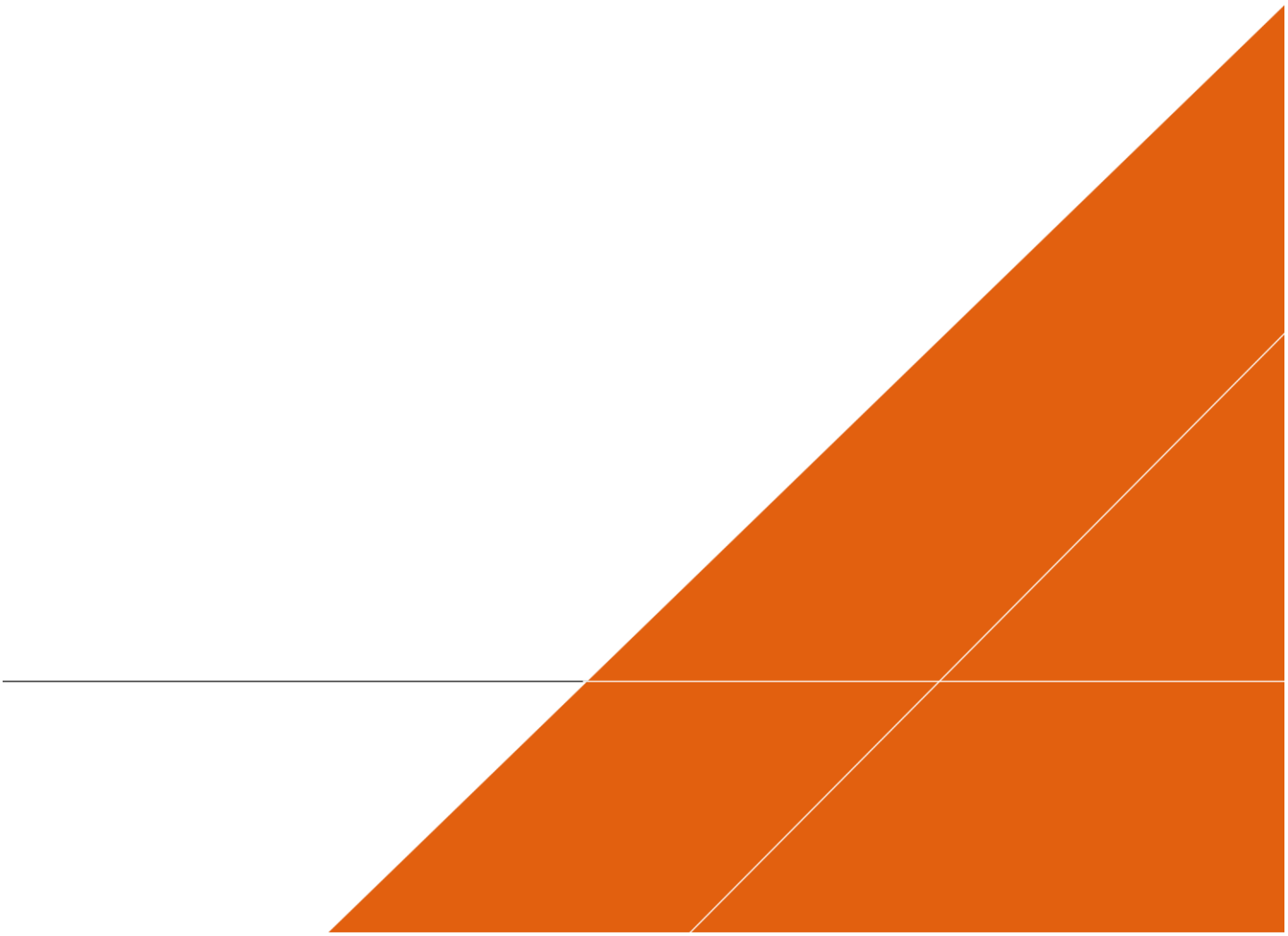
ARCADIS Design & Consultancy for natural and built assets

ANALYSE AFGRAVING PROEFSECTIE PILOT HOUTRIBDIJK

Morfologische ontwikkelingen rondom afgraving

16 OKTOBER 2018



Contactpersoon

SJOERD VAN TIL, MSC
Specialist morfologie

Arcadis Nederland B.V.
Postbus 137
8000 AC Zwolle
Nederland

ARCADIS Design & Consultancy for natural and built assets

INHOUDSOPGAVE

1 INLEIDING 5

1.1 Pilot Houtribdijk 5
1.2 Beschrijving van de ingreep 6
1.3 Vragen en doelen 7
1.4 Het ontwerp van de afgraving 7
1.5 Aannames en uitgangspunten ten aanzien van de analyses 8
1.6 Leeswijzer 8

2 MEETGEGEVENS 9

2.1 Hydrodynamische metingen 9
2.2 Shore metingen bodemniveau 10

3 THEORIEËN 13

3.1 Theorie breedte plateau 13
3.2 Theorie niveau plateau 14

4 ANALYSE HYDRODYNAMICA 16

4.1 Wind, golven en stromingen 16
4.2 Maatgevende condities 17
4.3 Conclusies 20

5 ANALYSE INGREEP 21

5.1 Evaluatie van de afgraving 21
5.2 Hydrodynamische condities tijdens het experiment 22
5.2.1 Gemiddelde condities 23
5.2.2 Stormcondities 24
5.3 Sedimentverplaatsingen 25
5.4 Dimensies plateau rond afgraving 28
5.4.1 Niveau en breedte van het onderwaterplateau 28
5.4.2 Lengte van de afgraving 31
5.5 Conclusies 33

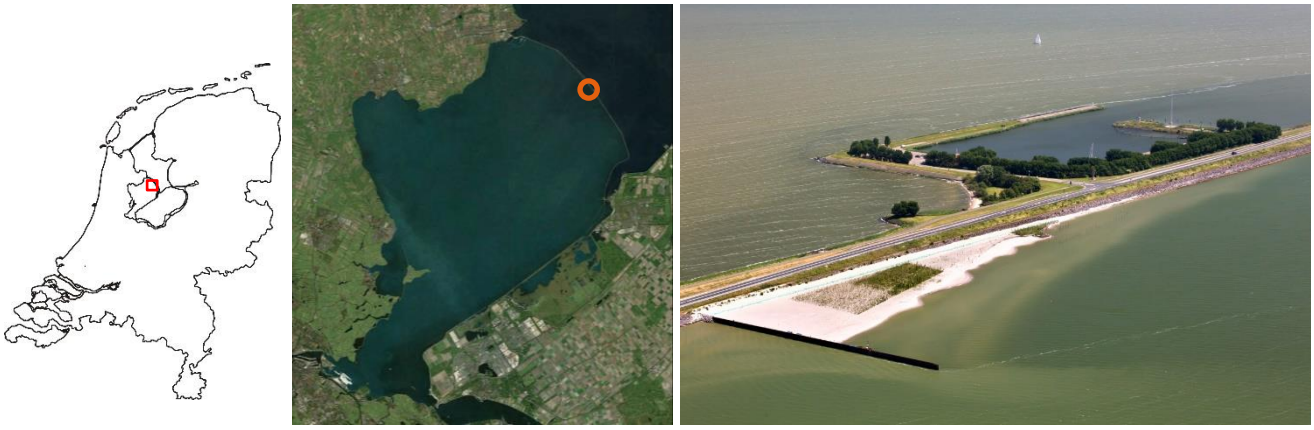
6 EVALUATIE THEORIEËN MET MEETRESULTATEN 34
6.1 Theorie breedte plateau 34
6.2 Theorie niveau plateau 34
6.3 Conclusies 37
7 GEDACHTENEXPERIMENTEN 38
7.1 Alternatieve configuraties 38
8 CONCLUSIES 40
LITERATUUR 42
COLOFON 45

1 INLEIDING

1.1 Pilot Houtribdijk

In het kader van het HWBP2-innovatiebudget voor project-overstijgende 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. Het algemene doel van de pilot is 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.

