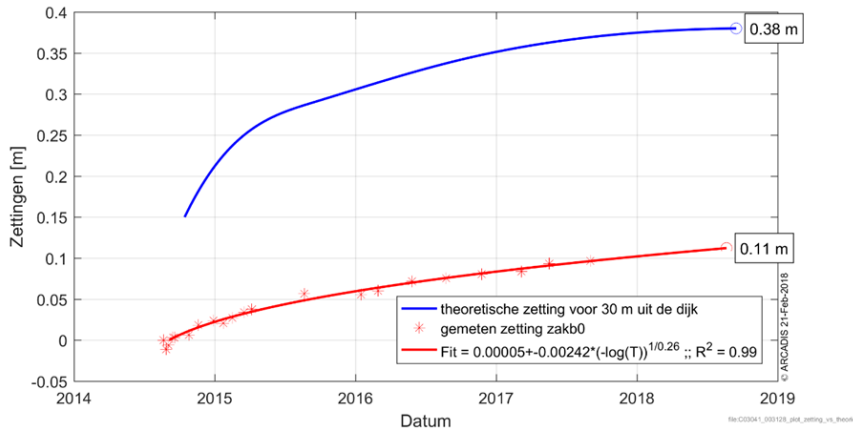
6.4.7 ZETTINGSONTWIKKELING

Een reden hiervoor kan zijn dat de aangehouden zandpakketdiktes voor de bepaling van de theoretisch zettingen groter zijn dan de diktes die daadwerkelijk zijn aangelegd. Aangezien voor ieder meetpunt de dikte van het zandpakket bekend is, kan ook het theoretische zettingsverloop voor ieder punt in meer detail worden bepaald. Dit is gedaan voor alle zakbakens (zie Figuur 6-64 tot Figuur 6-70).

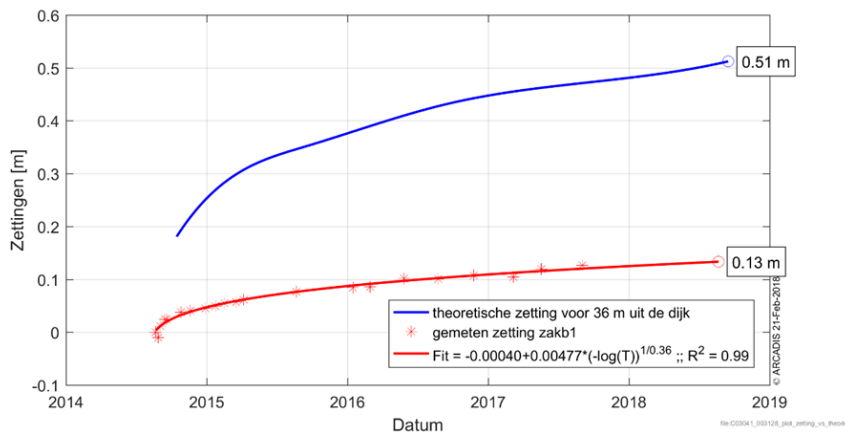
Over het algemeen laten de figuren zien dat ook nu de metingen achterblijven bij het theoretisch afgeleide verloop. Alleen de zettingen in zakb2 (het verst van de dijk gelegen punt; zie Figuur 6-66) liggen initieel dicht tegen het voorspelde verloop aan. De zettingen boven het cunet (zakb0, zakb1 en zakb4) blijven het meest achter bij de voorspellingen. Blijkbaar speelt niet alleen de afwezigheid van de slechte grond een rol, maar ook het feit dat er sprake is van een meer voorbelaste ondergrond. Dit zou de waargenomen verschillen tussen de metingen en de voorspellingen kunnen verklaren.

Er is ook een kromme gefit door de gemeten zettingen. Deze is ook te zien in Figuur 6-64 tot Figuur 6-70. De fit is redelijk tot goed met een R^2 tussen 0,92 en 0,99. Door de kromme door te trekken in de tijd is de opgetreden zetting aan het einde van de looptijd van de pilot (voorjaar 2018) voorspeld. De figuren van de gefitte kromme vertonen tot op zekere hoogte dezelfde vorm als de theoretische zettingscurve. De verwachting is daarom dat de zetting gedurende de gehele looptijd van de pilot minder zal zijn dan voorspelde zetting. Het verschil tussen de voorspelde eindzetting op basis van de metingen en de theorie varieert tussen de 17 (zakb5) en 38 cm (zakb1) en bedraagt gemiddeld ongeveer 0,3 m.

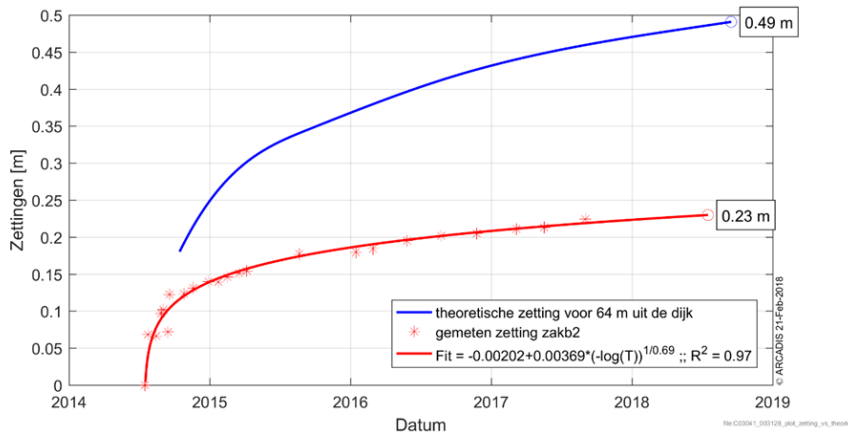
Voor vrijwel alle meetstations (behalve zakb0) geldt dat de snelheid van de zetting geleidelijk begint af te nemen. Dit is duidelijk te zien door het flauwer worden van de helling van de gefitte kromme. De afname van de zettingssnelheid begint rond januari 2015. De ondergrond is ook tijdens de laatste (finale) meting in september 2017 nog steeds niet gestabiliseerd.



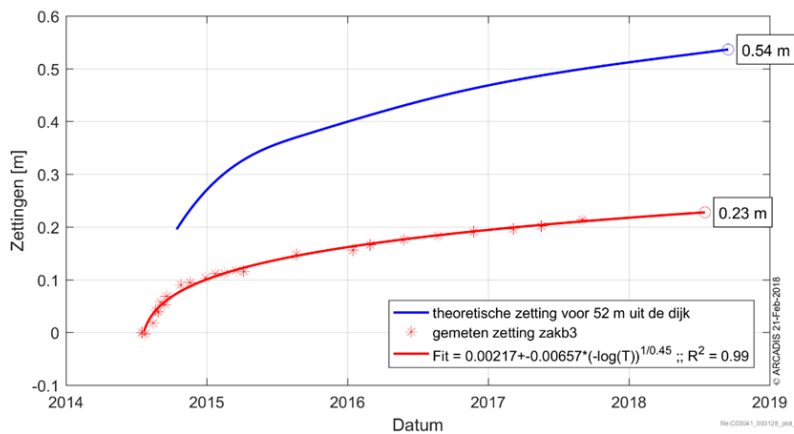
Figuur 6-64 Gemeten zettingen in zakk0 vergeleken met de theoretische zetting voor dit punt.



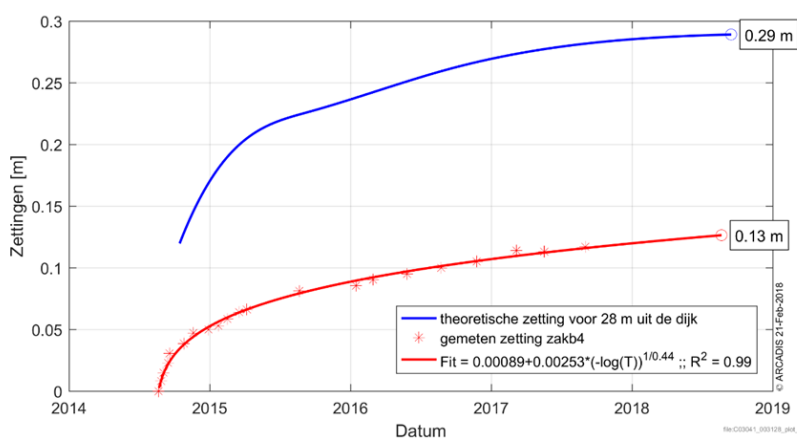
Figuur 6-65 Gemeten zettingen in zakk1 vergeleken met de theoretische zetting voor dit punt.



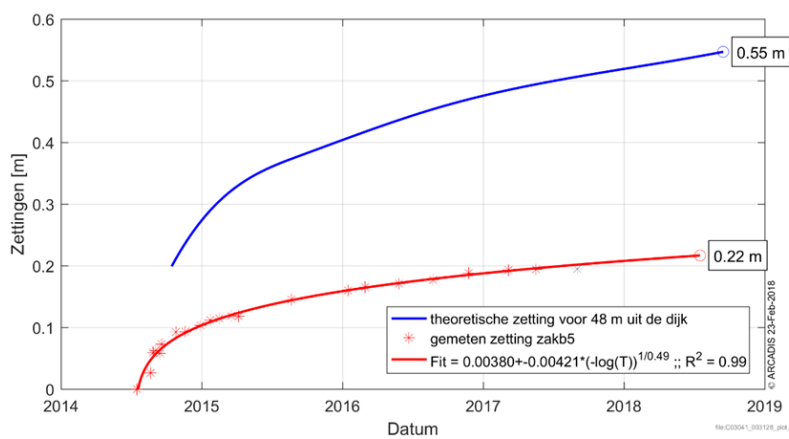
Figuur 6-66 Gemeten zettingen in zakk2 vergeleken met de theoretische zetting voor dit punt.



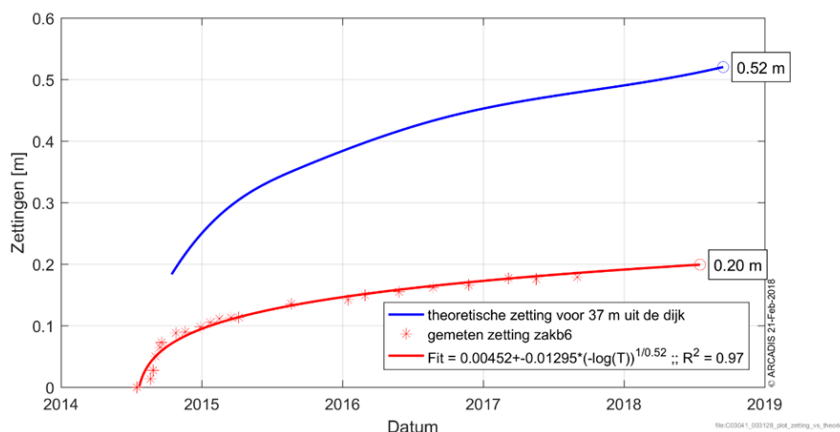
Figuur 6-67 Gemeten zettingen in zakk3 vergeleken met de theoretische zetting voor dit punt.



Figuur 6-68 Gemeten zettingen in zakk4 vergeleken met de theoretische zetting voor dit punt.



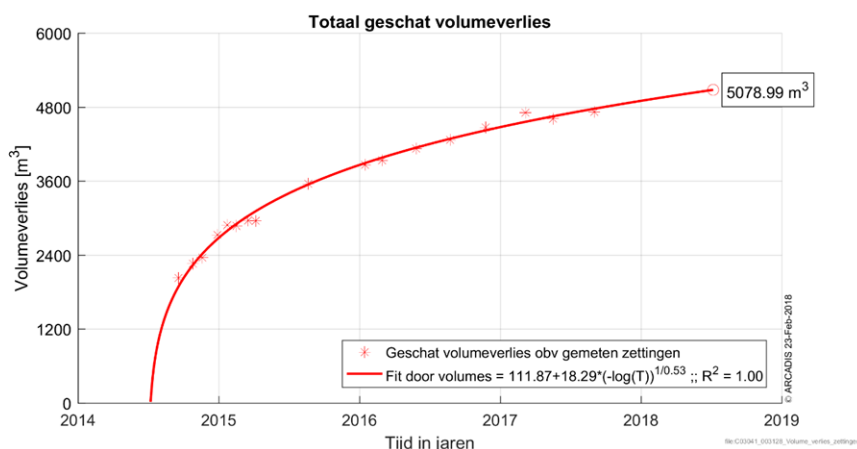
Figuur 6-69 Gemeten zettingen in zakk5 vergeleken met de theoretische zetting voor dit punt.



Figuur 6-70 Gemeten zettingen in zakb6 vergeleken met de theoretische zetting voor dit punt.

6.4.8 SCHATTING VOLUME ZETTINGSVERLIES

Op basis van de hierboven gepresenteerde resultaten is ook een inschatting gemaakt van het opgetreden volumeverlies van de pilot als gevolg van de zettingen alleen. Hiervoor is voor iedere meetlocatie de opgetreden zetting vertaald naar een zetting per dikte van de lokale suppletie laag. Vervolgens is een gemiddelde genomen van deze laag dikte afhankelijke zetting. Dit is gedaan voor de meetlocaties boven het cunet en buiten het cunet. Vervolgens is de zetting van de gehele pilot bepaald op basis van deze afgeleide gemiddeldes. Door de zetting te vermenigvuldigen met het oppervlak van de pilot boven en buiten het cunet is het volume verlies afgeschat. Dit is gedaan voor alle meetmomenten in de tijd.



Figuur 6-71 Geschat verloop van het zetting gerelateerd volumeverlies.

Het resultaat is getoond in Figuur 6-71. De figuur laat zien dat tot aan de finale meting op 1 september 2017 een totaal zetting gerelateerd volumeverlies van ongeveer 4.800 m³ is opgetreden. Op basis van de gefitte kromme is geschat dat het totale zetting gerelateerd volumeverlies medio 2018 (ten tijde van het overdragen van de proefsectie aan het versterkingsproject) ongeveer 5.100 m³ zal bedragen. Tijdens de monitoringsperiode (vanaf september 2014) bedraagt het opgetreden volumeverlies ongeveer 2.100 m³.

6.4.9 CONCLUSIES

Op basis van de resultaten van de zettingsmetingen wordt samenvattend geconcludeerd dat:

- De invloed van het cunet duidelijk zichtbaar is in de opgetreden zettingen. De opgetreden zettingen in zakb0, zakb1 en zakb4 blijven structureel achter bij de opgetreden zettingen in de overige bakens;
- De gemeten zettingen blijven ook op hoofdlijnen achter bij de voorspelde zettingen, iets wat waarschijnlijk te maken heeft met de voorbelaste ondergrond;
- De snelheid van de zetting begint enkele maanden na de aanleg af te nemen, maar de zetting gedurende de looptijd van de pilot nog niet is gestopt en de komende jaren wel door blijven gaan;
- Het huidige verlies nog steeds ongeveer 400 m³/jaar bedraagt;
- Er sinds het begin van de monitoringscampagne ongeveer 2.500 m³ zetting-gerelateerd verlies heeft plaatsgevonden;
- Er in totaal ongeveer 5.100 m³ materiaal verloren zal gaan als gevolg van zetting waarvan dus ongeveer 3.000 m³ sinds het begin van het monitoringsprogramma.

Gerelateerd aan de grootschalige zandbalans betekent dit dat:

- Er sinds het begin van het monitoringsprogramma ongeveer 2.100 m³ zetting-gerelateerd verlies aanwezig is hetgeen als negatieve post in de sedimentbalans moet worden meegenomen.
- Het uiteindelijke verlies van ongeveer 400 m³/jaar (met zettingen in zakb2 van ongeveer 2 cm/jaar) ook zal leiden tot een (beperkte) zetting-gerelateerde verplaatsing van de oeverlijn.

7

Basisinfo sedimentkarakteristieken

7.1 INLEIDING

Zowel door Alterra als door Shore Monitoring & Research zijn sedimentgegevens verzameld welke door Alterra nader zijn geanalyseerd. In het volgende is op hoofdlijnen ingegaan op deze resultaten. Voor meer informatie kan worden verwezen naar de finale versie van de monitoringsrapportage (EcoShape/Deltares/WEnR/HKV, 2018). In aanvulling hierop zijn ook de resultaten van een afstudeeronderzoek beschikbaar welke zich specifiek richt op de sedimentkarakteristieken en de hiermee samenhangende morfologische processen (Arcadis, 2016c).

7.2 GEVOLGDE METHODE KORRELGROOTTE-ANALYSE

7.2.1 INLEIDING

Er zijn sedimentmonsters voor korrelgrootteverdeling genomen tijdens de aanleg, elk bezoek van Alterra voor het bovenwaterdeel van de proefsectie en vanaf opname T3 door Shore Monitoring voor het onderwaterdeel.

7.2.2 BEMONSTERING AANLEG

De monsters tijdens aanleg zijn genomen uit een monster van circa 1 liter dat van elke aanvoerboot genomen is. In eerste instantie is in 2014 per losdag van één aanvoerboot een monster door Alterra geanalyseerd. In december 2015 zijn de analyses aan alle overige monsters van de aanleg uitgevoerd. De resultaten van de eerste analyse zijn al opgenomen in de notitie waarin de ervaringen tijdens de aanleg van de proefsectie zijn beschreven (EcoShape/Arcadis, 2015c).

7.2.3 BEMONSTERING TALUD (DROGE DEEL)

Tijdens het veldbezoek op 3 november 2014 zijn 53 monsters genomen, verdeeld over 3 raaien (zie Figuur 3.5).

Raai 1 is langs de oeverlijn, raai 2 op circa 10 meter van de oeverlijn en raai 3 op ca. 30 meter van de oeverlijn. Afstand tussen de monsterpunten per raai was circa 15 meter. Vanwege de driehoekige vorm van de pilot is het aantal monsterpunten per raai niet gelijk. Raai 1 bestond uit 22 monsterpunten, waarvan 3 ter plaatse van de rijsmatconstructie. Raai 2 bestond uit 17 monsterpunten en raai 3 uit 14 monsterpunten.



Figuur 7-1 Ligging monsterpunten grid. Raai 1 = groen, raai 2 = rood, raai 3 = zwart. Raai 1 is genummerd van NW-ZO 1 t/m 22 (rijsmat is nummers 17, 18 en 19, groene diamanten), raai 2 is genummerd van ZO-NW 23 t/m 39, raai 3 is genummerd van NW-ZO 40 t/m 53

Met behulp van een grondboor is op elk monsterpunt ca. 5 gram verzameld van de toplaag (ca. 0,5 cm). De grondboor is horizontaal gebruikt, zodat specifiek het laagje wat zou kunnen verstuiven bemonsterd werd (zie Figuur 7-2).

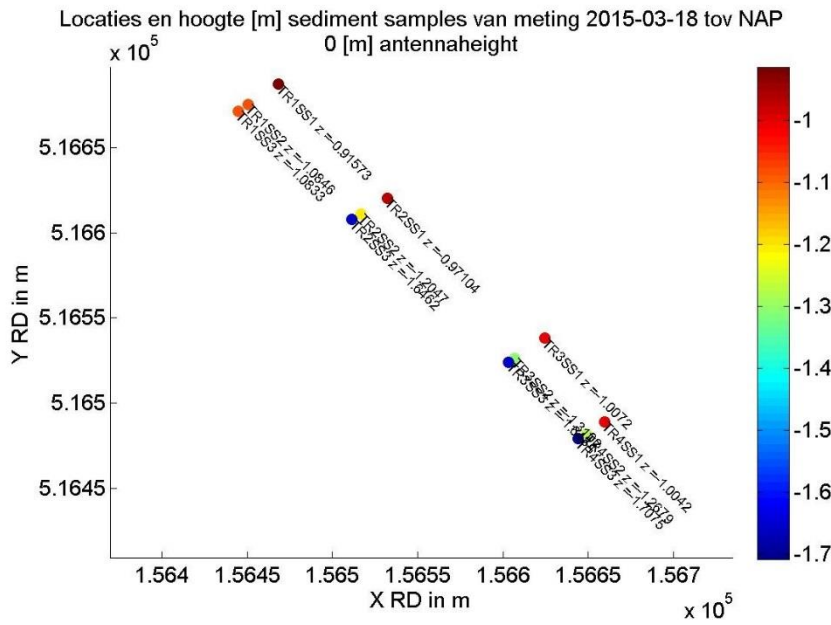


Figuur 7-2 Horizontale monsternamming met grondboor zodat alleen de bovenste 0,5 cm wordt bemonsterd.

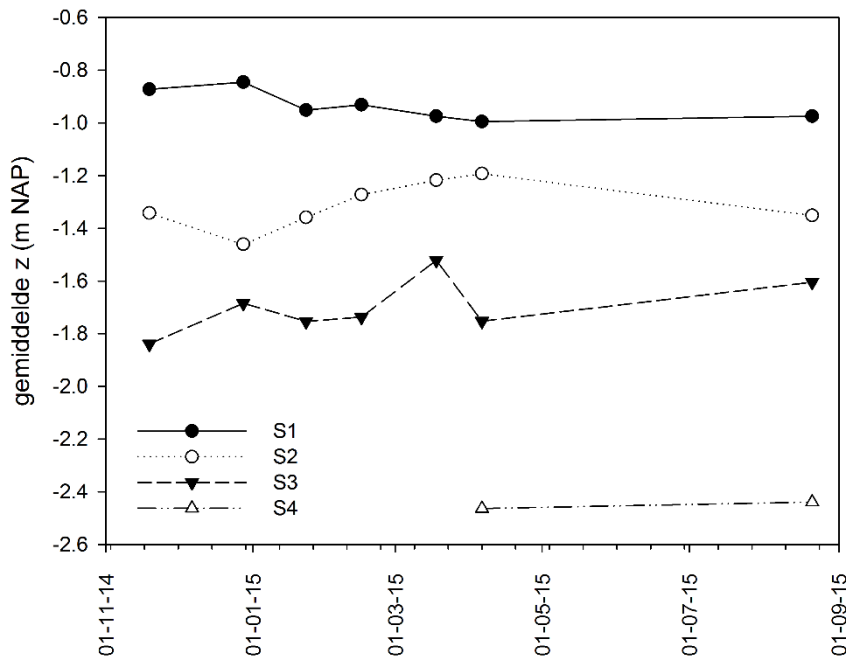
7.2.4 BEMONSTERING ONDERWATERDEEL

Shore Monitoring heeft tijdens hun bemonsteringen vanaf opname T3 (19 november 2014) ook sediment-monsters onder water verzameld. Per keer zijn (met een Van Veen grab) 12 monsters verzameld, per vak een transect resulterend in 4 transecten, en per transect drie dieptes. De eerste keer zijn de monsterpunten gekozen op NAP-0,5 m, NAP-1,0 m en NAP-1,5 m. Op elk monsterpunt is sediment bemonsterd van de bovenste 2 cm. Tijdens deze T3-meting zijn deze monsterpunten precies ingemeten, op de daaropvolgende bemonsteringen is op dezelfde plek bemonsterd.

Door erosie en sedimentatie kan de diepte in de daaropvolgende bemonsteringen dus anders zijn dan bij T3 (zie Figuur 7-3 en Figuur 7-4). Vanaf T8 is er per transect ook een vierde punt bemonsterd, en wel op NAP-2 m.



Figuur 7-3 Locatie monsterpunten onderwater bemonsterd door Shore Monitoring, met weergegeven de diepte van elk monsterpunt op T7.



Figuur 7-4 Gemiddelde diepte per monsterpunt in de tijd (gemiddelde van 4 transecten).

7.2.5 VOORBEHANDELING EN ANALYSE

De monsters van de aanleg zijn allemaal voorbehandeld, waarbij kalk en organisch materiaal verwijderd zijn. Deze voorbehandeling wordt standaard gedaan voor terrestrische bodemonsters. Op deze manier worden de losse (minerale) deeltjes gemeten. In het veld zijn korrels soms aan elkaar gekit door het organisch materiaal. Tevens bleek uit een vergelijk van voorbehandelde en niet-voorbehandelde monsters van het talud (november 2014) maar een zeer klein verschil. Daarom is er voor de latere monsters voor gekozen om alleen niet-voorbehandelde monsters te meten.

Deze meting geeft namelijk weer hoe groot de deeltjes zijn die door wind en/of water verplaatst kunnen worden.

De ruwe data geven een volume percentage verdeling per diameter klasse. In totaal worden er 93 klassen gemeten, van 0,375 μm tot 2.000 μm (2 mm).

Uit deze volumeverdeling zijn in de analyses de volgende parameters bepaald:

- Diameter bij piek in verdeling;
- Diameter bij de helft van het maximum (laag en hoog);
- Breedte verdeling (hoog – laag);
- Percentage fijn zand (fractie met korrelgrootte < 250 μm).

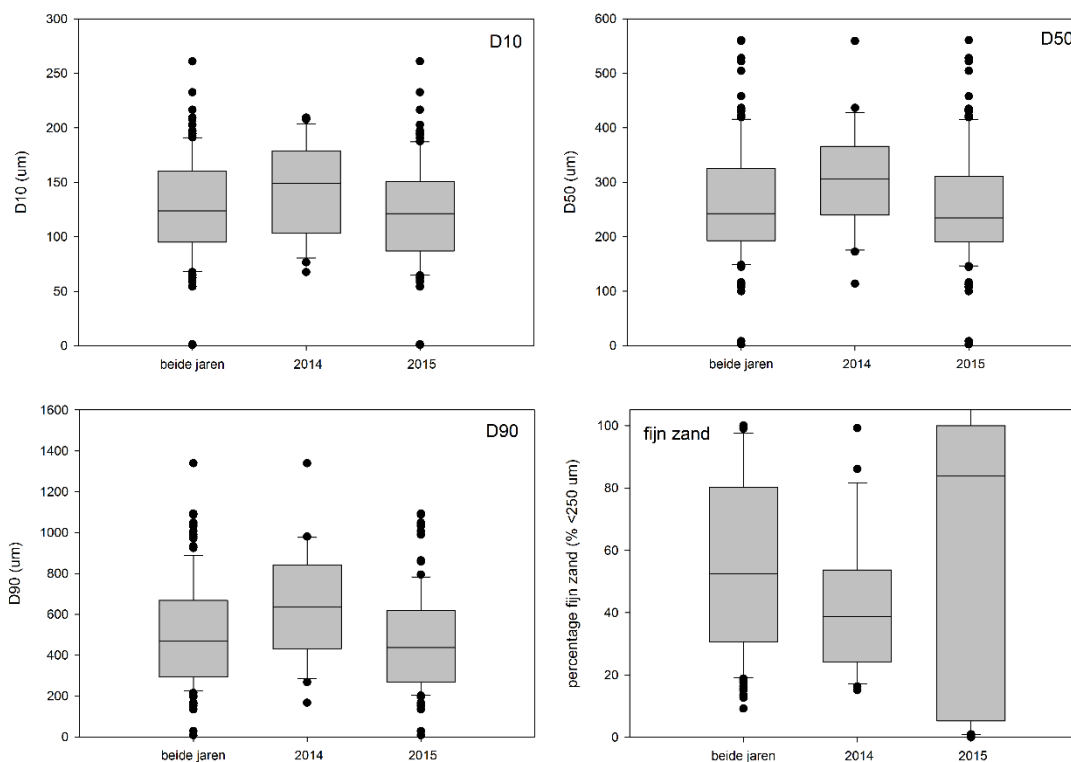
7.3 RESULTATEN

7.3.1 BEMONSTERING AANLEG

In eerste instantie zijn in 2014 23 monsters geanalyseerd, per losdag 1 monster, waarbij met laserdiffractie de korrelgrootte verdeling is bepaald. In 2014 zijn alle monsters ontkalkt, en het organisch materiaal is verwijderd. In december 2015 zijn de overige monsters geanalyseerd, zonder voorbehandeling.

Figuur 7-5 laat met behulp van boxplots de spreiding in de dataset zien voor de verschillende parameters. Hieruit blijkt dat de spreiding aanzienlijk is. Er is ook een opmerkelijk verschil tussen de 2014 en 2015 analyses. De D10-, D50- en D90-waarden liggen in de 2015 analyses in het algemeen iets lager dan in de 2014 analyses, wat inhoudt dat er in de latere analyse blijkbaar meer kleinere korrels zijn. Dit komt overeen met het grotere percentage fijn zand in 2015 vergeleken met 2014 (zie figuur rechtsonder). Het verschil tussen de analysejaren is significant voor D10 en D90, en niet voor D50.

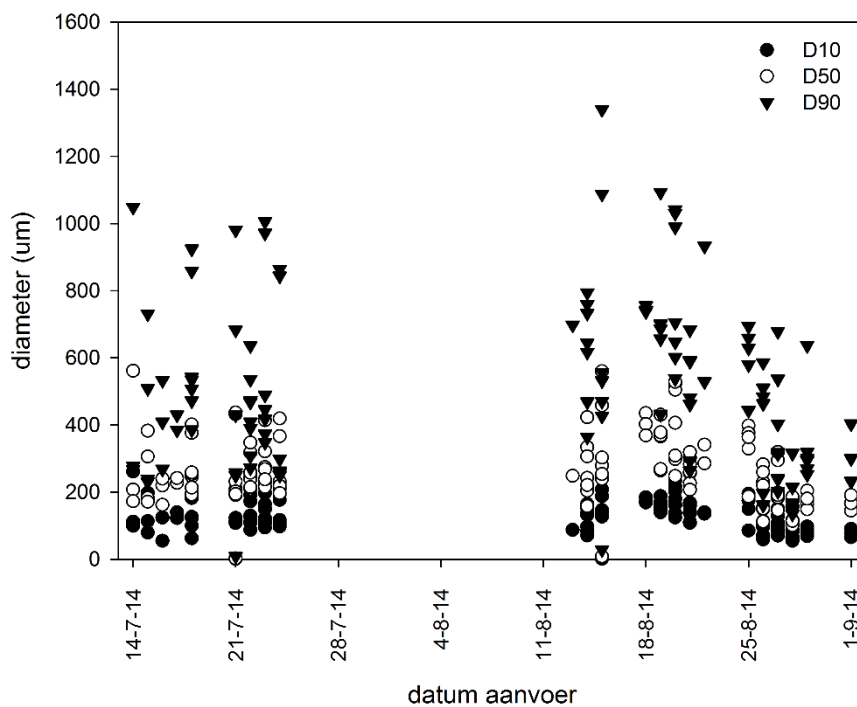
De gemiddelde D50 van het aangevoerde zand bedraagt 264 μm (\pm 106 μm).



Figuur 7-5 Boxplots van D10, D50 (rechtsboven), D90 en % fijn zand (rechtsonder), voor beide jaren samen (n=125), en uitgesplitst voor de analyse in 2014 (n=23) en 2015 (n=102). De (boven en onderzijde van de) box geven het 25 en 75 percentiel aan, de horizontale lijn de mediaan, de vlaggen (horizontale lijnen) zijn het 5 en 95 percentiel, de stippen daarbuiten zijn de zogenaamde outliers.

Het verschil tussen de analyses in beide jaren kan komen doordat er in 2014 wel voorbehandeld is (ontkalken en organisch stof verwijderen), en in 2015 niet. Echter, door de voorbehandeling worden vastgekitten deeltjes losgemaakt, en zou je meer kleinere deeltjes verwachten. Een andere mogelijke verklaring is het effect van langdurige opslag. De monsters die in 2015 zijn gemeten zijn donker en koel bewaard (opgeslagen in een koelcel met een gemiddelde temperatuur van 8 °C). De verwachting is dat dit weinig effect heeft op de minerale deeltjes. Maar opslag kan wel effect hebben op het organisch stof (langzame bacteriële afbraak is mogelijk), wat tot kleinere deeltjes leidt.

Als de D10, D50 en D90 wordt uitgezet tegen datum aanvoer (Figuur 7-6), dan blijkt daaruit dat er in de tijd variatie is, met in het begin van de aanleg iets lagere waarden, in het midden hogere waarden, en op het eind weer iets lagere waarden. Omdat de aanleg bij de damwand is begonnen, en van daaruit naar het zuidoosten is aangelegd, volgt de verwachting dat er ook een ruimtelijke spreiding zal zijn in de korrelgrootte op de proefsectie, namelijk een afname van de korreldiameter is zuidoostelijke richting. Dit wordt overigens onderschreven door de resultaten van de taludmonsters (zie Figuur 7-8).



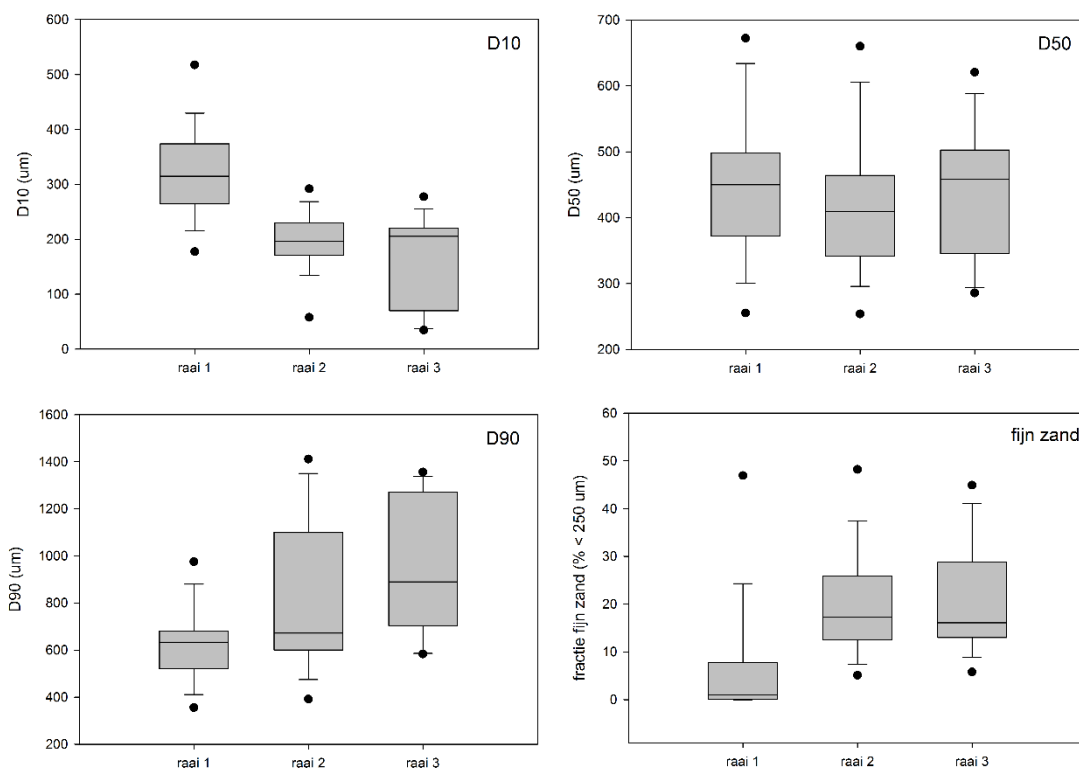
Figuur 7-6 Grootte D10, D50 en D90 tijdens de aanleg als functie van de losdag.

7.3.2 BEMONSTERING TALUD (DROGE DEEL)

De eerste bemonstering van het droge deel van de proefsectie heeft plaatsgevonden op 3 november 2014. Figuur 7-7 geeft D10, D50, D90 en fractie fijn zand weer, als boxplot per raai. De boxplots laten zien dat er behoorlijk wat variatie tussen monsters zit binnen een raai (grote box). Wat uit de verschillende plaatjes blijkt is dat de D50 ongeveer gelijk is op de 3 raaien (overall range 250 – 670 μm), maar dat de D10 en D90 laten zien dat langs de oeverlijn (raai 1) er meer grovere deeltjes zijn, en hoger op het talud (raai 3) meer fijnere deeltjes.

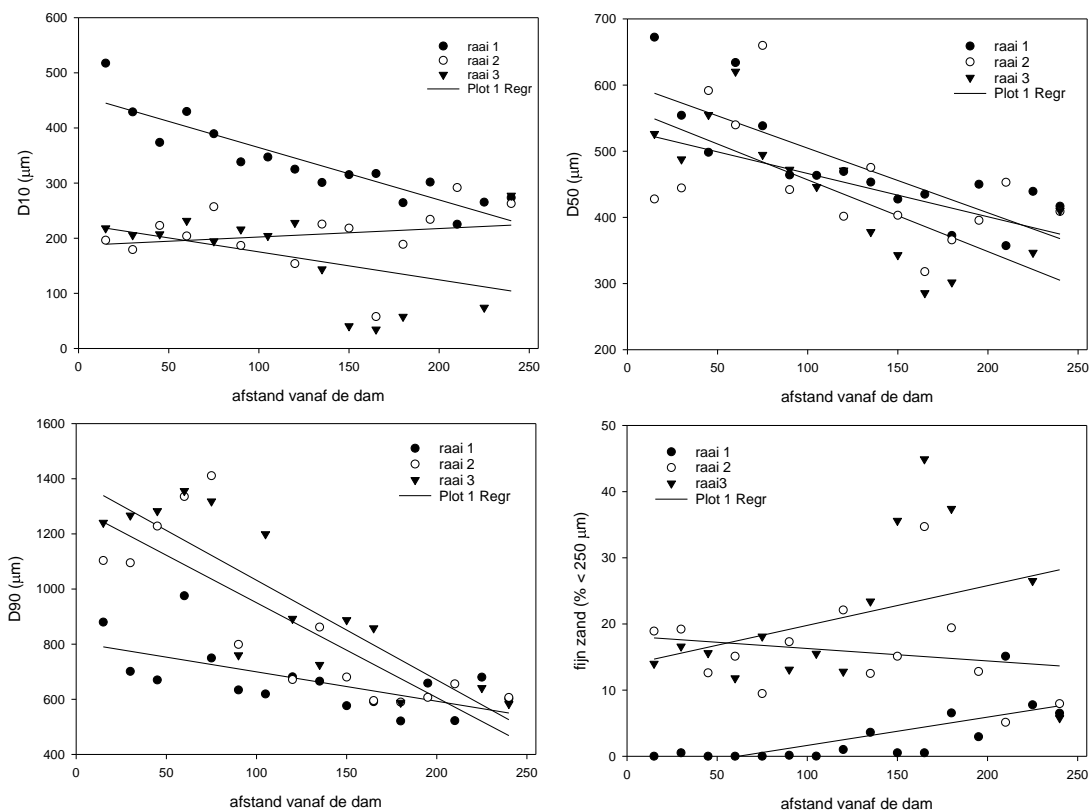
Het zand sorteert zich dus uit op het talud, afhankelijk van de hoogte/afstand uit de oeverlijn.

Dit verschil is waarschijnlijk het gevolg van het uitspoelen van de fijnere delen rond de oeverlijn waardoor in raai 1 de fijne fractie afneemt en de D10 toeneemt.



Figuur 7-7 Boxplots van D10, D50, D90 en % fijn zand, op de drie bemonsterde raaien op het talud. Raai 1 is langs de oeverlijn, raai 2 is op 10 m van de oeverlijn, raai 3 is op ca 30 m van de oeverlijn. De monsters op de rijsmat zijn hierin weggelaten.

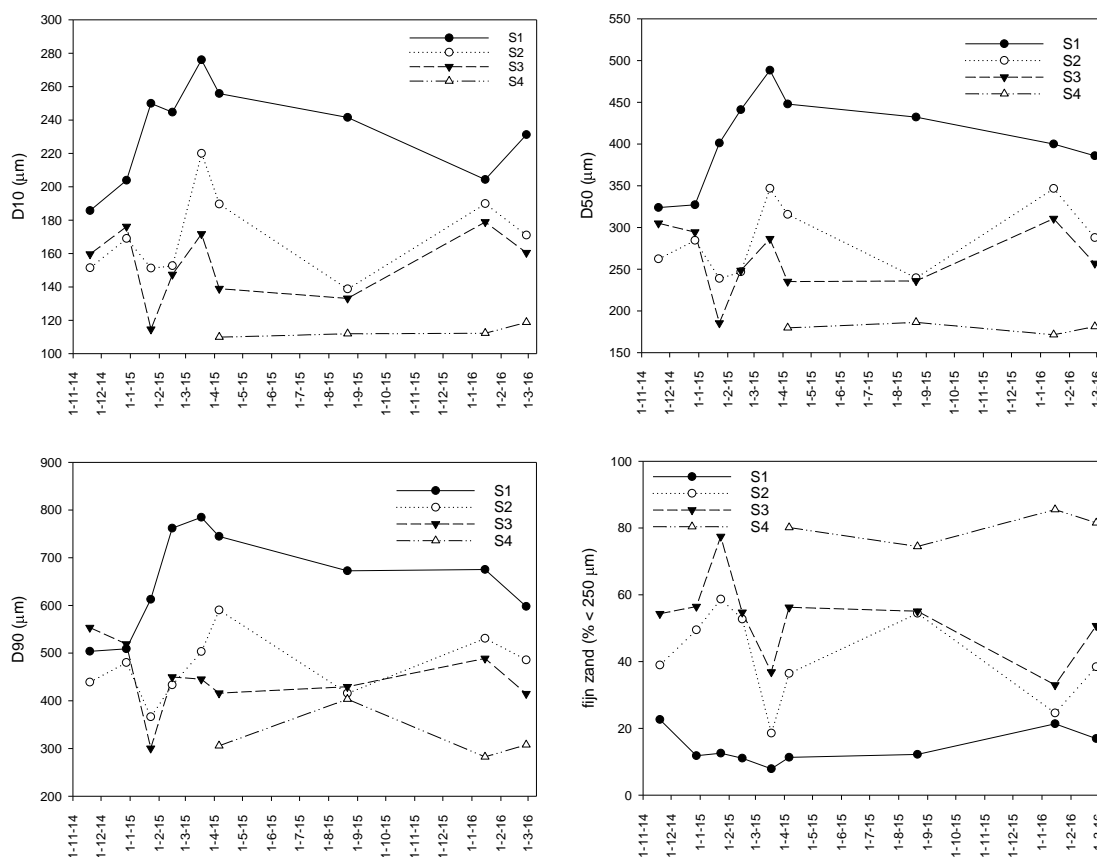
In Figuur 7-8 wordt de ruimtelijke variatie per raai (langsrichting) weergegeven. Op raai 1, langs de oeverlijn, neemt de D10 af met toenemende afstand van de damwand, ook D50 en D90 nemen af, en de percentage fijn zand neemt toe met toenemende afstand van de damwand. Op raai 2, 10 meter vanaf de oeverlijn, is er geen duidelijk ruimtelijk patroon voor D10 en D50 en percentage fijn zand, en neemt de D90 af met toenemende afstand van de damwand. Op raai 3, het hoogst gelegen op het talud ca 30 m van de oeverlijn, is er geen duidelijk ruimtelijk patroon voor D10 en percentage fijn zand. De D50 en D90 nemen af met toenemende afstand van de damwand hetgeen past bij het eerder op basis van de analyse van de aanlegmonsters verwachte beeld.



Figuur 7-8 Verschuiving van D10, D50, D90 en % fijn zand ten opzichte van afstand vanaf de damwand, op de drie bemonsterde raaien op het talud. Raai 1 is langs de oeverlijn, raai 2 is op 10 m van de oeverlijn, raai 3 is op ca 30 m van de oeverlijn. Alleen de monsters ten westen van de rijsmatconstructie zijn weergegeven. Elk punt is 1 monster. Lineaire regressie is toegevoegd als indicatie van het ruimtelijk patroon.