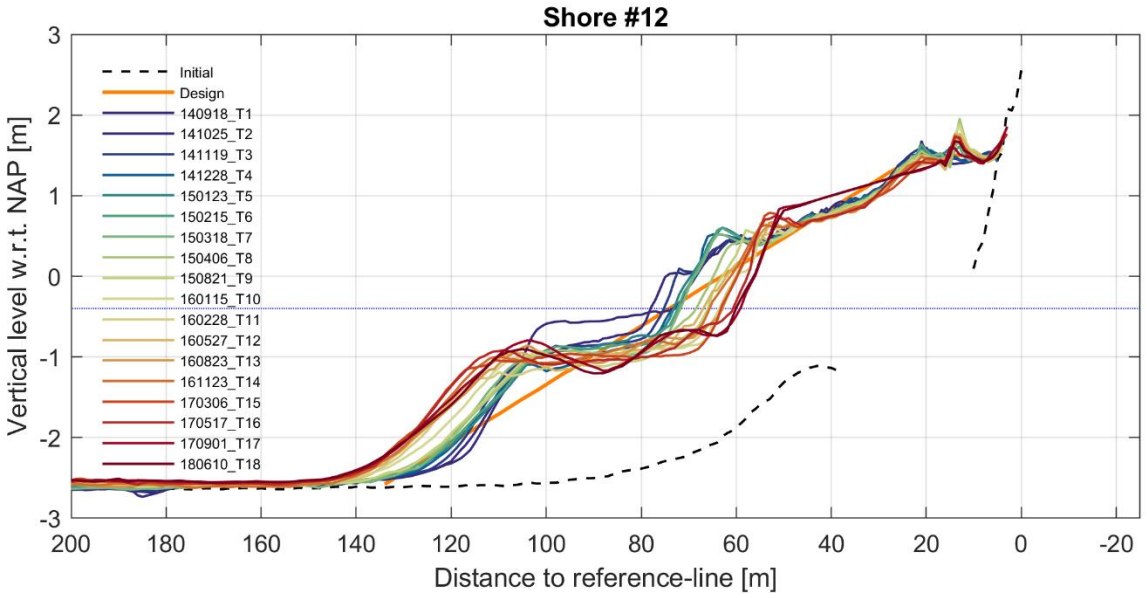
De proefsectie van de Pilot Houtribdijk bevindt zich aan de Markermeerzijde van de Houtribdijk ter hoogte van Trintelhaven, zie Figuur 1. De oriëntatie van de proefsectie is overeenkomstig met een theoretische evenwichtsoriëntatie die is afgeleid op basis van een lokaal golfklimaat die is afgeleid voor deze specifieke locatie.



Figuur 1 *De locatie van de Pilot Houtribdijk. Bron middelste foto: Bing maps, 2018. De rechter foto in genomen in juni 2016 [bron: opname RWS, Jurriaan Brobbel].*

Na de realisatie van het zandlichaam voor de Houtribdijk in 2014 heeft zich een onderwaterplateau gevormd op het voorlandprofiel. Het plateau heeft een bijna uniforme breedte langs de proefsectie van circa 40 m en het bevindt zich op het niveau van NAP-1 m. In Figuur 2 is een dwarsprofiel met verschillende metingen gepresenteerd. Hierin is duidelijk zichtbaar hoe het onderwaterplateau eruit ziet. Het ontstaan van het plateau met deze breedte en dit niveau was niet verwacht en het heeft zich in korte tijd gevormd. Met de maandelijks uitgevoerde meting was het ontstaan ervan daardoor niet goed te volgen. In Figuur 2 is namelijk te zien dat het plateau al bij meting T2 aanwezig is.

Het doel van het aanvullende onderzoek rondom de ingreep bij het onderwaterplateau is daarom om te verklaren hoe het plateau ontstaat en hoe het zich ontwikkelt. Hiertoe is een deel van het voorlandprofiel afgegraven om de ontwikkelingen vervolgens te kunnen volgen.



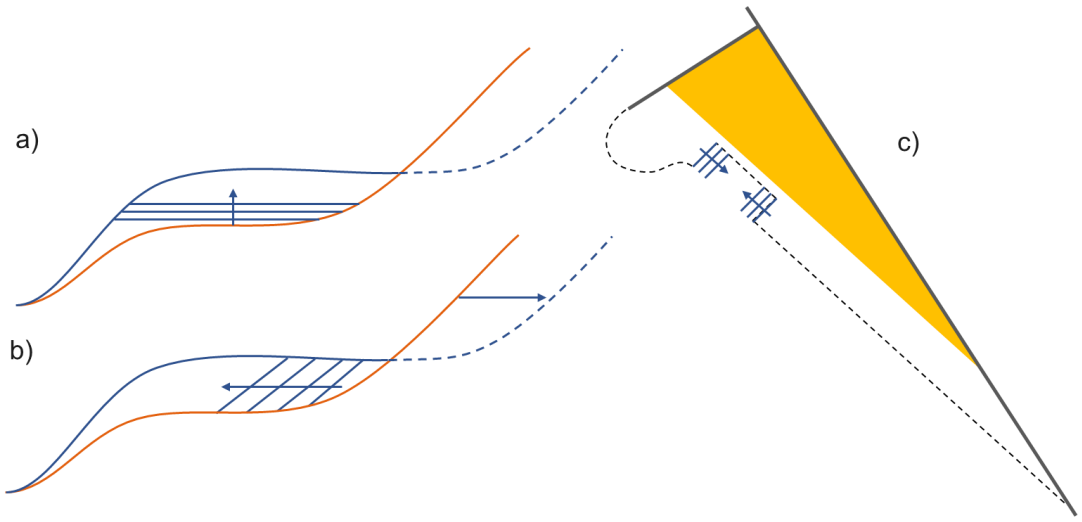
Figuur 2 *De dwarsprofielen van metingen T1 tot en met T18. De dwarsprofielen tonen duidelijk de ontwikkeling van het onderwaterplateau.*

1.2 Beschrijving van de ingreep

Gedurende een periode van drie maanden zijn verschillende metingen uitgevoerd. Door de ontwikkelingen in het onderwaterprofiel te meten gedurende een periode van drie maanden, kan de vorming van het plateau geanalyseerd worden. Figuur 3 toont verschillende manieren waarop de afgraving zich opnieuw kan vullen:

a. Uniforme opvulling op het onderwaterplateau;
b. Uitbouw van het plateau in de richting van het Markermeer;
c. Opvulling vanuit de zijkanten.

Deze manieren van opvullen zijn gerelateerd aan langs- en dwarstransporten. Hoe (en of) het plateau opvult en welke processen hieraan gerelateerd zijn, wordt verderop in dit rapport geanalyseerd.



Figuur 3 *Drie manieren waarop de afgraving zich op natuurlijke wijze op kan vullen. Het sediment voor de opvulling kan komen vanuit erosie rond de waterlijn of vanuit langstransport.*

1.3 Vragen en doelen

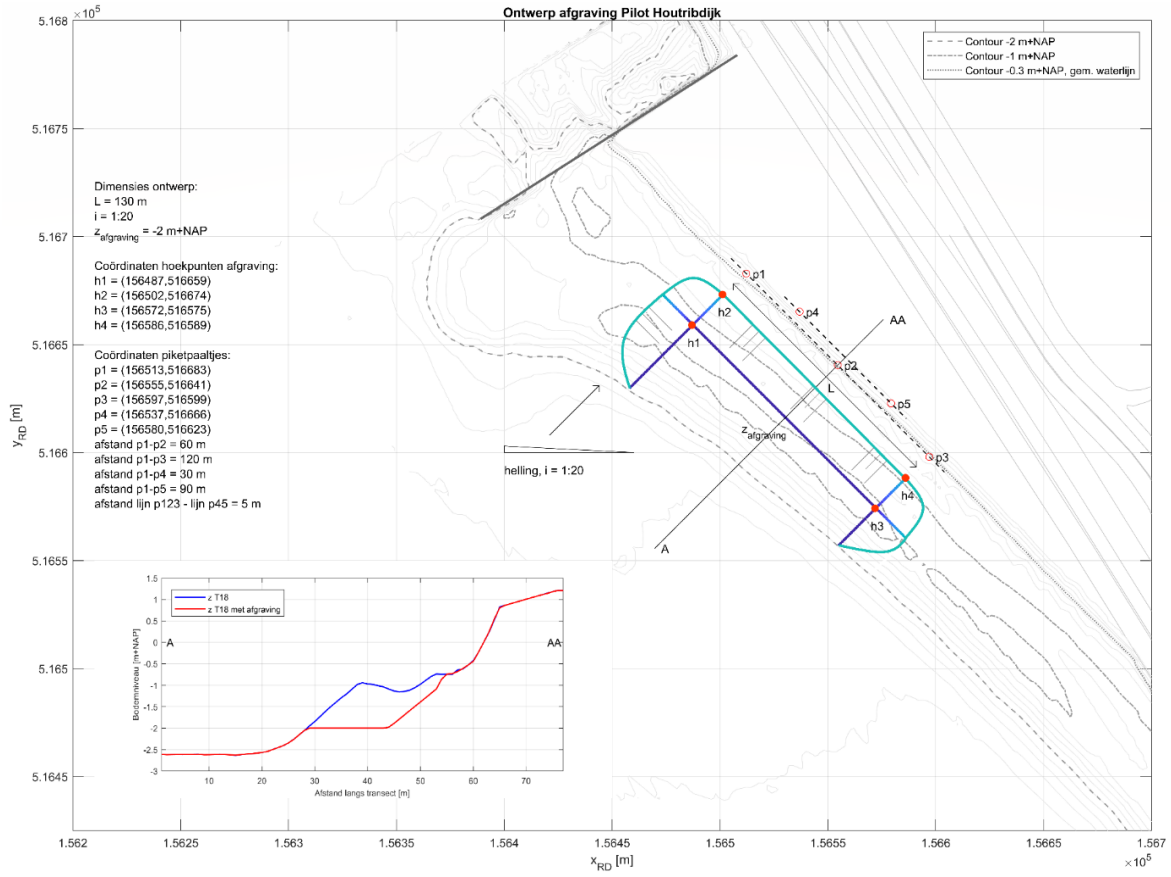
Het doel van het aanvullend onderzoek is om te verklaren hoe het onderwaterplateau ontstaat en hoe het zich ontwikkelt. Wanneer de processen beter begrepen worden, kan bepaald worden wat de rol van het onderwaterplateau is in de waterkerende functie van het zandige lichaam. Door het plateau af te graven en het effect daarvan te meten en analyseren kan de ontwikkeling van het onderwaterprofiel hier meer inzicht in geven. Het effect van de afgraving op de morfologie is uitgewerkt aan de hand van de volgende vragen:

1. Hoe vult de afgraving zich op in de drie maanden na de afgraving? (morfologische ontwikkeling)
2. Welke hydrodynamische processen zorgen voor de zorgen voor het opvullen van de afgraving?
3. Waar moet op gelet worden bij toekomstige ontwerpen van zandige versterkingen, met betrekking tot het ontstaan en ontwikkelen van een onderwaterplateau?
4. Wat is het effect van de afgraving op de positie van de oeverlijn?

1.4 Het ontwerp van de afgraving

De verstoring van het onderwaterprofiel moet groot genoeg zijn om het systeem uit de veronderstelde evenwichtssituatie te halen. Figuur 4 toont het ontwerp van de afgraving. Het plateau is met circa 1 m verlaagd tot NAP-2 m. Deze lokale verdieping wordt als voldoende geacht om een effect op de ligging van de waterlijn te creëren. Om de verstoringen rond de waterlijn ten gevolge van de uitvoeringswerkzaamheden te limiteren, begint de afgraving 10 meter uit de waterlijn. Bij de overgang van NAP -1 m naar NAP -2 m is een helling van 1:20 toegepast, wat een standaard onderwaterhelling bij de proefsectie is (zie Figuur 2).

Door de afgraving niet direct naast de damwand uit te voeren wordt er niet gekeken naar het directe effect van de damwand op de verstoring. De noordwestelijke grens van de afgraving is ontworpen op de locatie waar de NAP-2 m contourlijn weer parallel aan de oeverlijn loopt. Hierdoor is er sediment ten noorden en ten zuiden van de afgraving aanwezig, waardoor het van twee kanten weer op kan vullen. Daarnaast is de lengte van de afgraving 130 m, waarmee onderzocht wordt of het plateau een functie heeft in de stabiliteit van het profiel. Als de waterlijn landwaarts verplaatst te midden van de afgraving, dan kunnen we concluderen dat het plateau een rol heeft in het reduceren van de golfenergie. Daarnaast is het mogelijk dat de afgraving vanuit de zijkanten opgevuld wordt. In dat geval is langtransport in de vorming van het onderwaterplateau te duiden. Ter hoogte van de hoekpunten van de afgraving zijn referentiepalen op de waterlijn geplaatst om visueel de waterlijnontwikkeling bij de afgraving te kunnen volgen. Figuur 4 is in groter formaat gepresenteerd in Bijlage A van deze rapportage.



Figuur 4 *Het ontwerp van de afgraving, waarop de uitgevoerde afgraving gebaseerd is.*

1.5 Aannames en uitgangspunten ten aanzien van de analyses

Voor de analyse van de afgraving is aangenomen dat de vooroever van de Proefsectie zich min of meer in een dynamische evenwichtssituatie bevindt voordat de afgraving plaatsvond. Daarnaast wordt aangenomen dat de beoogde verstoring groot genoeg is om het evenwicht te verstoren. Ten laatste is verondersteld dat drie maanden meten voldoende tijd is om het systeem naar een evenwichtsherstel te zien ontwikkelen. In dit rapport worden alleen de metingen en ontwikkelingen beschreven die plaatsgevonden hebben tussen 12 december 2017 en 20 maart 2018, wanneer het experiment met de verstoring plaatsgevonden heeft.

1.6 Leeswijzer

Dit rapport zal ingaan op de morfologische ontwikkelingen omtrent de afgraving. Om de morfologische ontwikkelingen te verklaren zijn metingen nodig die in hoofdstuk 2 gepresenteerd worden. De in paragraaf 1.2 beschreven mogelijkheden voor het opvullen van de afgraving kan opgedeeld worden in verschillende theorieën. De theorieën beschreven in hoofdstuk 3, vormen de basis van het onderzoek en zorgen voor een koppeling tussen de onderzoeksvragen en de uiteindelijke resultaten.

Na deze hoofdstukken met achtergrond en verwachtingen, worden in hoofdstukken 4 en 5 de ontwikkelingen en verklaringen voor de ontwikkelingen beschreven. In hoofdstuk 4 wordt nader ingegaan op de hydrodynamica door de maatgevende golf- en stromingscondities voor de Pilot Houtribdijk te beschrijven. Deze worden gebruikt om een verklaring te vinden voor de morfologische bevindingen in hoofdstuk 5.

In hoofdstuk 6 worden de theorieën geëvalueerd aan de hand van de conclusies komend uit de hydrodynamische en morfologische analyses. Dit biedt inzicht in de ontwikkelingen rond de afgraving en de processen die daaraan bijgedragen hebben. Met de afgraving konden niet alle vragen rond de optredende processen en ontwikkelingen beantwoord worden. Daarom zijn in hoofdstuk 7 een aantal interessante situaties geschetst, gedachtenexperimenten, die niet getest konden worden. Aan de hand van de uitkomsten bij de afgraving worden de mogelijke ontwikkelingen bij elk van deze situaties beschreven. In hoofdstuk 8 worden ten slotte de conclusies uit de gehele analyse samengevoegd en de vragen beantwoord.