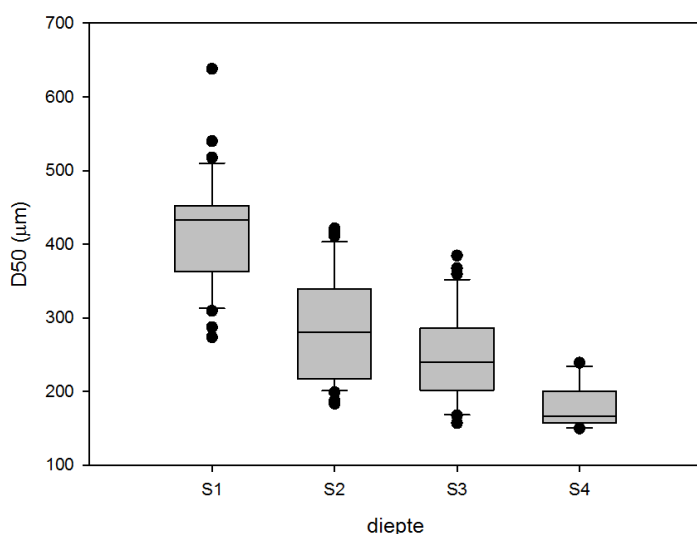
7.3.3 BEMONSTERING ONDERWATERDEEL

In het onderwater deel voor de pilot zijn op vier transecten (TR1 t/m TR4) loodrecht op de oeverlijn op 3 dieptes sediment gemonsterd (S1 t/m S3). Voor de monsternamen van november 2014 zijn deze monsters direct gemeten en na verwijderen kalk en organisch stof. Er is weinig verschil tussen de directe meting en de meting na voorbehandeling. De monsters zijn vanaf december 2014 allemaal zonder voorbehandeling geanalyseerd. Vanaf april 2015 (T3) is er per transect een 4e punt toegevoegd, op 2 m diepte (S4, zie ook Figuur 7-3). In deze rapportage worden specifiek de D10, D50, D90 en % fijn zand gepresenteerd (Figuur 7-9).



Figuur 7-9 Grootte D10, D50, D90 en % fijn zand op de vier diepten in de tijd (gemiddelde van vier transecten). S1 = 0,5 m diep, S2 = 1 m diep, S3 = 1,5 m diep, S4 = 2 m diep.

Verschillen tussen datum monitoring, transect en monsterpunt zijn getoetst met Kruskal-Wallis, omdat de data niet normaal verdeeld zijn. Er is geen significant tijdseffect voor D10, D50 en D90 of percentage fijn zand. Er is wel een significant effect van monsterpunt: bij toenemende diepte neemt de D10, D50 en D90 af, en het percentage fijn zand toe ($p < 0.001$).



Figuur 7-10 Boxplots van D50 op de onderwater transecten. S1 = 0,5 m diep, S2 = 1 m diep, S3 = 1,5 m diep, S4 = 2 m diep.

Bij toenemende diepte neemt de D10, D50 en D90 af, wat betekent dat er meer kleinere deeltjes zijn op de diepere monsterpunten. Dit blijkt ook uit het percentage fijn zand, de hoogste percentages op het diepste monsterpunt S4 (Figuur 7-9). De verschillen tussen de transecten zijn minder sterk ($p < 0.05$ voor D10, D50 en percentage fijn zand), maar deze zijn niet systematisch. De boxplots van D50 (Figuur 7-10) bevestigen het beeld van een lagere D50 dus meer kleine deeltjes bij toenemende diepte van het monsterpunt.

7.4 CONCLUSIES

7.4.1 EFFECT VOORBEHANDELING

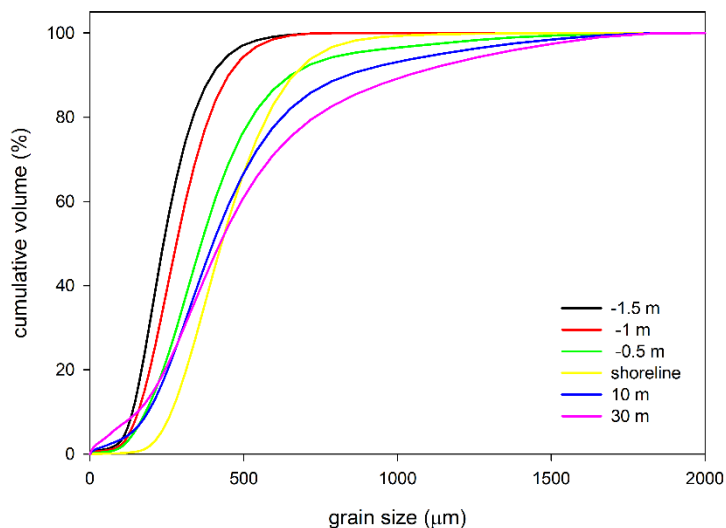
Er bleek weinig verschil in verdeling tussen de directe meting en meting na voorbehandeling (verwijderen kalk en organisch stof). In deze rapportage wordt alleen de analyse aan de onbehandelde monsters gegeven. Vanaf december 2014 worden de monsters alleen niet-voorbehandeld geanalyseerd.

7.4.2 DWARSVARIATIE IN DE KORRELGROOTTE-VERDELING

In november 2014 zijn de eerste veldmonsters genomen, zowel onder water als op het talud. Met inachtneming van het verschil in monsternamen (onder water met een Van Veen grab sampler, boven water de bovenste 0,5 cm gestoken) laten deze metingen het volgende beeld zien (Figuur 7-11).

Van diep onder water (NAP-1,5 m) tot aan de oeverlijn is er een min of meer parallel verschuiving van de verdeling (zwart, rood, groen en geel) naar een steeds grotere mediane diameter.

De monsters op het talud (geel, blauw en roze) laten meer een kanteling zien in de verdeling, rond een min of meer vergelijkbare mediane diameter. Hoe hoger op het talud, hoe meer variatie in deeltjesgrootte.



Figuur 7-11 Korrelgrootteverdeling onder water (monsternamen 19 november) en op het talud (monsternamen 3 november), directe meting.

7.4.3 TIJDSVARIATIE IN DE KORRELGROOTTE (D50)

De D50 bij aanleg (analyse aan aangevoerd zand) varieert tussen 100 en 600 µm (Figuur 7-6).

Boven water is op twee momenten de korrelgrootte geanalyseerd, in november 2014 (3 raaien op het talud, zie Paragraaf 7.3.2), en september 2015 (gekoppeld aan de PQ's).

In november 2014 varieert de D50 tussen 250 – 670 µm. In september 2015 varieert de D50 tussen 250 – 895 µm in de bovenste 5 cm, en tussen 100 – 950 µm in de laag 5 – 20 cm.

Er lijkt dus een verschuiving naar iets grotere D50-waarden te zijn opgetreden, met name in de top laag (november 2014 monsters en september 2015 0 - 5 cm monsters). In de diepere laag (5 - 20 cm) is de ondergrens van D50 nog steeds 100 µm.

Voor meer informatie kan worden verwezen naar hoofdstuk 4 van de finale versie van de monitoringsrapportage (EcoShape/Deltares/WEnR/HKV, 2018).

8

Basisinfo vegetatie

8.1 INLEIDING

Zowel door Alterra als Deltares wordt informatie verzameld over de aanleg en ontwikkeling van de vegetatie op de proefsectie. In het volgende is op hoofdlijnen ingegaan op deze resultaten.

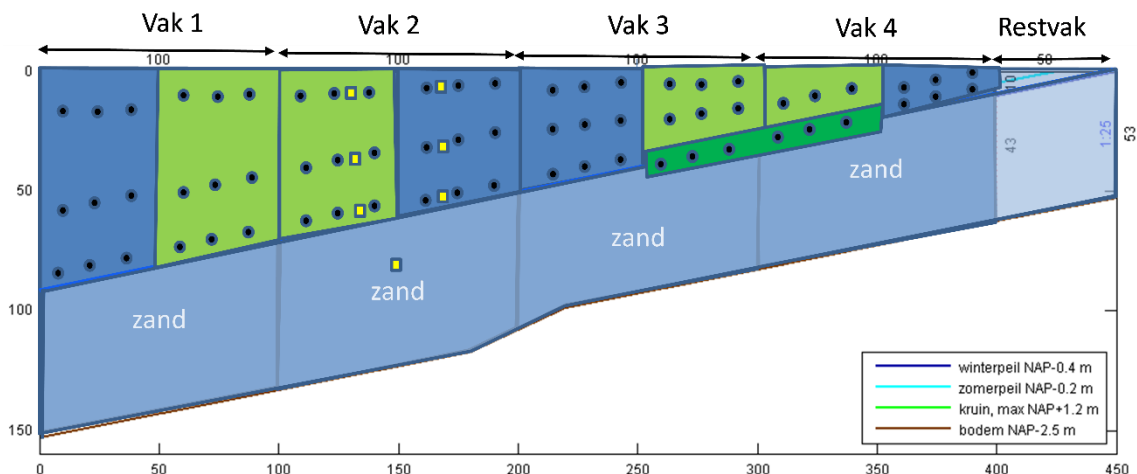
Voor meer informatie kan worden verwezen naar hoofdstuk 5 van de eindversie van de door Deltares/Alterra opgestelde rapportage (EcoShape/Deltares/WEnR/HKV, 2018).

In het volgende zijn ter illustratie enkele onderdelen van deze uitkomsten nader besproken.

8.2 ONTWERP AANLEGSTRATEGIE VOOR VEGETATIE

8.2.1 BASISONTWERP

Bij de aanleg van de proefsectie is specifiek aandacht gegeven aan de meest effectieve manier om vegetatieontwikkeling in het veld te stimuleren, om binnen zo kort mogelijke tijd een stabiele deklaag te creëren die erosie tegen kan gaan. Daartoe is de proefsectie onderverdeeld in meerdere vakken (zie Figuur 8-1).



Figuur 8-1 Schematisch overzicht van aangeplante vlakken (lichtgroen) en kale vlakken (donkerblauw) en locaties van de PQ's (donkere stippen) en exclusies (gele vierkanten). In donkergroen de locatie van de rijsmatten met rietplanten die als additionele proef worden aangelegd op de overgang tussen vak 3 en vak 4.

Per vak van 100 meter breedte is 50 meter aangepland om vegetatieontwikkeling actief te stimuleren, of kaal gelaten zodat vegetatie spontaan tot ontwikkeling kan komen. Binnen deze 50 meter zones worden steeds drie replica's van vegetatieontwikkeling gemonitord met zogenaamde PQ's (Permanent Quadrates) op 3 niveaus in het talud.

Dit is niet gedaan in vak 4: daar is minder hoogte boven de waterlijn en vervalt de meest bovenste monitoringsreeks.

De PQ's zijn cirkels met straal 1,13 m en oppervlakte 4 m². Het centrum van de cirkel zal met GPS worden ingemeten. In totaal wordt de vegetatieontwikkeling dus in 72 PQ's gevolgd (2 secties x 2 vakken x aangeplant of kaal x 3 hoogtes x 3 replica's).

De factor 'graas' wordt alleen in vak 2 onderzocht door op 3 hoogtes langs het talud exclusies te plaatsen waardoor graas door ganzen of andere herbivoren buiten wordt gesloten (zie gele vakken in Figuur 8-1). In totaal zijn 7 exclusies geplaatst. 6 op het 'droge' talud, en 1 onder water.

8.2.2 VOORBEREIDENDE WORKSHOP

Tijdens een workshop met vegetatie-experts op 22 april 2014 is besloten dat de droge delen van de pilot worden ingeplant met riet/lisdodden op het talud lager dan 0,5 m. NAP en het talud daarboven met een random mix van verschillende struik-achtigen (kornoelje, wilg, vlier etc.).

Voor het selecteren van de bron van het aan te planten riet is in 2014 een additioneel onderzoek gedaan naar de vraag of er genetische variëteit is in het Nederlandse riet. De genetische variëteit in het bemonsterde riet bleek erg groot en zeer variabel ook binnen een bemonsterde locatie. Fenotypische expressie lijkt dan ook voornamelijk gerelateerd aan standplaatsfactoren, en niet zo zeer beïnvloed te worden door genetische factoren.

Uiteindelijk is het riet bij een kweker gekocht die het opkweekt van zaad dat afkomstig is uit Oost-Europa, omdat dit een gangbare werkwijze is om in korte tijd aan grote hoeveelheden uniforme planten te komen.

8.2.3 RIJSMATTENTEST

Aanvullend aan de aanplant op het sediment zelf, is er een test uitgevoerd of het toepassen van rijsmatten met aangeplant riet de ontwikkeling van waterriet kan stimuleren. Deze rijsmatten zijn op de oever van vak 3 en 4 (100 m in langsrichting en 16 m dwarsrichting op de oever) geplaatst in het deel dat ook wordt aangeplant. Direct na aanleg begin sept. 2014 zijn er jonge rietplanten aangeplant op de rijsmat, die bestond uit 2 lagen van wilgentenen met daartussen een kokosmat met aarde.

8.2.4 AANPLANT IN VOORJAAR 2015

De vegetatie is in de periode 23 maart tot 30 april 2015 deels direct aangeplant (vak 1 en vak 2) en beschermd met een golfremmende barrière van wilgentenen en deels gestimuleerd door het plaatsen van rietplanten in de oeverzone (vak 3 en vak 4).

In de eerste maand na planten is de vegetatie middels conventionele sproeiers berekend (gemiddeld om de 5 dagen) om het aanslaan van de vegetatie te bespoedigen. Dit is gedaan omdat de pilot erg lage grondwaterstanden kent en het risico op verdroging van jonge aanplant groot is, zeker in periodes van droogte.

Na de aanplant van riet op de rijsmatten in september 2014 was dit niet gedaan, en deze jonge rietaanplant is daardoor binnen enkele weken verdord (september 2014 was een erg warme en droge maand).

8.3 RESULTATEN VEGETATIEONTWIKKELING

8.3.1 ONTWIKKELING RIET IN OEVERZONE

De golfremmende barrière heeft geen duidelijke bescherming kunnen bieden aan de rietplanten in de oeverzone, omdat de opzet tijdens zuidwestenwinden dusdanig hoog was dat het merendeel van de golfenergie over de barrière heen kon komen. Als gevolg van de te dynamische omstandigheden zijn alle rietplanten in de oeverzone weggespoeld, en is het riet alleen op de drogere delen aangeslagen.

8.3.2 ONTWIKKELING VEGETATIE OP DE RIJSMAT

De plantengroei op de rijsmat is zeer spaarzaam. Het aangeplante materiaal heeft zich maar beperkt ontwikkeld (zie Figuur 8-2).



Figuur 8-2 Initiële ontwikkeling van de vegetatie op de rijsmat.

Het riet op de rijsmat is initieel niet aangeslagen, door droogte en een te hoge ligging van de rijsmat ten opzichte van het meerpeil dat in september 2014 (een zeer warme en droge maand) erg laag stond.

Inmiddels (maart 2016) is de rijsmat vrijwel volledig verdwenen door golfaanval en erosie op de locatie van de rijsmat. De destructieve effecten van de golfaanval op deze locatie bleken een stuk groter dan van te voren ingeschat.

8.3.3 EFFECT BEGRAZING

De grasachtige planten binnen de exclusies hebben een grotere lengtegroei kunnen doormaken dan daarbuiten. Voor struweelvormers binnen een exclusie is het verschil binnen en buiten minder duidelijk waarneembaar. Begrazing aan individuele planten buiten de exclusies is duidelijk zichtbaar (zie Figuur 8-3).

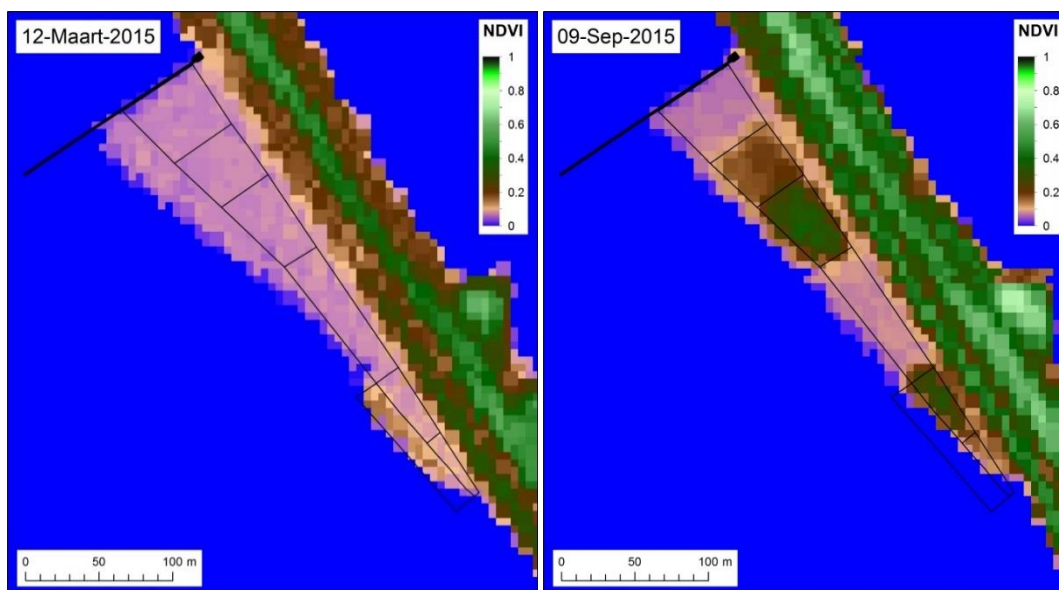


Figuur 8-3 Effect enclosure. Foto links: Verschil in hoogte vegetatie binnen en buiten de enclosure. Foto rechts: begrazing buiten de enclosure aan aangeplant riet.

8.3.4 EFFECT INMENGING HOLOCEEN MATERIAAL

De scheiding tussen de twee bodemtypen zand en zand met bijmenging is duidelijk zichtbaar in de ontwikkeling van het struweel. Op het deel waar holoceen materiaal is bijgemengd, is het struweel hoger en zit het voller in blad.

Dit verschil is ook terug te zien op spot-satellietbeelden, waarbij de vakken met ingemengd holoceen materiaal een veel hogere 'groen-index' hebben, dan de vakken op zand (rechter afbeelding in Figuur 8-4).



Figuur 8-4 De NDVI-groenindex op 12 maart 2015 en 9 september 2015.

8.3.5 SPONTANE VESTIGING PLANTEN OP DE PILOT

In totaal hebben 34 soorten zich spontaan gevestigd op de pilot, waarvan 9 soorten alleen op de vakken met zand, en 17 soorten uniek op de vakken zand met holoceen.

Deze aantallen omvatten ook de soorten riet, rietgras en schietwilg wanneer deze buiten de aangeplante vakken zijn waargenomen. Riet en goudzuring zijn de twee soorten die zich in zowel beide bodemtypen

en zowel ingeplant als daarbuiten hebben gevestigd. De soorten die zich enkel op zand hebben gevestigd zijn veelal aangepast aan drogere standplaatsen. Voor de soorten die zich enkel op het holoceen materiaal hebben gevestigd geldt dat zij een rijkere en vochtigere standplaats nodig hebben dan het kale zand.

Spontane vestiging planten op bodemtype zand

Er hebben zich 17 soorten planten spontaan gevestigd in de PQ's op de vakken met alleen zand (Tabel 8-1 en Tabel 8-2). De meeste soorten in raai 3 op 30 m uit de oeverlijn. In raai 1 (oeverlijn) hebben zich helemaal geen planten gevestigd. De meeste soorten hebben zich gevestigd in het ingeplante deel. In raai 2 (heeft zich ook riet gevestigd buiten de ingeplante stukken, dit is vrijwel zeker een gevolg van losgespoelde riet-pluggen). De schietwilg buiten het ingeplante struweel is een uitgelopen bos rijshout. Veel opgeslagen soorten zijn soorten van ruderaal omstandigheden. Muurpeper is de enige soort die specifiek is aangepast aan droge omstandigheden (zie Figuur 8-5).



Figuur 8-5 Muurpeper (op 10 m uit de oeverlijn op het zandige deel van de proefsectie).

Nederlandse naam	Familienaam
Rietgras	Poaceae
Riet	Poaceae
Gewone melkdistel	Asteraceae
Schietwilg	Salicaceae
Rode ganzenvoet	Chenopodiaceae
Muurpeper	Crassulaceae
Goudzuring	Polygonaceae

Tabel 8-1 Overzicht spontaan gevestigde soorten op bodemtype zand in raai 2 op 10 m uit oeverlijn.

Nederlandse naam	Familienaam
Engels raaigras	Poaceae
Reukeloze kamille	Asteraceae
Straatgras	Poaceae
Goudzuring	Polygonaceae
Gewone melkdistel	Asteraceae
Vogelmuur	Caryophyllaceae
Gestreepte witbol	Poaceae
Veldbeemdgras	Poaceae
Klein kruiskruid	Asteraceae
Jakobskruiskruid s.l.	Asteraceae
Ruw beemdgras	Poaceae
Gewoon varkensgras	Polygonaceae

Tabel 8-2 Overzicht spontaan gevestigde soorten op bodemtype zand in raai 3 op 30 m uit oeverlijn.

Spontane vestiging planten op bodemtype zand met holoceen materiaal

Binnen dit bodemtype hebben zich 25 soorten gevestigd (Tabel 8-3 en Tabel 8-4), waarbij er meer soorten binnen het ingeplante deel zijn gevestigd dan in het niet-ingeplante deel. Ook op dit bodemtype zijn planten van de ingeplante soort Riet los gespoeld en heeft deze zich hier gevestigd in het achterliggende ingeplante struweel. Anders dan bij het bodem type zand is er geen duidelijk verschil in het aantal gevestigde soorten tussen raai 2 en 3.

Nederlandse naam	Familienaam
Harig wilgenroosje	Typhaceae
Klein kruiskruid	Lamiaceae
Kleine lisdodde	Asteraceae
Moerasandoorn	Poaceae
Moerasmelkdistel	Poaceae
Riet	Chenopodiaceae
Rietgras	Poaceae
Rode ganzenvoet	Asteraceae
Ruw beemdgras	Lamiaceae
Speerdistel	Asteraceae
Wolfspoot	Typhaceae
Zwart tandzaad	Lamiaceae

Tabel 8-3 Overzicht spontaan gevestigde soorten op bodemtype holoceen in raai 2 op 10 m uit oeverlijn.

Nederlandse naam	Familienaam
Bezemkruid	Asteraceae
Canadese fijnstraal	Asteraceae
Fioringras	Poaceae
Gekroesde melkdistel	Asteraceae
Gewone melkdistel	Asteraceae
Gewoon struisgras	Poaceae
Goudzuring	Polygonaceae
Grote lisdodde	Typhaceae
Harig wilgenroosje	Onagraceae
Hoog struisgras	Poaceae
Klein hoefblad	Asteraceae
Klein kruiskruid	Asteraceae
Krulzuring	Polygonaceae
Melganzenvoet	Chenopodiaceae
Riet	Poaceae
Ruw beemdgras	Poaceae

Tabel 8-4 Overzicht spontaan gevestigde soorten op bodemtype holoceen in raai 3 op 30 m uit oeverlijn.

8.4 ALTERNATIEVE DATA-INWINNING VIA ANALYSE SATELLIETBEELDEN

8.4.1 INLEIDING

In de vorige paragraaf zijn de resultaten gepresenteerd van de fysieke bemonstering van de vegetatiekenmerken aan de hand van door Alterra uitgevoerd veldonderzoek.

Parallel hieraan is ook onderzocht in hoeverre de ontwikkeling van met name de biomassa op een innovatieve manier kon worden afgeleid door toepassing van remote sensing technieken. Hiervoor is gebruik gemaakt van de Spot satellietbeelden uit het Nationaal Satelliet Dataportaal. Deze informatie is ook gebruikt voor het in kaart brengen van de ontwikkeling van de omvang van het boven water gelegen deel van de proefsectie (zie Paragraaf 6.3). Voor meer achtergronden kan worden verwezen naar de door Alterra opgestelde deel van de monitoringsrapportage (EcoShape/Deltares/WEnR/HKV, 2018).

8.4.2 GEBRUIKTE INFORMATIE

Als input-bestanden voor deze analyse is dus gebruikt gemaakt van Spot satellietbeelden uit het Nationaal Satelliet Dataportaal. Deze beelden zijn maandelijks beschikbaar en getracht wordt om met behulp van de weersvoorspelling de te gebruiken opnamedagen zo te kiezen dat de kans op bewolking klein is.

De Spot satelliet heeft de beschikking over vier spectrale banden in het blauw, groen, rood en NIR licht met een ruimtelijke resolutie van 6 m en één panchromatische band die zwartwit opnames maakt met een ruimtelijke resolutie van 1,5 m (**Error! Reference source not found.** zie pagina **Error! Bookmark not defined.**). **Error! Reference source not found.**

De spectrale band in het rood en NIR licht worden gebruikt om de Normalised Difference Vegetation Index (NDVI) groenindex te berekenen. Deze index berust op het principe dat planten, of beter gezegd groene biomassa, grotendeels het rode zonlicht absorberen middels de fotosynthese en het merendeel van het nabij-Infrarode (NIR) licht reflecteren. Bij kale bodems (rotsen, zand, geploegd land) is dit verschil veel kleiner. Dit principe wordt gebruikt om vegetatie indicatoren te berekenen. De NDVI groenindex is een ratio tussen de reflecties van het rode en het NIR licht: $NDVI = (NIR - Rood) / (NIR + Rood)$.

De NDVI is een indicator van de hoeveelheid groene biomassa met een waarde tussen de 0 en 1. De NDVI-waarden kunnen "vertaald" worden naar landbouwkundige processen of natuurontwikkeling over de seizoenen. Zo kan per perceel de gewasontwikkeling middels de groeicurve gevolgd worden. Voor de Houtribdijk vooroever betekent dat de biomassa ontwikkeling van de verschillende vegetatie aanplantingen in de verschillende proefvakken kan worden gevolgd en gekwantificeerd. Bij de analyse van de ontwikkeling van de biomassa zijn verschillende proefvakken onderscheiden (zie Figuur 8-6).



Figuur 8-6 Google Earth opname van de zandige vooroever aan de Houtribdijk op 30 juni 2015 met hierin onderscheiden 6 proefvakken met verschillende aanplantingen en grondsoorten.

8.4.3 RESULTATEN

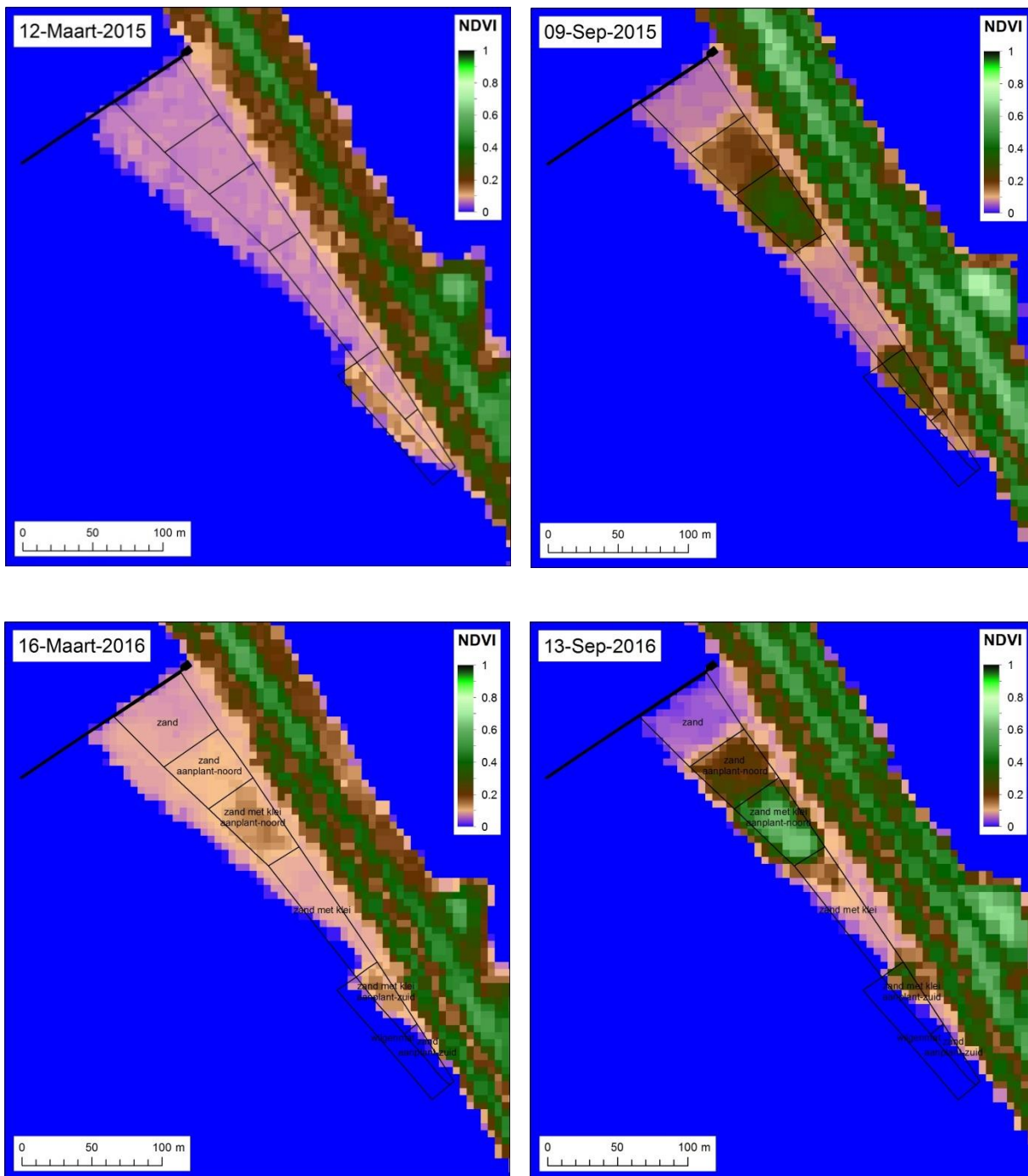
In totaal is de biomassa ontwikkeling van 7 proefvakken op de vooroever gevolgd vanaf november 2014. Daarnaast is er ook gekeken naar de biomassa ontwikkeling van loofbomen vlakbij de vooroever ter referentie. De resolutie waarmee de NDVI-groenindex beelden beschikbaar komen is geresampled naar 5 m (van oorspronkelijk 6 m resolutie). Om mixeffecten aan de randen van de proefvakken te voorkomen zijn de proefvakken met 5 m verkleind.

Figuur 7.5 geeft de NDVI-groenindex kaarten weer aan het eind van de winterperiode (maart 2015 en 2016) en in september 2015 en 2016, de periode met de maximale biomassa aanwezigheid op de vooroever.

Vergeleken met Figuur 7.2 is duidelijk waarneembaar de grovere resolutie van de NDVI-pixels. In maart 2015 is er nog geen onderscheid te zien tussen de verschillende proefvakken. Alleen de wilgenmatten hebben een iets hogere waarde doordat ze een andere kleur hebben dan zand. Op 9 september 2015 zijn de verschillende vegetatieaanplantingen tussen de proefvakken duidelijk waarneembaar. En ook het verschil in grondsoort wordt weerspiegeld door de biomassa ontwikkeling; waar de bodem alleen bestaat uit zand groeit de vegetatie niet zo goed als waar de bodem bestaat uit zand met klei vermengt.

Een jaar later in maart 2016 zijn de verschillen in de proefvakken minder geworden, maar nog steeds waarneembaar. In de zuidelijke punt is echter al te zien dat de afslag zover is gevorderd dat gedeeltes van de zuidelijke proefvakken geheel of gedeeltelijk verdwijnen onder water. In september is dat proces nog verder gevorderd. Wat echter heel duidelijk zichtbaar is dat de noordelijke aanplant op zand met kleibijmenging een stuk groener is dan in dezelfde periode een jaar eerder. Hier is de aanplant dus goed tot ontwikkeling gekomen. Dit is ook het geval voor de niet afgeslagen zuidelijke stukken zand/klei met aanplant.

Echter de noordelijke aanplant op puur zand laat een veel mindere biomassa ontwikkeling zien, ongeveer gelijk aan het jaar ervoor. Blijkbaar is de grond te weinig vruchtbaar voor een goede biomassa ontwikkeling, of biedt de grond te weinig houvast voor de aanplant. Op de vakken zonder aanplant is de eerste spontane vegetatiegroei waarneembaar op zand met kleibijmenging. De overige zandgebieden laten vrijwel geen vegetatieontwikkeling zien.



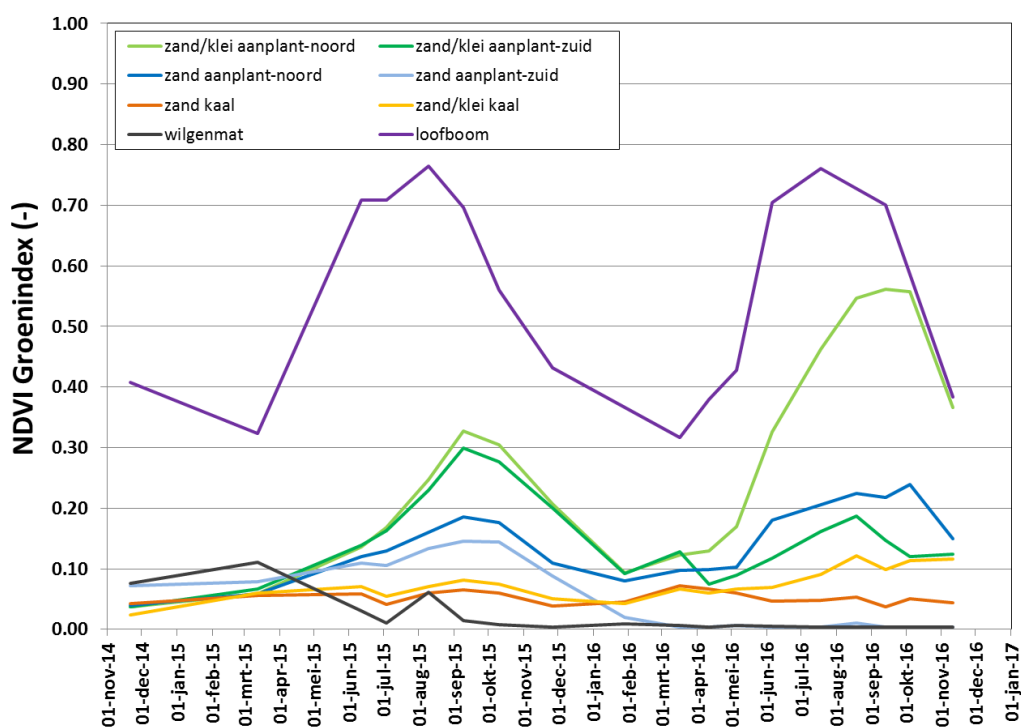
Figuur 7.5 De NDVI-groenindex op 12 maart 2015, 9 september 2015, 16 maart 2016 en 13 september 2016.

In Figuur 7.6 worden de NDVI-groenindex waarden per proefvak berekend voor alle dagen met satellietopnames en uitgezet in de tijd. Duidelijk is weer het verschil tussen aanplant op zand versus aanplant op zand/klei. Maar ook de kleinere verschillen tussen de proefvakken worden nu goed waarneembaar, zoals het verschil tussen de noordelijke aanplant versus de zuidelijke aanplant in 2015. De

noordelijke aanplant heeft in 2015 net iets hogere waarden dan de zuidelijke aanplant, zowel op zand als op zand/klei.

In de winter van 2015/2016 zijn een tweetal vakken verzwoegen door het water, terwijl de andere zuidelijk vakken gedeeltelijk afgeslagen zijn. Hierdoor kan het dat de aanplant op zand met kleibijmenging in het zuiden een gemiddelde lage waarde heeft; dat is de optelsom van een stuk groene aanplant en een stuk water met nul-waarden. De noordelijke aanplant op zand met kleibijmenging bereikt veel hogere waarden in 2016 dan in 2015; ook komt de vegetatie veel eerder op in 2016. Dit is het gevolg van de relatief late aanplant in het voorjaar van 2015.

Als laatste is nog gekeken naar het signaal van loofbomen ter referentie. Dit is een gesloten gewas in de zomer met vaak meerdere bladlagen. In de zomer geeft dit hogere NDVI-waarden. Dit houdt in dat de aangeplante vegetatie in 2015 nog geen gesloten gewas vormt. De maximale NDVI-waarde in 2016 van de aanplant is bijna 0.6; dit is ongeveer de NDVI-waarde waarbij we kunnen spreken van een gesloten vegetatie.



Figuur 7.6 De NDVI-groenindex per proefvak over de tijd. NDVI-loofboom is als referentie toegevoegd.

8.4.4 CONCLUSIES

Op de vooroever zijn 6 proefvakken aangelegd in het voorjaar van 2015 met verschillende vegetatietypes en grondsoorten. De biomassa ontwikkeling binnen deze vakken is gekwantificeerd met de NDVI-groenindex. De NDVI-groenindex is een indicator van de hoeveelheid groene biomassa met een waarde tussen de 0 en 1.

Het is duidelijk dat de biomassa ontwikkeling binnen de vakken met een zand/klei mix veel beter gaat dan in de vakken met alleen zand als grondsoort. In 2016 is de vegetatieontwikkeling binnen de vakken met aanplant op zand met klei pas goed tot wasdom gekomen; terwijl de aanplant op alleen zandgrond minder tot wasdom komt. Op de niet aangeplante delen op zand is er geen spontane vegetatie gevestigd.

Met relatief weinig capaciteitsinzet is er met behulp van satellietbeelden een schat aan kwantitatieve informatie ontsloten. Deze remote sensing monitoring wordt ook in 2018 voortgezet en verder gekoppeld aan de veldinventarisaties. Voorts zal worden nagegaan in welke mate de NDVI-index gebruikt kan worden bij adviezen over beheer van de struweel vegetatie.

Voor meer informatie kan worden verwezen naar de finale versie van de monitoringsrapportage (EcoShape/Deltares/WEnR/HKV, 2018).

Literatuur

- Alkyon. (2007). *Versterking Zwakke Schakel West Zeeusch-Vlaanderen; Achtergrondrapportage duinveiligheid en morfologie, samenvattend document*. Alkyon rapportage A1642, november 2007.
- Alterra. (2016). *Analyse korrelkarakteristieken*. Interim-toelevering t.b.v. werk/achtergrondrapportage, 21 maart 2016.
- Arcadis. (2011). *Versterking zwakke schakel Noord-Holland; Basisvariant veiligheid, onderdeel morfologie*. Rapportage C04021.002599/A2559, 28 maart 2011.
- Arcadis. (2014). *Pilot voorlandoplossing Houtribdijk, zettingsanalyse*.
- Arcadis. (2015a). *Modelverkenning*. Werkdocument versie 27 mei 2015.
- Arcadis. (2015c). *Morfologische analyses*. Werkdocument versie 9 juli 2015.
- Arcadis. (2016b). *Morfologische modellering pilot Houtribdijk - Plan van Aanpak Numerieke modellering - vervolgstappen, mei 2016*.
- Arcadis. (2016c). *Research proposal sandy foreshore pilot Houtribdijk K. van Ekdorp, augustus 2016*.
- Arcadis. (2018). *Zetting Pilot Houtribdijk*. Arcadis-rapportage d.d. 21 februari 2018.
- Arcadis, Deltares, HKV. (2018). *POV Waddenzeedijken - Effectiviteit voorlanden HR; Onderzoeksrapportage Fase C. Eindrapportage d.d. 26 maart 2018*.
- Arcadis/RHDHV/HHNK. (2015a). *Oeverdijkrapportage deel 1 - veiligheidsontwerp*. Arcadis/HHNK-rapportage 15.0015935 d.d. 22 mei 2015.
- Arcadis/RHDHV/HHNK. (2015b). *Oeverdijkrapportage deel 2 - basisontwerp*. Arcadis/HHNK-rapportage 15.0015937 d.d. 21 mei 2015.
- Deltares. (2016). *Overzicht resultaten vegetatie aanleg en ontwikkeling*. Interim-toeleveringen t.b.v. werk/achtergrondrapportage, 22 maart 2016.
- EcoShape. (2013). *Projectplan pilotoplossing Houtribdijk; Ontwerp, uitvoering, monitoring en resultaten*. EcoShape, mei 2014 (definitief).
- EcoShape. (2014). *Pilot Voorlandoplossing Houtribdijk, Monitoringsprogramma*. Deltares/Alterra, Rapport 1209013-000-ZWS-0019, 12 november 2014, definitief.
- EcoShape. (2015a). *Pilot Voorlandoplossing Houtribdijk, Werkprogramma (update febr. 2015)*. Arcadis, Rapport C03041.003128.0100_078336593:A, Definitieve versie, 11 maart 2015.
- EcoShape. (2015c). *Pilot Voorlandoplossing Houtribdijk, Interim-rapportage juli 2015*. Arcadis, Rapport C03041.003128.0100_078499877:0.3, Interim-versie, 28 augustus 2015.
- EcoShape. (2015d). *HPZ innovatieproject; Werkplan thema B*. Versie juli 2015 (concept).
- EcoShape. (2017a). *Pilot Voorlandoplossing Houtribdijk, Interim-rapportage februari 2017*. Arcadis, Rapport C03041.003128.0100, Interim-versie, 079132021-A Definitief, 22 februari 2017.
- EcoShape. (2017b). *BwN pilot Houtribdijk - Voorstel aanvullende metingen; 10 juli 2017*.
- EcoShape. (2017c). *BwN pilot Houtribdijk - Financiering aanvullende metingen; 24 juli 2017*.
- EcoShape. (2018a). *Pilot Voorlandoplossing Houtribdijk, Interim-rapportage februari 2018*. Arcadis, Rapport C03041.003128.0100, Interim-versie, 079592454:A - Definitief, 21 februari 2018.
- EcoShape/Arcadis. (2015b). *Pilot Voorlandoplossing Houtribdijk, Lessons Learned vergunningentraject*. C03041.0028.0100_072275948:A, Definitief 11 maart 2015.
- EcoShape/Arcadis. (2015b). *Pilot Voorlandoplossing Houtribdijk, Lessons Learned vergunningentraject*. Arcadis, Rapport C03041.0028.0100_072275948:A, Definitieve versie 11 maart 2015.
- EcoShape/Arcadis. (2015c). *Pilot Voorlandoplossing Houtribdijk, Lessons Learned aanleg*. C03014.003128.0100_078276043:A, Definitief, 11 maart 2015.

- EcoShape/Arcadis. (2016a). *Pilot Voorlandoplossing Houtribdijk, Guideline Vergunningen*. Arcadis, Rapport C03041.003128.0100, 078680109:A-Definitief, 30 maart 2016.
- EcoShape/Arcadis. (2018). *BwN_pilot_Houtribdijk-Analyse afgraving vooroever proefsectie - Morfologische ontwikkeling rondom afgraving*. Arcadis-rapportage C03041.003128 d.d. 15 oktober 2018.
- EcoShape/Deltares/HKV. (2018). *BwN_pilot_Houtribdijk-Aanvullende metingen en modelering pilot Houtribdijk. Rapportage met kenmerk 1209013-006-ZWS-0003 d.d. 26 juni 2018*.
- EcoShape/Deltares/WEnR/HKV. (2018). *Monitoring pilot Houtribdijk. Deltares-rapportage met kenmerk 1209013-000-ZWS-0034 d.d. 2 juli 2018*.
- EcoShape/Deltares/WEnR/RHDHV. (2018). *BwN pilot Houtribdijk - Guideline beheer en onderhoud zandige voorlanden. Definitieve versie oktober 2018*.
- EcoShape/HKV. (2018). *BwN pilot Houtribdijk - Guideline Ontwerp en beoordeling van dijk-voorlandsystemen. Definitieve versie oktober 2018*.
- EcoShape/RHDHV. (2018). *BwN_pilot_Houtribdijk-Business Case zandige vooroever. Definitieve versie oktober 2018*.
- EcoShape/RHDHV/Arcadis. (2016b). *Pilot Voorlandoplossing Houtribdijk, Guideline Aanleg*. Arcadis, Rapport C03041.003128.0100, 078680471:A-Definitief, 30 maart 2016.
- Ekdorf, K. v. (2017). *Cross-shore profile and grain size development on a foreshore: A conceptual model (draft V4)*.
- Fugro Geoservices. (2014). *Geotechnisch onderzoek Markermeer tbv uitbreiding Houtribdijk*.
- HHNK. (2014). *Voorontwerp Projectplan (VOPP) dijkversterking Markermeerdijken*.
- HKV. (2018). *Pilot voorlandoplossing Houtribdijk - Analyse hydrodynamica (t/m T23). Memorandum PR2729.20 d.d. 6 april 2018*.
- KIMa/Arcadis. (2018). *KIMa - Thema 1 - Analyse en monitoring Zandige randen Marker Wadden*.
- Rijkswaterstaat. (2004). *Recept met uitgangspunten voor het bepalen van de ontwerprandvoorwaarden ten behoeve van de provinciale planstudies langs de Nederlandse kust*. Kennis Coördinatie Punt Zwakke Schakels, 31 augustus 2004.
- Shore Monitoring & Research. (2018). *Veldrapportage(s) monitoring pilot Houtribdijk*. Werkdocumenten #01 t/m #23; 20 maart 2018.

Annex I

NATUURLIJKE GEOMETRIE VAN VOORLAND- OPLOSSINGEN

1 Inleiding

1.1 ALGEMEEN

Dit rapportagedeelte betreft het basisproduct voor het ontwerp van de waterkering en wordt in het werkplan omschreven als ‘Rapport I: Natuurlijke geometrie van voorlandoplossingen’. In het volgende worden de in dit kader relevante onderwerpen besproken en van een nadere uitwerking voorzien. Waar van toepassing wordt hierbij verwezen naar meer specifieke achtergrondrapportages waaronder (EcoShape/Deltares/WEnR/HKV, 2018) en (EcoShape/Deltares/HKV, 2018).

1.2 INHOUD CONFORM WERKPLAN

1.2.1 INLEIDING

In het werkplan staat beschreven wat de (oorspronkelijke) inhoud van dit onderdeel van de rapportage is. In het volgende is deze ter referentie opnieuw kort aangehaald.

In deze achtergrondrapportage wordt op basis van data-analyse en toepassing van numerieke modellen inzicht gegeven in:

- De natuurlijke helling van het voorland ter plaatse van de proefsectie en de mate waarin het morfologisch model XBeach deze helling kan reproduceren (vraag 1);
- De mate waarin vegetatie een voorlandoplossing kan stabiliseren (vraag 2);
- De mate waarin de geometrie van het voorland als toegepast in de pilot ook geschikt is als veiligheidsontwerp voor andere locaties (vraag 3).

Het rapport wordt opgeleverd in 2018 met een tussenrapportage in het voorjaar van 2016 (zie ook Hoofdstuk 5 planning) en is bedoeld als achtergrondrapportage voor inhoudelijke eindgebruikers. De eerste resultaten en vervolgactiviteiten zijn ook meermalen besproken in de begeleidingsgroep.

1.2.2 NATUURLIJKE TALUD HELLING (VRAAG 1)

De pilot richt zich primair op de buitenzijde van een voorlandoplossing en wel op het kennis opdoen over de meest ideale helling van het hier aanwezige talud. Basisidee is dat hier idealiter sprake is van een zogenaamde evenwichtshelling (natuurlijke talud helling). Een dergelijke helling leidt tot een geleidelijke afname van de inkomende golfaanval, zonder dat deze gepaard gaat met een significante vervorming van het profiel. Dit laatste sluit aan bij de wens om het beheer en onderhoud van het voorland zoveel mogelijk te beperken.

De pilot zal dus inzicht moeten opleveren ten aanzien van het gebruik van het concept van een dergelijke evenwichtshelling voor deze locatie en de helling van het hiermee samenhangende talud.

Effect hydraulische condities

Met behulp van data beschikbaar uit het monitoringsprogramma wordt onderzocht op welke wijze de waargenomen buitentaludhelling op de pilotlocatie afhangt van de hydraulische condities en over welk deel van het profiel deze helling te verwachten is. Doel is om beter inzicht te krijgen in het afzonderlijke en gecombineerde effect van waterstand en golven op de natuurlijke helling.

Vraag daarbij is bijvoorbeeld of een natuurlijke taludhelling die behoort bij een extremere combinatie van waterstand (iets hogere waterstand) en golfaanval (iets zwaardere golfaanval) geometrisch gezien in het verlengde ligt van het talud dat hoort bij een normale combinatie van waterstand en golfaanval. De combinatie van beide is immers leidend voor de helling van het 'ontwerp-talud'.

Effect korreldiameter

Daarnaast zal (indien mogelijk) worden gekeken naar het effect van de (ruimtelijk) variërende korreldiameter op de proefsectie. Grover zand zal immers samengaan met een relatief steilere helling. Complicerend effect kan ook nog zijn dat er in dwarsrichting sprake is van verschillende korreldiameters, dit als gevolg van tijdens de aanleg en dagelijkse omstandigheden optredende uitzevingseffecten.

Effect zettingen

In de analyse van de profielgegevens zal tenslotte ook rekening worden gehouden met de effecten van de optredende zettingen. De waargenomen profielontwikkeling is immers een resultante van de zetting en morfologische ontwikkeling. De omvang van de opgetreden zetting volgt uit de zakkaken-informatie en hangt lokaal ten minste af van de omvang van de aanvulling en de dikte van de onderliggende weinig draagkrachtige laag. Dicht bij de dijk speelt ook de zetting-reducerende aanwezigheid van het dijkcunet een rol.

De input voor bovenstaande activiteiten betreffen monitoringsdata ten aanzien van de waterstanden, golfaanval, de meteo-data, de ingemeten profielen, de zettingsinformatie en sediment eigenschappen uit de bodemonsters.

Effect rijsmatconstructie

Op de grens van vak 3 en 4 van de proefsectie zijn rijsmatten aangelegd met de bedoeling om de groei van rietvegetatie te bevorderen. De rijsmatconstructie kan in deze zin als een middel worden gezien. Feit is echter ook dat de aanwezigheid van deze constructie (afhankelijk van de momentane staat ervan) lokaal effect zal hebben op de morfologische ontwikkeling en daarmee op een ter plaatse aanwezige profielvorm. Ook dit effect zal nader worden gekwantificeerd.

De hoofdaandacht gaat echter uit naar het bredere deel van het proefvak waar een dergelijke constructie afwezig is en de morfologische ontwikkeling meer natuurlijk en ongestoord is. Bij de analyses zal het effect van de vegetatie en de ondersteunende maatregel (het middel) aandacht krijgen. Ook zal worden gekeken worden naar de verschillen tussen wel/geen vegetatie en wel/geen rijsmatconstructies. In dit kader zal ook de effectiviteit van het aangebrachte windscherm worden beschouwd.

In de rapportage moeten de resultaten van de verschillende analyses worden beschreven.

1.2.3 VALIDATIE MORFOLOGISCH MODEL (VRAAG 1)

Met het morfologische model XBeach wordt getracht de dynamiek in de natuurlijke talud helling en daarbij horende profielontwikkeling zo goed mogelijk te reproduceren. Met het gevalideerde model kan inzicht worden verkregen in het afzonderlijk effect van waterstand en golven op de natuurlijk taludhelling en profiel dynamiek. Ook kan aanvullend inzicht verkregen worden in het effect van de korreldiameter. Doel is om modelinstellingen af te leiden waarmee het model het beste de profiel dynamiek uit de monitoring data kan reproduceren. Op basis van deze instelling (settings) kan het XBeach-model vervolgens toegepast worden om het veiligheidsontwerp te definiëren en te optimaliseren. Ook kan deze worden gebruikt voor het definiëren van een concept toetsingsprotocol.

De input voor bovenstaande activiteiten betreffen monitoringsdata ten aanzien van de waterstanden, golfaanval, de meteo-data, de ingemeten profielen, de zettingsinformatie en sediment eigenschappen uit de bodemonmonsters. Voor de modellering van XBeach zal gebruikt worden van de laatst beschikbare release versie van XBeach (open source freeware).

1.2.4 STABILISEREN VOORLAND MET VEGETATIE (VRAAG 2)

In de pilot zijn uiteenlopende vakken gespecificeerd met verschillende bodemeigenschappen (wel of niet innemen van klei in toplaag), type vegetatie en vegetatie dichtheden. Ook is er sprake van een zich in de tijd ontwikkelende vegetatie. Met behulp van de beschikbare data uit het monitoringsprogramma wordt een verband gelegd tussen de vegetatie eigenschappen (hoogte, stijfheid, dichtheid) en de stabiliteit van het voorland (morfodynamiek). Op basis van deze analyses wordt getracht beter inzicht te krijgen in het relatieve belang van enerzijds de golfremming door vegetatie en anderzijds de erosiebestendigheid van de bodem door de aanwezigheid van het wortelstelsel van de vegetatie.

In het kader van het monitoringsprogramma vinden er regelmatig vegetatieopnamen plaats. De metingen in augustus zijn essentieel want ze geven aan wat er aan maximale biomassa op het talud staat. Dit is van invloed op de golfuitdoving die afhankelijk is van de hoeveelheid biomassa op het talud ten tijde van een 'storm'. Vegetatie op een voorland beïnvloedt in de inkomende golven waardoor de golfbelasting op het voorland en de daarmee samenhangende bodemverandering iets afneemt. Dat kan in theorie leiden tot een stabiel voorland.

Daarnaast kunnen wortels van de vegetatie de toplaag van het voorland extra cohesie geven waardoor het voorland (onder gelijke belasting) minder gevoelig voor erosie is (wat ook leidt tot een stabiel voorland). Ook hiervoor zijn de metingen in augustus essentieel omdat dan daarmee kan worden vastgesteld hoeveel productie er in een seizoen behaald kan worden (opbouw ondergrondse biomassa over de tijd) en wat de spreiding in biomassa is over het jaar. Ook kan in augustus worden bekeken wat voor een-jarigen er zijn (ruigtekruiden, soortsaamenstelling (bijdrage aan meerwaarde biodiversiteit)) en zo kan worden gekeken in hoeverre die in de winter nog bijdragen aan de golfuitdoving (deze kruiden kunnen in de winter niet goed worden gedetermineerd).

Om beide effecten van elkaar te kunnen scheiden zal de data-analyse nader geanalyseerd worden met behulp van XBeach-modelering.

De data uit de pilot zal tevens worden gebruikt om de settings voor verschillende type vegetatie in XBeach af te leiden. Hierbij gaat het bijvoorbeeld om de drag-coëfficiënt en de effectieve hoogte van de vegetatie in

het model in geval van flexibele vegetatie. Het model kan immers worden gebruikt om eerder benoemde effecten los van elkaar te onderzoeken.

Resultaat van deze uitwerkingen is een eerste uitspraak over de rol van vegetatie voor stabilisatie van het voorland.

1.2.5 OPTIMAAL GEOMETRISCH VEILIGHEIDSONTWERP (VRAAG 3)

Op basis van data-analyse in combinatie met morfologische modelering van de natuurlijke talud-helling en dynamiek daarin wordt enerzijds duidelijk in hoeverre voorlanden in grote meren zich morfologisch anders gedragen als de zandige kust. Anderzijds geeft het inzicht in de toepasbaarheid van morfologische modellen als XBeach om deze dynamiek te voorspellen.

Ten behoeve van het ontwerp van een morfologisch optimale vormgeving speelt dit model als kennisdrager een belangrijke rol. Het aansturen van het model met andere condities geeft immers inzicht in welke voorlandprofielen voor andere locaties verwacht kunnen worden.

Optimale helling buitentalud

Het gevalideerde morfologische model XBeach zal worden toegepast (met eerder afgeleide modelinstellingen) om op ook voor andere locaties/omstandigheden de natuurlijke profielvorm te kwantificeren. Streven is hierbij om een relatie te leggen tussen de karakteristieken van het hydraulische klimaat, het aanwezige korrelmateriaal en de taludhelling. Deze resultaten zullen beschikbaar komen in de vorm van ontwerpgrafieken waarin de ideale helling als functie van de omgevingsparameters wordt gevisualiseerd, dit expliciet rekening houdend met de hierbij aanwezige onzekerheden. Bij de hiervoor gebruikte XBeach-modellering is immers sprake van onzekerheden omdat de waargenomen profielontwikkeling niet tot in detail kan worden gereproduceerd.

Deze uitwerking zal met name worden gebaseerd op de profielontwikkeling in het bredere gedeelte van de proefsectie (vak 1 en 2) waar de effecten van de rijsmatconstructie afwezig zijn.

Optimaal veiligheidsontwerp

Daarnaast wordt op basis van XBeach-berekeningen voor normatieve omstandigheden het veiligheidsontwerp geoptimaliseerd door de geometrie (helling, breedte en hoogte) van het voorland te variëren. Voor deze uitwerking is het uitgangspunt dat het voorland een bepaalde mate van bescherming biedt voor de achterliggende dijk. Hierbij kan onderscheid worden gemaakt tussen bijvoorbeeld een voorlandoplossing waarbij de dijk wordt ontzien en een oplossing waarbij de dijk nog wel (maar niet te veel) wordt belast. In dat laatste geval spreken we over een hybride oplossing.

Bij aanwezigheid van een voorland is de resterende golfaanval op de dijk een nette functie van de omvang van het voorland (en dus de geometrie). Bij toenemende omvang van het voorland neemt de effectieve belasting af van 'origineel' (zonder voorland of met beperkt volume), via 'voldoende' (voor het daadwerkelijk voldoende reduceren van de belasting bij een hybride oplossing) tot volledig (stand-alone zandige versterking voor de dijk).

Voor de uitwerking zal in eerste instantie de zelfstandige voorlandoplossing worden uitgewerkt. Dit betekent dat de profielverandering tijdens de normatieve condities niet mag leiden tot een belasting op de dijk. De 'afslag' van het voorland moet dus binnen het voorlandprofiel worden opgevangen.

Binnen de combinatie helling, breedte en hoogte zijn er meerdere 'oplossingen' mogelijk voor een voldoende robuust voorland. Een flauwere helling (en dus meer dissipatie van inkomende golfenergie) zal

immers vragen om een minder brede kruin. Ook de hoogte van het voorland heeft een effect op deze breedte, waarbij een hoger voorland minder breedte zal vragen.

De betrouwbaarheid van de verkregen resultaten zal hierbij de nodige aandacht krijgen. Het gaat immers om een extrapolatie van modelresultaten buiten het validatie-gebied. Speciale aandacht zal daarbij moeten uitgaan naar de situatie waarbij het kruinniveau van het voorland slechts beperkt hoger ligt dan de maatgevende waterstand omdat ervaringen leren dat dit model-technisch lastig kan zijn (golfoploop op de bovenzijde).

Deze exercitie leidt tot een inzicht in de mogelijke en optimale geometrie voor een voorlandoplossing. Het resultaat hiervan zal worden gevisualiseerd in de vorm van ontwerpgrafieken.

Soortgelijke uitwerkingen zijn ook voorzien voor het geval dat de achterliggende dijk wel een waterkerende functie heeft. In dat geval is de resterende golfaanval op de dijk het maatgevende criterium.

De minimaal benodigde input data voor bovenstaande analyses betreffen hydraulische condities, materiaaleigenschappen van het voorland en globale bodemligging. Daarnaast zijn de normatieve hydraulische condities vereist. De resultaten van deze uitwerking zullen worden gebruikt voor de formulering van ontwerp-guidelines.

1.3 BEANTWOORDING VAN DE VRAGEN

In de volgende secties is de beantwoording van de initieel gestelde vragen ter hand genomen. Daarbij wordt ter onderbouwing waar mogelijk verwezen naar de in dit kader relevante achtergrondrapportages waaronder (EcoShape/Deltares/WEnR/HKV, 2018) en (EcoShape/Deltares/HKV, 2018).

2 Natuurlijke taludhelling

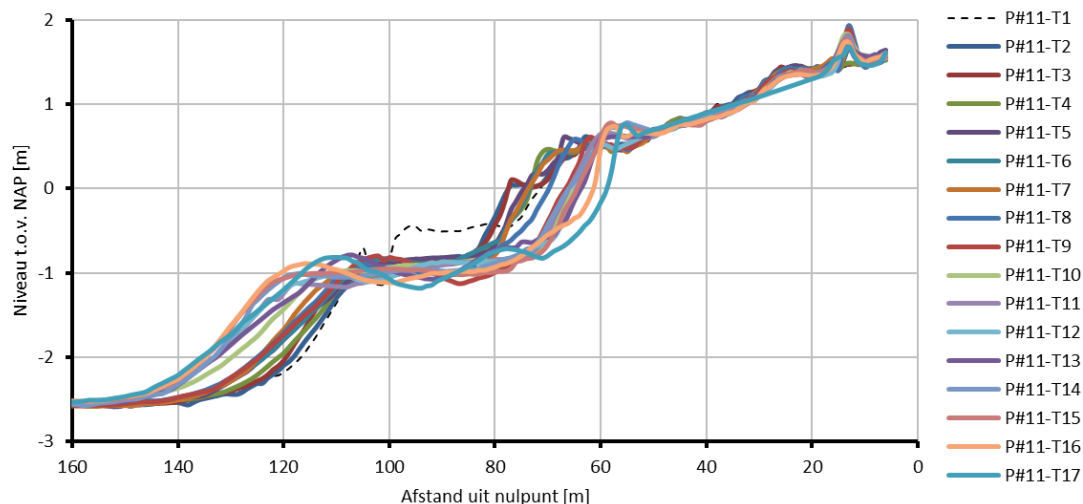
2.1 ALGEMEEN

Dit hoofdstuk is in het resultaat van de nadere analyses toegelicht en zijn de mede op de onderliggende uitwerkingen gebaseerde conclusies en bevindingen beschreven.

2.2 STABIELE PROFIELVORM

2.2.1 AANPAK

De karakteristieke profielvorm van het dwarsprofiel van de proefsectie kan worden afgeleid uit de in het midden van de centrale sectie aanwezige dwarsprofielen. Voor het op 120 m van de damwand afgelegen profiel #11 is deze profielontwikkeling weergegeven in Figuur I - 2-1.

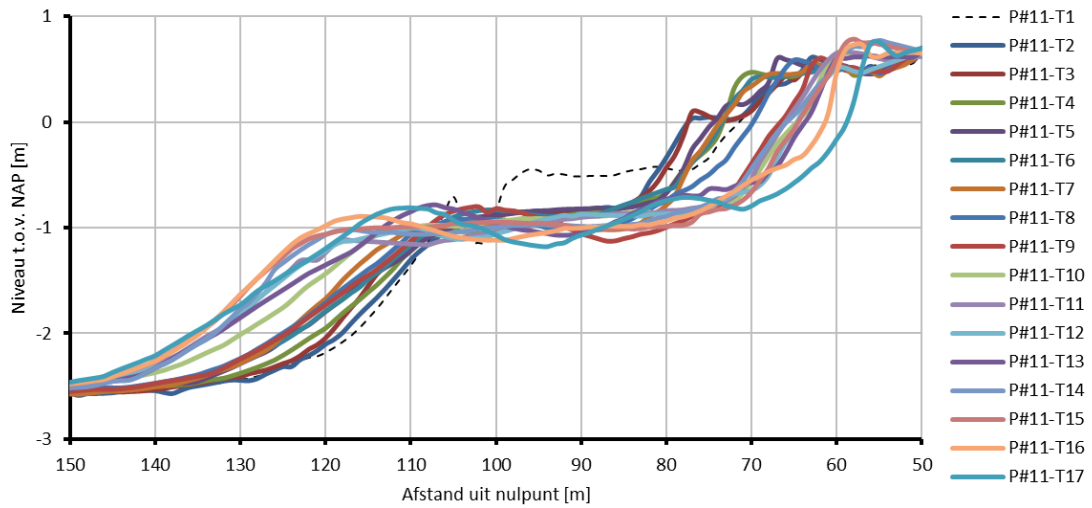


Figuur I - 2-1 Overzicht ontwikkeling karakteristiek dwarsprofiel in de centrale sectie (profiel #11).

Te zien is dat het initieel aangelegde profiel ((P#11-T1) beneden de waterlijn snel vervormd tot iets wat sterk vergelijkbaar is met de andere profielen.

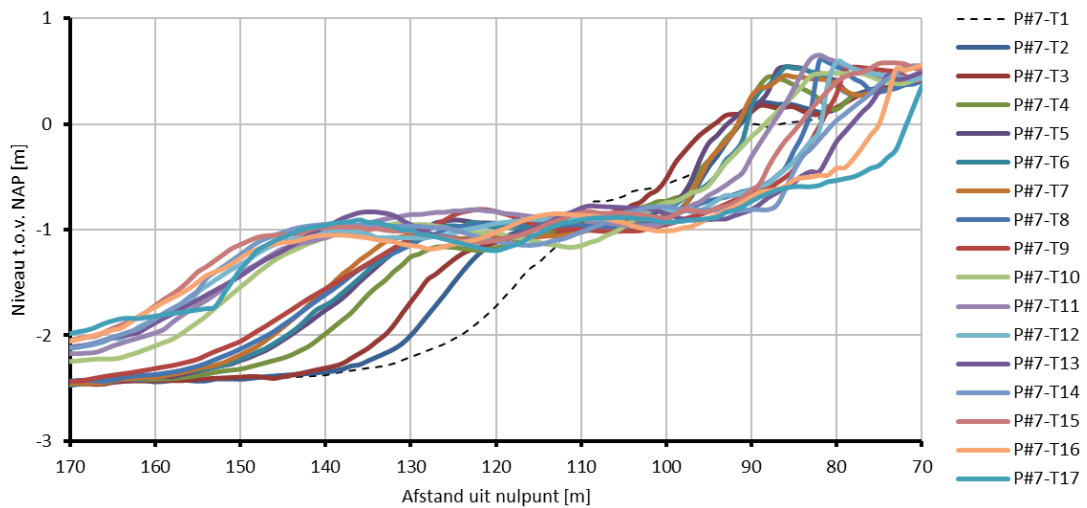
Met name de ontwikkeling van een relatief steil 1 : 10 talud rond de waterlijn valt hierbij op. Afhankelijk van de opnamedatum ligt dit profieldeel echter op een andere positie ten opzichte van het gehanteerde nulpunt (voorzijde dijk).

Dit profiel is in iets meer detail nogmaals weergegeven in Figuur I - 2-2.

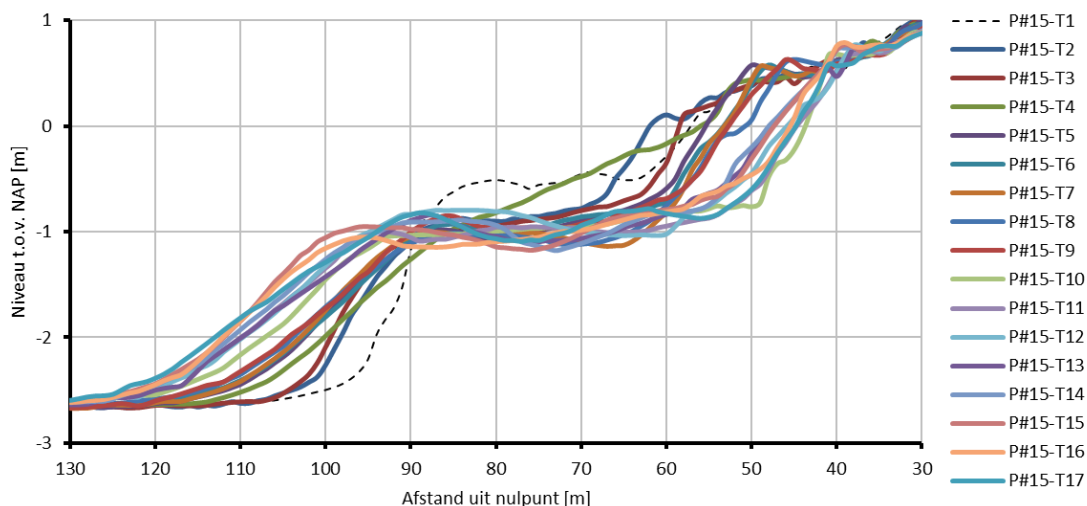


Figuur I - 2-2 Detail ontwikkeling karakteristiek dwarsprofiel in de centrale sectie (profiel #11).

Een vergelijkbare profielontwikkeling is ook te zien in een 60 m westelijk of oostelijk gelegen profiel (zie Figuur I - 2-3 en Figuur I - 2-4). Dit betekent dus dat er sprake is van in principe vergelijkbare profielvormen.



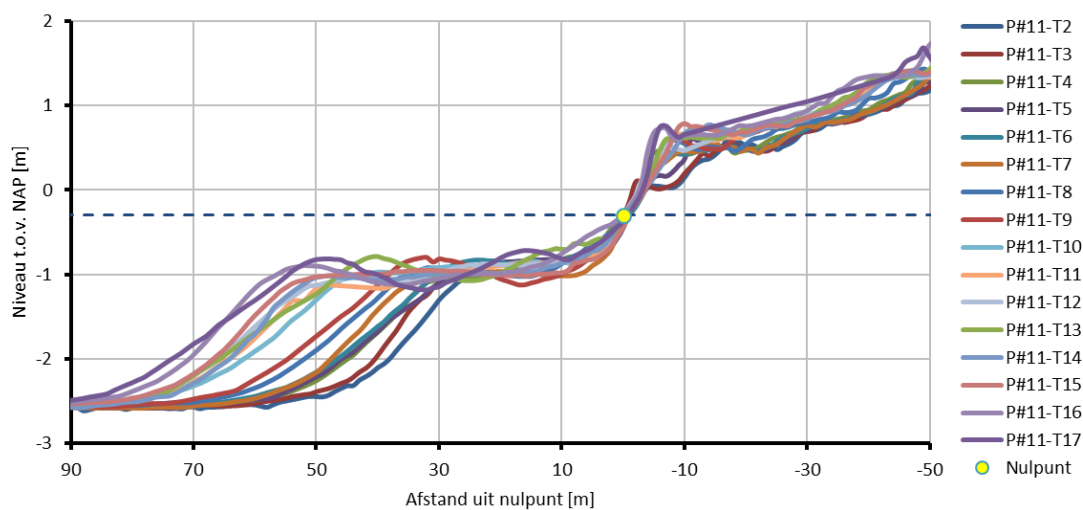
Figuur I - 2-3 Detail ontwikkeling karakteristiek dwarsprofiel 60 m westwaarts (profiel #07).



Figuur I - 2-4 Detail ontwikkeling karakteristiek dwarsprofiel 60 m oostwaarts (profiel #15).

2.2.2 ANALYSE PROFIELVORM

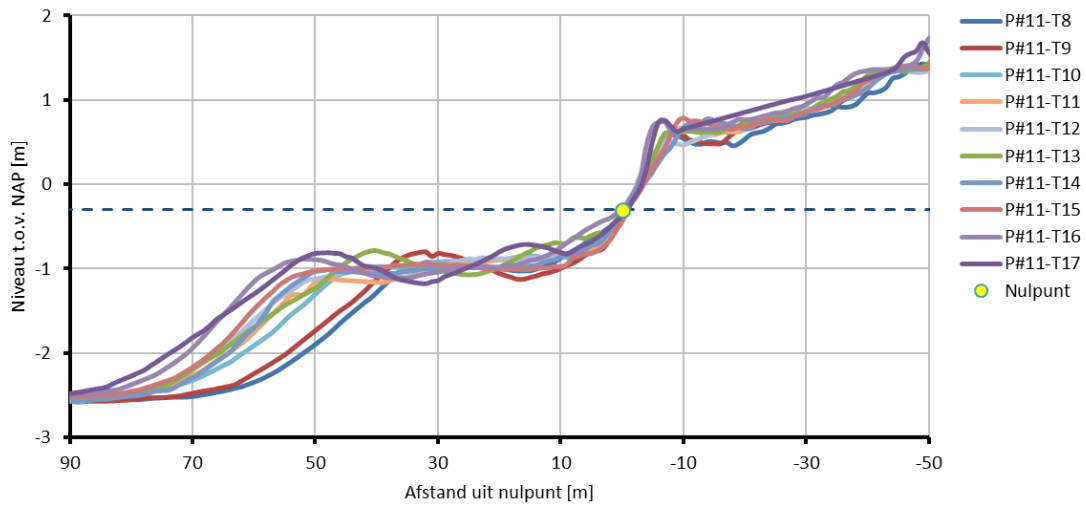
In Figuur I - 2-5 zijn voor dwarsprofiel #11 dezelfde profielen gegeven, maar nu zijn deze zodanig verschoven dat er sprake is van een samenvallende NAP-0,3 m positie. Dit laatste niveau is gekozen omdat deze als karakteristieke waterstand (als gemiddelde van zomer- en winterpeil) mag worden beschouwd.



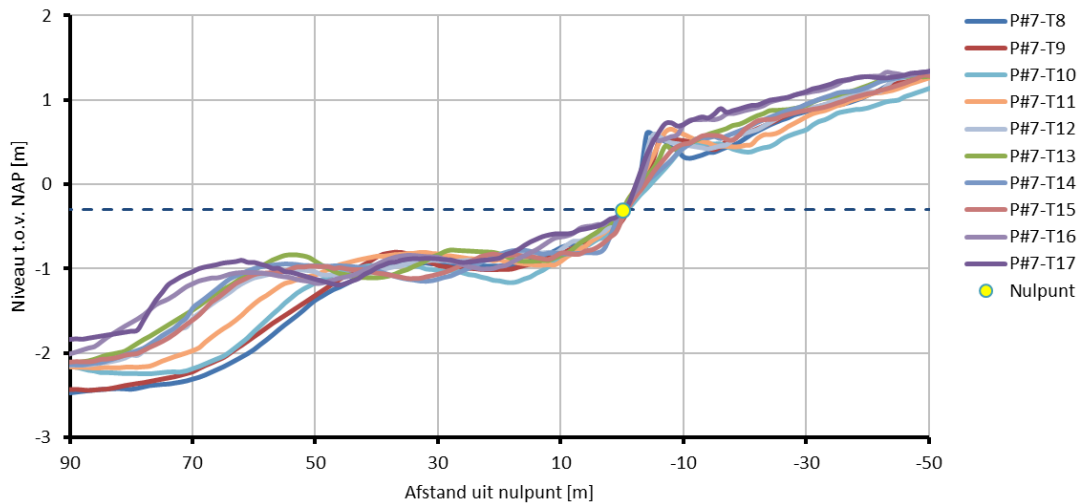
Figuur I - 2-5 Ontwikkeling karakteristiek dwarsprofiel in de centrale sectie (profiel #11) ten opzichte van doorsnijding op NAP-0,3 m niveau.

Deze figuur en het in Figuur I - 2-6 **Error! Reference source not found.** gegeven detail laat zien dat er sprake is van een steil talud rond de waterlijn en een relatief vlak profieldeel tussen grofweg NAP-0,8 en NAP-1,0 m.

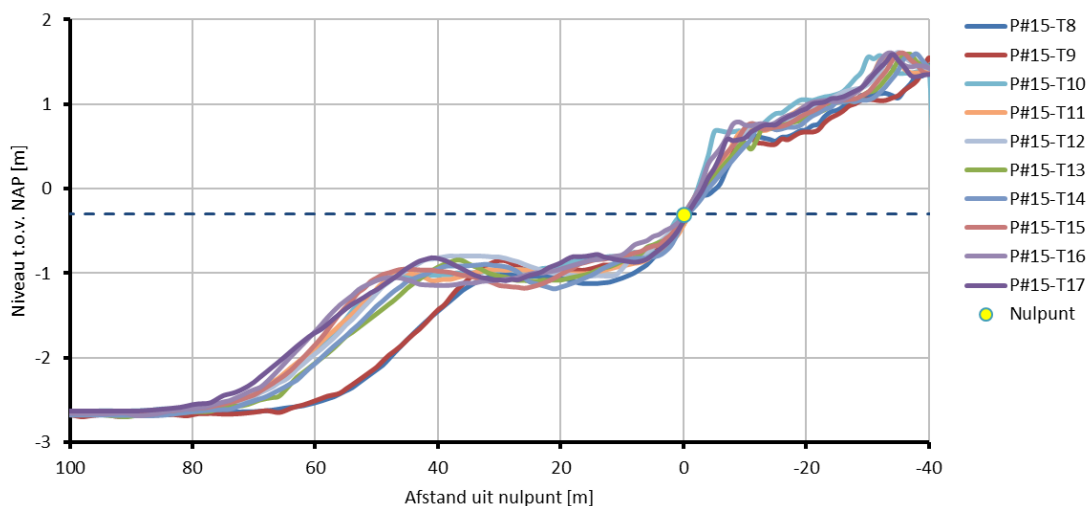
Een dergelijke profielvorm kan blijkbaar als karakteristiek worden gezien. Deze is immers ook aanwezig in verschoven versies van een 60 m oostelijk of westelijk gelegen profiel (zie Figuur I - 2-7 en Figuur I - 2-8).



Figuur I - 2-6 Detail ontwikkeling karakteristiek dwarsprofiel in de centrale sectie (profiel #11) ten opzichte van doorsnijding op NAP-0,3 m niveau voor meest recente peilingen.



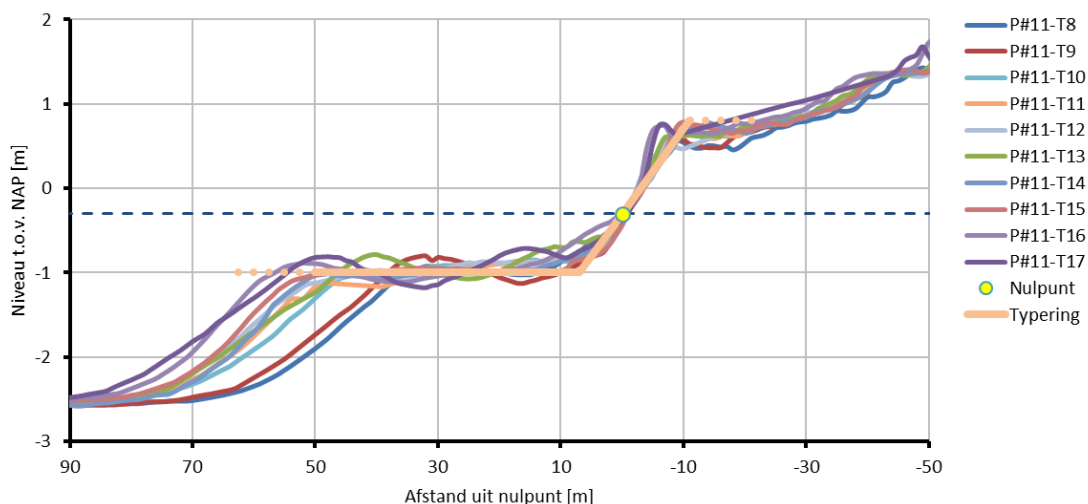
Figuur I - 2-7 Detail ontwikkeling ander, meer westelijk gelegen dwarsprofiel in de centrale sectie (profiel #07) ten opzichte van doorsnijding op NAP-0,3 m niveau voor de 10 laatste peilingen.



Figuur I - 2-8 Detail ontwikkeling ander, meer oostelijk gelegen dwarsprofiel in de centrale sectie (profiel #15) ten opzichte van doorsnijding op NAP-0,3 m niveau voor de 10 laatste recente peilingen.

2.2.3 GESCHEMATISEERDE PROFIELVORM

In Figuur I - 2-9 is deze typering van de dwarsprofielvorm schematisch weergegeven. Het strandtalud bevindt zich tussen NAP-1 m (het plateau niveau) en de bovenzijde van de swash-berm (in de eindsituatie rond NAP+0,8 m). De breedte van het plateau is hierin nog een variabel en hangt af van zowel het tijdstip als de positie van het profiel in langsrichting. De breedte van het plateau is in de orde van 40 m.



Figuur I - 2-9 Schematisatie karakteristiek dwarsprofiel in de centrale sectie (profiel #11) ten opzichte van doorsnijding op NAP-0,3 m niveau.

2.2.4 CONCLUSIES

De analyses leiden voor wat betreft de profielvorm tot de volgende conclusies.

Er ontstaat al vrij snel een min of meer stabiele profielvorm waarbij de vorm van het initieel aangelegde profiel eigenlijk al niet meer ter zake doet.

Dit profiel wordt gekenmerkt door de aanwezigheid van een relatief steil talud (1 : 10) rond de waterlijn met een achterliggende swash-berm. Het niveau van deze laatste neemt in de tijd gezien geleidelijk iets toe tot ongeveer NAP+0,8 m, zijnde een meter boven de gemiddelde waterstand. De steile helling van het profiel hangt in deze zone samen met de aanwezigheid van relatief grof materiaal in deze omgeving.

Aan de voorzijde van de het 'strandtalud' ontwikkelt zich een nagenoeg horizontaal plateau rond het NAP-1 m niveau. De evenwichtsbreedte hiervan is op basis van deze beschouwing nog niet helemaal duidelijk. Bij de beschouwing van de ontwikkeling van de proefsectie wordt hier nog iets uitgebreider op teruggekomen.

De vraag doet zich overigens voor in hoeverre deze profielvorm, en dan met name de breedte van het voorliggende plateau specifiek afhankelijk is van de lokale configuratie. Deze vraag was ook de aanleiding tot de uitvoering van het zogenaamde aanvullende onderzoek (EcoShape/Deltares/HKV, 2018), (EcoShape/Arcadis, 2018). In Annex III wordt uitgebreider op deze kwestie teruggekomen.

2.3 EFFECT HYDRAULISCHE CONDITIES

Uit de analyses blijkt dat het (karakteristieke) dwarsprofiel zich geleidelijk ontwikkelt waarbij er geen directe relatie aanwezig lijkt te zijn met het af en toe optreden van een zwaardere storm. Wel lijkt het niveau van de swash-berm samen te hangen met het totaal aantal zwaardere stormen dat is gepasseerd. Hierbij is overigens niet alleen de golfhoogte maar ook de met deze golfaanval samenhangende waterstandsopzet van belang. Juist de correlatie tussen beide speelt een belangrijke rol.

Voor het daadwerkelijk onderbouwd kunnen duiden van het effect van de hydraulische condities op de min of meer stabiele profielvorm lijkt het beschouwen van de profielontwikkeling op een andere locatie met afwijkende hydraulische omstandigheden het meest voor de hand liggend. Door het uitvoeren van het onderzoek naar het gedrag van de zandige randen op de Marker Wadden wordt hier op dit moment al invulling aan gegeven (KIMa/Arcadis, 2018).

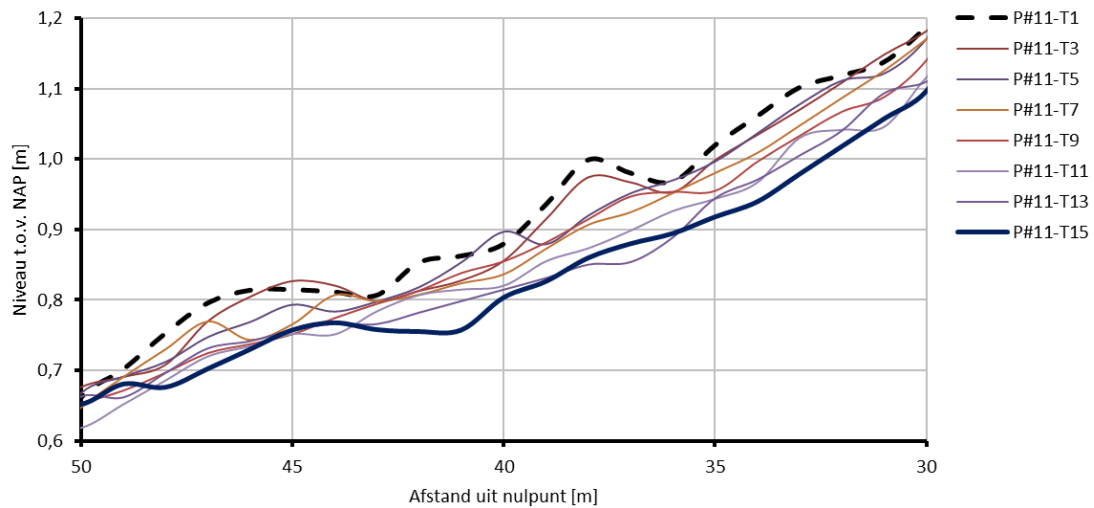
2.4 EFFECT KORRELDIAMETER

Duidelijk is dat de aanwezigheid van grof materiaal rond de waterlijn een groot effect heeft op de vorm van het dwarsprofiel. In het volgende hoofdstuk wordt hier nog op teruggekomen.

2.5 EFFECT ZETTINGEN

Als gevolg van de aanwezigheid van zettingen (0,1 tot 0,25 m) is er in de tijd gezien sprake van een daling van het niveau van de bovenzijde van de proefsectie. Deze zakking is ook waarneembaar in het profieldeel dat buiten de invloedszone van de golfwerking ligt maar nog niet wordt beïnvloedt door de aanwezigheid van de stuifschermen achter op het talud.

Deze ontwikkeling is voor dwarsprofiel #11 weergegeven in Figuur I - 2-10.



Figuur I - 2-10 Effect zetting in ongestoorde profieldeel van dwarsprofiel #11.

Deze zettingen zijn relatief beperkt en spelen zich op andere tijdschalen af als de vervorming van het profieldeel rond de waterlijn. In principe leidt de zetting dus wel tot een extra erosie-component, maar dit effect is duidelijk ondergeschikt aan dat van de andere morfologische ontwikkelingen.

3

Validatie morfologisch model

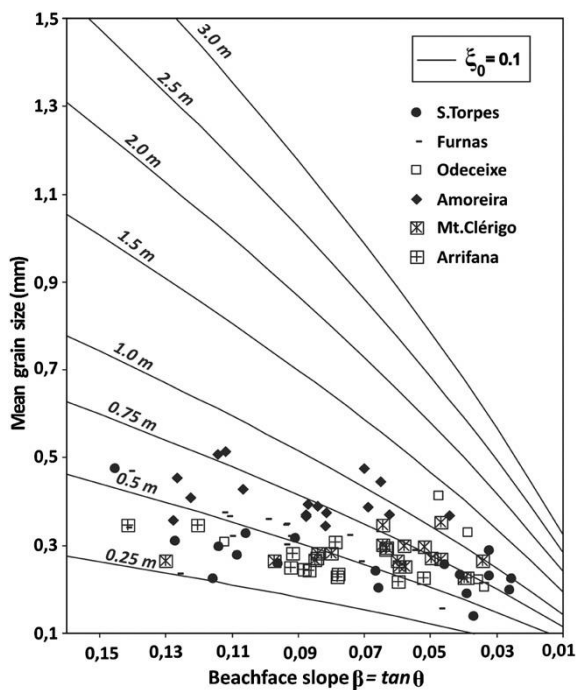
3.1 INLEIDING

Ten aanzien van dit onderwerp is in het kader van de pilot onderzocht in hoeverre het voor het ontwerp en toetsing in te zetten morfologische model (XBeach) in staat is om de waargenomen profielontwikkelingen te simuleren. Cruciaal daarbij lijkt de aanwezigheid van relatief grof materiaal. Ook infiltratie van de golfoplooptong zou hierbij van belang kunnen zijn.