2 MEETGEGEVENS

De meetgegevens die gebruikt worden om de ontwikkelingen omtrent de afgraving te volgen zijn in deze paragraaf toegelicht. Met de hydrodynamische metingen wordt geprobeerd de gevonden ontwikkelingen te verklaren. De profielontwikkelingen in de tijd worden geanalyseerd met de periodieke bodemmetingen.

2.1 Hydrodynamische metingen

De hydrodynamische condities zijn te relateren aan de gevonden profielontwikkelingen. De condities in de hier gepresenteerde analyse bestaan uit de metingen met het meetframe en de meetinstallatie op de damwand. Zoals getoond in Figuur 5 bevindt het meetframe zich offshore van de zandige versterking en het meet de volgende gegevens:

- Golfhoogte en golfrichting;
- Stromingsrichting en -snelheid.

De stroming gemeten bij het offshore meetframe heeft betrekking op de wind gedreven circulatiestroming in het Markermeer. Windopzet zorgt voor een waterstandsgradiënt in het Markermeer, welke daaropvolgend de circulatiestroming initieert.

De meetinstallatie op de damwand bestaat uit twee onderdelen:

- Een windmeter die de windrichting en windsnelheid meet.
- Twee fotocamera's die met een vast interval foto's van de waterlijn maken. Met deze gegevens worden de ontwikkelingen rond de waterlijn visueel gecontroleerd.

De interpretatie van deze gegevens zijn beschreven in hoofdstukken 4 en 5.

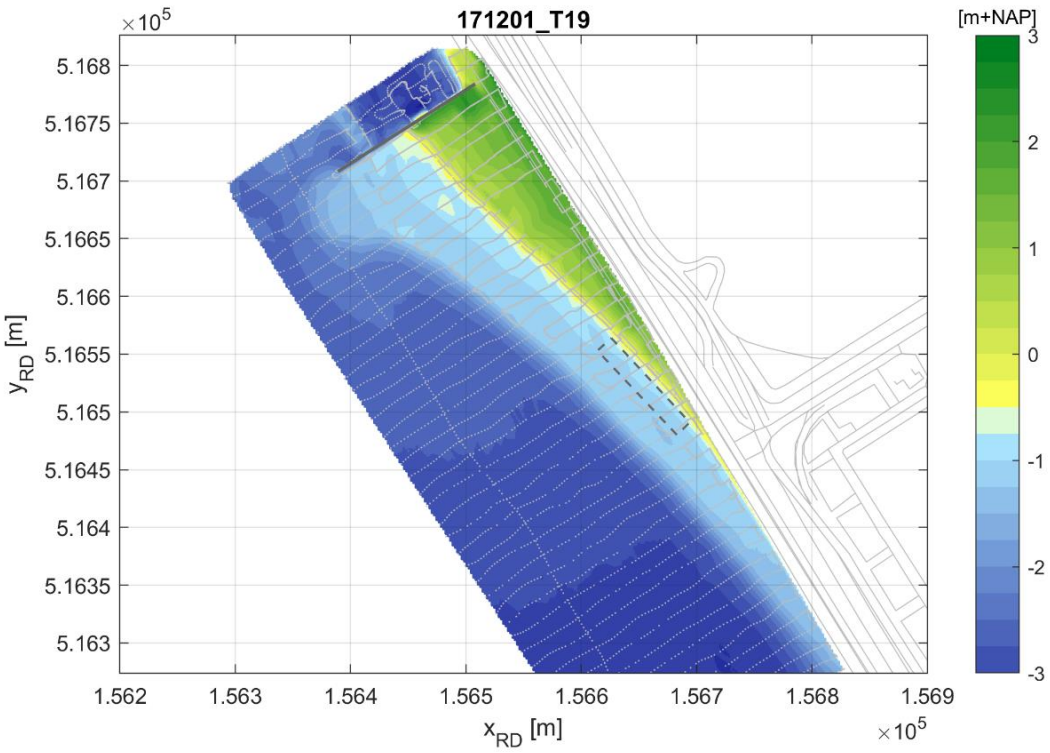
Figuur 5 *De locatie van het meetframe inclusief de kabel die het meetframe verbindt met de damwand. De locatie van de meetinstallatie op de damwand is weergegeven met de oranje cirkel.*

2.2 Shore metingen bodemniveau

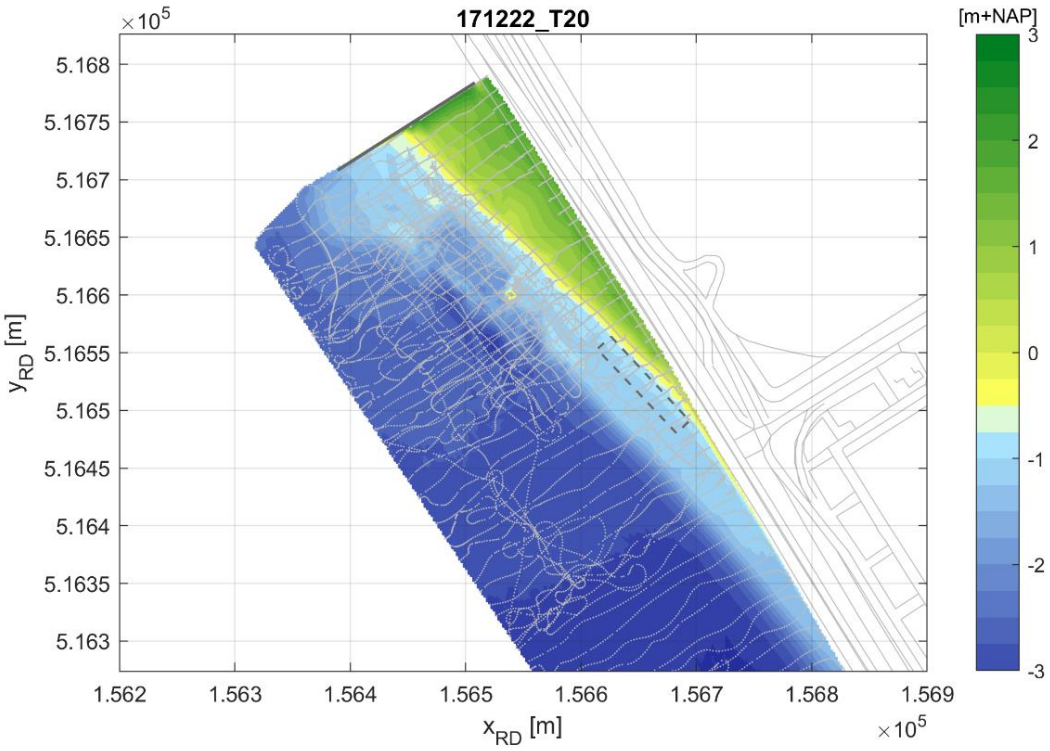
De ontwikkelingen van het bodemniveau rond de afgraving zijn geanalyseerd aan de hand van de Shore metingen. Deze metingen bevatten het geïnterpoleerde bodemprofiel van de hele zandige versterking. Een jetski met daarop een Single Beam Echo Sounder (SBES) gemonteerd worden raaien gevaren. De raaien boven water zijn ingemeten met een GNSS-rolconstructie. Meer informatie over de meetmethoden is te lezen in Shore Monitoring (2018). Figuur 6 tot en met Figuur 10 tonen een bodemprofiel na interpolatie en de meetraaien waar de bodem uit onttrokken is. Meting T19 is de laatste meting voordat de afgraving gerealiseerd werd. Metingen T1 tot en met T18 zijn gebruikt om de eerdere ontwikkelingen te bestuderen en zijn voor deze analyse buiten beschouwing gelaten. De datum van meten en de beschrijving van de meting en de vigerende condities in die periode zijn getoond in Tabel 1.

Tabel 1 Beschrijving van de metingen die betrekking hebben op de afgraving.