3.2 AFHANKELIJKHEID KORRELDIAMETER

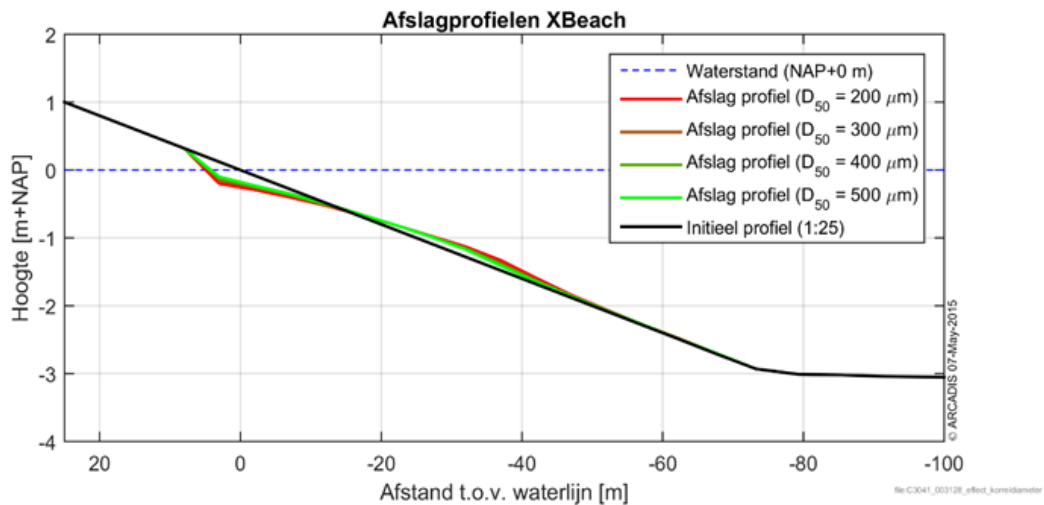
Het ontwerp (met de 1 : 30 helling) is gebaseerd op het gebruik van sediment met een karakteristieke diameter van 200 μm . Het aanwezige zand is echter veel grover (300 tot 400 μm).

Ook op basis van literatuurgegevens (zie bijvoorbeeld Figuur I - 3-1) leidt dit grovere materiaal tot een veel steilere profielhelling bij de waterlijn.



Figuur I - 3-1 Relatie tussen helling en korreldiameter.

De vigerende versie van het XBeach-model geeft in deze zin geen direct bruikbare resultaten (zie Figuur I - 3-2). Bovendien is de afhankelijkheid van de korreldiameter in het model uiterst beperkt.



Figuur I - 3-2 Afhangelijkheid profielontwikkeling van korreldiameter voor XBEACH.

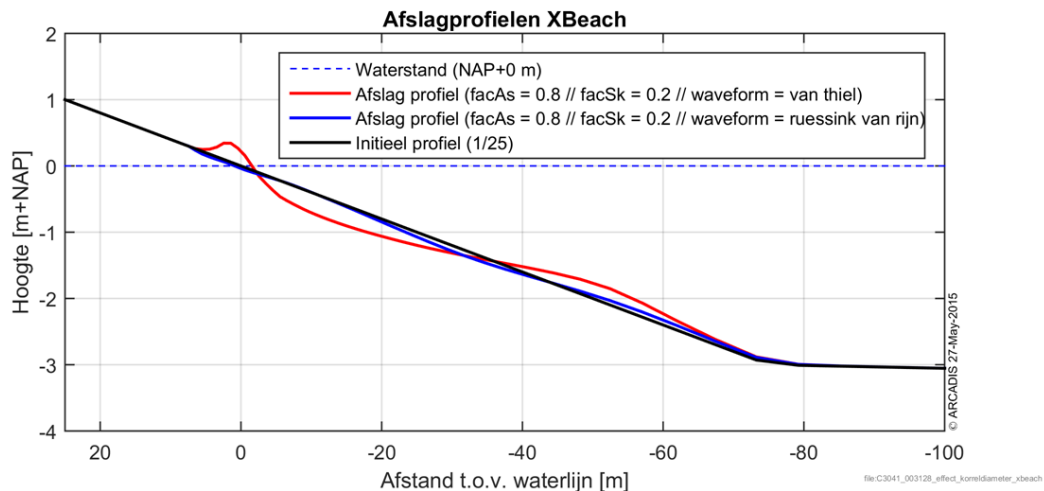
Een nadere uitwerking van deze problematiek is te vinden in een speciaal hierop toegespitst afstudeeronderzoek (Ekdom, 2017).

Een en ander leidt tot de conclusie dat het gebruik van grover zand in het XBeach-model slechts leidt tot een reductie in met name de snelheid van de profielvorming en dat er sowieso geen swash-berm ontstaat.

3.3 VERKENNING AANPASSING INSTELLINGEN XBEACH-MODEL

Conclusie was dus dat het effect van de korreldiameter moet beter worden gesimuleerd. In eerste aanzet is dit probleem aangepakt door het aanpassen van de zogenaamde asymmetrie-factor. Beter zou echter zijn om der interne formuleringen van het model aan te passen, maar dat is vooralsnog een niet begaanbare weg.

Ter illustratie is in Figuur I - 3-3 het effect gegeven van een eerste verkenning met een dergelijke aanpassing.



Figuur I - 3-3 Resultaat eerste verkenning effect aangepaste asymmetrie-factor op profielontwikkeling.

Conclusie daarvan was eigenlijk dat er weliswaar sprake was van het ontstaan van een soort van swash-berm, maar dat het onderwaterdeel van het gesimuleerde dwarsprofiel nog steeds de vorm van een hellend afslagprofiel had en geen gelijkenis vertoonde met de op de proefsectie waargenomen plateauvorming.

Ook het simuleren van het gedrag van het XBeach-model voor verschillende korreldiameters blijft nog een aandachtspunt.

3.4 DETAILANALYSE PROCESSEN OP ONDERWATERPLATEAU

Voor het ontwikkelen van een gevalideerd rekenmodel voor het ontwerp van zandige versterkingen was het dus uitermate gewenst dat er aanvullende procesinzichten beschikbaar kwamen. Medio 2017 is hiertoe een samenhangend voorstel geformuleerd bestaande uit een aantal procesmetingen op het zogenaamde plateau van de proefsectie, het in detail monitoren van een fysieke ingreep en flankerende analyses met procesmodellen (EcoShape, 2017b).

Deze aanvullende metingen zijn inmiddels uitgevoerd en zijn uitgebreid beschreven in een primair door Deltares opgestelde rapportage (EcoShape/Deltares/HKV, 2018). 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.

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.

3.5 DEFINITIE STRANDMODULE XBEACH-MODEL

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, 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 aangrijppingspunt 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 plateau breedte 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 is na toevoeging van de morfologische modules hoog.

Voor meer gedetailleerde informatie wordt verwezen naar de onderliggende technische rapportage (EcoShape/Deltares/HKV, 2018).

4

Stabilisatie met vegetatie

4.1 INLEIDING

Een van de doelen van het onderzoek was het kwantificeren van het effect van vegetatie op de stabiliteit van het dwarsprofiel. Uitgangspunt daarbij was dat er sprake zou zijn van een directe interactie van de op het proefvak aanwezige vegetatie met de inkomende hydraulische belasting. Onderliggende veronderstelling was daarbij dat de vegetatie op zijn minst in staat zou zijn om deze belasting te weerstaan.

4.2 RIETONTWIKKELING OP DE PROEFSECTIE

Op de oeverlijn is het niet gelukt om de gewenste rietzone te laten ontstaan. De belangrijkste oorzaak hiervan is de snelle erosie van de oever, ook op plekken waar rijsmatten zijn aangelegd. Op de meest geëxponeerde en daardoor erosiegevoelige delen zijn niet alleen het aangebrachte riet, maar ook rijsmatten en houten staken weggeslagen. De pogingen tot rietontwikkeling zijn dan ook weinig succesvol gebleken, wat aansluit bij elders opgedane inzichten dat rietvegetatie niet bestand is tegen dagelijkse golven hoger dan grofweg 20 cm. Rietontwikkeling maakt dan ook alleen kans in luwe deelgebieden of achter een speciaal daartoe aangebrachte vooroeververdediging.

De beste kansen voor het duurzaam ontwikkelen van rietoevers bestaat daarom wel op locaties waar de oever niet te snel afloopt of op plekken waar een vooroeververdediging wordt aangebracht. Het realiseren van een rietkraag op de oeverlijn lijkt dan ook alleen succesvol bij een combinatie van relatief luwe oevers (bijvoorbeeld door vooroeververdediging, of mogelijk aan de IJsselmeerszijde van de Houtribdijk) en het tegengaan van begrazing door ganzen (door – al dan niet tijdelijke – exclusures).

Voor meer gedetailleerde achtergrondinformatie wordt verwezen naar hoofdstuk 5 uit het monitoringsrapport (EcoShape/Deltares/WEnR/HKV, 2018).

4.3 CONCLUSIE

Gegeven het feit dat er op de proefsectie geen sprake was van een stabiele interactie tussen de vegetatie en de hydraulische belasting kan ook geen conclusie worden getrokken over het potentieel stabiliserende effect van de vegetatie. Ook ten aanzien van de oorspronkelijke voorziene verbetering/validatie van het XBeach-model konden dus geen stappen worden gezet.

5

Veiligheidsontwerp

5.1 INLEIDING

Op basis van de resultaten van de uitgevoerde analyses kan in ieder geval worden geconcludeerd dat het dwarsprofiel zich in een meer-systeem wezenlijk ander gedraagt als aan de zandige Noordzeekust. Deze inzichten zijn gebruikt voor het definiëren van het ontwerp van de thans in uitvoering zijnde versterking van de Houtribdijk.

5.2 OPTIMALE HELLING BUITENTALUD

Uit de analyses volgt dat het definiëren van een specifiek aanlegprofiel met name van belang is met het oog op de binnen bepaalde zones aanwezige volumes. Deze insteek is ook gevolgd voor opstelling van de zogenaamde rekenwijzer voor het veiligheidsontwerp van de zandige versterking van de westelijke helft van de Houtribdijk.

5.3 OPTIMAAL VEILIGHEIDSONTWERP

De in de pilot opgedane kennis is direct en indirect gebruikt voor de definitie van het veiligheidsontwerp van de zandige versterking van de Houtribdijk. Daarbij is de rol van het morfologisch rekenmodel XBeach uiterst beperkt gebleven en is de uitwerking primair gebaseerd op de schematisatie van de profielvorm en de hieraan ten grondslag liggende fysische processen.

6

Aanvullende producten

6.1 GUIDELINE ONTWERP VAN VOORLANDOPLOSSINGEN (ZIE BIJLAGE 1)

De guideline voor het ontwerp van voorlandoplossingen is als separaat product van deze pilot opgenomen in Bijlage 1 (zie pagina 267) van deze rapportage.

Inhoud conform werkplan

Op basis van de inzichten uit rapport I worden guidelines voor het ontwerp van een voorland afgeleid. Dit product beschrijft de wijze waarop voor een specifieke locatie een veiligheidsontwerp voor een voorland kan worden gedefinieerd. Daarbij zal ook aandacht worden gegeven aan de rol van de achterliggende dijk bij het ontwerp van de (eventueel hybride) waterkering.

De guideline zal bestaan uit ontwerpgrafieken waarin afhankelijk van de hydraulische belasting (normaal en extreem), het aanwezige materiaal (korreldiameter) en de nog toelaatbare golfaanval op de achterliggende dijk het bereik van de optimale combinaties van hellingen, hoogtes en breedtes worden gepresenteerd. De nog toelaatbare golfaanval op de dijk zegt iets over de mate waarin de achterliggende dijk bijdraagt aan de veiligheidsoplossing.

Deze guidelines kunnen door eindgebruikers (consultants, aannemers, overheid) gebruikt worden om voorlandoplossing te ontwerpen dan wel te evalueren. Deze guidelines zullen qua niveau van uitwerking vergelijkbaar zijn met de zogenaamde EDD-guidelines.

Uitwerking

Uiteindelijk is er voor gekozen om de guideline ontwerp te combineren met de guideline beoordeling (of eigenlijk 'bijdrage aan de toetsing') en de focus te leggen op de gecombineerde beoordeling van dijk-voorlandsystemen (zie Bijlage 1 en (EcoShape/HKV, 2018)).

Annex II

AANLEG VAN VOORLAND- OPLOSSINGEN

1 Inleiding

1.1 ALGEMEEN

Dit rapportagedeelte betreft het basisproduct voor de aanleg-gerelateerde informatie en wordt in het werkplan omschreven als rapport II: Aanleg van een voorlandoplossing.

1.2 INHOUD RAPPORTAGE CONFORM WERKPLAN

1.2.1 INLEIDING

In het werkplan staat beschreven wat de (oorspronkelijke) inhoud van dit onderdeel van de rapportage is. In het volgende is deze opnieuw kort aangehaald.

In deze achtergrondrapportage wordt op basis van de opgedane ervaringen en data-analyse verslag gedaan van het inzicht in:

- Het voor de aanleg van een voorland te doorlopen vergunningen-traject (vraag 4);
- De efficiënte aanleg van een voorlandtalud (vraag 5);
- Het gebruik van een mengsel van zand en holoceen materiaal voor de kern van een voorlandoplossing (vraag 6);
- In hoeverre vegetatie op een voorland snel kan worden gerealiseerd (vraag 7).

1.2.2 ERVARING VERGUNNINGENTRAJECT (VRAAG 4)

Binnen deze taak zullen de tijdens de voorbereiding van de pilot met betrekking tot het vergunningen-traject opgedane ervaringen worden vastgelegd. Daarbij zal onder andere worden ingegaan op de wijze waarop de in een Natura2000-gebied benodigde vergunningen toch relatief snel konden worden verkregen.

Deze ervaringen zullen worden aangevuld met informatie die is ontleend aan een aantal interviews met de bij deze procedures betrokken partijen/personen. Het op een rij zetten van deze ervaringen is toeleverend aan de vraag hoe een waterkeringbeheerder het vergunningentraject van een grootschalige versterking het best kan inrichten (EcoShape/Arcadis, 2015b).

Naast het opleveren van de 'lessons-learned' van het voor de aanleg van de proefsectie doorlopen vergunningenproces, is de volgende stap de procedures voor een toekomstig vergunningen traject ten behoeve van een meer grootschaliger voorlandoplossing (voor bijvoorbeeld een groot deel van de Houtribdijk) in kaart te brengen.

De resultaten hiervan zijn inmiddels opgenomen in de guideline vergunningen (EcoShape/Arcadis, 2016a).

1.2.3 ERVARING AANLEG PROEFSECTIE (VRAAG 5)

Dit product heeft betrekking op de tijdens de aanleg van de zandaanvulling opgedane ervaringen. Onderdeel hiervan is ook de analyse van de opgetreden zettingen en de opgetreden verliezen en de mate waarin de in detail ontworpen geometrie daadwerkelijk is gerealiseerd.

Ten aanzien van de zettingen is het bijvoorbeeld de vraag op welke wijze de compensatie voor de verwachte zettingen het best in het ontwerp kan worden meegenomen. Bij de aanleg is er voor gekozen om het te realiseren aanlegprofiel op een iets hoger niveau te leggen, zonder rekening te houden met de tijdens de aanleg zelf optredende zettingen.

Ten aanzien van de opgetreden verliezen doet zich de vraag voor uit welke componenten deze verliezen bestaan (pakkingsverschillen, uitspoeling fijn materiaal, windverliezen, zetting tijdens de aanleg, ...).

Ook een belangrijke vraag is of het geforceerd aanleggen van een bepaald profiel nodig is (of dat het gewoon vanzelf ontstaat) en/of wat er gebeurt als het onderwaterprofiel initieel veel te steil wordt aangelegd.

Voor deze uitwerking zal gebruik worden gemaakt van de ervaringen zoals deze zijn opgedaan in het kader van WP2, aangevuld met de resultaten van een aantal met de aannemerscombinatie te houden interviews. Voor de verdiepende morfologische analyse zal gebruik worden gemaakt van de tijdens de aanlegfase ingewonnen profielgegevens en zettingen alsmede de eerste monitoringsgegevens van na de oplevering.

Dit resultaat zal worden opgeleverd in de vorm van een rapportage, waarin een overzicht is gegeven van de aandachtspunten die bij de aanleg van een voorlandoplossing spelen en de relatie tussen het ontwerp en de (gerealiseerde of te realiseren) aanleg. Een eerste bijdrage hieraan is reeds beschikbaar in de vorm van een interne rapportage van de aannemerscombinatie aan EcoShape.

De oplevering van deze rapportage heeft inmiddels plaatsgevonden (EcoShape/Arcadis, 2015c).

1.2.4 GEBRUIK ANDER KERNMATERIAAL (VRAAG 6)

Een van de initieel geformuleerde onderzoeksvragen heeft betrekking op het gebruik van de holocene toplaag als kernmateriaal. Achterliggend idee was dat door de inzet van relatief goedkoper te verkrijgen materiaal (holocene toplaag die sowieso zou moeten worden verwijderd alvorens het onderliggende zandpakket kan worden aangeboord) er netto sprake zou zijn van een reductie van de gemiddelde prijs per m³ aanlegmateriaal.

Bij de aanleg van de proefsectie bleek dit niet opportuun door gebrek aan zowel ruimte als tijd. Voor een efficiënte inzet van ander materiaal zou het tenminste moeten gaan om veel grotere hoeveelheden en bovendien vraagt het kwalitatief mindere materiaal om extra consolidatietijd.

Denkbaar is dat dit wel tot de mogelijkheden behoort bij een meer grootschaliger voorlandversterking. Dit onderwerp komt dus weer terug binnen de guideline aanleg (zie Paragraaf 6.1 en Bijlage 5).

Dit vereist een nadere analyse waarbij moet worden gekeken naar de schaal van de oplossing, de materiaaleigenschappen en oorsprong (welke winlocaties), alsmede de mogelijke werkmethoden.

Duidelijk is dat hier een directe relatie ligt met andere in het Markermeer en IJsselmeer lopende en komende projecten. Uitwisseling van kennis speelt hier dus een belangrijke rol. In dit verband er ook gezocht naar mogelijkheden om de opgedane kennis en inzichten interactief te delen met de gerelateerde projecten.

1.2.5 INITIATIE VAN VEGETATIE (VRAAG 7)

Doel van deze taak is het vastleggen van de tijdens het aanbrengen van de vegetatie opgedane ervaringen. Deze zijn immers van belang voor toekomstige voorlandversterkingen. Daarbij wordt gebruik gemaakt van de ervaringen zoals deze zijn opgedaan in het kader van WP2 ten aanzien van het aanbrengen van de holocene top laag en de rijsmatten, aangevuld met de resultaten van een aantal interviews met de hierbij betrokken personen.

Duidelijk mag zijn dat niet alleen het aanbrengen van de vegetatie van belang is maar nog meer hoe de vegetatie vervolgens aanslaat. De aard en omvang (hoeveel per m²) van de vegetatie in combinatie met het niveau boven de waterlijn waar deze is aangebracht zal immers van invloed zijn op de ontwikkeling. Binnen WP3 wordt de ontwikkeling van de vegetatie gemonitord als functie van verschillende vegetatie initiatie methodieken (niks doen, zaaien, planten, planten op rijsmatten). Een nadere analyse van deze data kan deze ervaringen mogelijk beter onderbouwen.

Doel van de verschillende uitwerkingen is het conceptueel modelleren/beschrijven van de (van de standplaatsfactoren afhankelijke) groei van de vegetatie en de daarmee samenhangende effecten op de effecten van deze vegetatie. Uitdaging is om gegeven de gekozen vegetatie een voorspelling te doen en deze later bij te stellen aan de hand van de waargenomen ontwikkelingen. Het bijgestelde voorspelmodel speelt ook een rol in de beschouwingen over de beheer- en onderzoeksfase.

Dit resultaat zal ook separaat worden opgeleverd in de vorm van een interim-rapportage. Een eerste bijdrage hieraan is (voor wat betreft de aanleg van de rijsmatten) beschikbaar in de vorm van een interne rapportage van de aannemerscombinatie aan EcoShape. Een update van deze informatie is voorzien medio 2015 op het moment dat ook de overige vegetatie is aangebracht en medio 2016 als ook helder wordt hoe de aangebrachte vegetatie zich heeft ontwikkeld.

1.3 RESULTAAT UITWERKINGEN

Naast de separaat te ontwikkelen guidelines heeft deze rapportage dus betrekking op een verhandeling over de mogelijkheden tot het gebruik van afwijkend kernmateriaal voor de aanleg van een voorland (Hoofdstuk 2) en de mogelijkheden tot het realiseren van vegetatie (Hoofdstuk 3).

In de pilot is specifiek ervaring opgedaan over het initiëren van vegetatie. De resultaten hiervan komen terug in de door Deltares/Alterra opgestelde werkrapportage (EcoShape/Deltares/WEnR/HKV, 2018). De samenvattende inzichten zijn eveneens opgenomen in Hoofdstuk 8.3 van het voorliggende rapport (zie pagina 163).

2

Gebruik ander kernmateriaal

2.1 INLEIDING

Bij de aanleg van de proefsectie bleek het gebruik van ander kernmateriaal niet opportuun door gebrek aan zowel ruimte als tijd. Voor een efficiënte inzet van ander materiaal zou het tenminste moeten gaan om veel grotere hoeveelheden en bovendien vraagt het kwalitatief mindere materiaal om extra consolidatietijd. Denkbaar is dat dit wel tot de mogelijkheden behoort bij een meer grootschaliger voorlandversterking.

Dit onderwerp is uitgebreider aan de orde gekomen binnen de guideline aanleg (zie Paragraaf 6.1 en Bijlage 5) en dit vereist een nadere analyse waarbij moet worden gekeken naar de schaal van de oplossing, de materiaaleigenschappen en oorsprong (welke winlocaties), alsmede de mogelijke werkmethoden.

Duidelijk is dat hier een directe relatie ligt met andere in het Markermeer en IJsselmeer lopende en komende projecten. Uitwisseling van kennis speelt hier dus een belangrijke rol. In dit verband er ook gezocht naar mogelijkheden om de opgedane kennis en inzichten interactief te delen met de gerelateerde projecten.

2.2 CONCLUSIES

De pilot heeft dus geen directe inzichten verschaft in de mogelijkheden om ander kernmateriaal te gebruiken bij de aanleg van een zandige vooroever.

In het kader van de business case is hier nog wel enige aandacht aan besteed. Voor meer informatie wordt dan ook verwezen naar het betreffende document (zie Bijlage 7 en (EcoShape/RHDHV, 2018)).

3

Initiatie van vegetatie

3.1 INLEIDING

Tijdens de pilot is moment is specifiek ervaring opgedaan over het initiëren van vegetatie. De resultaten hiervan komen terug in de door Deltares/Alterra opgestelde rapportage (EcoShape/Deltares/WEnR/HKV, 2018).

Enkele inzichten zijn opgenomen in Hoofdstuk 8.3 van het hoofd rapport (zie pagina 163).

3.2 RANDVOORWAARDEN: MAXIMAAL TOELAATBARE GOLF VOOR RIETVEGETATIE

3.2.1 ALGEMEEN

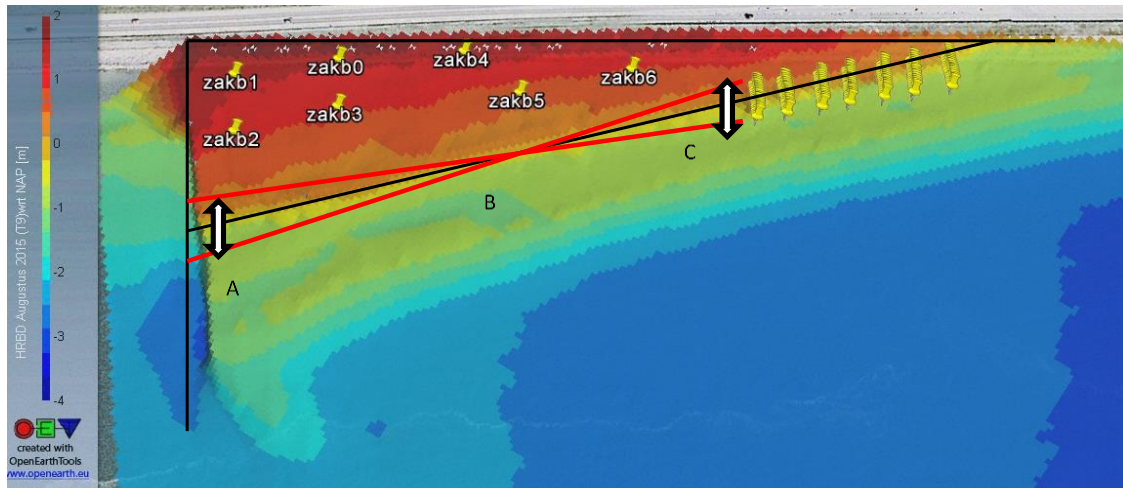
In dit kader is ook gekeken naar de relatie tussen golfaanval en de mogelijkheden voor het aanwezig zijn van riet. Duidelijk is immers dat inspanningen voor het initiëren van vegetatie wel moeten samengaan met de juiste randvoorwaarden voor stabiele aanwezigheid van bijvoorbeeld riet. Als riet onder bepaalde golfomstandigheden überhaupt niet in stand kan blijven heeft het immers ook zeer weinig zin om deze aan te planten.

3.2.2 VEGETATIE OP DE PROEFSECTIE

Op de pilot houtribdijk is vegetatie aangeplant in het voorjaar van 2015, bestaande uit zowel riet als wilgenstruweel.

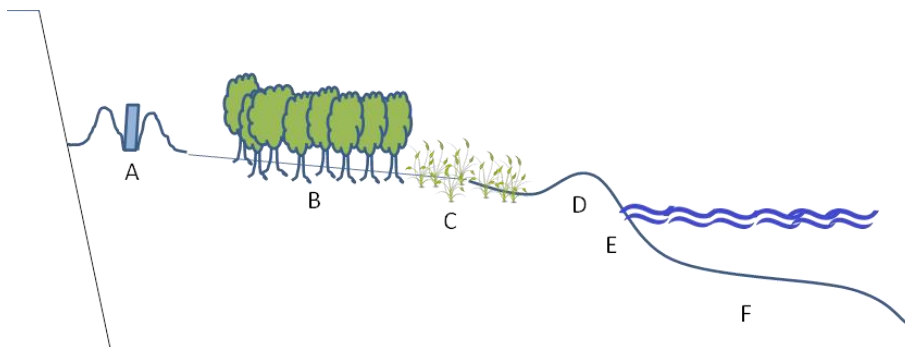
Rond de oeverlijn heeft zich tot op heden geen riet weten te vestigen, en is ook het geplante riet niet aangeslagen. Dit is met name te wijten aan de grote golfdynamiek op de locatie, die zorgt voor grote morfologische veranderingen rond de oeverlijn afhankelijk van de inkomende golven.

De oeverlijn is dynamisch in langsrichting en draait afhankelijk van de windrichting tijdens storm-events bij met de damwand (A) en de rijsmatconstructie (B) als opsluitranden. Hierdoor vindt er grofweg een draaiing plaats rondom een middelpunt 'B' (zie Figuur II - 3-1).



Figuur II - 3-1 Bovenaanzicht van dynamische oeverlijn, met grootste uitwijkingen rond de damwand (A) en bij de rijsmatten (C) rond een meer constant middelpunt (B).

Op de plek waar vegetatie is aangeplant is het dwarsprofiel schematisch weergegeven in Figuur II - 3-2, met het stuifscherm (A), het wilgenstruweel (B), het aangeplante riet (C), de swash-bar (D), een steil oevertalud van ongeveer 1 : 10 en een onderwaterplateau op circa NAP-1,0 m (F).



Figuur II - 3-2 Schematische dwarsdoorsnede van de proefsectie van de dijk (links) tot in het water (rechts).

Tijdens stormcondities komt het water tot over de swash-bar (meestal minder dan 24 uur), maar onder normale condities staat alle vegetatie op het stuk zonder golfaanval droog.

3.2.3 MAXIMAAL TOELAATBARE GOLFHOOGTE OP BUITENRAND RIETVEGETATIE

Om een beter grip te krijgen op de maximale golfaanval die vegetatie kan weerstaan in de oeverzone is een studie gedaan naar de maximaal toelaatbare inkomende golven aan de buitenrand van de rietvegetatie, en de invloed van de waterdiepte en het taludprofiel op de inkomende golfhoogte.

Hiervoor is een vergelijkend onderzoek in referentiemeren met natuurlijk voorkomende rietvegetatie uitgevoerd. Er zijn vier referentiemeren geselecteerd: het IJsselmeer en het Zwartemeer in Nederland, het Peipsimeer in Estland, en het Balatonmeer in Hongarije. De karakteristieken van deze meren zijn samengebracht in Tabel II - 3-1.

<i>Meer</i>	<i>IJsselmeer</i>	<i>Zwarte Meer</i>	<i>Peipsi</i>	<i>Balaton</i>
<i>Locatie</i>	Netherlands	Netherlands	Estonia / Russia	Hungary
<i>Gemiddeld oppervlak (km²)</i>	1139	18.1	3555	597
<i>Kustlijn (km)</i>	229.5	35.2	875	236
<i>Gemiddelde diepte (m)</i>	4.4	1	7.1	3.3
<i>Maximale diepte (m)</i>	22.2	10.4	15.3	12.2
<i>Volume (km³)</i>	5.1	0.03	25.07	1.9
<i>Water peil</i>	Omgekeerd	Omgekeerd	Natuurlijk	Natuurlijk, gereguleerd met max. en min.
<i>Locatie rietvegetatie</i>	Oostelijke oever	Grootste deel van de oever	Oostelijke zuidelijke oevers	en Noordelijke en westelijke oevers

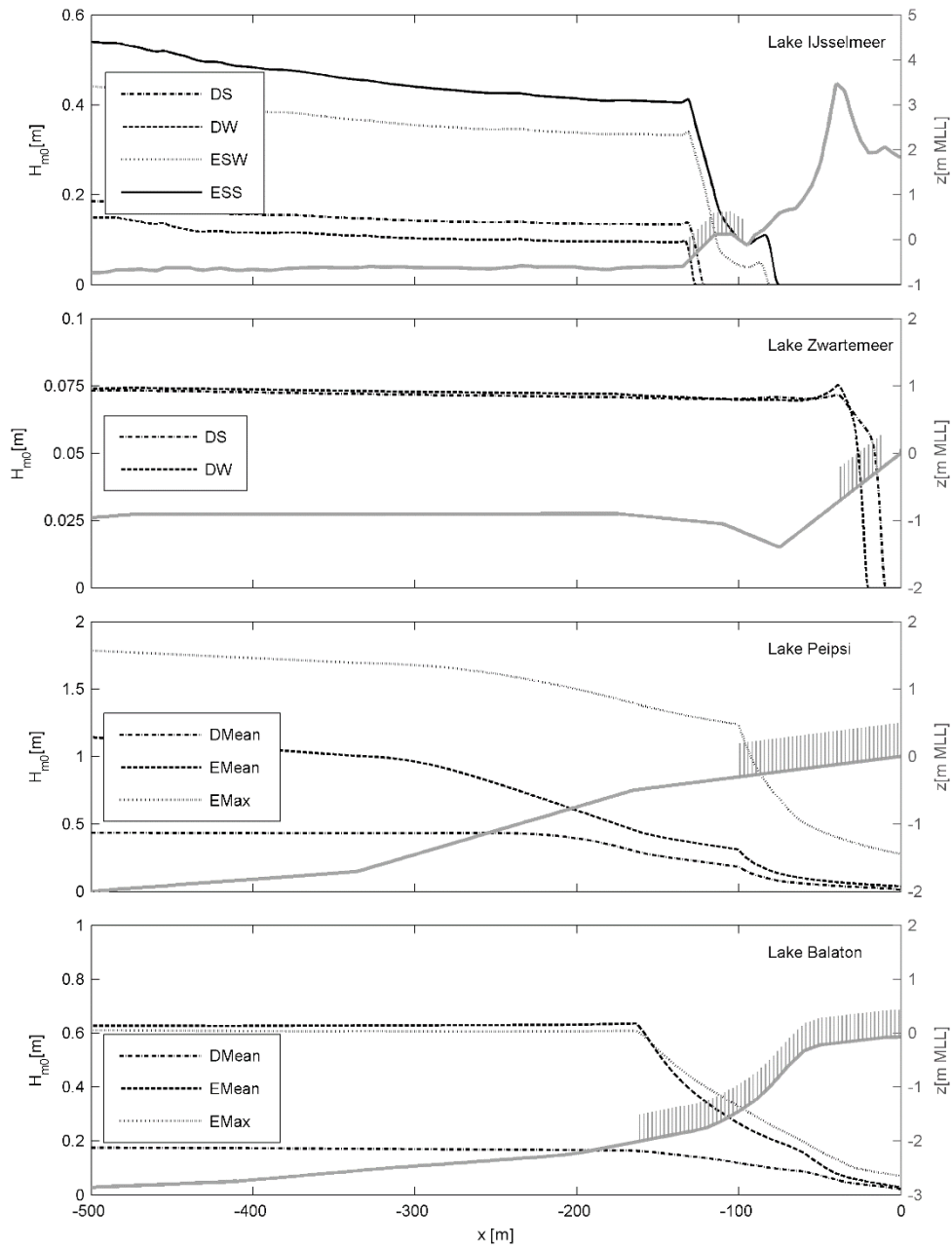
Tabel II - 3-1 Beschrijving van de referentiemeren (Bron: Van Eerden et al., 2007; Zlinszky, 2013).

Voor alle referentiemeren zijn voor zoveel mogelijk oeverlocaties data verzameld over de breedte van de rietzone loodrecht op de oever, de maximale diepte waarop het riet voorkomt, het waterpeil, de wateropzet bij extreme condities (~1x per jaar voorkomende storm), de golfhoogte en de golfperiode in het open water, en het taludprofiel.

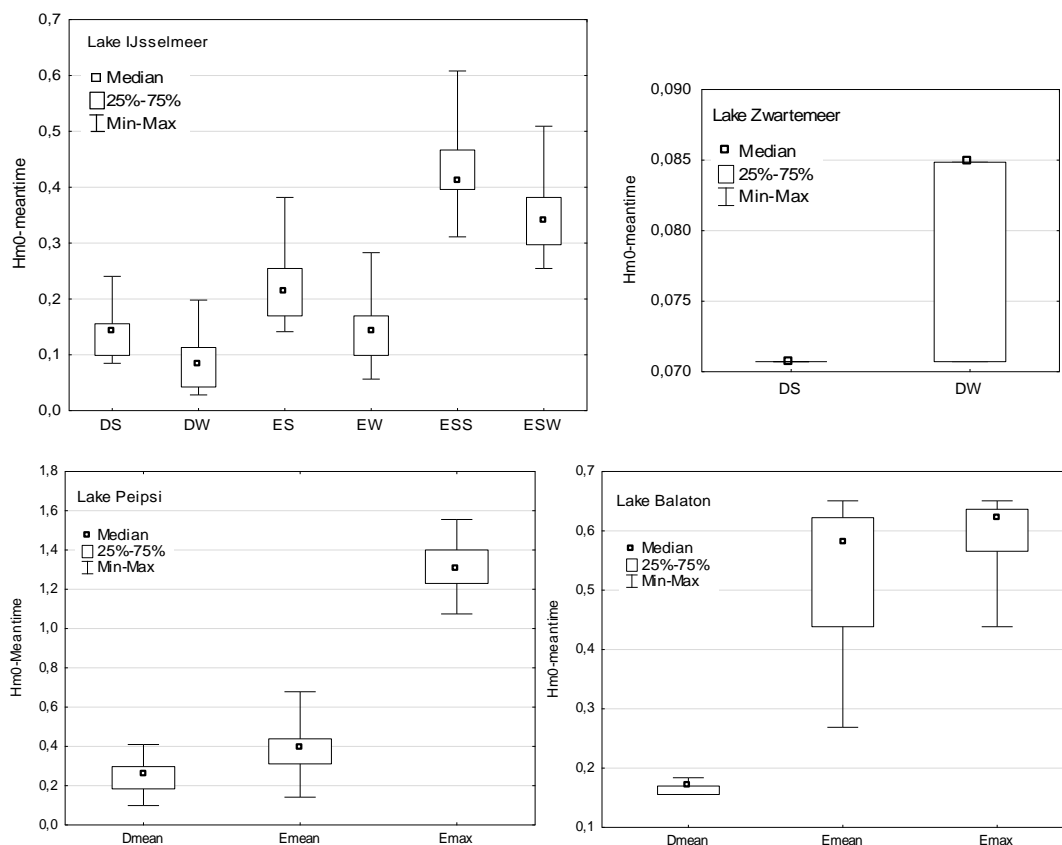
Deze data zijn vervolgens ingevoerd in het hydrodynamische model XBeach, waarmee de invloed van de golven op de zeekust kan worden gesimuleerd. Het model kan worden toegepast bij meren, omdat in dit onderzoek alleen hydrodynamische berekeningen zijn gedaan en deze berekeningen voor meren niet anders zijn dan voor zee-systemen. Met het model is voor de referentiemeren de inkomende golfhoogte aan de buitenrand van de rietvegetatie berekend, evenals de invloed van de wateropzet op de inkomende golfhoogte (zie Figuur II - 3-3). Dit is gedaan voor zowel dagelijkse als extreme condities.

<i>Meer</i>	<i>Conditie</i>	<i>Z_{s0} (m)</i>	<i>H_{m0} (m)</i>	<i>T_p (s)</i>
<i>IJsselmeer</i>	Dagelijkse condities zomer (DS)	-0.20	0.33	2.5
	Dagelijkse condities winter (DW)	-0.40	0.58	3.0
	Extreme condities zomer (ES)	-0.20	1.57	4.7
	Extreme condities winter (EW)	-0.40	1.57	4.7
	Extreme + opzet zomer (ESS)	0.32	1.57	4.7
	Extreme + opzet winter (ESW)	0.12	1.57	4.7
<i>Zwarte Meer</i>	Dagelijkse condities zomer (DS)	-0.20	0.09	2.1
	Dagelijkse condities winter (DW)	-0.40	0.09	2.1
<i>Peipsi</i>	Dagelijkse condities, gemiddeld waterpeil (DMean)	0	0.50	3
	Extreme condities gemiddeld waterpeil (EMean)	0	2.35	6.6
	Extreme condities max. water peil (EMax)	1.76	2.35	6.6
<i>Balaton</i>	Dagelijkse condities, gemiddeld waterpeil (DMean)	0	0.2	2.5
	Extreme condities gemiddeld waterpeil (EMean)	0	0.7	4.3
	Extreme condities max. water peil (EMax)	0.35	0.7	4.3

Tabel II - 3-2 Gebruikte modelscenario's voor inkomende open-water golfcondities en waterstanden.



Figuur II - 3-3 Simulaties van golfhoogte-uitdoving in relatie tot talud en vegetatie bij verschillende golf- en waterpeil scenario's voor een geselecteerde locatie per meer (zie tabel 2 voor de uitleg van de scenario's).



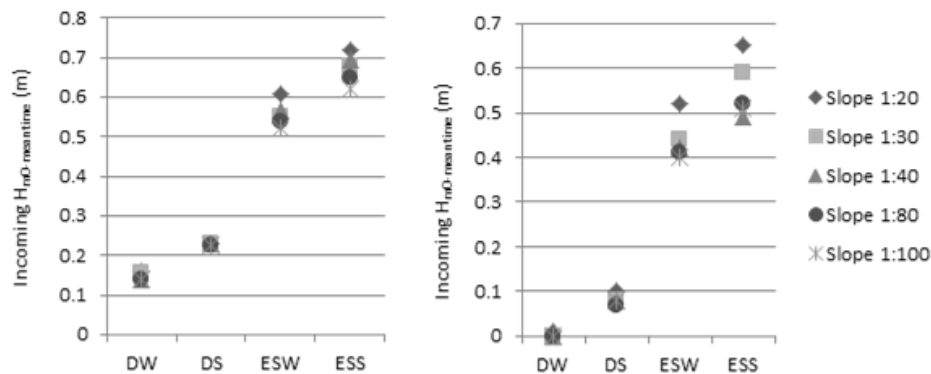
Figuur II - 3-4 Range van inkomende golfhoogte aan de buitenrand van het rietveld voor verschillende scenario's.

Uit de resultaten blijkt dat voor nieuwe vooroevers de maximaal toelaatbare golfhoogte aan de buitenrand van de rietvegetatie onder dagelijkse condities ongeveer 0,20 m bedraagt, en onder extreme condities ongeveer 0,60 m. De resultaten laten duidelijk het dempende effect zien van de ondiepe vooroevers van de referentiemeren op de inkomende golfhoogte, en de vermindering van dit effect bij een wateropzet.

Deze resultaten kunnen gebruikt worden om een inschatting te maken van de mogelijk beste helling voor het creëren van een acceptabele golfconditie voor nieuwe vooroevers. Hiervoor zijn we ervan uit gegaan dat het talud vlak blijft (en dus niet zoals nu op de proefsectie met een swash-bar – scherpe oeverlijn en onderwatertalud) en dat vegetatie tot op ofwel een diepte van 60 cm weet te groeien, ofwel tot een diepte van 30 cm.

Talud	Conditie	Zs0 (m) gemiddeld meerpeil	Hm0 (m)	Tp (s)	Max. standdiepte riet gemiddeld meerpeil (m) t.o.v.
1:20 /	Dagelijkse condities zomer (Ds)	-0.20	0.33	2.07	-0.60 / -0.30
1:30 /	Dagelijkse condities winter (DW)	-0.40	0.58	2.5	-0.60 / -0.30
1:40 /	Extreme condities + opzet zomer (ESS)	0.32	1.57	4.7	-0.60 / -0.30
1:80 /	Extreme condities + opzet winter (ESW)	0.12	1.57	4.7	-0.60 / -0.30
1:100					

Tabel II - 3-3 Model scenario's voor het ontwerpen van nieuwe vooroevers.



Figuur II - 3-5 Inkomende golfhoogte bij verschillende hellingen voor de 4 modelscenario's zoals in Tabel II - 3 3 beschreven.

Uit de simulaties voor nieuw aan te leggen vooroevers blijkt dat bovengenoemde maximale inkomende golfhoogten niet worden overschreden als een talud van 1 : 80 wordt toegepast. Deze simulaties zijn echter gebaseerd op een windkracht van 8-9 Bft, terwijl zwaardere stormen geregeld voorkomen in Nederland. Daarnaast zien we nu op de proefsectie dat inkomende golven hoger zijn en dat de swashbar en steile oeverlijn niet in lijn zijn met de aannames in deze berekeningen van een vlak talud.

Echter, als het lukt om een zachte helling aan het begin van het groeiseizoen gereed te hebben, en direct te kunnen beplanten, bijvoorbeeld middels voorbegroeide vegetatiematten, is de kans op het vestigen van vegetatie mogelijk beter dan tot nu toe op de proefsectie zelf is gerealiseerd.

Daarnaast is de huidige pilot aangelegd op een locatie die een exceptioneel sterk dagelijks golfregime heeft. Op andere locaties in het Markermeer (bijvoorbeeld aan de Noord-Hollandse Kust) zijn de dagelijkse golfcondities minder extreem, en is het misschien wel mogelijk hier (water-)rietvegetatie te realiseren. Verder is er in deze studie niet gekeken naar de morfologische veranderingen van het talud onder invloed van bijvoorbeeld verschillende korrelgroottes en golfcondities.

3.3 NADERE UITWERKING EN CONCLUSIES

In de monitoringsrapportage is meer specifiek gekeken naar de mogelijkheden om vegetatie snel te laten aanslaan. In hoofdstuk 5.3 van deze rapportage zijn de conclusies en aanbevelingen met betrekking tot de vegetatieontwikkeling samengebracht (EcoShape/Deltares/WEnR/HKV, 2018).

Ten aanzien van het op gang brengen van vegetatie wordt geconcludeerd dat in de niet-ingeplante, met holoceen materiaal gemengde vakken een snelle vastlegging van de bovenste bodemlaag aanwezig is, waarbij een vrijwel aaneengesloten spontaan ontwikkelde moslaag ontstaat. Dit gebeurt zowel in de vakken zonder aanplant als onder het aangeplante struweel.

De ontwikkeling op de zandige delen is vooralsnog niet ver genoeg, om te kunnen beoordelen welke vegetatie hier op langere termijn ontstaat. Echter, de mogelijkheid van een schrale grasmat is hier aanwezig, indien er op termijn (bij het ontstaan van voldoende biomassa) een maaibeheer of begrazingsbeheer (bijvoorbeeld met schapen) zou worden ingevoerd. Om op een zandig talud op langere termijn een voor de flora en fauna waardevolle begroeiing te krijgen is het van belang dat er gemaaid

wordt (met afvoeren van maaisel) of vrij intensief beweid wordt (bijvoorbeeld met schapen). Dit biedt op langere termijn mogelijk perspectief voor schrale graslanden die van betekenis zijn voor de insectenfauna. Ook kan zo bosvorming worden tegengegaan.

De vegetatie van het hele talud is erg schraal, doordat het proefgebied relatief steil is, en daardoor droog blijft, en de zandige bodem weinig voedsel biedt. Slechts weinig planten wortelen zo diep dat ze bij het oppervlaktewater komen. Het aanslaan van de vegetatie is waarschijnlijk mede te danken aan de in de initiatie-fase ingezette beregening.

Een vlakker talud biedt beter perspectief voor vegetatie-ontwikkeling, waarbij een enigszins golvend maaiveld ook nog kansen biedt voor meer variatie, inclusief het ontstaan van schrale, natte duinvalleibegroeiingen (zoals in het besproken voorbeeld van de Stichtse Brug). De kalkrijkdom van het zand is in ieder geval hoog genoeg.

De inmenging van holoceen materiaal in de zandige toplaag heeft een positief effect op de snelheid van de vegetatie-ontwikkeling, wat verklaard kan worden uit de hogere voedselrijkdom en het betere vochtvasthoudende vermogen van dit type bodem. Inmiddels ontstaat er een steeds dichtere vegetatie op de met klei gemengde bodem, ook op de initieel niet beplante delen van de proefsectie. Behalve voor een snelle vegetatie-ontwikkeling, is het ook zinvol om de toplaag van een zandige versterking door te mengen met wat holoceen materiaal om verstuiving van zand te voorkomen.

Al met al heeft de aanplant van struiken gezorgd voor het ontstaan van een open struweel op de zandige bodem, en een gesloten, hoger struweel op de met klei doorgemengde, voedselrijkere bodem. Opmerkelijk is dat vooral Duindoorn, een soort die in dit deel van het land niet algemeen is, het vooral goed doet. Dit is waarschijnlijk te danken aan de – eerder genoemde – droge en relatief arme (zandige) maar kalkhoudende bodem. Alleen deze soort breidt zich vanuit de aanplant uit naar de aangrenzende vakken. Opmerkelijk is verder dat ook niet-autochtone planten in de aanplant zijn aangetroffen, waaronder enkele ‘vreemde’ struiken, te weten een exoot (Grijze wilg) en een soort die niet bij dit milieu past (Geoorde wilg). Mogelijk is er bij de kweker vermenging van de aan te planten soorten opgetreden. Het gebruik van autochtone soorten die op de huidige oevers van Markermeer en IJsselmeer algemeen zijn, wordt in dit soort situaties aangeraden.

De struweel-aanplant lijkt beperkt bij te dragen aan het vastleggen van zand in vergelijking met de maatregel van het doormengen met holocene klei; het ingeplante struweel op puur zandige bodem ontwikkelt zich namelijk nauwelijks, en de onderlaag blijft vrijwel kaal, terwijl op de kleiige bodems overall een moslaag ontstaat met een ijle kruidlaag van (vooral) ruigtesoorten. Vanuit het oogpunt van ‘behoud van zichtlijnen’ is ontwikkeling van struweel in feite ook ongewenst, met name als het doorschiet richting bos. Al met al is de aanplant van struiken op dit type zandig talud alleen zinvol als dit vanuit een directe noodzaak tot stofvermindering gewenst is.

Voor een uitgebreidere duiding wordt verwezen naar de monitoringsrapportage (EcoShape/Deltares/WEnR/HKV, 2018).

4

Gerelateerde producten

4.1 LESSONS-LEARNED VERGUNNINGEN-TRAJECT (ZIE BIJLAGE 2)

De tijdens de voorbereiding van de aanleg met betrekking tot de vergunningen opgedane ervaringen zijn als separaat product van deze pilot opgenomen in Bijlage 2 (zie pagina 268) van deze rapportage.

Inhoud rapportage conform werkplan

Binnen deze taak zullen de tijdens de voorbereiding van de pilot met betrekking tot het vergunningen-traject opgedane ervaringen worden vastgelegd. Daarbij zal onder andere worden ingegaan op de wijze waarop de in een Natura2000-gebied benodigde vergunningen toch relatief snel konden worden verkregen.

Deze ervaringen zullen worden aangevuld met informatie die is ontleend aan een aantal interviews met de bij deze procedures betrokken partijen/personen. Het op een rij zetten van deze ervaringen is toeleverend aan de vraag hoe een waterkeringbeheerder het vergunningentraject van een grootschalige versterking het best kan inrichten.

Dit resultaat zal worden opgeleverd in de vorm van een notitie. De oplevering van deze rapportage is voorzien in het vroege voorjaar van 2015.

Naast het opleveren van de ‘lessons-learned’ van het voor de aanleg van de proefsectie doorlopen vergunningenproces, is de volgende stap de procedures voor een toekomstig vergunningen traject ten behoeve van een meer grootschaliger voorlandoplossing (voor bijvoorbeeld een groot deel van de Houtribdijk) in kaart te brengen. De resultaten hiervan zijn opgenomen in de guideline vergunningen (zie volgende paragraaf).

Huidige status

Dit product is reeds in 2015 opgeleverd (EcoShape/Arcadis, 2015b).

4.2 GUIDE-LINE VERGUNNINGEN (ZIE BIJLAGE 3)

De tijdens de aanleg van de zandaanvulling opgedane ervaringen zijn als separaat product van deze pilot opgenomen in Bijlage 3 (zie pagina 271) van deze rapportage.

Inhoud rapportage conform werkplan

Doel van deze guideline is het opleveren van een leidraad voor het te doorlopen vergunningen proces voor het realiseren van voorlandoplossingen. Er zal worden beschreven welke vergunningen er spelen en op welke wijze het vergunningentraject zo soepel mogelijk kan worden doorlopen. Onderdeel daarvan is

ook het inventariseren van de eisen die de vergunningen aan het ontwerp stellen en de wijze waarop er in het ontwerp rekening mee kan worden gehouden.

Daarbij zal gebruik worden gemaakt van de reeds vastgelegde ervaringen aangevuld met een overzicht van alle regionale, relevante vergunningen en met een op basis van interviews verkregen visie op de vergunningsproblematiek. Op deze wijze worden ook inzichten verkregen in hoeverre eerdere ervaringen representatief zijn voor bijvoorbeeld het project Houtribdijk of ander potentiële voorlandprojecten nabij de grote meren.

Ook zal aandacht worden besteed aan na realisatie relevante vergunningen en voorschriften. Deze kunnen immers een groot effect hebben op het beheer en onderhoud van een dergelijk type waterkering.

Status

Dit product is in 2016 beschikbaar gesteld (zie ook Bijlage 3 en (EcoShape/Arcadis, 2016a).

4.3 LESSONS-LEARNED AANLEG (ZIE BIJLAGE 4)

De tijdens de aanleg van de zandaanvulling opgedane ervaringen zijn als separaat product van deze pilot opgenomen in Bijlage 4 (zie pagina 272) van deze rapportage.

Inhoud rapportage conform werkplan

Dit product heeft betrekking op de tijdens de aanleg van de zandaanvulling opgedane ervaringen.

Onderdeel hiervan is ook de analyse van de opgetreden zettingen en de opgetreden verliezen en de mate waarin de in detail ontworpen geometrie daadwerkelijk is gerealiseerd.

Ten aanzien van de zettingen is het bijvoorbeeld de vraag op welke wijze de compensatie voor de verwachte zettingen het best in het ontwerp kan worden meegenomen. Bij de aanleg is er voor gekozen om het te realiseren aanlegprofiel op een iets hoger niveau te leggen, zonder rekening te houden met de tijdens de aanleg zelf optredende zettingen.

Ten aanzien van de opgetreden verliezen doet zich de vraag voor uit welke componenten deze verliezen bestaan (pakkingsverschillen, uitspoeling fijn materiaal, windverliezen, zetting tijdens de aanleg, ...).

Ook een belangrijke vraag is of het geforceerd aanleggen van een bepaald profiel nodig is (of dat het gewoon vanzelf ontstaat) en/of wat er gebeurt als het onderwaterprofiel initieel veel te steil wordt aangelegd.

Voor deze uitwerking zal gebruik worden gemaakt van de ervaringen zoals deze zijn opgedaan in het kader van WP2, aangevuld met de resultaten van een aantal met de aannemerscombinatie te houden interviews. Voor de verdiepende morfologische analyse zal gebruik worden gemaakt van de tijdens de aanlegfase ingewonnen profielgegevens en zettingen alsmede de eerste monitoringsgegevens van na de oplevering.

Dit resultaat zal worden opgeleverd in de vorm van een rapportage, waarin een overzicht is gegeven van de aandachtspunten die bij de aanleg van een voorlandoplossing spelen en de relatie tussen het ontwerp en de (gerealiseerde of te realiseren) aanleg. Een eerste bijdrage hieraan is reeds beschikbaar in de vorm van een interne rapportage van de aannemerscombinatie aan EcoShape.

Status

Dit product is in 2015 beschikbaar gesteld (EcoShape/Arcadis, 2015c).

4.4 GUIDE-LINE AANLEG (ZIE BIJLAGE 5)

Richtlijnen voor de wijze waarop grootschalige voorlandoplossingen kunnen worden aangelegd zijn als separaat product van deze pilot opgenomen in Bijlage 5 (zie pagina 273) van deze rapportage.

Inhoud rapportage conform werkplan

Dit product heeft betrekking op een guideline waarin wordt beschreven op welke wijze een grootschaliger voorlandoplossing zo adequaat mogelijk kan worden aangelegd en wat daarbij de meest kosteneffectieve uitvoeringsmethodieken zijn. Op basis van interviews met de aannemerscombinatie zal een inventarisatie worden gemaakt van mogelijke uitvoeringstechnieken. Hierbij zal ook rekening worden gehouden met de opschalingseffecten. Afhankelijk van de omvang van het werk zullen andere uitvoeringsmethoden immers haalbaarder worden.

Status

Dit product is in 2016 beschikbaar gesteld (zie ook Bijlage 5 en (EcoShape/RHDHV/Arcadis, 2016b)).

Annex III

BEHEER EN ONDERHOUD VAN VOORLAND- OPLOSSINGEN

1 Inleiding

1.1 ALGEMEEN

Dit rapportagedeelte betreft het basisproduct voor de beheer en onderhoud-gerelateerde informatie en wordt in het werkplan omschreven als 'Rapport III: Basisinformatie beheer en onderhoud'.

1.2 INHOUD RAPPORTAGE CONFORM WERKPLAN

1.2.1 INLEIDING

In het werkplan staat beschreven wat de (oorspronkelijke) inhoud van dit onderdeel van de rapportage is. In het volgende is deze opnieuw kort aangehaald.

In deze achtergrondrapportage wordt op basis opgedane ervaringen en data-analyse verslag gedaan van het inzicht in:

- De ontwikkeling van de morfologie (vraag 8);
- De ontwikkeling van de vegetatie (vraag 9);

Omdat er ten aanzien van beheer- en onderhoud in willekeurige versterkingsprojecten een veelheid aan aspecten van belang is, is er voor gekozen om een van de cruciale parameters van een nadere verdieping te voorzien, namelijk het effect van een structureel verlies van materiaal door de aanwezigheid van een gradiënt in het langstransport. Deze is op voorhand niet als onderzoeksvraag geformuleerd, maar verdient wel aandacht met de doorkijk naar grootschaligere toepassing van voorlandoplossingen.

1.2.2 ONTWIKKELING MORFOLOGIE (VRAAG 8)

Binnen deze taak worden de eventuele trends en fluctuaties in de morfologische ontwikkeling van de proefsectie geanalyseerd en beschreven. Een significante trend zal hierbij waarschijnlijk ontbreken als gevolg van het afwezig zijn van een (netto) gradiënt in het langstransport. In dit kader zal ook worden gekeken naar de effecten van windtransport en de hiermee samenhangende morfologische veranderingen.

In de analyse zal gebruik worden gemaakt van de meetgegevens aangaande de morfologie en sedimentologie. Ook de profielverandering ter plaatse van het stuifscherm is hierbij van belang. Deze levert immers informatie over de omvang van het windtransport.

Ook de camera-beelden spelen hierbij een rol. Daarbij moet worden opgemerkt dat de camera's er in eerste instantie zijn geplaatst om de proefsectie in de gaten te houden. Dit heeft zijn meerwaarde al opgeleverd omdat we nu weten als er ongenode gasten op de site zijn (kitesurfers, ganzen) die potentieel schade

kunnen veroorzaken waar we anders geen weet van hebben. Ook effecten van stormschade en kruierend ijs kunnen zo worden bekeken zonder dat er een daadwerkelijk veldbezoek voor nodig is.

De analyse van de morfologische ontwikkeling via deze beelden gebeurt vooralsnog kwalitatief.

Combinatie met de resultaten van de monitoring (inmetingen) geeft naar verwachting voldoende inzicht in deze ontwikkeling. Mocht uit de eerste analyses echter volgen dat er significante witte vlekken resteren, dan kan overwogen worden om de camerabeelden (achteraf) ook meer kwantitatief te verwerken. De beslissing hierover komt aan de orde bij de jaarlijkse update van het monitoringsprogramma.

1.2.3 LESSONS-LEARNED ONTWIKKELING VEGETATIE (VRAAG 9)

Binnen deze taak worden de eventuele trend en fluctuaties in de ontwikkeling van de vegetatie op de proefsectie beschreven. Feitelijk weten we nog niet wat ons de komende vier jaar te wachten staat.

Mogelijk dat beheer (het opnieuw inplanten of verwijderen van te veel (ongewenste) vegetatie, herprofilering, etc.) wel nodig is. De voorkeur gaat echter uit naar het niet ingrijpen omdat dat het meest representatieve en neutrale resultaat geeft.

Uit deze analyse moet volgen welke soort vegetatie waar in het dwarsprofiel (niveau t.o.v. waterlijn) onder welke condities (bodemsamenstelling) het best voldoet en wat de verwachte 'evenwichts-omvang' van de vegetatie dan is. Deze laatste is weer afhankelijk van het soort vegetatie.

Ook is inzicht gekregen in de effecten van (ongewenste) begrazing door bijvoorbeeld ganzen op de vegetatie-ontwikkeling. Niet uitgesloten is dat ook het effect van eolisch transport een rol speelt bij de ontwikkeling van vegetatie.

Mogelijk moet hier de waargenomen ontwikkeling van de vegetatie worden geëxtrapoleerd. Extrapolatie op de langere termijn zal worden gedaan door te kijken naar de daadwerkelijke ontwikkeling in de komende vier jaar en te zien in hoeverre de verschillende aanlegstrategieën hierop van invloed zijn. Voor het in kaart brengen van deze ontwikkelingen zal gebruik worden gemaakt van zogenaamde standplaatsfactoren.

Dit geeft informatie die belangrijk is voor de aanleg elders (heeft het zin om vegetatie bij de aanleg te stimuleren?) en geeft ook een doorkijk naar de te verwachte vegetatie op langere termijn, aan de hand van expert inschattingen en data van andere locaties. Hiervoor is het noodzakelijk om jaarlijks te monitoren. Deze laatste stap is nodig voor het invullen van het benodigde beheer en de hiermee samenhangende kosten alsmede de natuur-waardering (baten).

Voor deze uitwerking zal gebruik worden gemaakt van de meetgegevens aangaande de vegetatie inclusief de uit de camerabeelden afgeleide kwalitatieve informatie.

1.3 RESULTATEN

De aandacht heeft zich primair gericht op de analyse van de morfologisch ontwikkelingen. Daarbij is voortgebouwd op de resultaten van de in dit hoofd rapport (Paragraaf 6.2.4) beschreven basisanalyses. De resultaten hiervan zullen worden vastgelegd in Hoofdstuk 2 van dit rapportagedeel.

De ontwikkeling van de vegetatie is initieel beschreven in de door Deltares/Alterra opgestelde werkrapportage (Deltares/Alterra, 2015) en laten vastgelegd in de finale versie van de monitoringsrapportage (EcoShape/Deltares/WEnR/HKV, 2018).

De voornaamste bevindingen hieruit zijn opgenomen in Hoofdstuk 3 van dit rapportagedeel.

2

Morfologische ontwikkelingen

2.1 INLEIDING

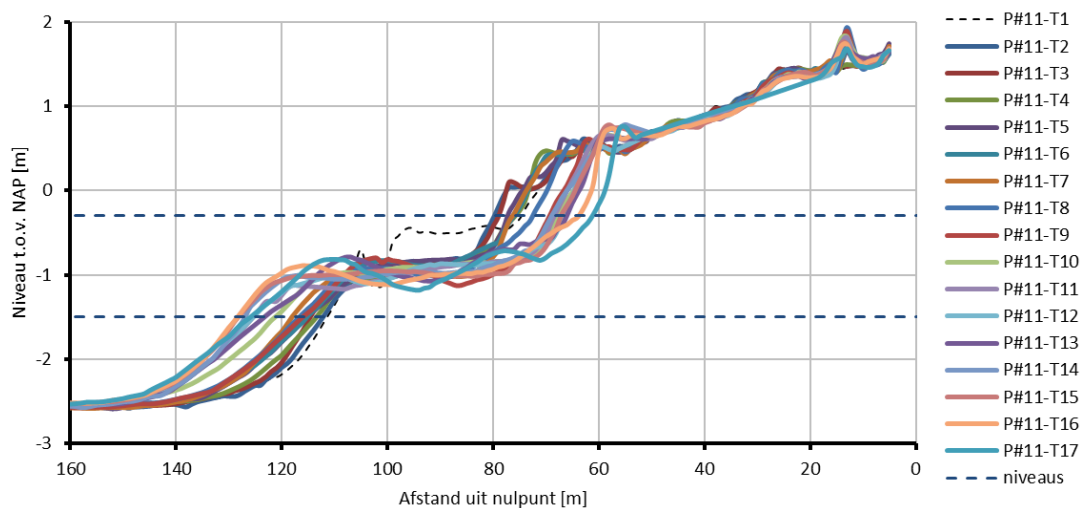
Uit de basisanalyse volgt al dat de morfologische ontwikkeling van de proefsectie een combinatie is van langs- en het dwarstransport door golven en stroom, het transport door wind en tenslotte het effect van de zetting van de ondergrond. Voor de eerste twee processen speelt ook de interactie met de aanwezige constructies een rol. Een en ander is in dit hoofdstuk nader worden uitgewerkt.

2.2 ONTWIKKELING KUSTLIJN

2.2.1 OVERZICHT

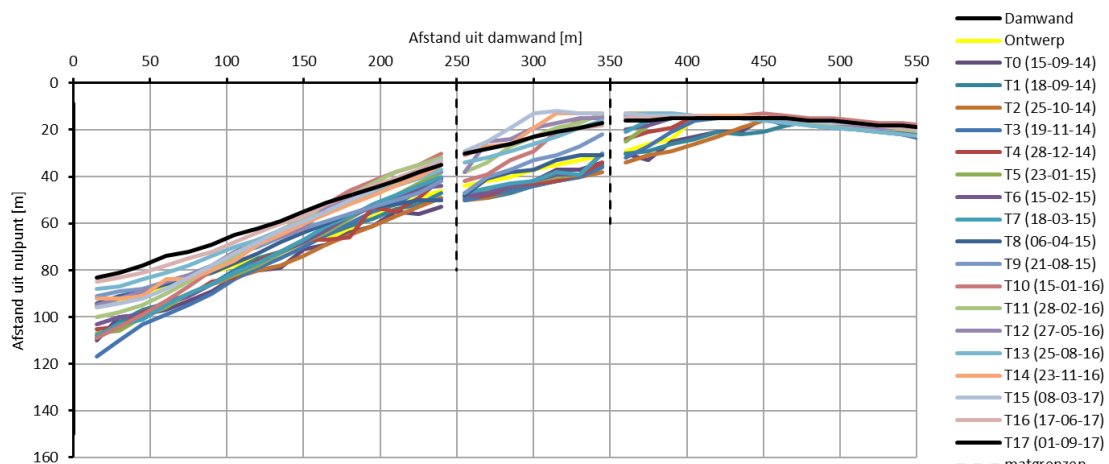
In Figuur III - 2-2 en Figuur III - 2-3 is een overzicht gegeven van de ontwikkeling van de oeverlijn. De positie van deze lijn is hiertoe gekarakteriseerd door voor elk van de gemeten dwarsprofielen de positie van de doorsnijding met het NAP-0,3 m niveau te bepalen. Dit niveau is het gemiddelde van de in het Markermeer gehanteerde streefpeilen.

De karakteristieke niveau is te zien in Figuur III - 2-1 waarin de tijdsontwikkeling is gegeven van het dwarsprofiel op 120 m uit de damwand (profiel #11).

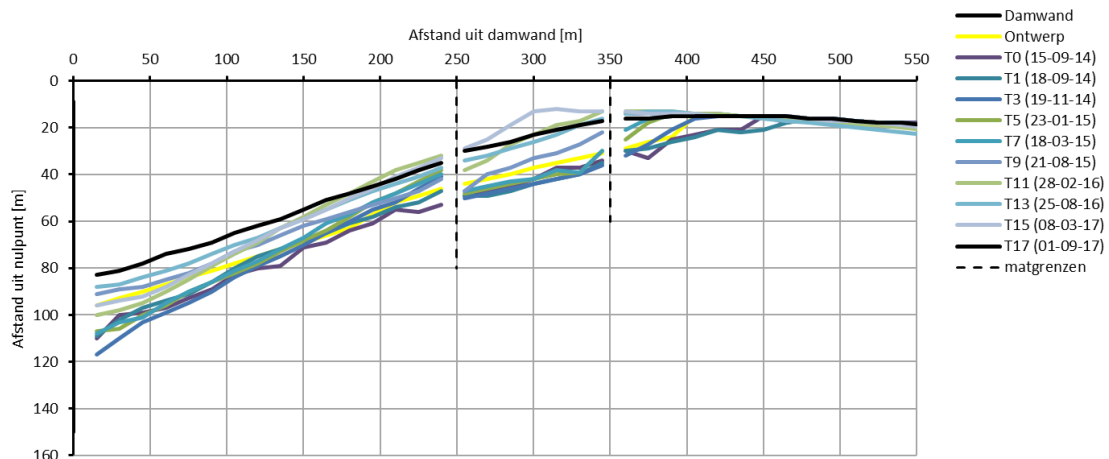


Figuur III - 2-1 Ontwikkeling dwarsprofiel in profiel #11 (op 120 m uit damwand) tot en met de laatste inmeting met daarin aangegeven de gehanteerde niveaus voor het bepalen van de karakteristieke posities van oeverlijn (NAP-0,3 m) en onderlaag (NAP-1,5 m).

In deze figuur is ook het voor de karakterisering van de positie van de vooroeverlijn gehanteerde niveau van NAP-1,5 m weergegeven (zie verderop).



Figuur III - 2-2 Overzicht ontwikkeling positie oeverlijn (positie doorsnijding op NAP-0,3 m) inclusief naastgelegen secties voor alle inmetingen.

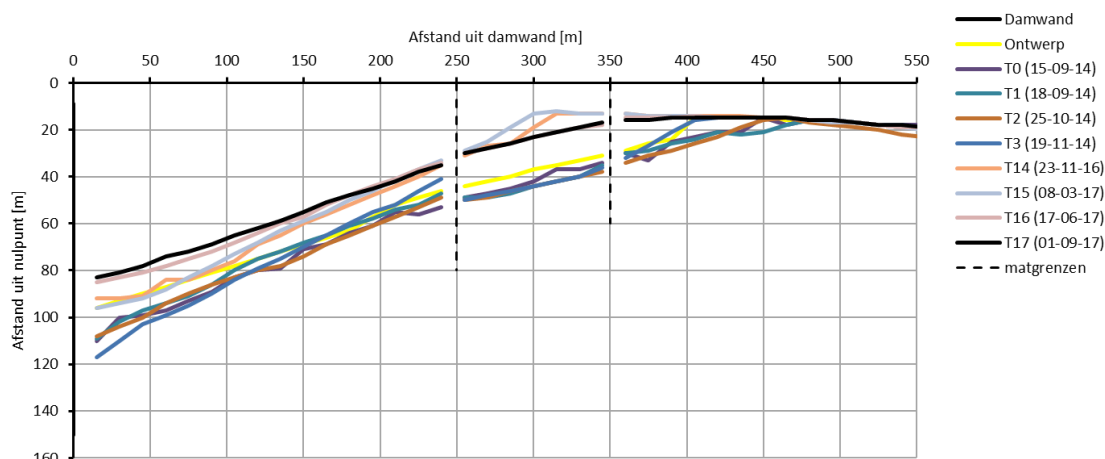


Figuur III - 2-3 Overzicht ontwikkeling positie oeverlijn (positie doorsnijding op NAP-0,3 m) inclusief naastgelegen secties voor een beperkter aantal inmetingen.

In het aldus verkregen bovenaanzicht is onderscheid gemaakt tussen:

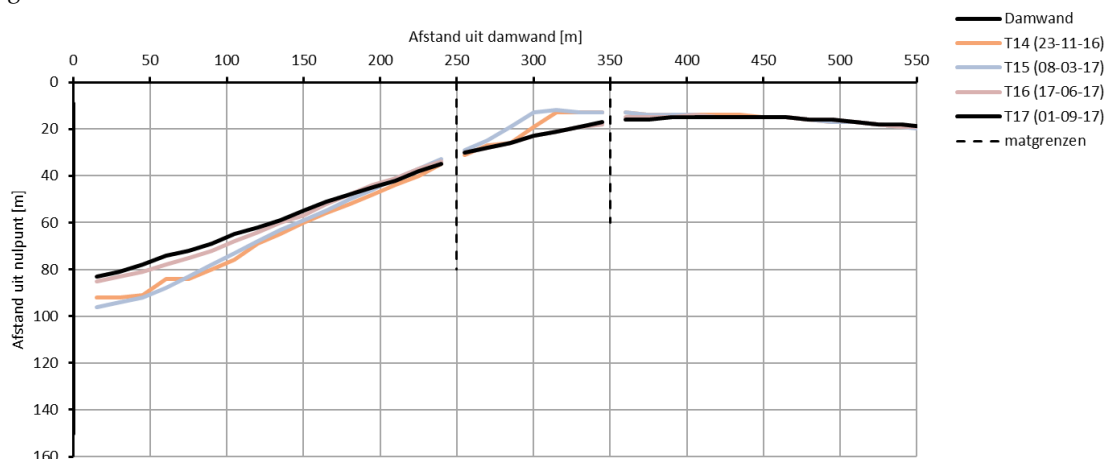
- het deel 'links' van de damwand;
- het breedste centrale deel van de proefsectie (van 0 tot 250 m uit de damwandconstructie);
- het deel ter plaatse van de initieel aanwezige rijsmattenconstructie (van 250 tot 350 m, tussen de beide stippellijnen);
- en het deel 'rechts' hier van.

In Figuur III - 2-4 is dezelfde figuur weergegeven met nu slechts een beperkter aantal opnamen, namelijk de eerste vier en de laatste vier. Hierin is duidelijker te zien dat de oeverlijn oostelijk van de rijmat-constructie thans tegen de dijk ligt en het strand hier dus ook is verdwenen.



Figuur III - 2-4 Overzicht ontwikkeling positie oeverlijn (positie doorsnijding op NAP-0,3 m) voor eerste vier en laatste vier inmetingen, inclusief naastgelegen secties.

Ook heeft er ter plaatse van de rijsmatconstructie een grote achteruitgang plaatsgevonden en is er alleen aan de westzijde nog sprake van een duidelijke strandbreedte. De oriëntatie van dit stranddeel was op dit moment dat er nog duidelijk sprake van een restant van de rijsmatconstructie (februari 2016) min of meer vergelijkbaar met dat van het centrale deel van de proefsectie (tussen 0 en 250 m). Inmiddels (sinds augustus 2016) ligt deze in het verlengde van het linkerdeel van de proefsectie. Dit is goed te zien in Figuur III - 2-5.



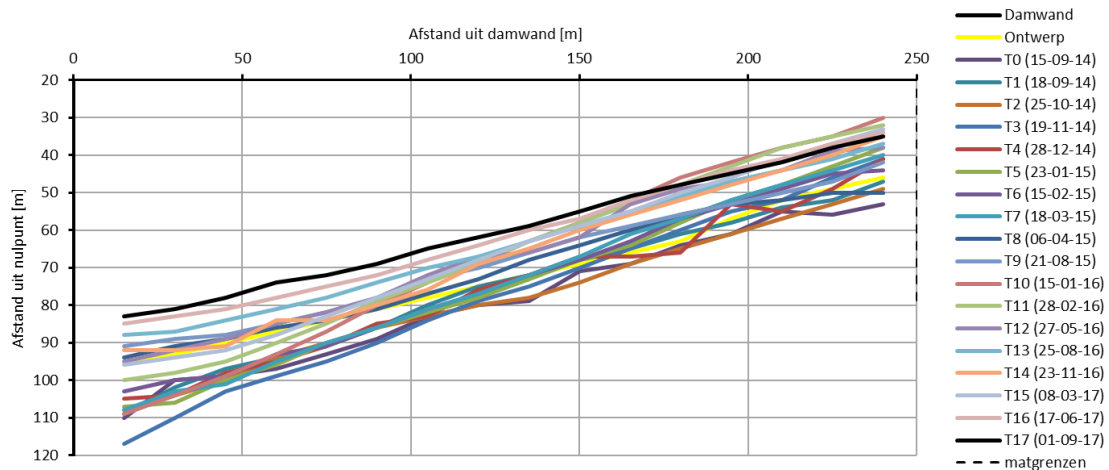
Figuur III - 2-5 Overzicht ontwikkeling positie oeverlijn (positie doorsnijding op NAP-0,3 m) voor de laatste inmetingen, met het (verdwenen) effect van de rijsmatconstructie.

Op het centrale deel is er sprake van een geleidelijke achteruitgang van de waterlijn, maar valt ook de verdraaiing van de oriëntatie van dit kustdeel op.

2.2.2 ONTWIKKELINGEN OP CENTRALE DEEL

2.2.2.1 TIJDONTWIKKELING POSITIE OEVERLIJN

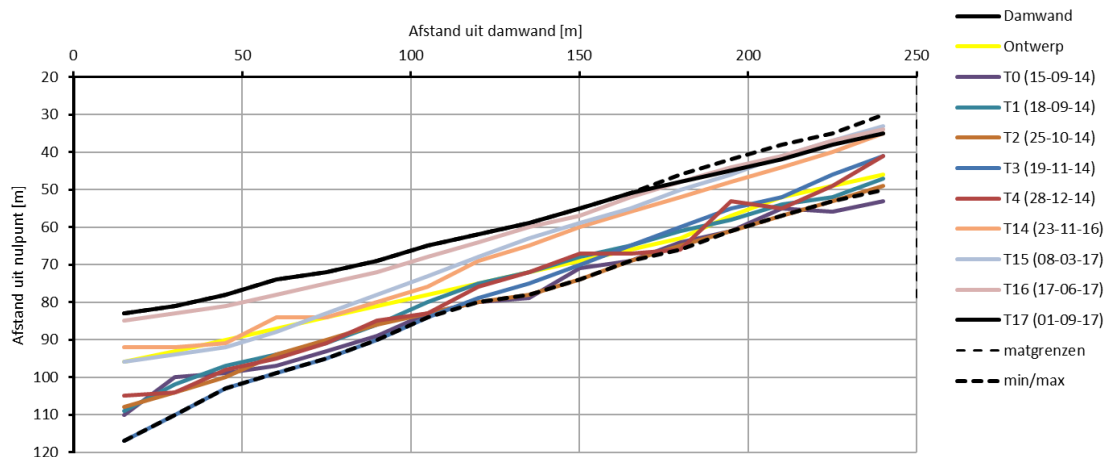
Bij de analyses is met name gekeken naar de ontwikkeling van het centrale deel van de proefsectie omdat deze, qua vrije natuurlijke ontwikkeling, het minst werd beïnvloed door de aanwezigheid van constructies. De ontwikkeling van de oeverlijn op dit stuk van de proefsectie is in Figuur III - 2-6 nader uitvergroot.



Figuur III - 2-6 Detail positie oeverlijn over centrale deel proefsectie (tussen damwand en rijnsmatconstructie).

Er is zowel qua ligging als globale oriëntatie van deze oeverlijn sprake van een behoorlijke variatie in de tijd. Voor de meest nabij de damwand aanwezige positie (profiel #4 op 15 m uit de damwand) bedraagt het verschil maar liefst 34 m. Afgezien van deze uitschieter bedraagt de tijdsvariatie op dit kustdeel grofweg 15 tot 20 m, waarbij de meest geringe waarden in de meetraai op 105 en 120 m uit de damwand (profiel #10 en #11) te vinden zijn.

Dit is ook te zien in Figuur III - 2-7 waarin met de zwarte stippellijnen, de zowel de meest 'dijkwaartse' als meest 'meerwaartse' positie is weergegeven.

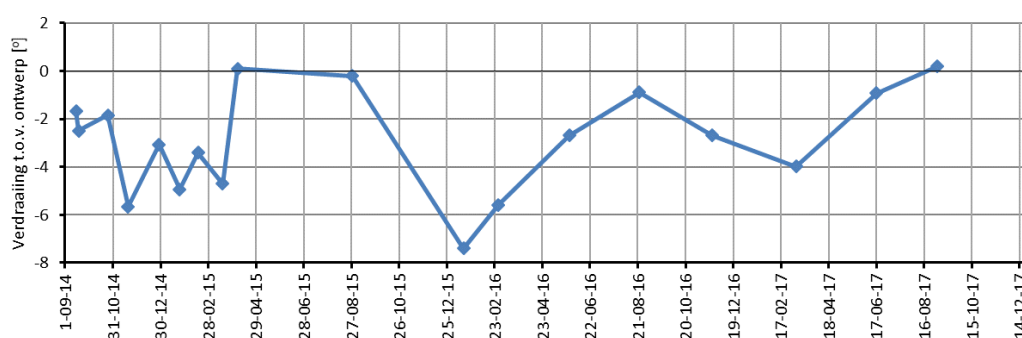


Figuur III - 2-7 Overzicht variatie in oeverlijnposities in centrale deel proefsectie.

Te zien is dat een deel van de variaties samenhangt met een heroriëntatie van de volledige sectie. Bij de damwand leidt dit bijvoorbeeld tot een achteruitgang van de oeverlijn (profielen voor T8 en T9), een grote vooruitgang (T10) gevolgd door een achteruitgang (vanaf T11).

2.2.2.2 TIJDSONTWIKKELING ORIENTATIE OEVERLIJN

De verdraaiing van de gemiddelde oeverlijn is weergegeven in Figuur III - 2-8 waarin de ontwikkeling van de oriëntatie van een geschematiseerde oeverlijn is gegeven ten opzichte van de ontworpen oriëntatie bij aanleg van de proefsectie.



Figuur III - 2-8 Tijdsontwikkeling oriëntatie oeverlijn centrale deel proefsectie als functie van de tijd.

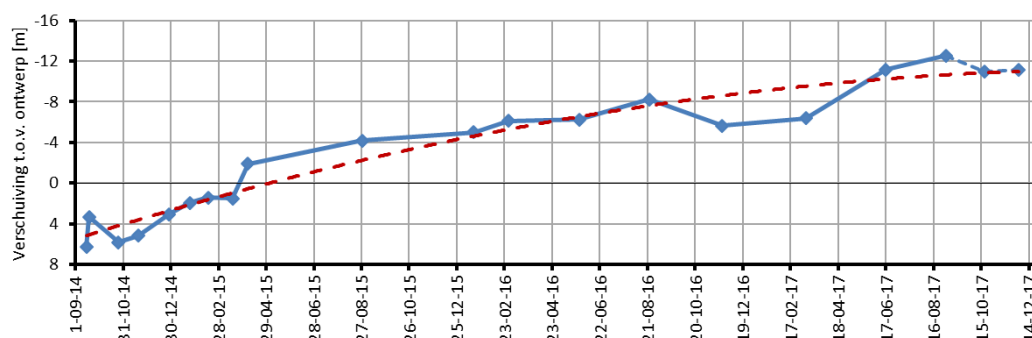
Te zien is dat er tweede periode (van T2 naar T3) als gevolg van oostelijke wind een grotere verdraaiing (tegen de klok in) plaatsvindt (zie ook Figuur 6-25 op pagina 119). De storm van eind maart 2015 (met westelijke wind) was verantwoordelijk voor een tegengestelde bijdraaiing. Vervolgens lijkt de oriëntatie gedurende de zomermaanden van 2015 weer stabiel rond de ontwerporiëntatie te liggen. Op basis van zowel de camerabeelden als de gemeten golfval is te zien dat er in december een duidelijke verdraaiing (tegen de klok in) plaatsvindt, waarbij er materiaal bij de damwand wordt afgezet en er bij de rijsmatconstructie veel erosie optreedt. Dit beeld (opname van januari 2016) wordt in de daaropvolgende periode weer deels tenietgedaan. In 2016 vindt er weer een geleidelijke bijdraaiing plaats waardoor er naast de damwand weer een geleidelijke teruggang van de oeverlijn aanwezig is. In 2017 vindt nog een dergelijke tweezijdige correctie plaats. Aan het einde van de monitoringsperiode komt de oriëntatie weer overeen met die van het oorspronkelijke ontwerp van de proefsectie.

Conclusie is sowieso dat het ontwerp wat dit betreft correct was maar dat de proefsectie onderhevig is geweest aan de effecten van een steeds wisselende dominante golfvalsrichting.

2.2.2.3 TIJDSONTWIKKELING KARAKTERISTIEKE POSITIE OEVERLIJN

Figuur III - 2-9 geeft de ontwikkeling van het zwaartepunt van de oeverlijn ten opzichte van het oorspronkelijke ontwerp. Te zien is dat er nog steeds sprake is van een langzame achteruitgang van de oeverlijn op dit kustdeel. Ten opzichte van het ontwerp is de NAP-0,3 m positie nu ongeveer 11 tot 12 m landwaarts verschoven, daar waar deze in eerste instantie 6 m 'meerwaarts' lag.

Na enige herschikking in de beginfase lijkt er sprake van een afnemende trend waarbij de tijdgemiddelde achteruitgang afneemt van grofweg 10 m per jaar in de beginfase, naar een beperkte waarde (1 tot 2 m per jaar) in de eindfase.



Figuur III - 2-9 Tijdsontwikkeling ligging positie zwaartepunt centrale proefsectie, inclusief de posities behorende bij de twee inmetingen gedurende de eerste fase van het aanvullende onderzoek.

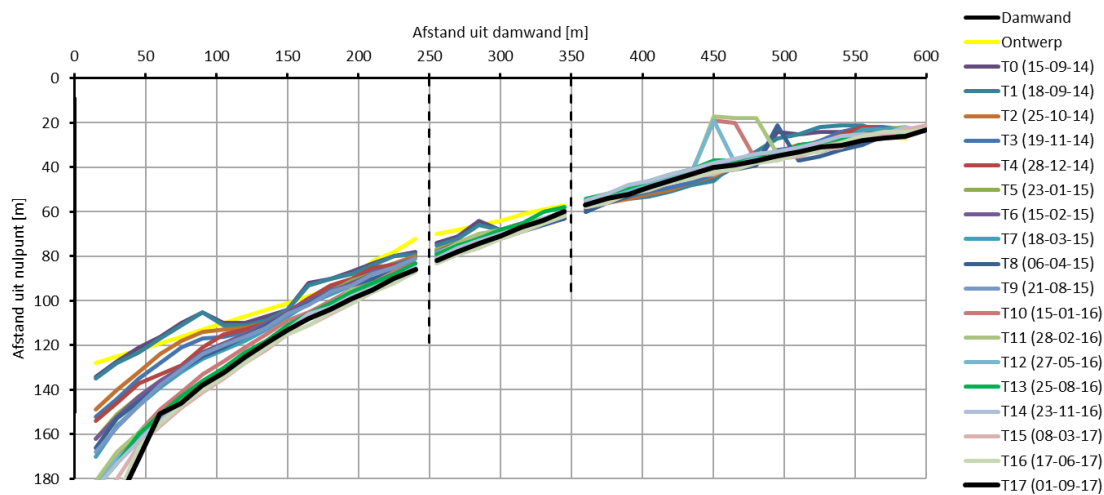
De achteruitgang van de oeverlijn hangt natuurlijk nauw samen met de inklemming van de beschouwde centrale sectie tussen de damwand en de rijsmatconstructie. Tot en met mei 2016 leek er sprake te zijn van een steeds meer stabiele situatie. Na het verdwijnen van het steunpunt (zie Figuur III - 2-5) gaat nu ook het voor oostelijke deel van de proefsectie actief meedraaien. In combinatie met de geleidelijke bijdraaiing (met de klok mee) van de proefsectie (zie Figuur III - 2-8) zal er extra materiaal vanuit de centrale sectie verdwijnen en dit dus ook leiden tot een eenmalige sprong in de achteruitgang van de oeverlijn als te zien in de figuur.

De optredende zettingen spelen hierbij ook een rol. Hierdoor zal er blijvend sprake zijn van een doorgaande achteruitgang (orde decimeters per jaar).

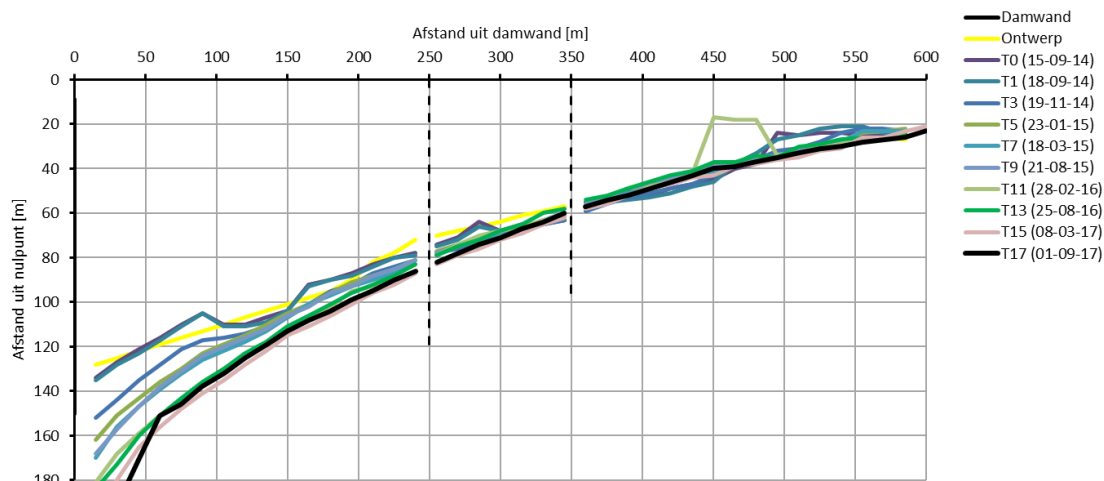
2.2.2.4 TIJDONTWIKKELING POSITIE ONDERLAAG

Het uit deze oeverlijn beschikbaar komende volume komt voor een groot deel ten goede aan de diepere laag. Verderop wordt nog iets uitgebreider teruggekomen op deze volumeontwikkeling.