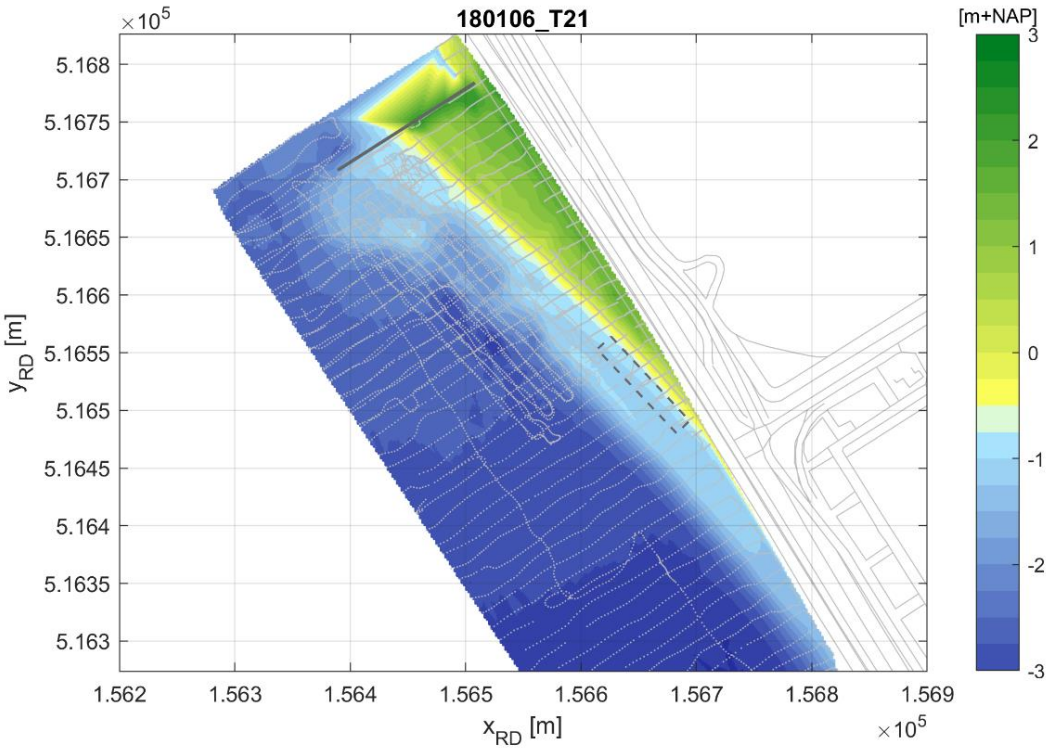
Meting	Datum meting	Opmerkingen
T19	01-dec-2017	Laatste meting voor het afgraven van een deel van de vooroever
T20	22-dec-2017	Eerste meting direct na de afgraving
T21	06-jan-2018	Meting na stormen begin januari
T22	23-feb-2018	Einde rustige periode met stormen, de zwaarste storm was op 17 januari
T23	20-mrt-2018	Einde zeer rustige periode met onder andere ijsvorming



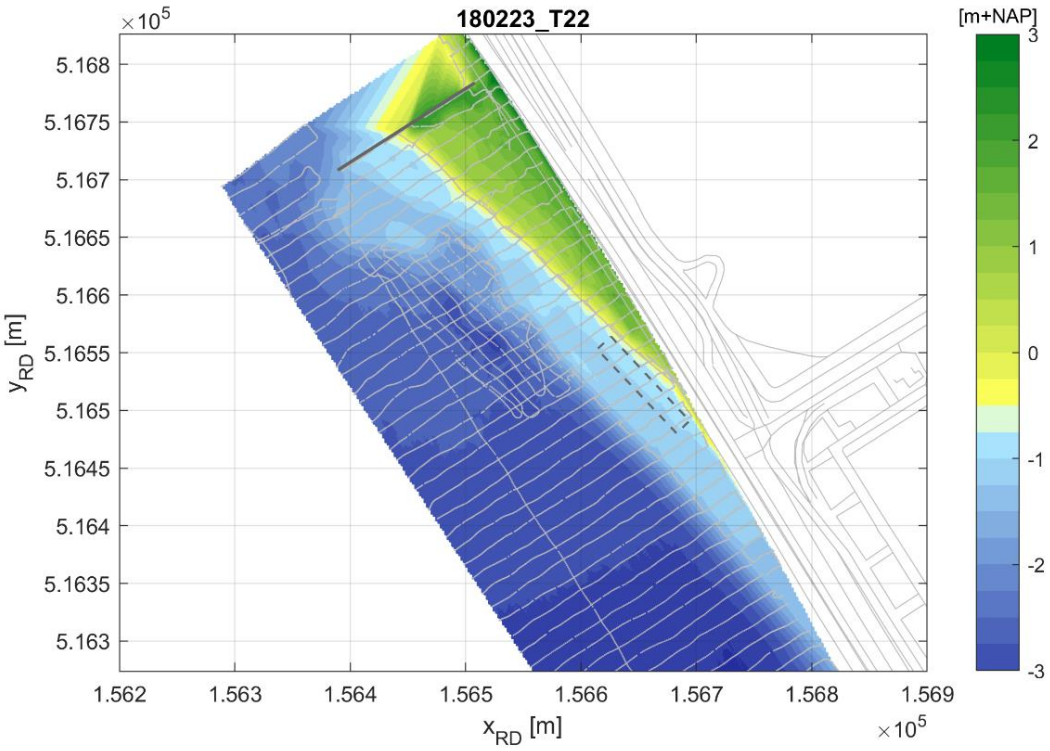
Figuur 6 Het bodemniveau en de meetraaien rond de proefsectie voor de T19-meting van 1 december 2017 (voor afgraving).



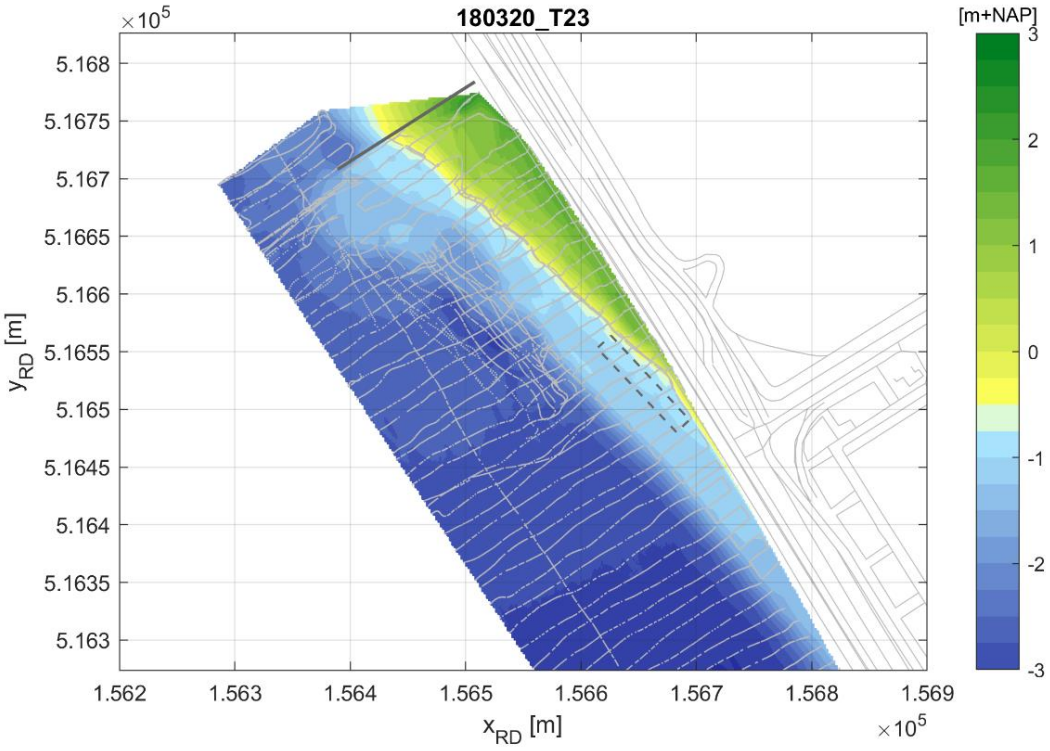
Figuur 7 *Het bodemniveau en de meetraaien rond de proefsectie voor de T20-meting van 22 december 2017 (na uitvoering afgraving).*



Figuur 8 *Het bodemniveau en de meetraaien rond de proefsectie voor de T21-meting van 6 januari 2018.*



Figuur 9 *Het bodemniveau en de meetraaien rond de proefsectie voor de T22-meting van 23 februari 2018.*



Figuur 10 *Het bodemniveau en de meetraaien rond de proefsectie voor de allerlaatste T23-meting van 20 maart 2018.*

3 THEORIEËN

Verschillende processen kunnen zorgen voor het ontstaan en ontwikkelen van een onderwaterplateau. Om te verklaren welke processen hiervoor zorgen en in welke mate ze relevant zijn, zijn verschillende theorieën opgesteld. Per theorie zal eerst ingezoomd worden op karakteristieken van het onderwaterplateau (en verklaringen hiervoor). Vervolgens wordt bekeken in hoeverre de ingreep bruikbaar is om deze theorieën te ondersteunen of te ontkrachten.