De tijdontwikkeling van de positie van de voor de onderlaag karakteristiek veronderstelde NAP-1,5 m contour is gegeven in Figuur III - 2-10 en Figuur III - 2-11 (zie ook Figuur III - 2-1 voor het gebruikte niveau).



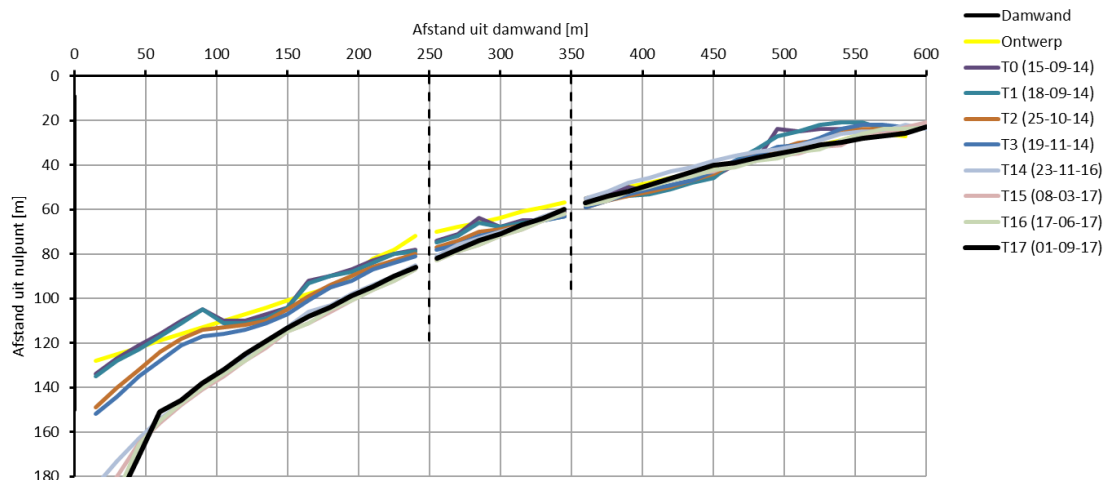
Figuur III - 2-10 Overzicht ontwikkeling positie onderlaag (positie doorsnijing op NAP-1,5 m) inclusief naastgelegen secties voor alle inmetingen.



Figuur III - 2-11 Overzicht ontwikkeling positie onderlaag (positie doorsnijding op NAP-1,5 m) inclusief naastgelegen secties voor een beperkter aantal inmetingen.

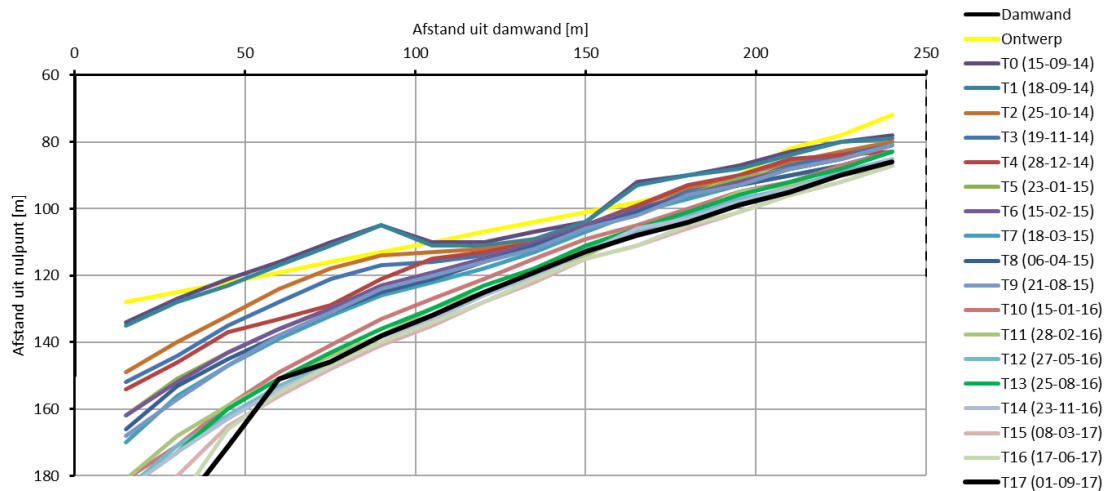
Anders dan bij de bovenlaag/oeverlijn (zie Figuur III - 2-2) is hier over de gehele proefsectie sprake van een continue doorgaande ontwikkeling zonder echte heen-en-weer-sprongen. Het effect van de rijsmatconstructie is hier bovendien afwezig.

Dit laatste is met name goed te zien in Figuur III - 2-10 waarin alleen de eerste en meest recente belijningen zijn gegeven. Te zien is dat zich een doorgaande boog ontwikkelt welke met name in de eerste 100 m vanaf de damwand leidt tot een uitbouw van deze laag. Het hiervoor benodigde volume zal moeten worden onttrokken aan de bovenste laag en daar dus leiden tot de waargenomen achteruitgang.



Figuur III - 2-12 Overzicht ontwikkeling positie onderlaag (positie doorsnijding op NAP-1,5 m) inclusief naastgelegen secties voor initiële en meest recente opnamen.

Deze uitbouw is ook te zien in Figuur III - 2-13 waarin een detail is gegeven voor het centrale deel.



Figuur III - 2-13 Ontwikkeling positie onderlaag (positie doorsnijing op NAP-1,5 m) in centrale deel voor alle inmetingen.

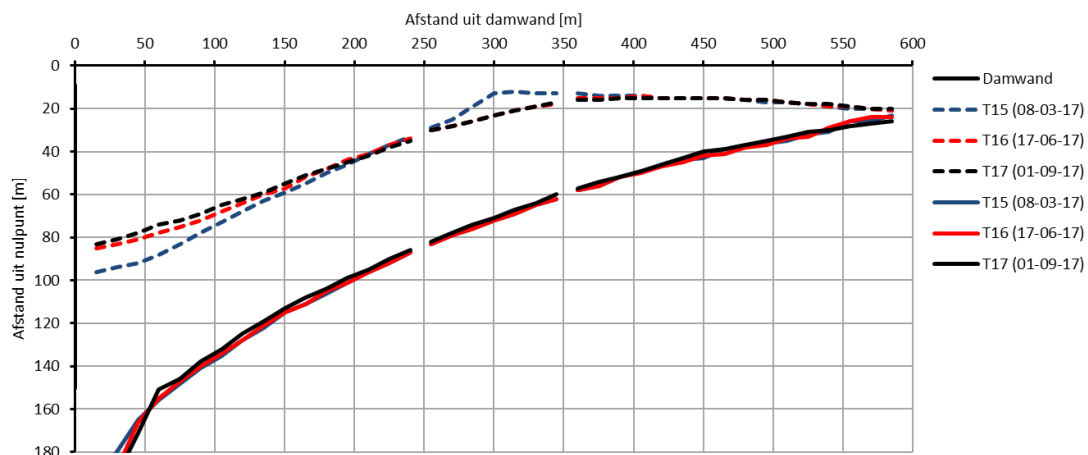
Op basis van deze beelden kan worden geconcludeerd dat er zich over de gehele proefsectie geleidelijk een doorgaande oeverlijn aan het ontwikkelen is welke aan de noordwestzijde aansluiting vindt op de damwandconstructie.

2.3 SAMENHANG BOVEN EN ONDERLAAG

2.3.1 POSITIES BOVEN- EN ONDERLAAG

In het voorafgaande zijn de positie van de oeverlijn en de onderlaag nog separaat beschouwd.

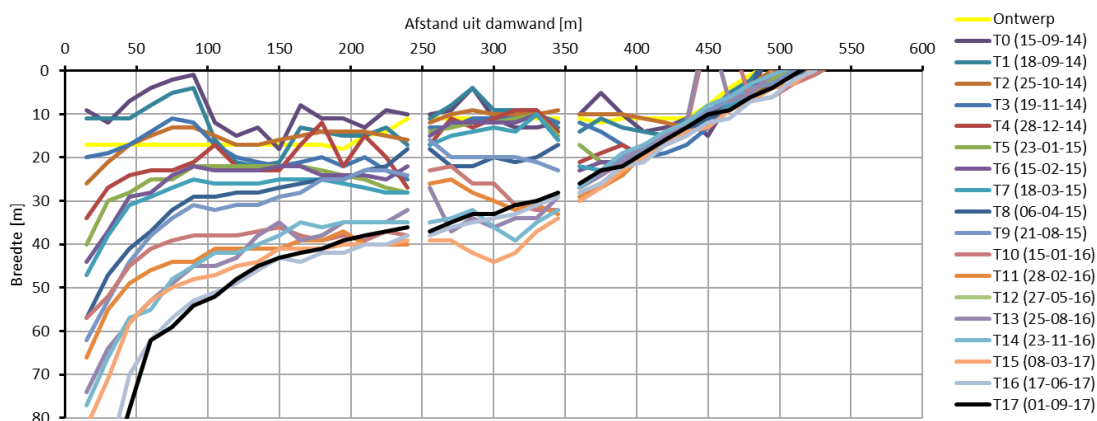
In Figuur III - 2-14 zijn deze samengebracht door voor de laatste drie opnamen beide contouren in een figuur te presenteren.



Figuur III - 2-14 Posities oeverlijn en onderlaag voor de laatste drie opnamen.

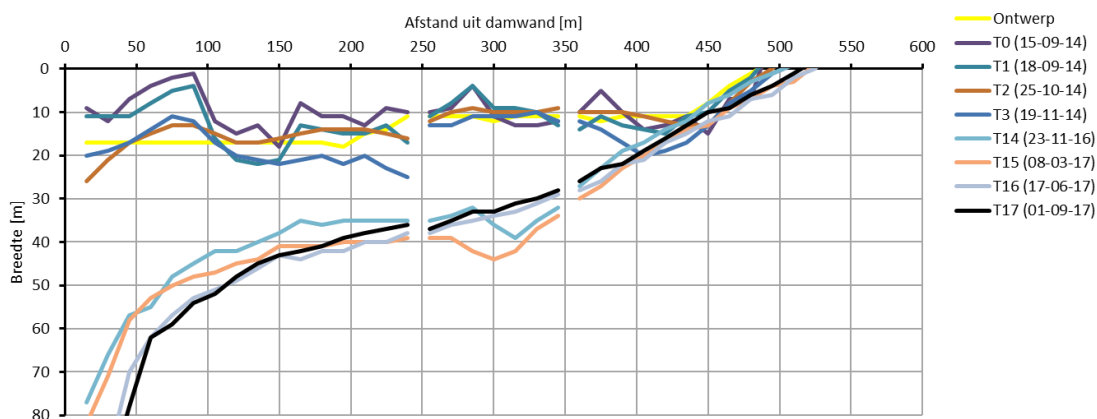
2.3.2 BREEDTE VAN HET PLATEAU

De afstand tussen deze lijnen kan gezien worden als een maat voor de breedte van het plateau en is voor alle opnamen weergegeven in Figuur III - 2-15.



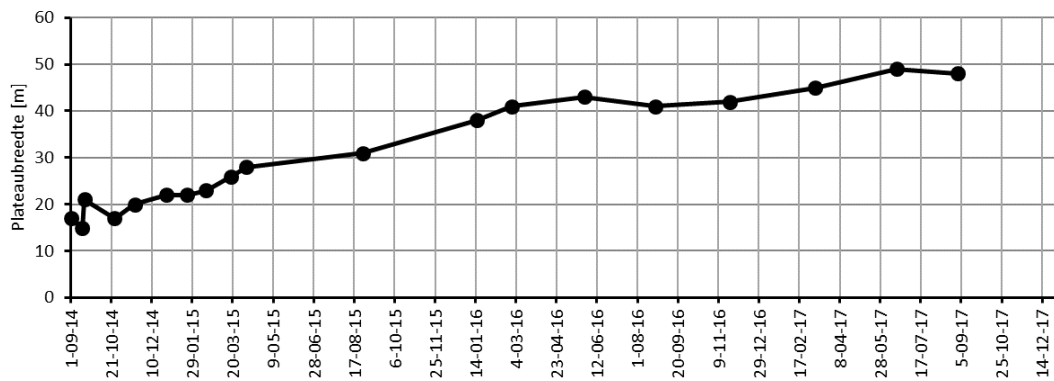
Figuur III - 2-15 Overzicht ontwikkeling plateaubreedte voor alle opnamen.

Er is duidelijk sprake van een toename van de breedte van dit vlakke deel van het dwarsprofiel. Dit blijkt ook uit de vergelijking tussen de eerste en laatste vier opnamen (Figuur III - 2-16). In de eindsituatie is er een duidelijk verschil aanwezig in de breedte van het plateau in langsrichting, waarbij de grootste breedte wordt gevonden in de nabijheid van de damwand.



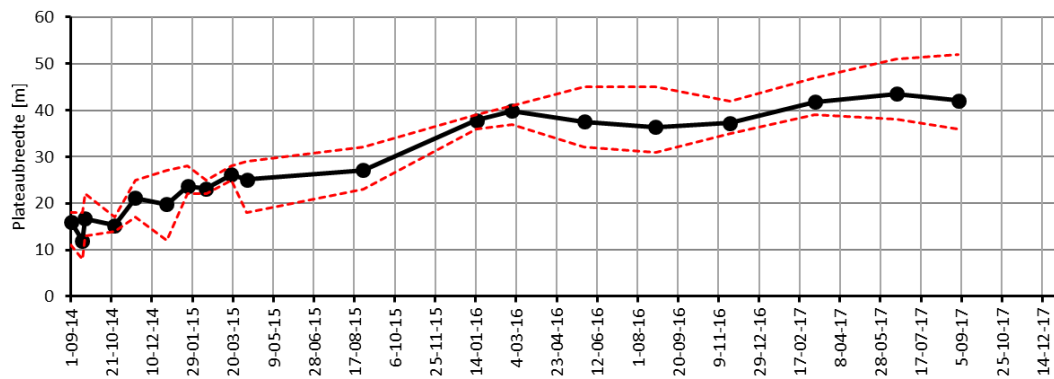
Figuur III - 2-16 Overzicht ontwikkeling plateaubreedte voor de eerste vier en laatste vier opnamen.

Beschouwing van de ontwikkeling van de plateaubreedte in de tijd voor het eerder ook beschouwde centrale dwarsprofiel (#11 op 120 m uit de damwand) geeft het in Figuur III - 2-17 weergegeven beeld. Te zien is dat de afstand tussen de boven- en onderlaag op deze locatie uiteindelijk ergens tussen de 40 en 50 m uitkomt.



Figuur III - 2-17 Tijdsontwikkeling plateaubreedte in dwarsprofiel #11 op 120 m vanuit de damwand.

Een beter beeld van deze ontwikkeling kan worden verkregen door het beschouwen van de gemiddelde breedte in de laatste 10 profielen (#10 t/m #19) van het centrale vak. Het directe effect van de profielvormen bij de damwandconstructie wordt op deze manier buiten beschouwing gelaten.

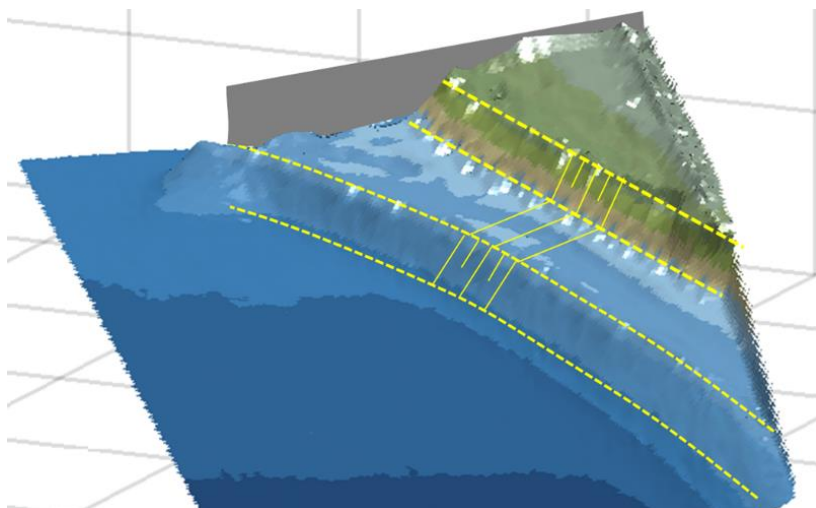


Figuur III - 2-18 Tijdsontwikkeling gemiddelde plateaubreedte op het traject tussen profiel #10 en #19 (van 105 tot 240 m uit de damwand).

Uit Figuur III - 2-18 blijkt dat er gaandeweg sprake lijkt te zijn van een zekere stabilisatie van deze breedtemaat. Van doorgaande erosie van de ovenlaag is dan ook geen sprake.

2.3.3 ONDERLINGE SAMENHANG

Analyse van de vorm van het stabiele dwarsprofiel laat zien dat er expliciet onderscheid kan worden gemaakt tussen de ontwikkeling van de lagere vooroever die geleidelijk aansluiting vindt op de beëindiging van de damwand en het sneller reagerende hoger gelegen deel dat zich qua oriëntatie instelt op de momentaan heersende golfaanval. Deze configuratie is schetsmatig weergegeven in het in Figuur III - 2-19 opgenomen 3D-aanzicht.



Figuur III - 2-19 Configuratie in 3D-aanzicht met actieve bovenlaag en voorliggende onderlaag

Het bovenste deel van het dwarsprofiel bestaat uit een relatief steil deel rond de waterlijn met een swash-berm boven water. De overgang tussen het steile deel rond de waterlijn en de buitenrand van het lagere deel wordt gemarkeerd door een breed, nagenoeg horizontaal plateau zoals te zien is in Figuur III - 2-19 waarin de profielen in de centrale sectie zijn gegeven voor de T15-opname.

2.3.4 ROL VAN HET PLATEAU EN AANVULLEND ONDERZOEK

Op basis van deze analyses wordt de conclusie getrokken dat deze configuratie waarschijnlijk samenhangt met de aanwezigheid van de damwand waar met name de diepere laag zich op aan sluit.

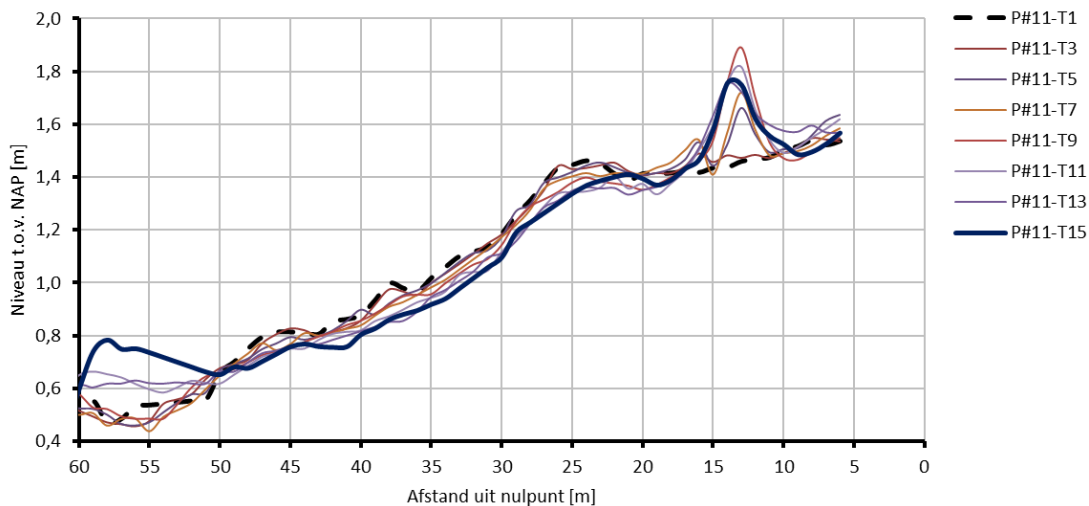
De rol van het plateau is in deze zin niet op voorhand duidelijk en heeft geleid tot het uitvoeren van een aanvullend onderzoek in de eindfase van de pilot (EcoShape/Deltares/HKV, 2018) (EcoShape/Arcadis, 2018). Dit onderzoek was gericht op het vergroten van het inzicht in de fysische processen die een rol spelen op dit plateau. Daartoe zijn er in eerste instantie additionele fysische metingen uitgevoerd en is aansluitend het effect van het deels afgraven van dit plateau gemonitord.

2.4 ONTWIKKELING VOLUMES

2.4.1 EFFECT ZETTINGEN

De omvang van de waargenomen en verwachte zettingen is reeds aan de orde geweest in Paragraaf 6.4 vanaf pagina 135. Op basis van deze informatie zou er momenteel (op basis van de T13-opname) sprake moeten zijn van een zettingsverlies van ongeveer 4.200 m³, waarvan 2.000 m³ tijdens de aanlegfase. Het zettingsverlies sinds de start van de monitoring bedraagt dus 2.200 m³.

Deze laatste volume-mutatie is echter niet expliciet terug te zien in de eerder gepresenteerde tijdsontwikkeling van het totale volume, maar maakt hier wel deel van uit.



Figuur III - 2-20 Vergelijking initiële en T15- bodemligging ter plaatse van profiel #11 op 120 m uit de damwand voor het droge deel van de proefsectie.

In Figuur III - 2-9 is ter illustratie van het lokale effect van de zettingen, zowel het initieel ingemeten dwarsprofiel (T1) als enkele tussen opnamen (tot en met T15) ter plaatse van profiel #11 (op 120 m uit de damwand) gegeven. Te zien is het effect van de opgetreden zettingen (orde 10 cm) op het traject tussen 25 en 50 m uit de dijk.

Deze verlaging kan overigens voor een beperkt deel zijn oorzaak hebben gevonden in het verlies door windtransport. Dit deel van het verlies is echter rond de stuifschermconstructie opgevangen.

2.4.2 UITWISSELING OVER RANDEN

Op basis van het verschil tussen het gekwantificeerde verschil tussen de zettingen (orde 2.200 m³ verlies sinds de T1-opname; zie Paragraaf 2.5.5 op pagina 148) en de netto volumebalans (plus of min 1.000 m³) zou dit leiden tot de conclusie dat er sprake lijkt te zijn van een sluitende sedimentbalans en er niet echt sprake is van geleidelijk aan- of afvoer van de zuidwestzijde of dieper water. Deze voorzichtige constatering moeten echter nog nader worden onderbouwd.

2.5 HERVERDELING VOLUMES

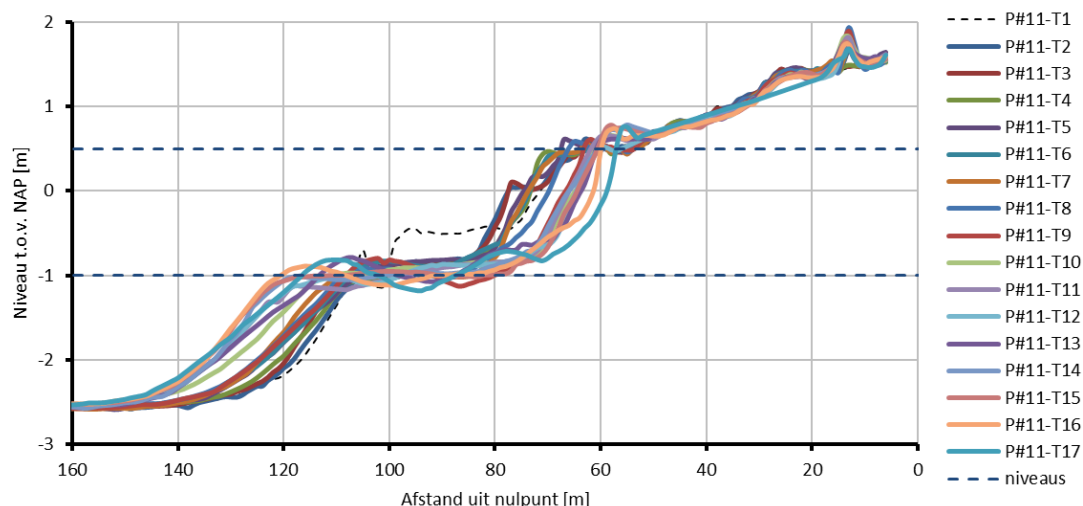
2.5.1 INLEIDING

Voor de nadere analyse van de interne herverdeling van het volume binnen de proefsectie is gebruik gemaakt van de definitie van een aantal lagen en vakken. Het idee achter de verschillende lagen is dat de morfologisch gezien op een afwijkende wijze worden aangestuurd. Voor de vakken is gekeken naar een logische indeling in langsrichting van de proefsectie.

2.5.2 DEFINITIE LAGEN EN VAKKEN

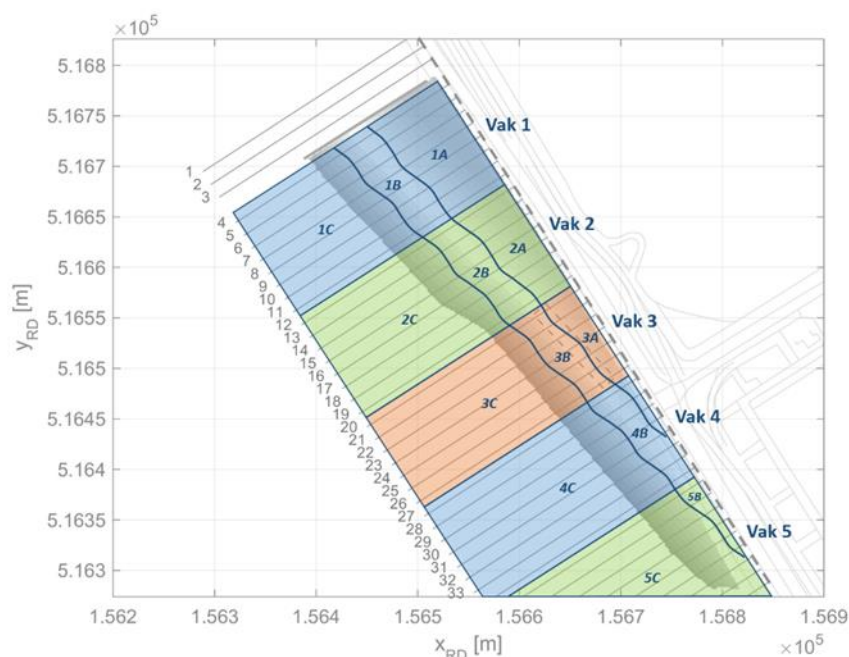
De voor de analyse gehanteerde lagen zijn weergegeven in Figuur III - 2-21. Het gaat daarbij respectievelijk om:

- Een bovenlaag (A) gelegen boven het NAP+0,5 m niveau;
- Een oeverlaag (B) gelegen tussen NAP-1,0 en NAP+0,5 m;
- Een onderlaag (C) gelegen beneden het NAP-1,0 m niveau.



Figuur III - 2-21 Schematische weergave van de gehanteerde definities voor de bepaling van de verticale verdeling van de volume-vakken. Er is onderscheid gemaakt tussen 3 lagen: [A] boven NAP+0,5 m, [B] tussen NAP-1 m en NAP+0,5 m, [C] onder NAP-1,0 m.

De in langrichting gehanteerde vak-indeling is gepresenteerd in Figuur III - 2-22. De vakken 1 en 2 vormen samen de zogenaamde ‘centrale sectie’ met een totale breedte van 250 m welke (in ieder geval tot aan de zomer van 2016 aan beide zijden is opgesloten. Vak 3 is 100 m breed en heeft betrekking op het vak met de (initieel aangelegde) rijsmattenconstructie. De vakken 4 en 5 kunnen gezien worden als het zogenaamde ‘restvak’.



Figuur III - 2-22 Schematisch overzicht van de gehanteerde indeling van volume-vakken in het studiegebied.

De rechte lijnen in Figuur III - 2-22 geven aan dat de begrenzingen van het betreffende vak ‘geografisch’ zijn bepaald. De golvende lijnen geven aan dat de begrenzingen zijn bepaald op basis van verticale niveaus (en dus afhankelijk zijn van de profielligging).

In Tabel III - 2-1 zijn de opgetreden (berekende) volumeverschillen tot en met de inmeting T17 van 1 september 2017 samengevat.

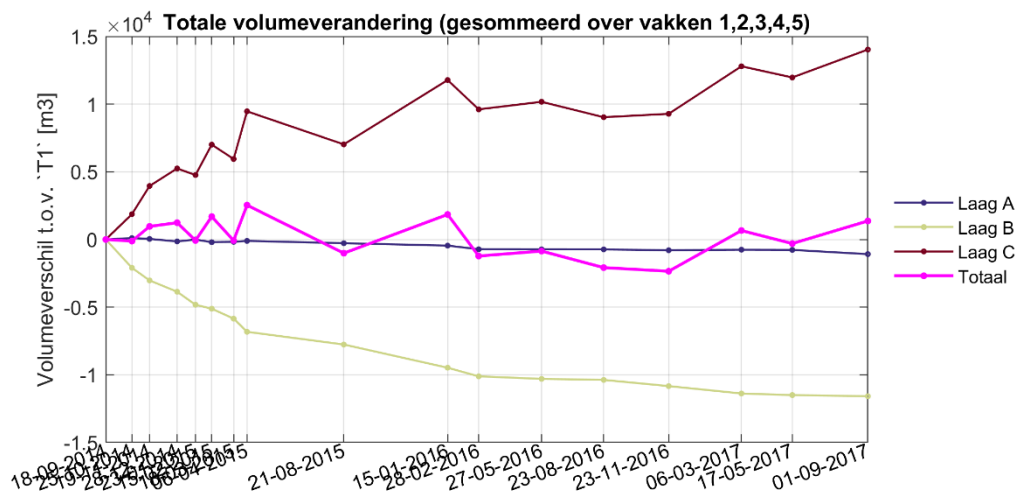
Laag	Vak 1	Vak 2	Vak 3	Vak 4	Vak 5	Totaal
Laag A	-605	-191	-286	-1	0	-1083
Laag B	-2785	-2886	-3471	-2325	-116	-11584
Laag C	7497	3218	1664	385	1270	14033
Totaal	4107	141	-2094	-1941	1153	1366

Tabel III - 2-1 Overzicht volumeverschillen ten opzichte van T1-opname tot en met inmeting T17.

Te zien is dat er ten tijde van de T17-opname sprake is van een netto winst van ruim 1.000 m³. Conclusie lijkt dus dat er materiaal in de proefsectie wordt ingevangen, zeker als is overweging wordt genomen dat het zetting-gerelateerde verlies ongeveer 2.500 m³ bedraagt. De in de tabel opgenomen getallen moeten echter ook in het licht van de onnauwkeurigheid worden beschouwd. Informatie hierover kan worden verkregen door ook te kijken naar de ontwikkeling van deze volumes in de tijd.

2.5.3 VOLUME-ONTWIKKELING PER LAAG

In Paragraaf 2.4 is de ontwikkeling van het totale volume (zie ook Tabel III - 2-1) al gepresenteerd. Hetzelfde resultaat, maar dan met een opsplitsing naar de verschillende lagen is te zien in de volgende figuur.

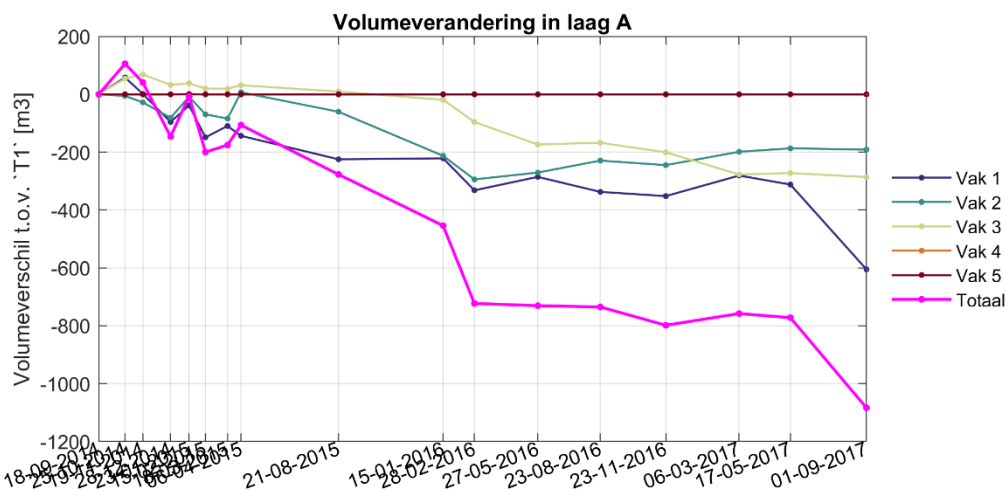


Figuur III - 2-23 Ontwikkeling volume per laag (A, B en C) en gesommeerd over alle lagen.

Te zien is dat de bovenlaag (laag A) geleidelijk een beperkte hoeveelheid materiaal kwijtraakt tot 1.000 m³. (zie ook Figuur III - 2-9), terwijl de oeverlaag (laag B) significant materiaal verliest en de onderlaag (laag C) juist materiaal wint. Dit is in lijn met de eerdere constatering. Het totale verlies van oever naar onderlaag bedraagt ongeveer 12.000 tot 14.000 m³ (T17-opname). Dit is terug te vinden in de volumetoename in deze laatste laag. Het verlies uit laag A en B is een combinatie van dit 'horizontale' verlies en het 'verticale' verlies door zetting.

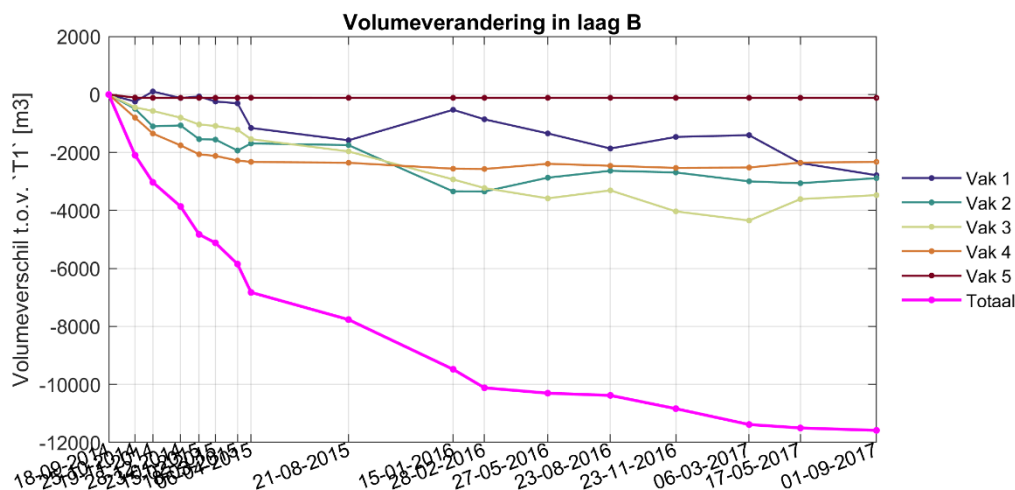
Ook is te zien dat de totale netto winst van ruim 1.000 m³ (zie ook Tabel III - 2-1) als een soort van toevalstreffer kan worden gezien. Op basis van het tijdsverloop van deze waarde lijkt de conclusie eerder gerechtvaardigd dat er op basis van deze gegevens eigenlijk netto niet zo veel winst of verlies aanwezig is.

De ontwikkeling per individuele laag (en deze weer onderverdeeld over de verschillende vakken) is gegeven in Figuur III - 2-24 tot en met Figuur III - 2-26.



Figuur III - 2-24 Ontwikkeling volume bovenlaag (laag A) per vak en gesommeerd over alle vakken.

In Figuur III - 2-24 is te zien dat in vak 3 (ter plaatste van de rijsmatconstructie) vanaf het voorjaar van 2016 een duidelijke afname te zien is van de volumehoeveelheid, dit als gevolg van het verdwijnen van de rijsmatconstructie en het daarmee bloot komen te liggen van het er achter gelegen profieldeel. Dit verklaart ook de sprong in het totale verlies uit deze laag in de winter van 2016. Het mede door zettingen geïnitieerde verlies uit de bovenlaag in vak 1 vertoont een negatief exponentieel verloop met gemiddeld genomen een in de tijd afnemende mate van verlies (tot orde 800 m³). De in het Sindsdien lijkt er sprake van een stabilisatie van deze waarde afgezien van de sprong die in de zomer gemaakt wordt in vak 1. Deze heeft echter te maken met de werkzaamheden rond de zanddam die tegen de damwand is aangelegd en heeft dus geen 'natuurlijke' oorzaak.

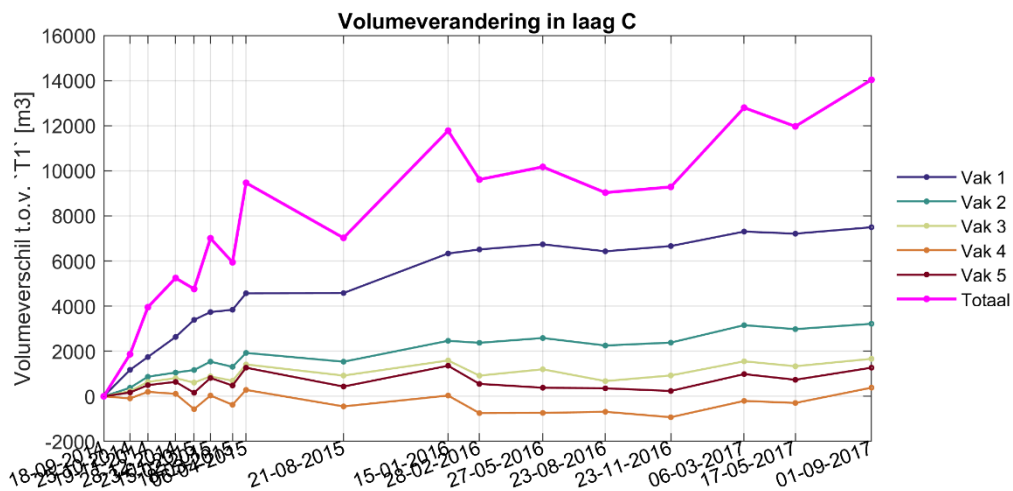


Figuur III - 2-25 Ontwikkeling volume oeverlaag (laag B) per vak en gesommeerd over alle vakken.

Voor wat betreft de ontwikkeling van de volumes in de oeverlaag (Figuur III - 2-25) is te zien dat er in vak 5 natuurlijk niets gebeurt (omdat er initieel ook al geen zand lag), de erosie in vak 4 zich reeds eind 2015

heeft gestabiliseerd op een niveau waarbij er geen zand meer aanwezig was en de erosie van vak 3 (het vak met de rijsmatconstructie) min of meer geleidelijk verloopt (orde 1.500 m³/jaar). Dit laatst gaat door tot het moment dat dit vak ook min of meer leeg is en qua morfologie en oriëntatie aansluit op de vakken 1 en 2. Beschouwing van de volumeontwikkeling in de laatste vakken (vak 1 en 2 tussen damwand en opsluitconstructie) laat zien dat het gecombineerde verlies zich min of meer lijkt te stabiliseren en dat er sprake is koppeling waarbij een af- of toename van het verlies in het ene vak samengaat met een vergelijkbare toe- of afname van het verlies in het andere vak. Dit komt door het steeds bijdraaien van de oeverlijn in dit vak.

Voor de oeverlaag zijn de volumeverliezen voor de verschillende vakken gelijkwaardig van omvang (afgezien van vak 5), hetgeen duidt op een ontkoppeling van de dwarstransport- en langstransport-verliezen.

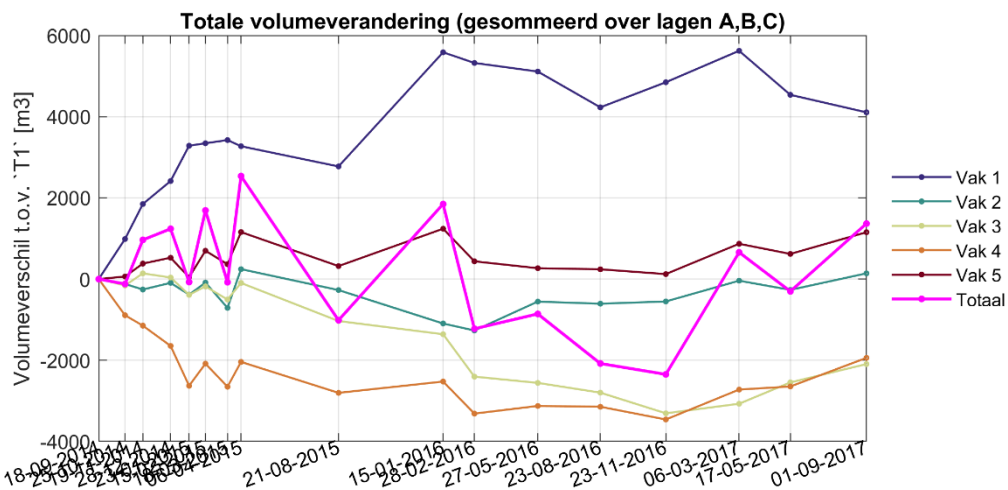


Figuur III - 2-26 Ontwikkeling volume onderlaag (laag C) per vak en gesommeerd over alle vakken.

De volumetoename in de onderlaag (Figuur III - 2-26) vindt primair plaats in het naast de damwand gelegen vak 1. Ook hier lijkt er in toenemende mate sprake van een stabilisatie ofschoon er nog wel een grote variatie aanwezig blijft.

2.5.4 VOLUME-ONTWIKKELING PER VAK

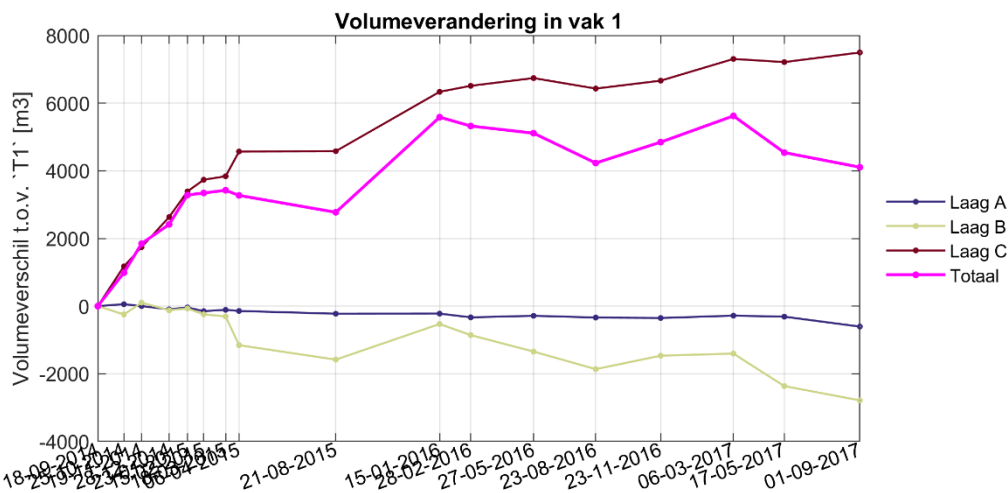
Een vergelijkbaar resultaat, maar dan met een opsplitsing naar de verschillende vakken is te zien in de volgende figuur.



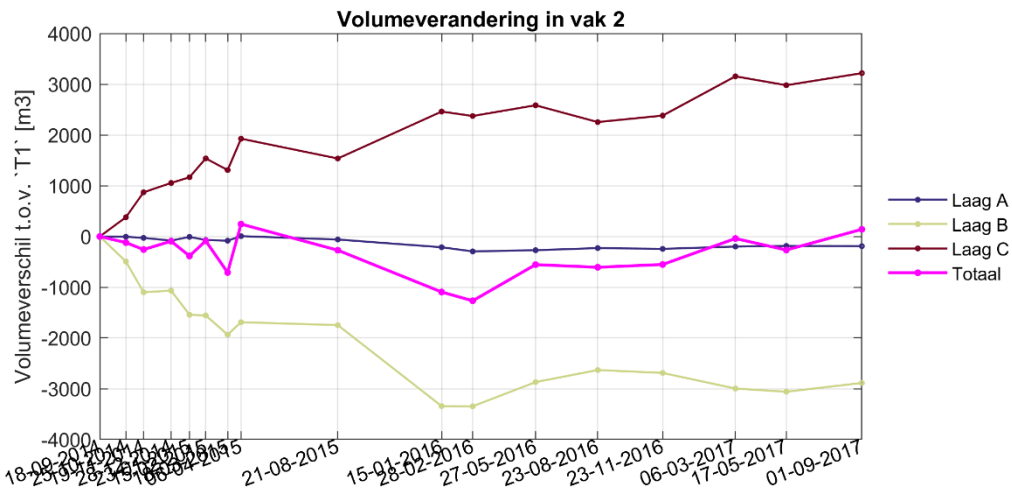
Figuur III - 2-27 Ontwikkeling volume per laag (A, B en C) en gesommeerd over alle lagen.

Te zien is dat met name vak 1 (naast de damwand) de meeste winst boekt (4.000 m³). De andere vakken vertonen juist een netto verlies (van ongeveer 150 m³ voor vak 2 tot orde 2.000 m³ voor zowel vak 3 en 4), terwijl er juist sediment bij komt in vak 5 (1.1500 m³).

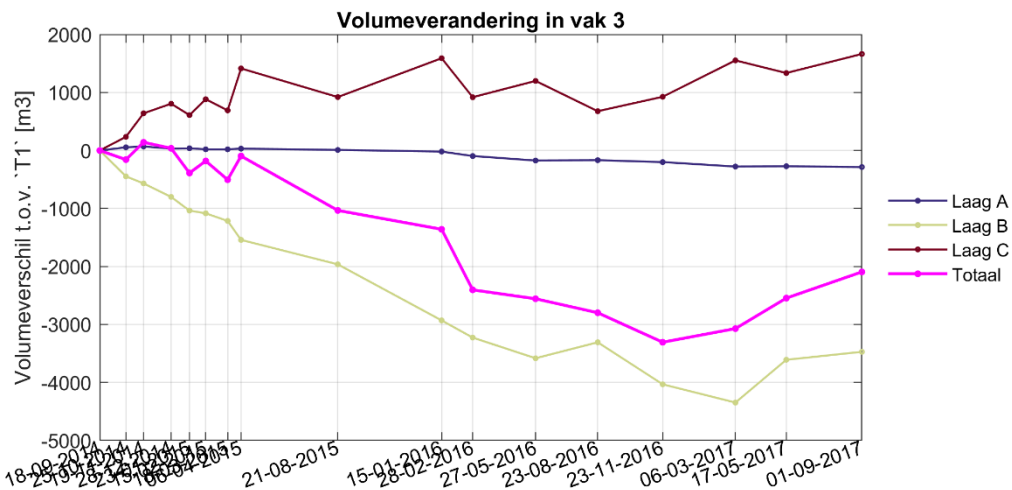
De ontwikkeling per individueel vak (en deze weer onderverdeeld over de verschillende lagen) is gegeven in Figuur III - 2-28 tot en met Figuur III - 2-32.



Figuur III - 2-28 Ontwikkeling volume vak 1 per laag en gesommeerd over alle lagen.

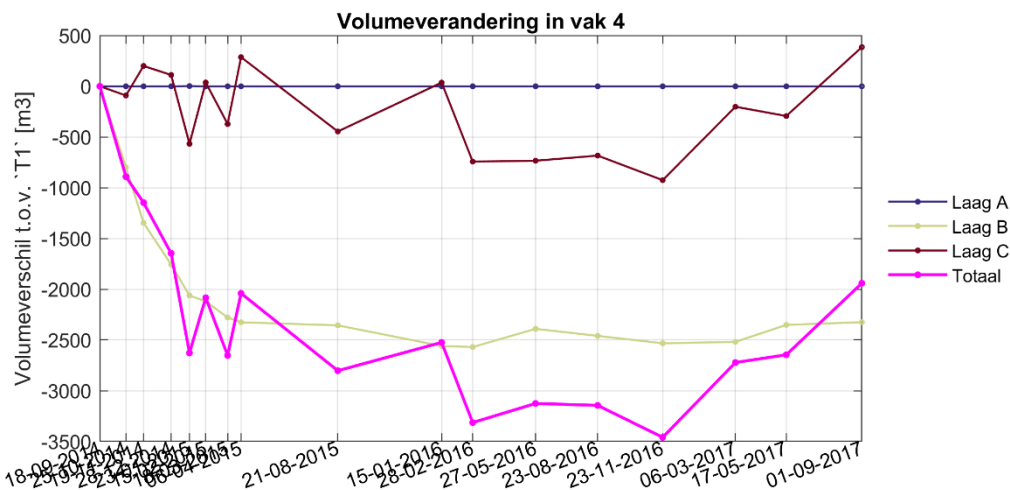


Figuur III - 2-29 Ontwikkeling volume vak 2 per laag en gesommeerd over alle lagen.

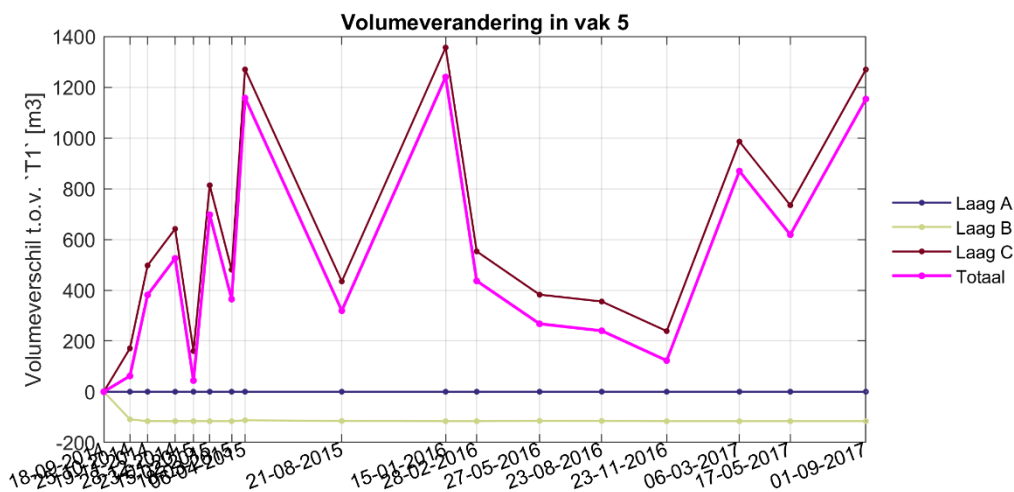


Figuur III - 2-30 Ontwikkeling volume vak 3 (rijsmatconstructie) per laag en gesommeerd over alle lagen.

Het totale verlies uit het vak met de rijsmatconstructie (vak 3) bedroeg in november 2016 3.200 m³ en bedraagt uiteindelijk 2.100 m³.



Figuur III - 2-31 Ontwikkeling volume vak 4 per laag en gesommeerd over alle lagen.

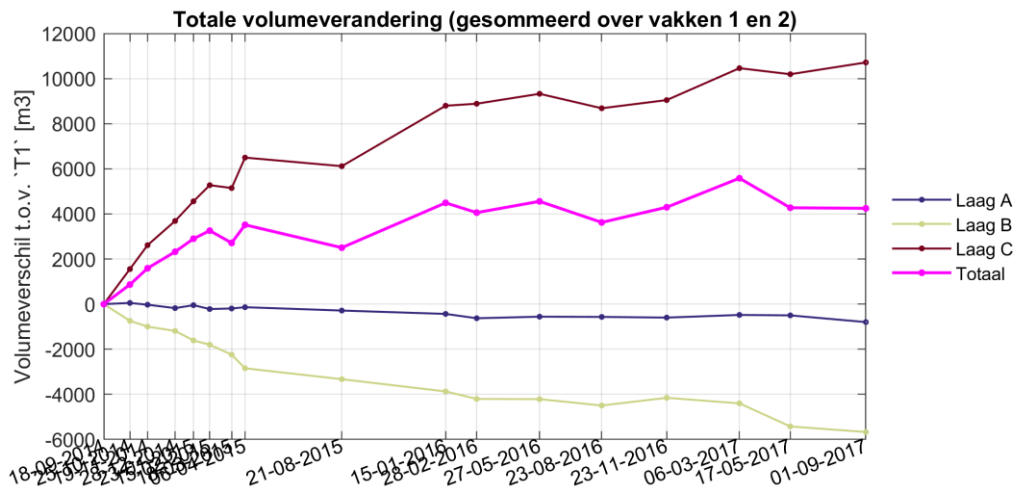


Figuur III - 2-32 Ontwikkeling volume vak 5 per laag en gesommeerd over alle lagen.

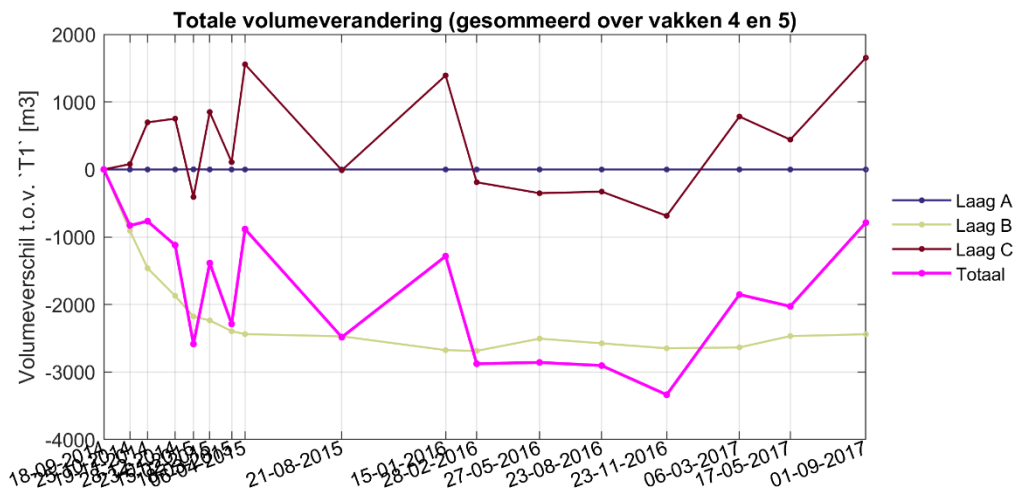
Vak 5 toont logischerwijze een grote tijdsvariatie in de volumes in de onderlaag, iets wat sterk gecorreleerd is aan de ontwikkeling van de volumes van deze laag in vak 4 en de variantie in de dominante golfvalsrichtingen.

2.5.5 VOLUME-ONTWIKKELING GECOMBINEERDE VAKKEN

In Figuur III - 2-33 is de totale volumeverandering in de vakken 1 en 2 (tussen damwand en rijzmatconstructie) in beschouwing genomen. Het totale verlies in de bovenlaag (laag A) bedraagt 800 m³ (waarvan 300 m³ in de laatste monitoringsperiode). De oeverlaag (laag B) verliest 5.700 m³ terwijl er sprake is van een toename van 10.700 m³ in de onderlaag. Netto neemt het volume in dit vak toe met ongeveer 4.000 m³, een waarde die reeds in het voorjaar van 2016 werd bereikt. Dit laatste duidt dus op het bereiken van een min of meer stabiele situatie.



Figuur III - 2-33 Ontwikkeling volume in gecombineerde vakken 1 en 2 per laag en gesommeerd over alle lagen.



Figuur III - 2-34 Ontwikkeling volume in gecombineerde vakken 4 en 5 per laag en gesommeerd over alle lagen.

De gecombineerde ontwikkeling van de volumes in de zuidoostelijk van de rijsmattenconstructie gelegen vakken laat zien dat de erosie van de oeverlaag eind 2015 tot staan is gebracht en heeft geleid tot min of meer stabiele situatie zonder veel zand in het profiel. Het totale verlies uit deze vakken bedraagt gemiddeld 2.000 m³ al lijkt er vanaf eind 2017 juist weer extra zand te worden ingevangen resulterend in een netto verlies van slechts 800 m³ in de eindfase.

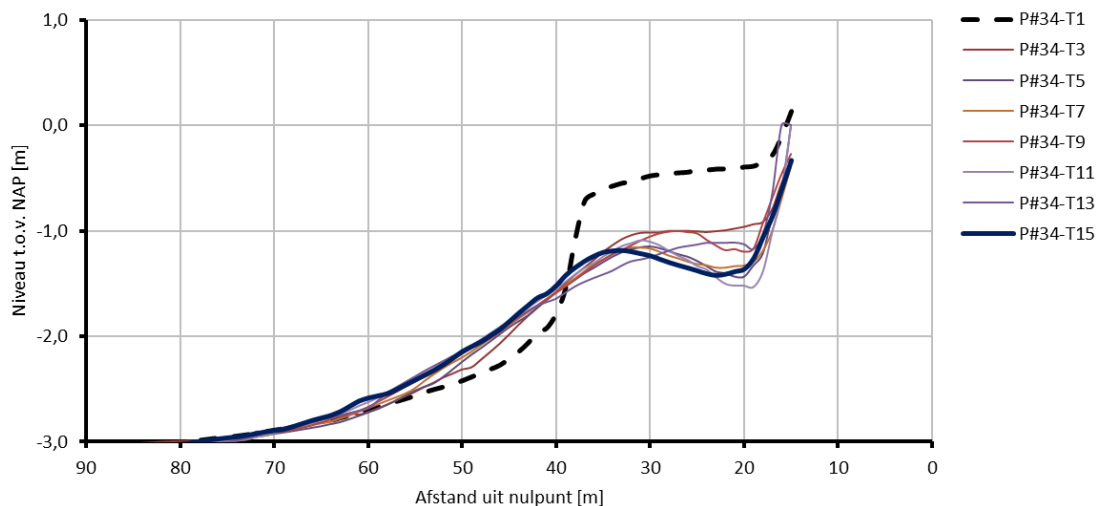
2.6 INTERACTIE MET CONSTRUCTIES

2.6.1 INLEIDING

De aanwezige constructies hebben vanwege de beperkte lengte van de proefsectie een relatief groot effect op de morfologische ontwikkeling van de proefsectie. Het door scheve golfaanval aanwezige sedimenttransport resulteert in een accumulatie van sediment tegen de damwand en of de dijk aan met als gevolg dat er sprake is van een bijdraaiing van de oeverlijn. Dit laatste zou niet het geval zijn geweest als de opsluitconstructies op veel grotere afstand van elkaar zouden hebben gelegen.

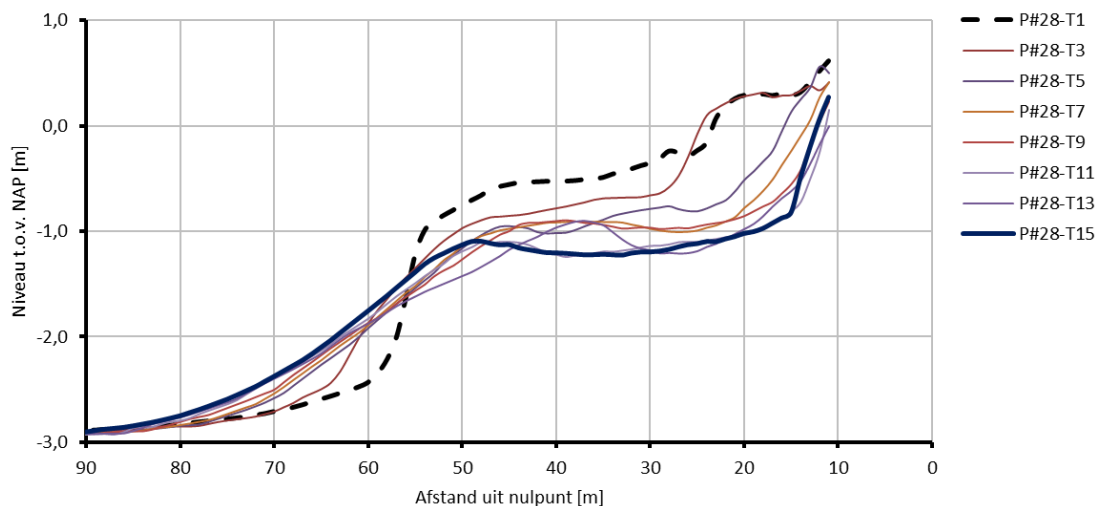
2.6.2 AANWEZIGE DIJK

In het oostelijke deel van de proefsectie is er geen strand meer voor de dijk aanwezig en ontstaat een typisch ontgrondingsprofiel tegen de dijk. Dit is te zien in Figuur III - 2-35.



Figuur III - 2-35 Overzicht profielontwikkeling in profiel #34 op 465 m uit de damwand.

Te zien is dat het initieel net onder zomerpeil aangebrachte profiel (T1) redelijk snel verlaagd en uiteindelijk een soort van ontgrondingskuil vormt. Naarmate er meer zand in het profiel aanwezig is (voor de meer westelijk gelegen profielen) komt dit kuilniveau geleidelijk ook iets hoger te liggen. Het maximale niveau van het min of meer vlakke deel van het profiel bevindt zich ook hier rond het NAP-1 m niveau.



Figuur III - 2-36 Overzicht profielontwikkeling in profiel #28 op 375 m uit de damwand.

Zoals te zien in Figuur III - 2-36 is deze laatste constatering ook van toepassing voor een veel meer richting de damwand gelegen dwarsprofiel.

2.6.3 DAMWAND

De interactie met de damwand is al aan de orde geweest. Deze zorgt voor de zijdelingse opsluiting van het hogere profieldeel, maar leidt ook tot het ontstaan van een 'aanzandingsboog' op het onderwaterdeel (zie Figuur III - 2-10).

2.6.4 RIJSMATCONSTRUCTIE

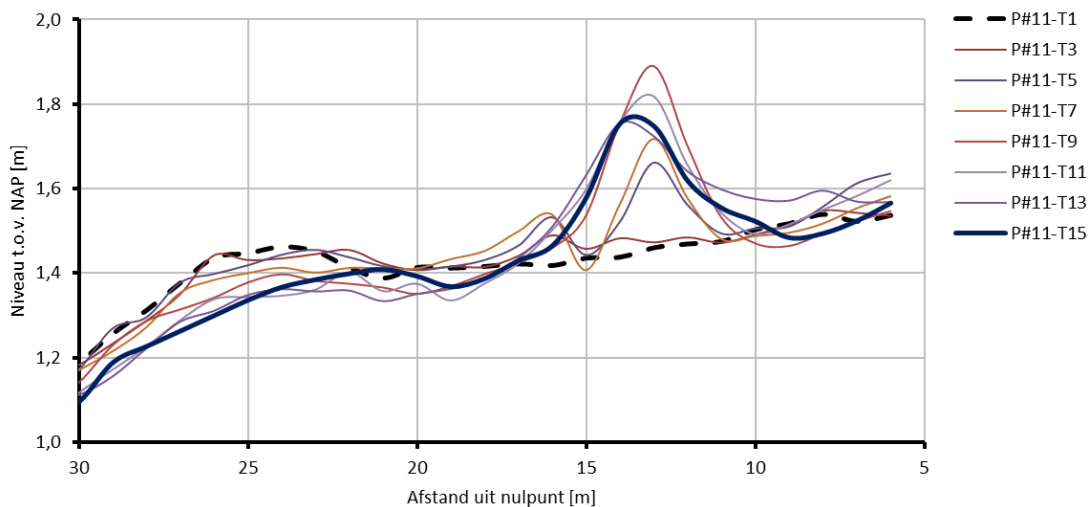
De rijsmatconstructie werkt initieel als soort van ophangpunt voor de naastgelegen secties. Dit is goed te zien in Figuur III - 2-4 zichtbare sprong in de positie van de oeverlijn. Later is deze constructie verdwenen en is ook deze 'verstorende' functie komen te vervallen.

2.6.5 TIJDELIJKE BESCHERMINGSCONSTRUCTIE

De tijdelijke beschermingsconstructie op het centrale deel van de profsectie heeft gedurende zijn aanwezigheid geleid tot enige stabilisatie van het achtergelegen oeverlijn. Dit is ook goed te zien in de GoogleEarth-opname van Figuur 1-2 op pagina 31 van deze rapportage. Na verwijdering is ook dit effect weer verdwenen.

2.6.6 WINDSCHEM

Het effect van het aangebrachte windscherm is te zien in Figuur III - 2-20 en in meer detail in Figuur III - 2-37.



Figuur III - 2-37 Detailvergelijking initiële en T15- bodemligging ter plaatse van profiel #11 op 120 m uit de damwand ter plaats van het aangebrachte windscherm.

Het rond deze constructie ingevangen volume bedraagt maximaal 2 m³/m¹.

3

Ontwikkeling van de vegetatie

3.1 INLEIDING

Tijdens de uitvoering van de pilot is specifiek ervaring opgedaan over de ontwikkeling van de vegetatie. De resultaten hiervan zijn beschreven in de door Deltares/Alterra/WEnR opgestelde monitoringsrapportage (EcoShape/Deltares/WEnR/HKV, 2018).

3.2 CONCLUSIES OP BASIS VAN DE MONITORINGSRESULTATEN

Ten aanzien van de lange termijn ontwikkeling wordt in het monitoringsrapport geconcludeerd dat de duur van de monitoring van de ecologische processen erg kort is. Na vier jaar is immers slechts het beginstadium van ontwikkeling doorlopen en dus is de vegetatieontwikkeling op langere termijn relatief onzeker.

Voor de daadwerkelijke aanleg van de zandige versterking langs de dijk is het zeer interessant om de vegetatie op het zandige substraat langer te volgen. Het is niet duidelijk wat voor begroeiing zal ontstaan op dit soort zandig substraat in deze zoete wateren, met name indien er beheerd (gemaaid of beweid) gaat worden om het ontstaan van hoog opgaand bos en struweel tegen te gaan. In theorie kan zich op de voedselarme, zandige bodem een schraal grasland ontwikkelen, dat de mogelijkheid biedt voor de vestiging van zeldzame plantensoorten. Ook kan dit in potentie bloemrijk zijn en dan een functie hebben door middel van waardplanten van rupsen en als voedselbron voor vlinders, bijen en andere insecten.

Voor meer informatie wordt verwezen naar de monitoringsrapportage (EcoShape/Deltares/WEnR/HKV, 2018).

4

Gerelateerde producten

4.1 GUIDE-LINE BEHEER EN ONDERHOUD (ZIE BIJLAGE 6)

Richtlijnen voor adequaat beheer en onderhoud van een voorlandoplossing zijn als separaat product van deze pilot opgenomen in Bijlage 6 (zie pagina 275) van deze rapportage.

Inhoud rapportage conform werkplan

Dit product heeft betrekking op een guideline waarin wordt beschreven op welke wijze beheer en onderhoud van een voorlandoplossing zo adequaat mogelijk kan worden uitgevoerd. De pilot levert daartoe inzicht in het nut van het inmengen van de holocene top laag, de effecten van verschillende soorten vegetatie, de 'werking' van de rijsmatten en de effecten van begrazing. Uiteindelijk moet dit leiden tot een aanbeveling over de wijze waarop het beheer van een voorland het meest effectief (goedkoop) kan worden uitgevoerd. Daarbij spelen de extra aanlegkosten ook een rol. Vraag is daarbij of de meerkosten van het inmengen van de top laag bij aanleg inderdaad een netto goedkoper beheer levert en of het wel verstandig is om rijsmatten te hanteren voor het opstarten van riet-vegetatie.

Verder levert de pilot inzicht in de het effect van niets doen, inzaaien of inplanten en kan daarmee de vraag beantwoord worden wat als de meest verstandige strategie kan worden gezien.

Startpunt daarbij is een inventarisatie en kwantificering van processen die het beheer en onderhoud van een voorlandoplossing sterk kunnen beïnvloeden. Te noemen zijn de langstransporten (en gradiënten daarin), de kustdwarse respons tijdens stormen en eolische transporten.

Voor de pilot is deze laatste informatie beschikbaar dan wel (voor het langstransport) aanvullend gegenereerd.

Op basis van de verkregen inzichten zullen een aantal beheersmaatregelen worden ontwikkeld. Hierbij kan bijvoorbeeld worden gedacht aan oplossingen waarbij vegetatie wordt ingezet om het onderhoud aan een voorlandoplossing te beperken.

Dit zal worden gedaan aan de hand van een aantal werksessies waarbij RWS en waterkeringbeheerders betrokken zullen worden. De inbreng van de waterkeringbeheerders is hierbij essentieel.

In de guideline zullen per beheersmaatregel ook de bijbehorende kosten worden gekwantificeerd. Hiervoor zullen kentallen deels worden gebaseerd op de voor bij de aanleg van de pilot gemaakte kosten. Belangrijker zijn echter de ervaringscijfers van de waterkeringbeheerders.

Naast de kosten zal er ook worden gekeken naar de batenkant: welke waarde vertegenwoordigt de ontstane natuur en hoe speelt dit een rol in de afweging van de keuze voor een zandige voorlandoplossing?

Op basis van deze onderdelen zal een stappenplan worden ontwikkeld dat de beheerder kan helpen bij het optimaliseren van het beheer en onderhoud van een voorlandoplossing.

Status

Inmiddels is de definitieve versie van deze guideline beschikbaar. Voor meer informatie kan worden verwezen naar de toelichting in Bijlage 6 en de natuurlijk de guideline zelf (EcoShape/Deltares/WEnR/RHDHV, 2018).

Annex IV

TOETSING VAN VOORLAND- OPLOSSINGEN

1 Inleiding

1.1 ALGEMEEN

Dit rapport betreft het basisproduct voor de toetsings-gerelateerde informatie en wordt in het werkplan omschreven als rapport IV: Bijdrage ontwikkeling toetsingsprotocol.

1.2 INHOUD RAPPORTAGE CONFORM WERKPLAN

1.2.1 INLEIDING

In het werkplan staat beschreven wat de (oorspronkelijke) inhoud van dit onderdeel van de rapportage is. In het volgende is deze opnieuw kort aangehaald.

In deze achtergrondrapportage wordt op basis van technische kennis en nadere data-analyse verslag gedaan van nieuw inzicht in:

- De definitie van een toetsingsprotocol (vraag 10);
- De rol van de vegetatie binnen de toetsing (vraag 11);
- De voor toetsing te hanteren monitoring (vraag 12).

Doel van deze taak is het eenduidig definiëren van een toetsingsprotocol voor een voorlandversterking in een 'meer'-omgeving. De pilot zal hiertoe echter niet alle benodigde informatie kunnen leveren. Wel zal er inzicht beschikbaar komen over de eisen die aan een stabiele buitenzijde van het voorland moeten worden gesteld. Ook kunnen door het beschikbaar komen van een afgeregeld numeriek model (XBeach) de dimensies van een veiligheidsprofiel indirect worden verkend. In het eerste achtergrondrapport komt deze verkenning al aan de orde. Op basis hiervan kan een ontwerp en dus ook een hieraan gekoppeld toetsingsprotocol worden afgeleid. Nog meer dat bij het ontwerp geldt dat hier expliciet rekening zal moeten worden gehouden met de aanwezige onzekerheden. Bij de hiervoor gebruikte XBeach-modellering is immers sprake van onzekerheden (de waargenomen ontwikkeling zal immers niet tot in detail kunnen worden gesimuleerd) en bovendien vereist een toetsingstoepassing nog een extrapolatie buiten het gebied van de waarnemingen.

Bij het opstellen van een toetsingsprotocol zal ook aansluiting worden gezocht bij de in het kader van het WTI in ontwikkeling zijnde voorlandmodule.

Nog geen definitief voorstel

Het definitief valideren van het voorgestelde toetsingsprotocol vereist echter een aparte actie. Onderdeel daarvan zou ook het nader analyseren van reeds in fysische faciliteiten (o.a. Deltares) uitgevoerd

modelonderzoek. Voor name de grote-schaal testen is de in de goot gehanteerde golfhoogte redelijk vergelijkbaar met de maatgevende golfaanval in een meer-omgeving.

Hierbij kan ook worden gedacht aan een voorstel voor een set van grootschalige testen in een Deltagoot-achtige faciliteit. In het kader van de pilot zal hiervoor een plan van aanpak worden opgesteld. De in het kader van de pilot uitgevoerde activiteiten moeten in dit licht dan ook worden gezien als een bijdrage aan het toetsingsprotocol.

De resultaten van deze uitwerkingen zullen tijdens een werksessie aan de projectpartners (RWS, HBWP, ENW, WTI, waterkering beheerders) worden gepresenteerd. De input van de aanwezigen zal worden meegenomen in de definitieve uitwerkingen.

1.2.2 TOETSING VEILIGHEIDSONTWERP (VRAAG 10)

Voorlandoplossingen zijn uitvoerbaar in uiteenlopende volumes waarbij de veiligheid in zijn geheel of gedeeltelijk gevonden wordt in het voorland. Er zal een globale toetsingsmethodiek ontwikkeld worden voor situaties waarbij de veiligheid in zijn geheel gevonden wordt in de voorlandoplossing en voor situaties waarin een hybride kering ontstaat (en de achterliggende dijk ook nog een waterkerende functie houdt). Door gebruik te maken van model resultaten met XBeach, waar de invloed van de geometrie (hoogte, breedte, helling) van het voorland onderzocht is voor verschillende locaties zal getracht worden zo eenvoudig mogelijke toets protocollen op te stellen.

De bijdrage aan de toetsing van het veiligheidsontwerp is daarmee direct gekoppeld aan het eerder uitgewerkte veiligheidsontwerp zoals dit al is uitgewerkt in Paragraaf 1.2.5.

Indien de bij het ontwerp gehanteerde uitgangspunten en methodiek technisch gesproken goed in elkaar steken, kan dezelfde methode in principe ook voor de toetsing van het veiligheidsontwerp worden gebruikt. Het enige verschil is dat er bij het ontwerp gebruik wordt gemaakt van zwaardere hydraulische condities omdat deze wordt betrokken op een situatie over een aantal jaren (bijvoorbeeld zichtperiode 50 jaar).

1.2.3 ROL VEGETATIE IN VEILIGHEIDSTOETSING (VRAAG 11)

Vegetatie kan een rol spelen bij het stabiliseren van het veiligheidsprofiel. De finale toets zal echter niet in het fysieke bereik liggen van de tijdens de doorlooptijd van de pilot te verwachten stormcondities.

De bijdrage van het effect van de vegetatie op de veiligheid van een voorlandoplossing kan dus alleen in kaart worden gebracht door de inzet van het eerder genoemde afgeregelde numerieke model.

Hiertoe worden verschillende zandige versterkingsoplossingen zowel met als zonder vegetatie doorgerekend. Dit leidt potentieel tot een effect op de benodigde omvang van de voorlandoplossing.

Als voorbeeld kan worden gedacht aan de benodigde breedte van de voorlandoplossing welke bij aanwezigheid van vegetatie op het buitentalud mogelijk reduceert.

Het resultaat kan zijn dat de bijdrage beperkt is of dat deze echt ‘zoden aan de dijk’ zet. In het eerste geval kan de rol van de vegetatie in de veiligheidstoetsing wellicht achterwege worden gelaten.

In het laatste geval dient er (in consultatie met ENW) een fundamentele keuze te worden gemaakt of de vegetatie daadwerkelijk een rol krijgt in de veiligheidsbeschouwing.

Onderdeel van deze taak is het rapporteren aan ENW over de rol die vegetatie kan spelen in de veiligheidstoetsing van voorlandoplossingen en de onzekerheden die daarbij spelen. Een dergelijk advies kan pas worden gegeven op het moment dat het hiervoor te hanteren XBeach-model afdoende is

afgeregeld voor de meer volgroeide vegetatie. Dit betekent dat een eindadvies pas in 2018 beschikbaar zal kunnen komen. Een interim-advies is halverwege de pilot voorzien.

Hierbij zal ook worden aangegeven wat er nog moet gebeuren om (anders dan de resultaten van de met het XBeach-model uitgevoerde verkenningen) meer zekerheid te krijgen over het effect van vegetatie onder ontwerpomstandigheden.

1.2.4 MONITORING VEILIGHEID (VRAAG 12)

De wijze waarop de veilige voorlandoplossing kan worden getoetst hangt nauw samen met de 'werking' van een dergelijk zandlichaam. Vermoedelijk is de werking van een aan een meer gesitueerde voorlandoplossing slechts beperkt vergelijkbaar met de situatie langs bijvoorbeeld de Noordzee- of Waddenkust. Voor de toetsing en monitoring van de veiligheid van een duinwaterkering moet in principe gebruik gemaakt worden van het resultaat van de doorrekening met een morfologisch duinafslagmodel. Dit kan gezien worden als een soort van detailtoets.

Denkbaar is ook dat de veiligheid van een voorlandoplossing in overwegende mate afhangt van het volume van het voorland. Mocht dat het geval zijn, dan zou de monitoring van de veiligheid zich kunnen richten op de aanwezigheid van een zeker minimaal volume.

Nog eenvoudiger wordt het als er een eis kan worden gesteld aan het beschikbaar zijn van een zeker volume binnen een bepaalde door een boven en ondergrens gedefinieerde schijf. Deze benadering komt overeen met de methodiek die voor de kust wordt gehanteerd voor de positie van de Momentane KustLijn (MKL).

Het meest eenvoudig is dat, gegeven dat het concept van een min of meer stabiel buitentalud daadwerkelijk werkt, mogelijk kan worden volstaan met het definiëren van een kritieke positie op de buitenkruin van het voorland.

Op basis van de ervaringen die zijn opgedaan tijdens de monitoringcampagne en het concept protocol voor het veiligheidsontwerp zullen de verschillende monitoringsconcepten worden vergeleken en zal een voorstel worden gedaan voor de te meten indicatoren, hun frequentie en een suggestie voor meetmethodiek.

1.3 RESULTAAT UITWERKINGEN

Het ontwikkelen van een gedragen veiligheidsbenadering bleek toch ingewikkelder dan op voorhand werd ingeschat. Dit had mede te maken met de in eerste instantie beperkte mogelijkheden van het XBeach-model om de waargenomen ontwikkelingen te kunnen reproduceren. In overleg met Rijkswaterstaat is er uiteindelijk toe besloten om de aandacht te richten op het, in lijn met de nieuwe WBI-methodiek, verkennen van de mogelijkheden voor het formuleren van een guideline voor het ontwerp en beoordelen van dijk-voorlandssystemen te ontwikkelen.

De stabiliserende rol van vegetatie kwam in deze pilot niet echt uit de verf en het voorliggende onderzoek heeft dus ook geen bijdrage kunnen leveren aan de inzichten op dit vlak.

2 Toetsing veiligheidsontwerp

2.1 INLEIDING

Initieel ging de aandacht primair uit de mogelijkheden om met het XBeach-model de waargenomen profielontwikkeling te kunnen simuleren. Meer specifiek is ging het daarbij om de evenwichtsvorm van de rond de waterlijn gelegen profielvorm (steil 1 : 10 talud boven het NAP-1,0 m niveau met een 'swash-bar' tot op NAP+0,8 m), plus de valt daaronder.

De vigerende versie van het model is wel verbeterd ten opzichte van de versie zoals deze in 2014 beschikbaar was, maar definitief geschikt als rekenmodel voor een veiligheidsontwerp is deze nog niet.

2.2 NADERE UITWERKING RICHTING DIJK-VOORLANDSYSTEMEN

Zoals aangegeven is er in het kader van de pilot gekeken naar de mogelijkheden om aan dijk-voorlandsystemen te rekenen. Het resultaat van deze verkenning is opgenomen in een eerste versie van een dergelijke guideline (EcoShape/HKV, 2018).

3

Rol van vegetatie

3.1 INLEIDING

Er is op basis van de resultaten van de pilot geen relatie te leggen tussen vegetatie en morfodynamiek van het talud. De aangeplante vegetatie staat slechts op dat deel van de pilot waar geen water komt en het riet in de oeverzone niet is aangeslagen.

Er is verder ook nauwelijks spontane vestiging van vegetatie in dit deel van het profiel, omdat de omstandigheden voor spontane vestiging hier erg ongunstig zijn.

3.2 CONCLUSIE TEN AANZIEN VAN DE VEILIGHEIDSBIJDRAGE

De resultaten van de pilot geven geen informatie over de mogelijkheden om het stabiliserende effect van vegetatie in de veiligheidsbeoordelingen te kunnen onderbrengen.

4

Monitoring veiligheid

4.1 INLEIDING

De veiligheid van een voorlandoplossing hangt in overwegende mate af van het volume van het voorland. De exacte vorm van het profiel doet in deze dus niet zo ter zake. Dit betekent dan ook dat de monitoring van de veiligheid van een van een zandig voorland voorziene waterkering kan worden vormgegeven door het beschouwen van een volume binnen een bepaalde verticale laag. Een specifieke uitwerking hangt daarbij natuurlijk af van de beschouwde situatie.

4.2 CONCLUSIE TEN AANZIEN VAN DE MONITORING

In het kader van de beoordeling van de veiligheid van de langs Houtribdijk aan te leggen zandige voorlanden wordt een dergelijke methodiek in meer detail uitgewerkt. De tijdens de pilot opgedane kennis wordt hierin zeer expliciet meegenomen.

5

Gerelateerde producten

5.1 PLAN VAN AANPAK TOETSINGSPROTOCOL (ZIE BIJLAGE 7)

De in het kader van de pilot gedefinieerde bijdrage aan de ontwikkeling van een toetsingsprotocol is als separaat product van deze pilot opgenomen in Bijlage 7 (zie pagina 277) van deze rapportage.

Inhoud rapportage conform werkplan

De ten behoeve van de vorige producten uitgevoerde activiteiten zullen per definitie niet tot een volwaardig toetsingsprotocol leiden. Om toch, gegeven de tijdens de pilot opgedane kennis, effectief richting te geven aan de daadwerkelijke formulering van een toetsingsprotocol, is een separaat product gedefinieerd dat een plan van aanpak voor de definitie van een dergelijk protocol beschrijft.

Ook zal op basis van het resultaat van rapport IV (zie Annex IV) worden aangegeven of het nuttig en verantwoord lijkt de effecten van de aanwezigheid van vegetatie op de veiligheid van een voorlandoplossing in rekening te brengen.

De oplevering van dit product is halverwege de pilot voorzien. Hiermee kan de in de eerste helft opgedane kennis worden 'meegenomen' en kan simultaan aan de tweede helft van de pilot een toegespitst onderzoeksprogramma worden opgestart. Het kader (bijvoorbeeld WTI2023) waarin een dergelijk programma kan worden opgenomen zal nog moeten worden vastgesteld.

Het inzicht in de veiligheidseffecten van de vegetatie neemt natuurlijk toe in de tijd. Het op basis van deze inzichten geformuleerde advies over de rol van vegetatie in de veiligheidsbeschouwing zal aan het eind van de pilot dan ook beter zijn onderbouwd dan halverwege. Desalniettemin zal er halverwege ook al een eerste indicatie worden afgegeven.

Status

Zoals aangegeven is de focus in de eindfase van de pilot gelegd op de verkennende definitie van een guideline voor het ontwerp en de beoordeling van dijk-voorlandssystemen.

Annex V

OPSCHALING EN BUSINESS-CASES

1 Inleiding

1.1 ALGEMEEN

Dit rapportagedeelte gaat in op het resultaat van de zogenaamde opschaling van de ontwikkelde kennis. Deze rapportage wordt in het werkplan omschreven als 'Rapport V: Opschaling'.

1.2 INHOUD RAPPORTAGE CONFORM WERKPLAN

In het werkplan staat beschreven wat de (oorspronkelijke) inhoud van dit onderdeel van de rapportage is. In het volgende is deze opnieuw kort aangehaald.

In de kennisontwikkeling onder de benoemde thema's (ontwerp, aanleg, beheer en onderhoud, ...) is steeds de nadruk gelegd op het 'vertalen' van de waargenomen/afgeleide resultaten van de proefsectie voor de Houtribdijk naar meer generieke kennis die toepasbaar is in andere omstandigheden/locaties. Om te komen tot een meer integrale verkenning van de mogelijkheden voor voorlandoplossingen in meer concrete zin, zal in aanvulling hierop worden gekeken naar concrete opties voor opschaling. Het gaat hier dus om een op basis van de individuele guidelines gecombineerde verkenning van de (on)mogelijkheden voor de realisatie van een voorlandoplossing op andere locaties.

Doel van een dergelijke verkenning (de zogenaamde 'roadmap') is om via een eenvoudige 'procedure' en business-case aan te geven of een voorlandoplossing voor een bepaalde locatie inderdaad als een kansrijke oplossing kan worden gezien. Dergelijke informatie kan behulpzaam zijn in de verkenningsfase van een dijkversterkingsproject waarin kansrijke alternatieven worden geselecteerd. Het ontbreken ervan zou kunnen leiden tot het (achteraf gezien) onterecht afvallen van een dergelijke optie.

Deze overkoepelende verkenning geeft ook de mogelijkheid om een meer expliciete koppeling te leggen met andere BwN-projecten, zoals de zandmotor en het recent voor de HPZ opgestarte innovatie/monitoringsprogramma.

Roadmaps en business-cases (vraag 12)

Doel van deze activiteit is het opleveren van een rapportage over de ruimere toepasbaarheid van voorlandoplossingen, dit uitgewerkt voor een specifieke locatie waar door waterkeringbeheerders wordt nagedacht over de mogelijke toepassing van een zandige versterking.

Als voorbeeld van dergelijke locaties moet niet alleen worden gedacht aan de voor de hand liggende locaties als de Houtribdijk en de Markermeerdijk, maar ook aan bijvoorbeeld dijken langs de Friese kust, het IJsselmeer en het Haringvliet. De te onderzoeken locaties zullen in overleg met project partners (RWS, HBWP en Waterkeringbeheerders) worden geselecteerd.

Voor de uitwerking zal gebruik worden gemaakt van de karakteristieken van de beschouwde locaties. Als onderdeel daarvan zal ook worden gekeken naar de problemen met de te versterken dijk. Het type voorlandoplossing hangt immers samen met dit veiligheidsprobleem. Is er bijvoorbeeld sprake van een geotechnisch probleem (HPZ, Markermeerdijk), dan komt een standalone voorlandoplossing in beeld. Heeft de dijk nog wel enige sterkte, maar wordt de voorzijde te veel aangevallen (bekleding en/of overslagprobleem), dan ligt een hybride oplossing voor de hand.