De voorspelling van de plateau-karakteristieken is opgedeeld in twee onderdelen die te relateren zijn aan de vragen over de afmetingen van het onderwaterplateau:

- Waarom heeft het plateau deze breedte gekregen?
- Waarom is het plateau ontstaan op NAP -1 m?

Er is onderscheid gemaakt in theorieën gerelateerd aan de breedte en aan het niveau van het plateau. Per theorie is een onderbouwing gegeven en wordt kort beschreven welke processen bewezen kunnen worden.

3.1 Theorie breedte plateau

Na aanleg van de zandige versterking in het begin van 2014 is vrij snel een plateau gevormd. De breedte heeft zich relatief snel uitgebreid tot 40 m, waarna deze in de tijd min of meer constant bleef. Deze breedte kan door twee processen gevormd zijn, namelijk door langstransport, dwarstransporten of door een combinatie van beide.

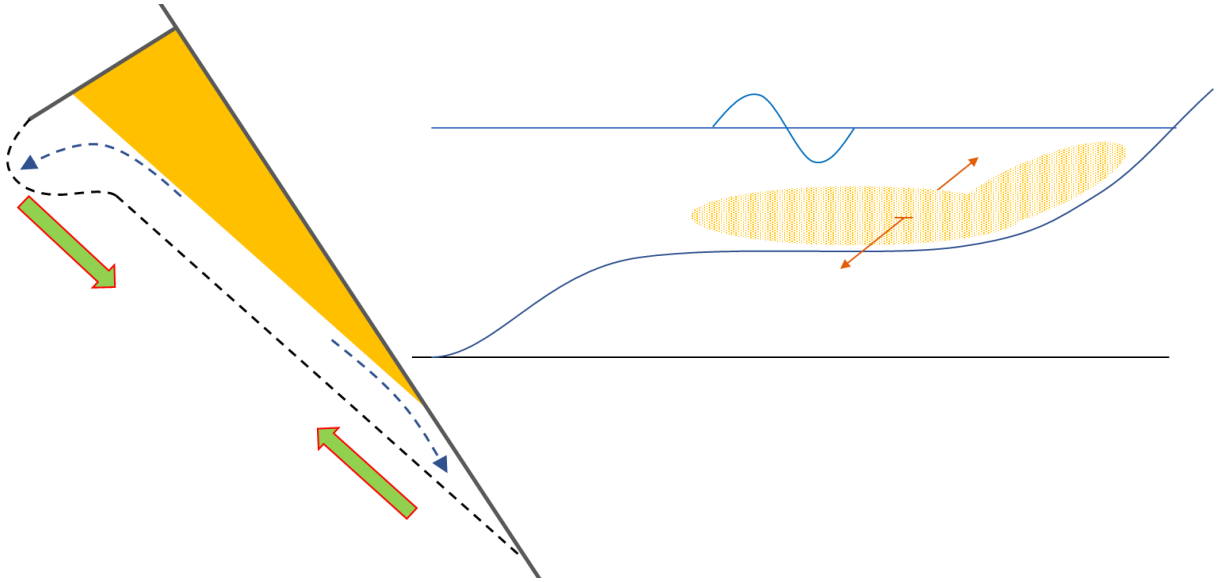
Theorie “Breedte plateau 1” (langstransport gedomineerd)
Twee onderdelen die apart beschreven worden:

Theorie “Breedte plateau 1a”:
Het dwarstransport beperkt zich tot de oeverlijn. Er vindt voornamelijk golfgedreven langstransport plaats over het plateau en dit zorgt ervoor dat het zand naar buiten gevoerd wordt nabij de damwand (noord) en de dijk (zuid).

Theorie “Breedte plateau 1b”:
De windgedreven circulatiestroming in het Markermeer zorgt voor uitvlakking van het buitentalud. Op deze manier verplaatst het sediment langs de proefsectie van de Pilot Houtribdijk en wordt het afgezet aan de offshore zijde van het plateau. Deze afzetting resulteert in het uitbouwen van het plateau.

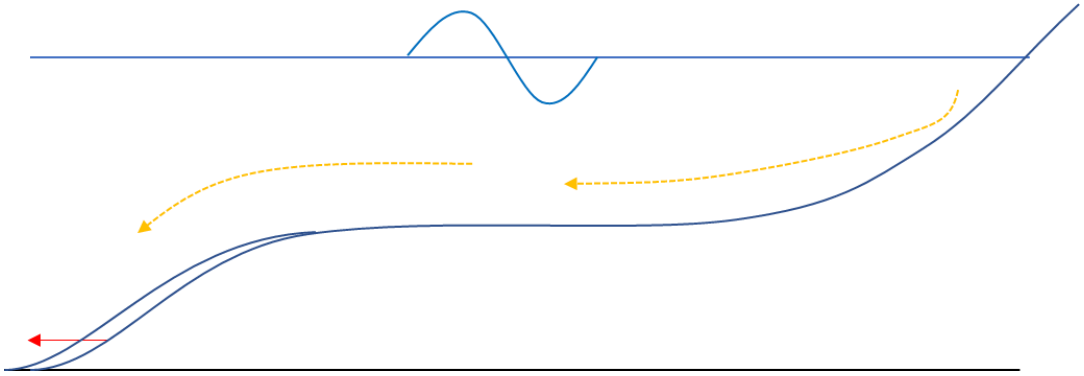
Figuur 11 geeft beide processen weer. Het langstransport op het plateau met de blauwe gestippelde pijlen in bovenaanzicht en met de oranje pijlen in de schematisatie van de dwarsdoorsnede. De mogelijke invloed van de windgedreven circulatiestroming is in het figuur aangeduid met de groene pijlen.

Ter ondersteuning van deze theorie wordt in monitoringsgegevens gekeken naar aanwijzingen dat het langstransport dominant is over het dwarstransport. Indien dit het geval is, dan zal de afgraving opvullen vanuit de zijkanten en zal de erosie rond de waterlijn beperkt blijven.



Figuur 11 Theorie “Breedte plateau 1”.

Theorie “Breedte plateau 2” (dwarstransport gedomineerd)
De vorm en de afmetingen van het onderwaterplateau zijn primair gevormd door dwarstransporten. Hierbij verplaatst het zand richting het Markermeer en wordt het tegen het buitentalud afgezet. Wanneer ter hoogte van de afgraving erosie plaatsvindt rond de waterlijn, zorgt het plateau dus voor een golfdempende werking. Als de hoeveelheid afgezet zand onder water gelijk is aan de erosie boven water, wordt het plateau dus uitgebouwd als gevolg van dwarstransport.

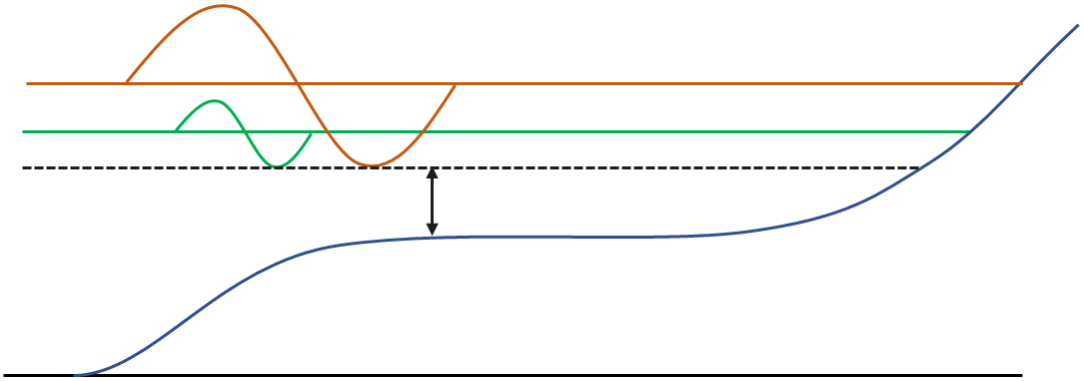


Figuur 12 Theorie “Breedte plateau 2”.

3.2 Theorie niveau plateau

Ook worden twee theorieën beschouwd die betrekking hebben op het niveau van het onderwaterplateau.

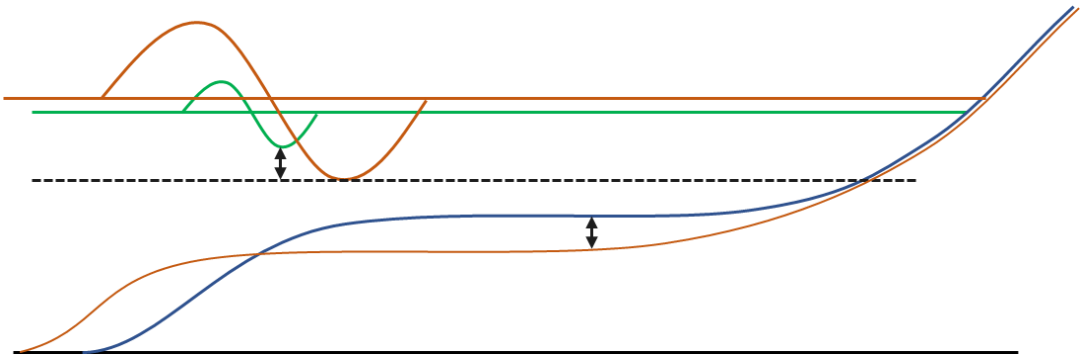
Theorie “Niveau plateau 1”
Het plateau heeft een constant niveau bereikt doordat de waterstand en golfhoogte aan elkaar gecorreleerd zijn. Figuur 13 presenteert het idee dat hogere golven gepaard gaan met een hogere waterstand, waardoor er een minimale waterdiepte onder het golfdal blijft bestaan. Hoewel hogere golven meer energie bevatten zal dit voornamelijk terug te vinden zijn in de erosie rond de waterlijn en niet in de hoogte van het plateau.



Figuur 13 Theorie “Niveau plateau 1”, de golfhoogte en waterstand zijn gecorreleerd.

Theorie “Niveau plateau 2”

Het niveau van het plateau wordt volledig bepaald door de zwaarst opgetreden conditie, omdat elke zwaardere storm ‘dieper’ aangrijpt. Grotere golven hebben meer energie, waardoor waterbewegingen onder de golf en de hieraan gerelateerde turbulentie sediment verplaatst en het plateauniveau daalt.



Figuur 14 Theorie “Niveau plateau 2”, het niveau van het plateau correleert met de zwaarst opgetreden conditie.

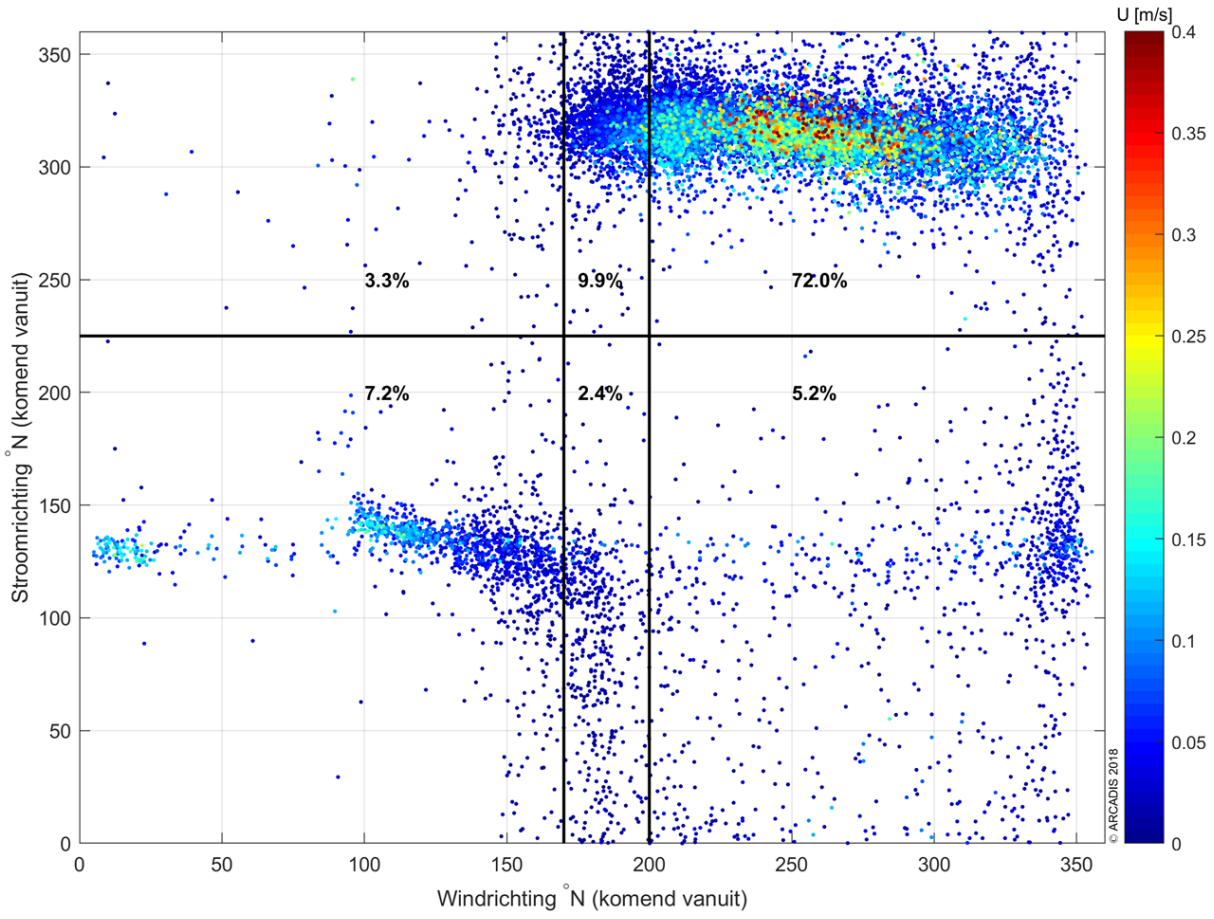
4 ANALYSE HYDRODYNAMICA

Het sediment langstransport bij de proefsectie van de Pilot Houtribdijk kan gestuurd worden door golven of door de windgedreven circulatiestroming. Om verklaringen te vinden voor de ontwikkeling omtrent de afgraving is het van belang om de hydrodynamische condities te kennen. Golven en de grootschalige circulatiestroming worden beide gedreven door de wind, waardoor eerst de relatie tussen de wind en de stroomrichting beschreven wordt. Vervolgens wordt ingegaan op de richting van het langstransport door de relatie tussen de golfrichtingen en de gemeten stromingsrichtingen bij het offshore meetframe te analyseren.