Na vaststelling van de mogelijke oplossingsrichting kan op basis van de ‘guideline ontwerp’ een eerste indicatie worden verkregen over de benodigde afmetingen van het voorland. Vervolgens kan met de ‘guideline aanleg’ inzicht worden verkregen in de mogelijke aanlegmethodes en de hiermee samenhangende kosten en de ‘guideline vergunningen’ in het hiervoor te doorlopen vergunningentraject. De ‘guideline beheer- en onderhoud’ geeft tenslotte inzicht in de met het beheer en onderhoud samenhangende aspecten.

Resultaat is een set van voorontwerpen waarin de opgedane kennis wordt toegepast op specifieke locaties. Door de toepassing van alle guidelines op concrete locaties komt alle ontwikkelde kennis bij elkaar en kan de toepasbaarheid ervan voor de geselecteerde gevallen worden beoordeeld. Mogelijk leidt dit weer tot een bijstelling/aanscherping van individuele guidelines.

Voor de beschouwde locaties laat deze oefening zien in hoeverre het mogelijk is om veel sneller en beter een inschatting te kunnen maken van de mogelijke toepasbaarheid van voorlandoplossingen. Onderdeel hiervan zal ook het opstellen van een business-case per beschouwde locatie zijn.

Deze activiteit geeft daarmee invulling aan het oorspronkelijke hoofddoel van deze pilot.

Gegeven het feit dat de helft van de definitieve guidelines pas in 2018 beschikbaar komt, is er voor gekozen om halverwege de pilot een eerste exercitie te plannen (najaar 2016). Deze sessie leidt ook mogelijk weer tot enige bijstelling van de guidelines. De finale sessie is gepland in het voorjaar van 2018.

1.3 GEVOLGDE AANPAK

Het onderzoeksthema opschaalbaarheid c.q. de onderzoeksvraag betreffende het toepassingsbereik (vraag 13) komt enerzijds als product terug in Tabel 3-2, maar is daarnaast ook integraal onderdeel van de andere thema’s waar op basis van inzichten uit de pilot generieke kennisproducten worden ontwikkeld die elders toepasbaar zijn.

Opschaalbaarheid heeft immers steeds betrekking op de ‘vertaling’ van de resultaten van de pilot naar andere locaties of toepassingen. Hiermee komt opschaalbaarheid terug in de formulering van een bepaald product waarbij het nagestreefde product de lokale dimensie van de proefsectie/pilot overschrijdt. Het is immers niet de bedoeling om enkel en alleen de ervaringen op de proefsectie te beschrijven, maar juist om ervan te leren voor andere locaties en toepassingen.

Als voorbeeld van deze benadering kan de productcategorie ‘vergunningen’ worden genoemd. Doel van het product van de pilot is niet zozeer het opleveren van de ‘lessons-learned’ van het voor de aanleg van de proefsectie doorlopen vergunningenproces, maar de hierop gebaseerde lessen voor een toekomstig

vergunningstraject ten behoeve van een meer grootschaliger voorlandoplossing (voor bijvoorbeeld een groot deel van de Houtribdijk).

Het te leveren product is een via opschaling verkregen 'guideline vergunningen' welke ingezet kan worden in toekomstige initiatieven.

Een soortgelijke guideline benadering geldt ook voor de guideline binnen de andere thema's met uitzondering van de Toetsing. De hier op te leveren producten zijn een bijdrage aan de ontwikkeling van een toetsingsprotocol voor voorlandoplossingen (en zijn geen eindproduct dat ingezet kan worden in vervolg initiatieven voor voorlandoplossingen). De tijdens de doorlooptijd van de pilot te verwachten hydraulische belasting zal naar waarschijnlijkheid kleiner zijn dan de voor een toetsing te hanteren ontwerpbelasting. Hiermee zullen de monitoringsgegevens dus wel relevant inzicht leveren, maar geen definitief antwoord kunnen geven op de toetsingsproblematiek.

1.4 RESULTAAT UITWERKINGEN

Inmiddels is de definitieve versie van de zogenaamde Business Case Zandige voorlanden beschikbaar gesteld (EcoShape/RHDHV, 2018).

In het volgende is kort ingegaan op de bij de opstelling van de business case gehanteerde aanpak. Achtereenvolgens komen daarbij aan de orde de mogelijke toepassingen (Hoofdstuk 2), de verschillende niveaus waarop een business case kan worden beschouwd (Hoofdstuk 3) en de doorvertaling naar specifieke gebieden (Hoofdstuk 4).

Deze aanpak is ook terug te vinden in de uiteindelijke versie van deze guideline (EcoShape/RHDHV, 2018).

2

Mogelijke toepassingen

2.1 INLEIDING

Onderdeel van het werkprogramma is het definiëren van zogenaamde opschalingslocaties en het ontwikkelen van de basis voor business cases voor zandige oplossingen. Voor deze locaties zal de mogelijkheid voor het toepassen van een zandige vooroveroplossing in beeld worden gebracht en nader worden onderbouwd met een business case. In onderstaande is een toelichting gegeven op de opschalingslocaties die onderzocht zullen worden en de wijze waarop invulling wordt gegeven aan de business case.

2.2 OPSCHALINGSLOCATIES

2.2.1 ALGEMEEN

De verkenning naar opschalingslocaties start vanuit een beter begrip van zachte (voorland)oplossingen wat betreft ontwerp, aanleg en beheer en onderhoud. Belangrijkste bron van inspiratie daarbij is de pilot bij de Houtribdijk en in eerste instantie zal daarom gezocht worden naar vergelijkbare opgaven in vergelijkbare situaties. Met dit als uitgangspunt worden locaties gecategoriseerd in drie schillen waarbij de situatie steeds meer gaat afwijken van de situatie bij de pilot in het Markermeer.

In Tabel V - 2.1 is een overzicht gegeven van enkele locaties met een korte beschrijving van de relevante karakteristieken.

2.2.2 EERSTE SCHIL - MARKERMEER/IJSSELMEER

Dit zijn projecten om het Markermeer waarin een zachte kering een rol speelt, zoals de Markermeerdijken, de Houtribdijk en het project Marker Wadden. Dit zijn projecten die wat betreft golfdynamiek en stroming in essentie niet veel afwijken van de situatie bij Trintelhaven. De golfdynamiek is voor loefzijde Marker Wadden groter, maar voor de andere projecten kleiner (zie onderstaande tabel). Dit laatste maakt het mogelijk om eerder tot een doorvertaling naar het gedrag naar maatgevende condities te kijken. Een verder kenmerk van deze projecten is dat ze al ver zijn in de planvorming c.q. contractering. Dit heeft als voordeel dat er veel projectmatige kennis is, die het mogelijk maakt een business-case ook nader te onderbouwen en te kwantificeren. Nadeel is dat nuttige input vanuit het pilot project, al dan niet in een business case format, snel moet gebeuren. Een volledige business-case benadering (zie onder) zal in de 1^e schil niet aan de orde zijn. Zo is voor de Markermeerdijken en Oeverdijk de beslissing om zacht te versterken is genomen maar zoeken deze initiatieven nog wel naar cofinanciering, vooral vanuit de verwachte natuurbaten.

2.2.3 TWEEDE SCHIL - ZOET WATER, RIVIERBEKKENS

Dit zijn projecten in groot open en zoet water waarbij golven een rol van betekenis spelen maar tevens een (onregelmatige) rivierafvoer invloed heeft op de (ontwerp) waterstanden. Er wordt daarbij in hoofdzaak gedacht aan Haringvliet en Hollands Diep, waar op dit moment geen concrete versterkingsopgaven spelen. In de tweede schil gaat het om de doorvertaling van het concept naar andere zoet water situaties waarbij de maatgevende condities mede bepaald worden door een ver boven gemiddelde (rivier) waterstand. Ter illustratie, de opwaaiing leidt bij het Markermeer tot een extra opzet van 1 tot 2 meter. Voor het benedenrivierengebied gaat het om meerdere meters. Hierdoor zal ook de vegetatie ontwikkeling rond het waterpeil en het langjarig langstransport wezenlijk anders zijn.

2.2.4 DERDE SCHIL - INTERGETIJDEGEBIEDEN

Dit zijn projecten in intergetijdegebieden. Zand speelt naast vegetatie, in de vorm van kwelders een rol. Daarnaast zijn getij en zout zijn erg bepalend voor het functioneren, aanleggen en beheer van de voorlandoplossing. De aandacht in de derde schil gaat in eerste instantie uit naar de Waddenzeedijken en wanneer nog relevant de Ooster- en Westerschelde.

Locatie	Hydrodynamica	Vegetatie	Overig
Trintelhaven	Langjarig: opzet tot 0,5 meter, T=1 golven orde 1 meter. Maatgevend: opzet tot 2 meter, T=10.000 orde 2 meter. Langstransport, groot bruto, beperkt netto.	Oeverzone blijft kaal zand. Hoger op het profiel afhankelijk van inrichting en beheer gras en struiken.	Aanleg in hoofdzaak met fracties D50 200 tot 250 mu. Beperkte zetting.
Houtribdijk	Langjarig: opzet tot 0,3 tot 0,5 meter, T=1 golven orde 0,5 tot 0,9 m. Maatgevend: opzet tot 2 meter, T=10.000 orde 1,2 tot 2 meter. Langstransport, varieert ook stukken waar netto vrijwel gelijk is aan bruto.	Oeverzones deels kaal zoals bij Ecoshape pilot, deels beschermt met mogelijke ontwikkeling van rietoevers.	Aanleg in hoofdzaak met fracties D50 200 tot 250 mu. Beperkte zetting, maar plaatselijk tot 30 a 40%.
Marker Wadden	Langjarig: opzet tot 0,5 0,5 meter, T=1 golven orde 0,9 m. Maatgevend: opzet tot 1m meter, T=50 orde 1,2 tot 1,5 m. Langstransport, varieert ook stukken waar netto vrijwel gelijk is aan bruto.	Zoals hierboven. Afhankelijk van het ontwerp komen loef, lij en achter vooroeverdammen gelegen zachte randen voor.	Aanleg mogelijk in verschillende fracties.
Markermeerdijken, oeverdijken	Langjarig: opzet tot 0,3 tot 0,5 meter, T=1 golven orde 0,5 tot 0,9 m. Maatgevend: opzet tot 1,5 meter, T=10.000 orde 1,2 tot 1,5 meter. Langstransport, varieert ook stukken waar netto vrijwel gelijk is aan bruto.	Oeverzones deels kaal zoals bij EcoShape pilot, mogelijk dat ook deels beschutte oevers worden aangelegd met mogelijke ontwikkeling van rietoevers.	Aanleg in hoofdzaak met fracties D50 200 tot 250 µm. Grote zetting 50 tot 100%.

Tabel V - 2.1 Overzicht karakteristieken hydrodynamica en vegetatie per beschouwde locatie.

3

Business-cases

3.1 INLEIDING

Het doel van de business case is om op basis van het technische inhoudelijk ontwerp, kosten, baten en kansen voor financiering inzichtelijk te krijgen zodat een beter idee verkregen wordt waar een zachte voorlandoplossing toegepast kan worden.

Hart van de business case is een ontwerp voor een zachte voorlandoplossing dat wordt gemaakt op basis van de ontwerprichtlijnen die in de pilot verder worden ontwikkeld waarbij specifiek aandacht zal zijn voor beheer en onderhoud, inspectie en toetsing. Daarnaast wordt gekeken naar de wijze waarop een zachte kering kan worden aangelegd (slimme uitvoeringsmethoden). Voor wat betreft het voorvertalen van het technisch ontwerp naar kosten wordt aansluiting gezocht met de SSK systematiek waarin gebruik gemaakt zal worden van ramingen en kentallen uit lopende trajecten. Door de voorlandoplossing qua kosten te vergelijken met een alternatieve (meer conventionele) waterveiligheidsoplossing wordt aan het HBWP inzichtelijk gemaakt of een zachte voorlandoplossing een kosteneffectief alternatief kan zijn. Tot slot wordt nog gekeken of er eventuele maatschappelijke baten dan wel vermeden kosten zijn en of op grond hiervan cofinanciering gevonden kan worden voor de aanleg dan wel het beheer en onderhoud. Hierbij valt bijvoorbeeld te denken aan subsidies voor natuurbeheer.

3.2 VERSCHILLENDE NIVEAUS

3.2.1 NULDE NIVEAU: DAT VAN DE ONTWERPPRINCIPES

Mede op basis van de EcoShape-pilot worden ontwerpprincipes opgesteld voor het ontwerp van een zachte kering. Het gaat daarbij om de wijze waarop het vereiste volume kan worden berekend en waar in het profiel dat moet zijn gelegen. Het gaat ook om het eventueel conditioneren van de bodem met oog op vegetatiegroei en de inzet van constructies voor het beperken van het onderhoud. De aanleg van de pilot geeft in beperkte mate ook aanwijzingen over de uitvoering. Onduidelijk is of de EcoShape pilot ook informatie levert voor de beheer en onderhoudsfase. Er een sterke link met de overige activiteiten binnen de pilot die zullen leiden tot een ontwerp leidraad. Belangrijk voor de lopende ontwerptrajecten langs het Markermeer is het kunnen schatten van het langstransport. De EcoShape pilot is de enige plek die hiervoor echte meetwaarden levert.

3.2.2 EERSTE NIVEAU: DAT VAN DE KOSTEN RAMING

Op basis van een kosteneffectiviteit vergelijking in termen van directe (bouw)kosten kan al een vergelijking worden gemaakt tussen een zachte en een conventionele kering. Vooral bij meer sectoraal ingestoken projecten kan dit al voldoende zijn om een duidelijke vergelijking mogelijk te maken. Omdat er doorgaans sprake is van een groot verschil in de beheer en onderhoudsdimensie is het raadzaam daarbij in

ieder geval ook naar een vergelijking in LCC termen te kijken op termijn van 20 jaar (o.a. contractperiode) en langer. Een ander punt dat kan worden meegenomen in de vergelijking zijn de indirecte kosten, inclusief de waardering van risico's.

3.2.3 TWEEDE NIVEAU: DAT VAN EEN MKBA-VERGELIJKING

Hierbij wordt gekeken naar zaken als vermeden kosten, mogelijke maatschappelijke baten. Feitelijk wordt hierbij ook een MKBA benadering gevolgd waarbij gekeken wordt naar maatschappelijke baten.

3.2.4 DERDE NIVEAU; VAN EEN (FINANCIËLE) BUSINESS CASE

Dit is het niveau waarop wordt gekeken naar welke geïdentificeerde baten in de MKBA verband daadwerkelijk mogelijkheden geven tot (co-)financiering. Dus het gaat om echte Euro's.

3.3 NADERE UITWERKING VAN DE BUSINESS CASE BENADERING

Hiervoor wordt aansluiting gezocht op lopende initiatieven binnen EcoShape. Vanuit kennisontwikkelings-projecten rondom de ZandMotor wordt in 2015 gewerkt aan het ontwikkelen van een zogenaamde business case template voor zandige strategieën in lijn met Building with Nature. Uitgangspunt daarbij is dat de interactie tussen ontwerp, kosten, baten en financiering inzichtelijk worden gemaakt gedurende het (interactieve) ontwerpproces. Vanuit het project pilot voorlandplossing Houtribdijk zal de ontwikkelde template concreter gemaakt worden voor wat betreft de ontwerprichtlijnen en raming, met ook meer aandacht voor de uitvoering. Daarnaast bestaat de mogelijkheid om expertise vanuit het HBWP wat betreft business cases te koppelen aan het lopende project binnen EcoShape om aan de voorkant de template mee te ontwikkelen. Het resultaat is een korte omschrijving van een business case.

4

Doorvertalingen

4.1 MARKERMEEROMGEVING

Voor de projecten rond het Markermeer worden alle niveaus van de business case (integraal) doorlopen:

- **Bepalen van mogelijke basisontwerpen.**
Deze worden in hoofdzaak afgeleid van lopende trajecten, en waar zinvol aangevuld dan wel geoptimaliseerd met kennis vanuit de EcoShape pilot.
- **Bepalen van de kosten van basisontwerpen.**
Hiervoor wordt aangesloten bij de lopende projecten. Punt van aandacht is wel dat SSK ramingen niet openbaar zijn. Er wordt daarom veeleer gewerkt met een generiek schema voor het bepalen van aanleg en onderhoudskosten. Voor het Markermeer is de wijze waarop zand kan worden gewonnen en de deklaag een plaats kan krijgen bepalend voor de kosten. De kosten van een zacht basisontwerp worden daarbij ook naast de kosten van een conventionele dijkversterking gezet.
- **Bepalen van de mogelijke baten van de zachte oplossingen.**
Voor de projecten om het Markermeer is hierbij vooral de betekenis van een zachte kering inclusief de daarvoor benodigde winputten voor het ecologische herstel van het ecosysteem Markermeer van belang en de bijdrage die kan worden geleverd aan KTW, TBES en Natura 2000 beheersdoelen. De baten zijn dus in hoofdzaak kwalitatief, maar kunnen mogelijk via de band van vermeden kosten, of kostenbesparingen wel aan Euro's worden gekoppeld. Plaatselijk spelen ook recreatiebaten. Hiervoor kan o.a. ook gebruik worden gemaakt van de TEEB-studie (economie, ecologie en biodiversiteit) die de provincie Noord Holland heeft laten uitvoeren in het kader van de oeverdijk ontwikkelingen. Een verder punt van aandacht is het kunnen waarderen van de inherente flexibiliteit die een zachte kering biedt ten aanzien van veranderingen in (meer)peil en normering. Deze laatste onderdelen kunnen evenwel ook een plaats krijgen in de raming.
- **Bepalen van mogelijkheden voor cofinanciering.**
Dit is een concrete discussie die voor de projecten oeverdijk en Houtribdijk loopt of gaat lopen. Voor Marker Wadden ligt de situatie anders. Dit project heeft niet de veiligheid maar juist het ecologische herstel van het Markermeer als uitgangspunt en wordt vanuit dit oogpunt dan ook gefinancierd..

Deze stappen resulteren in ontwerpen en overwegingen bij het ontwerp, aanleg en beheer en onderhoud, kostenvergelijkingen, vergelijkingen op MKBA niveau en suggesties voor cofinanciering.

4.2 HARINGVLIET, HOLLANDS DIEP SITUATIES.

Deze doorvertaling is minder concreet, vooral ook omdat deze situaties sterk afwijken van die langs het Markermeer. Wel is mogelijk om aan te geven welk onderdeel van de ontwerprichtlijnen overdraagbaar is, en op welke aspecten meer locatie-specifiek naar het ontwerp moet worden gekeken. Ook de volgende stappen, dat van een basisontwerp, de daarmee samenhangende kosten en mogelijke baten worden globaal genomen.

4.3 INTERGETIJDE-GEBIEDEN.

Deze doorvertaling is ook globaal, zie hiervoor. Wel kan bij de doorvertaling naar ontwerpen ook kennis worden ingeschakeld uit andere trajecten waarin gekeken wordt naar de inzet van kwelders en duinen als onderdeel van de primaire kering.

Annex VI PRODUCTEN

Bijlage 1

Guideline ontwerp en beoordeling

Het gaat hierbij om een gecombineerd document waarin oorspronkelijk genoemde guideline ontwerp en de bijdrage aan het toetsingsprotocol samenkomen in een notitie 'Ontwerp en beoordeling van dijk-voorlandssystemen'. Reden hiervoor is dat het toetsingsprotocol in principe er nauw samenhangt met de ontwerprichtlijn.

De definitieve versie van dit document is inmiddels beschikbaar (EcoShape/HKV, 2018).

De 'Guideline Ontwerp en Beoordeling van dijk-voorlandssystemen' geeft een aanzet tot het ontwikkelen van concrete rekenregels en handvatten voor het ontwerpen en beoordelen van voorlandoplossingen voor (bestaande) dijken. Bij de beoordeling van een voorlandoplossing is alleen de huidige toestand van de kering zelf (dijk inclusief voorland) van belang. De faalkans op basis van de huidige sterkte en belasting moet aan de vereisten voldoen. Bij het ontwerp dient rekening gehouden te worden met de ontwikkeling in de tijd van de belasting (door zeespiegelstijging, toename rivierafvoer, meer-peilstijging, etc.) en van de sterkte van de kering (verliezen door langstransport, zettingen, etc.). Hierbij moet verantwoord worden omgegaan met onzekerheden in de lange-termijn ontwikkeling; deze kunnen aanzienlijk zijn.

Het rapport richt zich met name op de technische belemmeringen, die vooral betrekking hebben op het gebrek aan concrete rekenregels en handvatten voor de integrale beoordeling van de veiligheid van de waterkering, inclusief de werking en de standzekerheid van het voorland. Met dit als basis kan ook invulling gegeven worden aan het ontwerp van een kering, los van de wijze waarop de hiervoor te hanteren randvoorwaarden worden aangepast aan de toekomstige omstandigheden.

Daartoe is eerst is een beschrijving gegeven van verschillende typen dijk-voorlandssystemen. De typen zijn grofweg onder te verdelen in een voorland dat fungeert als zandige kering en een voorland als belastingrem. Vervolgens zijn de relevante principes voor zowel de beoordeling van bestaande keringen als het (technisch) ontwerp van nieuwe keringen beschreven en is een voorbeeld uitgewerkt, waarbij een faalkans wordt berekend voor een dijk met zandig voorland, gebaseerd op de condities en het profiel van de pilot Houtribdijk.

Tot slot worden enkele praktische aanbevelingen gedaan voor het meenemen van voorlanden in het ontwerp.

Voor meer informatie kan worden verwezen naar de guideline zelf (EcoShape/HKV, 2018).

Bijlage 2 Lessons-learned vergunningen

Deze rapportage is inmiddels afgerond en vastgesteld (EcoShape/Arcadis, 2015b).

In deze rapportage is verslag gedaan van de aandachts- en leerpunten die tijdens het vergunningentraject voor de aanleg van de proefsectie pilot voorlandoplossing Houtribdijk naar voren zijn gekomen. In de volgende tabel is een samenvatting opgenomen van deze punten, waarbij onderscheid is gemaakt naar inhoudelijke en meer procesmatige leerpunten.

Aandachtspunt	Lessons learned	
	Inhoudelijk	Procesmatig
Beheer en onderhoud	Op dit moment is nog weinig kennis beschikbaar m.b.t. kosten en aanpak van beheer en onderhoud van zandige versterkingen. De pilot aangrijpen om kennis te vergaren om toekomstige projecten op dit punt soepeler te laten verlopen.	Bij toekomstige projecten de afdeling beheer en onderhoud in vroegtijdig stadium betrekken bij vergunningaanvraag en verdere planvorming.
Handhaving	Het aspect handhaving is veelzijdig en kent verschillende belanghebbenden. In dit geval de provincie als wegbeheerder en verantwoordelijk voor naleving van de natuurwetten en RWS als dijkbeheerder. Voor toekomstige projecten wordt aanbevolen handhavingsaspecten die kunnen optreden in beeld te brengen tijdens de voorbereiding.	Na het in beeld brengen van mogelijke aandachtspunten voor handhaving, deze bespreken met de verantwoordelijke bevoegde gezagen en in beeld brengen welke informatie en/of actie benodigd is op dit punt.
Waterveiligheid:	De relatieve onbekendheid van en gebrek aan ervaring(scijfers) met zandige versterkingen bij vergunningverleners en toetsers is een aandachtspunt in toekomstige vergunningentrajecten.	Voor toekomstige projecten wordt aanbevolen om tijdig de wensen en eisen met betrekking tot waterveiligheid en de benodigde argumentatie helder te krijgen.
Natuurwetgeving:	Natuurwetgeving is eigenlijk bij ieder dijkversterkingsproject een aandachtspunt, waardoor in veel gevallen uitvoeringsbeperkingen kunnen gelden. Zandige versterkingen vormen hierop geen uitzondering. De aandachtspunten tijdig in beeld brengen in een voortoets uitgevoerd door een ecoloog met kennis van natuurwetgeving.	De uitkomsten van de voortoets Natuurbeschermingswet zijn aanleiding geweest om de planning van de aanleg met enkele maanden te vervroegen. Dit heeft de druk op de planning en de processen voor de overige vergunningen flink opgevoerd. Nb-wet of FF-wet procedures nemen veel tijd in beslag. Van belang om de aandachtspunten tijdig in beeld te hebben.
Archeologie	Het bevoegd gezag archeologie (gem. Lelystad) bleek het niet eens met het advies uit het bureauonderzoek archeologie. Belangrijkste reden voor afwijzing was de onbekendheid met het onderzoek en met onderzoek waarnaar werd verwezen. Ook relatieve onbekendheid met onder water archeologie kan een rol spelen.	Bureauonderzoek/aanbevelingen van een archeoloog in vroeg stadium aan bevoegd gezag archeologie voorleggen, vooral als de planlocatie zich in archeologisch waardevol gebied bevindt en als voor het gebied nog geen door het bg vastgesteld archeologisch onderzoek beschikbaar is.

Tabel 5 Overzicht Lessons learned vergunningentraject.

Voor meer informatie kan worden verwezen naar de notitie zelf (EcoShape/Arcadis, 2015b).

Bijlage 3 Guideline vergunningen

In aanvulling op de in het voorjaar van 2015 beschikbaar gestelde 'lessons-learned' van het voor de aanleg van de proefsectie doorlopen vergunningenproces (EcoShape/Arcadis, 2015b) zijn nu ook de procedures voor een toekomstig vergunningentraject ten behoeve van een meer grootschaliger voorlandoplossing (voor bijvoorbeeld een groot deel van de Houtribdijk) in kaart gebracht.

Daarbij is gebruik gemaakt van de ervaringen van de bij de pilot betrokken partijen.

Dit document is inmiddels opgeleverd en op de website beschikbaar gemaakt (EcoShape/Arcadis, 2016a).

In dit rapport is getracht het vergunningenproces voor zandige versterkingen zowel procesmatig als inhoudelijk te beschrijven. Daarbij is eerst ingegaan op het proces en zijn vervolgens zowel de inhoudelijke kant van de vergunningen als de bijbehorende onderzoeken nader belicht, dit met een focus op de toepassing van zandige versterkingen in het Markermeer en IJsselmeergebied.

Bij de beschrijving van het integrale proces is onderscheid gemaakt tussen een viertal opeenvolgende stappen, te weten het uitvoeren van een zogenaamde omgevingsscan, het definiëren van een vergunningenstrategie en vervolgens het aanvragen van de benodigde vergunningen en het doorlopen van de verschillende procedures.

Vervolgens is een overzicht gegeven van de verschillende vergunningen.

De belangrijkste zijn daarbij het projectplan Waterwet (Watervergunning), de Omgevingsvergunning, de Nb-wet vergunning, de Flora- en faunavergeving en de Ontgrondingsvergunning voor de zandwinning. Per vergunning is aangegeven welke wetgeving relevant is, welke onderbouwing er nodig is en welke bevoegde gezagen en procedures er nodig zijn. Ook is in de vorm van een tabel een overzicht gegeven van een vijftiental onderzoeken die in dit kader relevant kunnen zijn.

Aansluitend is nog ingegaan op specifiek voor de zandwinning en uitvoering benodigde uitwerkingen. Aandachtspunt daarbij is onder andere dat een kosteneffectieve aanleg van een zandige versterking gebaat is bij een eigen zandwinning en een kosteneffectieve uitvoering. Dit kan worden bereikt door de aannemer zoveel mogelijk vrijheidsgraden te gunnen. Dit laatste heeft echter ook weer consequenties voor het MER en de vergunningaanvragen die hier adequaat op moeten inspelen.

Samenvattend geeft dit document een overzicht van alles wat er rondom vergunningen speelt en kan zo als guideline worden gebruikt voor verkrijgen van de benodigde vergunningen voor de daadwerkelijke aanleg van een zandige versterking.

Voor meer informatie kan worden verwezen naar de eigenlijke guideline (EcoShape/Arcadis, 2016a).

Bijlage 4 Lessons-learned aanleg

Deze rapportage is inmiddels afgerond en vastgesteld (EcoShape/Arcadis, 2015b).

Deze notitie inmiddels via de website beschikbaar gemaakt.

In deze rapportage is verslag gedaan van de aandachts- en leerpunten die tijdens de aanleg van de proefsectie pilot voorlandoplossing Houtribdijk naar voren zijn gekomen. Hiervoor is gebruik gemaakt van onder andere het opleverdossier (d.d. 25 september 2014) zoals dat is opgesteld door DE Combinatie en het interne eindverslag (versie 004). In aanvulling hierop is in iets meer detail gekeken naar de volumes, de profielen en de karakteristieken van het aangebrachte zand.

Na een korte beschrijving van de in dit kader relevant geachte activiteiten, is een overzicht gegeven van de belangrijkste leerpunten.

Deze hebben betrekking op:

- Het feit dat er ook op het Markermeer sprake kan zijn van zwaar weer, waardoor het gebruikte materieel enige schade heeft opgelopen. Inzet van zwaarder materieel zou bij meer voorbereidingstijd meer opportuun worden.
- De hier gehanteerde werkwijze (aanvoer van zand met schepen en vervolgens vermengd met water hydraulisch verpompen) heeft goed gewerkt.
- Het verschil tussen de gerealiseerde beunkuubs (85.000 m³) en het in-situ gemeten volume (65.000 m³) bedraagt ongeveer 25 % (20.000 m³), dit primair als gevolg van pakkingsverschillen. De bijdrage van de optredende zandverliezen en zetting van de ondergrond zijn beperkt van omvang.
- De bovenzijde van de pilot blijkt goed in profiel te brengen te zijn. Het onderwaterdeel is door de gekozen werkwijze plaatselijk steiler aangelegd dan oorspronkelijk gepland. Het effect van deze steilere aanleg is onderdeel van het lopende onderzoek.
- Er vindt verstuiving van zand plaats over het droge deel van het voorland. Omdat het laag bij de grond blijft, blijft dit aan de teen van de dijk en bij de aangebrachte stuifschermen liggen. Aandachtspunt is wel de lengte waarover het stuifscherm in het laatste proefvak moet worden doorgezet en de aansluiting bij de damwand.
- Er hebben zich geen zakkings van de dijk voorgedaan. De zettingen onder het aangebrachte deel bedragen tijdens de realisatieperiode maximaal 5 tot 10 cm.
- De slibvangput op het Markermeer heeft bruikbare klei opgeleverd welke op een deel van de proefsectie is vermengd met zand. Dit zou voor de vegetatieontwikkeling een goede basis moeten zijn.
- De voortgang van de uitvoering heeft geen hinder ondervonden van de randvoorwaarden die vanuit de verschillende vergunningen waren opgelegd. Dit hangt natuurlijk samen met de gekozen periode van uitvoering.

Inmiddels is de aanleg met succes afgerond en sinds medio september 2014 zijn de ontwikkelingen van de proefsectie in detail gemonitord.

Voor meer informatie kan worden verwezen naar de notitie zelf (EcoShape/Arcadis, 2015b).

Bijlage 5 Guideline aanleg

In aanvulling op de in het voorjaar van 2015 beschikbaar gestelde 'lessons-learned' van de aanleg van de proefsectie (EcoShape/Arcadis, 2015b), is nu ook een leidraad aanleg opgesteld. Dit document is inmiddels opgeleverd en op de website beschikbaar gemaakt (EcoShape/RHDHV/Arcadis, 2016b).

Deze leidraad gaat in op aspecten waarmee rekening moet worden gehouden bij de aanleg van een zachte versterking, ofwel een versterking met een grondlichaam. Het gaat daarbij om de relatie maar ook verschillen tussen wat er wordt uitgerekend en hoe dat kan worden aangelegd, maar ook hoe de wijze van uitvoering weer van invloed kan zijn op het ontwerp.

Een belangrijk onderwerp is, naast natuurlijk de inpassing in de omgeving, ook hoe ontwerp en grondstromen met elkaar samenhangen en wat daarbij onder andere in termen van effecten en vergunningsvoorwaarden komt kijken. Ook de wijze waarop de aanleg het beste in een contract kan worden gezet vraagt de nodige aandacht, vooral als er sprake is van onzekerheden wat betreft zetting en morfologische ontwikkeling van het profiel. Beheer en onderhoud zijn immers vaak een zorgpunt voor de dijkbeheerder en verdienen ook een plaats in dit overzicht.

Parallel aan het opstellen van deze guideline is ook gewerkt aan een guideline voor het vergunningenproces (EcoShape/Arcadis, 2016a). Waar relevant wordt er naar deze notitie verwezen.

De notitie begint met een korte beschouwing over de *pilot Houtribdijk* en de daaruit volgende aandachtspunten. Hierbij is ook aangegeven wat de verschillen zullen zijn tussen een dergelijke kleinschalige aanleg en de realisatie van een veel grotere zandige versterkingsopgave.

Aansluitend is eerst aandacht gegeven aan de *onderlinge samenhang* tussen de voornaamste onderwerpen, namelijk het ontwerp, de aanleg en het onderhoud van een zandige versterking. Het onderlinge verband hangt direct samen met het feit dat een natuurlijke kering wordt gebouwd met grond en dat de kosten vooral afhankelijk zijn van de wijze van uitvoering en de beschikbaarheid van grond.

Een illustratief overzicht van deze relaties is gegeven in een tabel waarin enkele verbanden worden gelegd tussen ontwerp, aanleg en onderhoud en hoe deze relateren aan veiligheid, grondstromen medegebruik, MER, vergunningen en.

Bij de aanleg van een zandige versterking is het goed om expliciet onderscheid te maken tussen *vier typen maatregelen*, namelijk de waarborging van de veiligheid, de onderhoudslaag en onderhoud beperkende constructies, de constructies en werken ten behoeve van mitigatie en compensatie en als vierde de aanvullende maatregelen ten behoeve van het voorziene medegebruik.

Voor wat betreft de *vormgeving van het dwarsprofiel* kan onderscheid worden gemaakt tussen verschillende soorten profielen. Het gaat daarbij om het rekenprofiel, het ontwerpprofiel, het aanlegprofiel en het dynamische evenwichtsprofiel. Deze worden in deze guideline op hoofdlijnen behandeld maar komen in de nog op te stellen 'guideline ontwerp' nog uitgebreider aan bod.

De voor de aanleg benodigde/mogelijke/beschikbare *grondstromen* spelen een belangrijke rol in het ontwerp en zijn bepalend voor de met een zandige versterking samenhangende kosten. Aandachtspunten zijn hierbij de opbouw en mogelijke aanlegwijzen en de inzet van verschillende zandfracties. Ook wordt

hierbij nog aandacht besteed aan de bodemopbouw binnen het IJsselmeergebied en de mogelijke baggerschema's.

Bij versterkingen in het IJsselmeergebied op basis van een eigen zandwinning komt ook een groot volume aan dekgrond vrij. Hoe met deze *dekgrond* om te gaan, constructief aanwenden, omputten of inzetten voor natuurontwikkeling, is een belangrijke keuze in het ontwerpproces.

De wijze van *aanleg en uitvoering* is afhankelijk van de grondstromen en de inzet van materieel. Verder spelen ook de optredende verliezen en de effecten van zettingen van de ondergrond een belangrijke rol en moet er bovendien rekening worden gehouden met de effecten op de natuur.

De benodigde voorbereidingen hebben betrekking op het aanvragen van vergunningen en het opstellen van een MER. Aandachtspunten daarbij zijn de locatie en omvang van de zandwinning, het beschouwen van archeologische en natuurwaarden, maar ook de tijdens de aanleg optredende vertroebeling. Verder moet er op voorhand rekening worden gehouden met bijvoorbeeld de mogelijkheden voor het bergen van dekgrond.

De contractuele aspecten vormen een belangrijk aandachtspunt. Er moet daarbij worden gezocht naar een voldoende ruimte voor de opdrachtnemer voor de uitvoering, ontwerp vrijheid binnen een kader van minimale ontwerp technische eisen en vergunningsvoorwaarden en de juiste prikkels voor het realiseren van een potentiële win-win voor natuur, landschap en medegebruik.

Voor meer informatie kan worden verwezen naar de eigenlijke guideline (EcoShape/RHDHV/Arcadis, 2016b).

Bijlage 6 Guideline beheer en onderhoud

De guideline beheer en onderhoud van aangelegde zandige voorlanden in grote wateren is inmiddels opgeleverd (EcoShape/Deltares/WEnR/RHDHV, 2018).

Zandige voorlanden voor dijken in grote wateren zonder getij, zoals de nieuw aan te leggen zandige versterking voor de Houtribdijk, vragen om beheer en onderhoud dat afwijkt van dat van een dijk met een harde bekleding. Beheer en onderhoud moeten daarbij zorgdragen voor het functioneren van het zandige voorland als onderdeel van een (primaire) kering, wat vooral vereist dat voldoende zand aanwezig is om de vereiste golfreductie te leveren. Het zandvolume moet voldoende zijn om eventuele erosie tijdens een maatgevende storm te kunnen bufferen (via bijvoorbeeld een slijtlaag en een aanvullende stormbuffer). Het beheer van dit zandvolume kan, net al bij kusten, worden uitgevoerd volgens een basiskustlijnzorg-principe, waarbij de noodzaak tot periodieke aanvullingen (suppleties) wordt vastgesteld door middel van monitoring van het aanwezige zandvolume. Daarnaast moet het beheer er op gericht zijn dat er geen verstuiving optreedt, vooral als het zandige voorland naast een weg is gelegen.

Op een zandig voorland komt ook vegetatie tot ontwikkeling. Hoger op het talud, buiten bereik van de golven, en nabij de oeverlijn als de golfaanval niet te groot is. Op dit moment is het nog niet zeker in welke mate ook deze vegetatie op een zandige ondergrond een rol kan spelen in de golfreductie bij maatgevende condities. De ontwikkeling van de vegetatie is daarop nog niet gericht en dat geldt ook voor het beheer en onderhoud daarvan. Wel kan oevervegetatie het onderhoud aan het zandige talud beperken doordat het erosie vertraagd en stuivend zand vermindert.

Een zandig voorland biedt ook kansen voor natuur, en natuur is daarmee ook een belangrijk doel voor het beheer. De ruimte die voor natuurontwikkeling aanwezig is, hangt mede af van de verdere eisen die aan de vegetatie worden gesteld met oog op het tegengaan van verstuiving en de mogelijke rol in golfreductie en onderhoud. In het geval van de Houtribdijk moet vooral verstuiving worden tegengegaan maar wordt geen eisen aan de vegetatie gesteld wat betreft golfreductie. Dit maakt het mogelijk om een soortenrijke vegetatie van schrale gronden te starten op de zandige ondergrond.

Het voorstaande geeft duidelijk aan dat beheer en onderhoud samenhangen met het functies van het zandige voorland en dat hierop al wordt voorgesorteerd bij de aanleg. Omdat het beheer en onderhoud 'anders' is dan dat van traditionele dijken, leven er nog vragen over hoe dit het beste vorm kan worden gegeven.

In deze guideline laten we zien dat het beheer en onderhoud van een zandig voorland deels afhankelijk is van de keuzes die al in het ontwerp stadium van dit soort versterkingen worden gemaakt. Dit omdat bij het ontwerp ook profielvorm en bodemopbouw worden bepaald, welke van grote invloed zijn op de morfologische ontwikkeling van, en ook de vegetatieontwikkeling op het zandige voorland. Door dus al slim te kiezen tijdens het ontwerp, kan worden gestuurd op de uiteindelijke veldsituatie, en kan het beheer en onderhoud vervolgens zo gekozen worden dat deze passend is bij deze gewenste situatie.

Voor meer informatie kan worden verwezen naar de betreffende guideline (EcoShape/Deltares/WEnR/RHDHV, 2018).

Bijlage 7 Business Case zandige vooroever

Dit product is inmiddels opgeleverd (EcoShape/RHDHV, 2018).

Dit onderhavige notitie is opgebouwd vanuit de kennis die ontwikkeld is met de pilot van EcoShape bij de Houtribdijk en kijkt daarbij ook naar de wijze waarop de Houtribdijk op dit moment met zand wordt versterkt. De nadruk ligt daarom ook op het IJsselmeergebied. Daarnaast wordt globaler gekeken naar mogelijke toepassingen in het Benedenrivierengebied en de Wadden.

Geconcludeerd wordt dat een zandig voorland een alternatief voor conventionele vormen van dijkversterking kan zijn als aan een aantal voorwaarden wordt voldaan.

Een zandig voorland kan een alternatief zijn voor dijken met een kruinhoogtetekort of een zwakke bekleding. Voor piping biedt een zandig voorland echter geen oplossing en in geval van macro-instabiliteit kan nog worden gedacht aan een duin voor dijk oplossing.

Onder typische omstandigheden worden zandige voorlanden kosteneffectief voor waterdiepten tot ongeveer 2,5 meter. Locatie-specifieke omstandigheden kunnen enige variatie aanbrengen op deze grenswaarde. Zo is bij een lagere aansluiting op de dijk een navenant grotere waterdiepte mogelijk, maar op plaatsen met veel zetting van de ondergrond juist niet.

Zandige voorlanden zijn alleen interessant in combinatie met een nabije zandwinput (< 5 km). Dit kan voor kleinere te versterken trajecten een bestaande put zijn. In het geval een nieuwe put nodig is, kan dat alleen als een langer traject met zand wordt versterkt, vanwege de bijkomende kosten voor onderzoek en vergunningsaanvraag.

De oriëntatie van een zandig voorland is bij voorkeur loodrecht op de dominante golfval. In deze situaties speelt golfreductie een grote rol, maar blijft erosie als gevolg van netto langstransport beperkt. Dit zijn onder andere trajecten die op het zuidwesten zijn gelegen. Ook op meer luw gelegen trajecten is de inzet van een zandig voorland mogelijk, omdat dan het langstransport beperkt is en daarmee ook het onderhoud. De potentiële golfreductie door het zandig voorland is dan wel kleiner.

De bijdrage van een zandig voorland aan recreatie en natuurontwikkeling kan plaatselijk aanzienlijk zijn. De baten hiervan, in de vorm van vermeden kosten, leiden evenwel niet of maar zelden tot cofinanciering van een zandig voorland.

De realisatie van een zandig voorland op plaatsen met een aanwijzing als habitatrictlijn gebied kan leiden tot significante negatieve effecten, die de inzet van een zandig voorland niet toelaten of kunnen leiden tot aanzienlijke extra kosten vanwege verplichte natuurcompensatie. Dit speelt niet tot minder in vogelrichtlijngebieden.

Het goed op elkaar afstemmen van deze variabelen vraagt om een integraal ontwerpproces, waarbij slim met grond en natuurbeheerdoelstellingen wordt omgegaan en waarbij van een natuur-positieve insteek wordt uitgegaan. De aanleg van voorlanden schept mogelijkheden, maar vraagt ook ruimte die vaak al

wordt gebruikt of is bestemd. Ook van belang is de zeggenschap van de waterkeringbeheerder, dan wel de garanties die kunnen worden geboden dat het voorland aanwezig blijft en ook bij maatgevende condities zijn functie kan blijven vervullen.

Voor meer informatie kan worden verwezen naar de betreffende notitie (EcoShape/RHDHV, 2018).

Contact

Spuiboulevard 210,
3311 GR Dordrecht
+31 78 6111 099
info@ecoshape.nl
www.ecoshape.nl

Disclaimer:

De in deze rapportage opgenomen informatie is vrij toegankelijk en vrij te gebruiken. Hoewel ten tijde van publicatie deze informatie met de grootste zorg is samengesteld, zijn de gebruikers ervan zelf volledig verantwoordelijk voor het gebruik en interpretatie van de informatie.