Om de algemene trends in de hydrodynamica te kunnen duiden is in dit hoofdstuk gebruik gemaakt van de data die gedurende de driejarige meetcampagne gemeten zijn. De beschrijving van de basisdata die in de figuren in deze paragraaf gebruikt wordt, wordt in meer detail beschreven in een separaat document over de hydraulische condities bij de proefsectie (HKV, 2018). In het voorliggende rapport wordt de beschikbare gegevens gebruikt om de relatie te duiden tussen de gemeten wind-, golf en stromingsrichting en het sedimenttransport bij de afgraving.

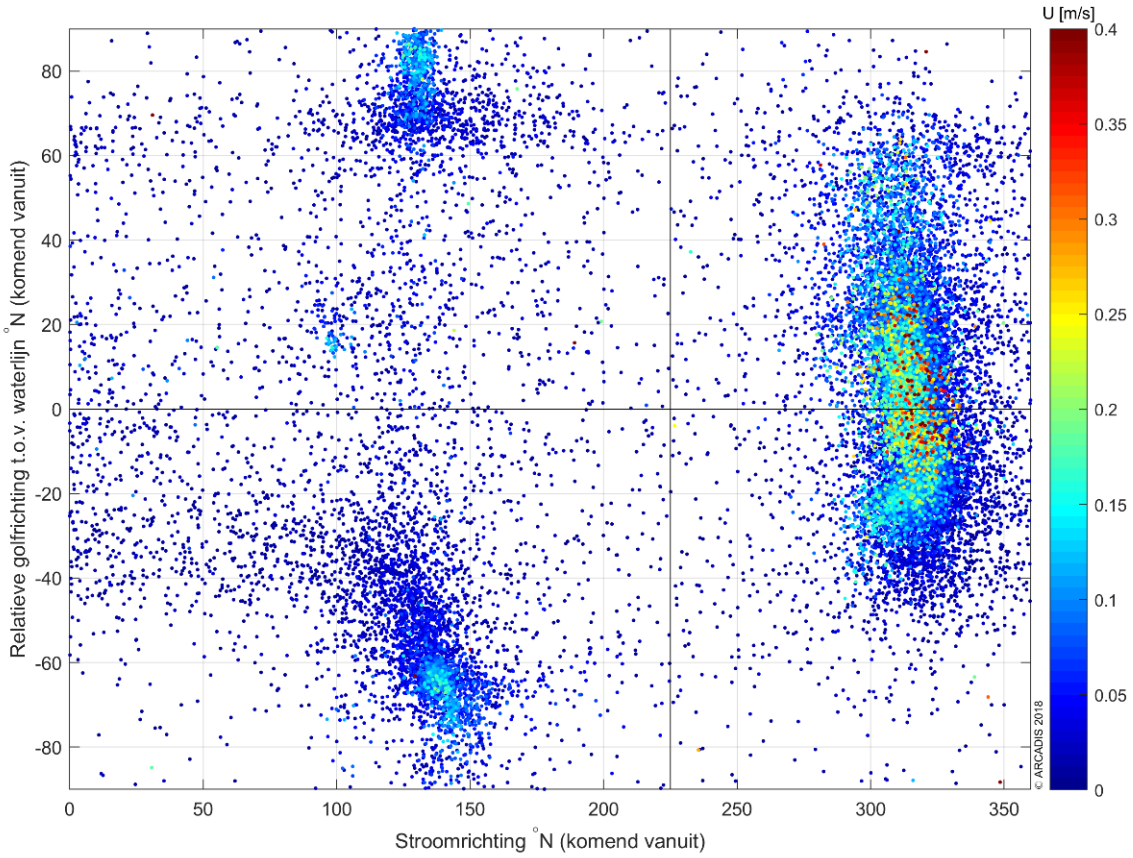
4.1 Wind, golven en stromingen

Figuur 15 toont de relatie tussen de wind- en de offshore stromingsrichting. Hieruit blijkt dat bij windrichtingen vanuit 180 tot circa 200 graden noord de offshore stroming uit een andere richting kan komen. 225 Graden noord representeert de oriëntatie haaks op de waterlijn. Voor ruim 80% van de meetpunten is de stroming dus gericht naar Lelystad. In circa 10% van de gevallen komt de stroming uit tegengestelde richting ten opzichte van de wind. Dit is mogelijk te verklaren met het omslaan van de windrichting en de vertraagde respons van de windgedreven circulatiestroming. Als aangenomen wordt dat wind en golven aan elkaar gerelateerd zijn, betekent het dat de nearshore strominsrichting door golven uit het noordnoordwesten tegengesteld is aan de offshore stroming.



Figuur 15 *De offshore stromingsrichting uitgezet tegen de windrichting. De percentages geven aan hoeveel procent van de meetpunten zich in het desbetreffende vak bevinden.*

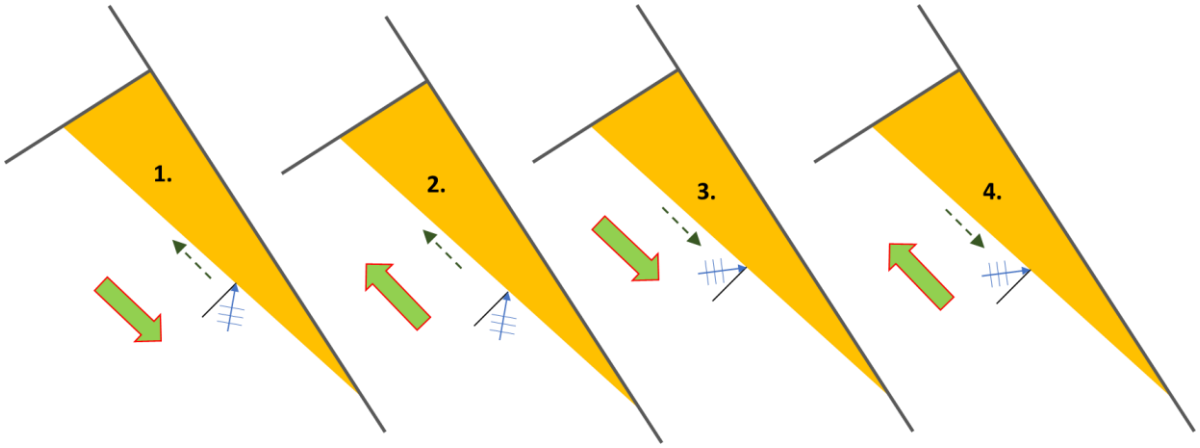
Figuur 16 presenteert de relatie tussen de stromingsrichting en de relatieve golfrichting. De relatieve golfrichting van 0º presenteert de golfinval haaks op de waterlijn, dus 225 graden noord. Daarnaast zijn voor dit figuur alle metingen meegenomen, omdat zo meer inzicht verkregen wordt in de trends. De metingen bij de afgraving vonden namelijk plaats in een stormachtige periode, waardoor de jaarrond condities niet inzichtelijk worden. Met de figuur wordt duidelijk dat bijna alle combinaties van golf en stromingsrichtingen gemeten zijn. Daarnaast bevinden zich rond de stromingsrichtingen van 140 en 320 graden noord de meeste datapunten.



Figuur 16 *De relatie tussen de stromingsrichting en de relatieve golfrichting. In kleur zijn de stromingssnelheden weergegeven.*

4.2 Maatgevende condities

Vanuit de gemeten hydrodynamische condities zijn vier situaties onderscheiden, zoals getoond in Figuur 17. Een aanname is dat golven de nearshore stromingen induceren. De gemeten stromingen bij het offshore meetframe zijn gepresenteerd met de groene pijlen. Door deze situaties te relateren aan de opgetreden stromingscondities kan bepaald worden welke situatie het vaakst voorkomt. Deze informatie kan gebruikt worden in het verklaren van de morfologische ontwikkelingen die plaats hebben gevonden rond de afgraving. De relatie tussen de offshore en nearshore stromingen, en de morfologie is relevant voor het begrip van de processen op het plateau.



Figuur 17 Vier verschillende situaties met waterbewegingen die plaats kunnen vinden voor de proefsectie.

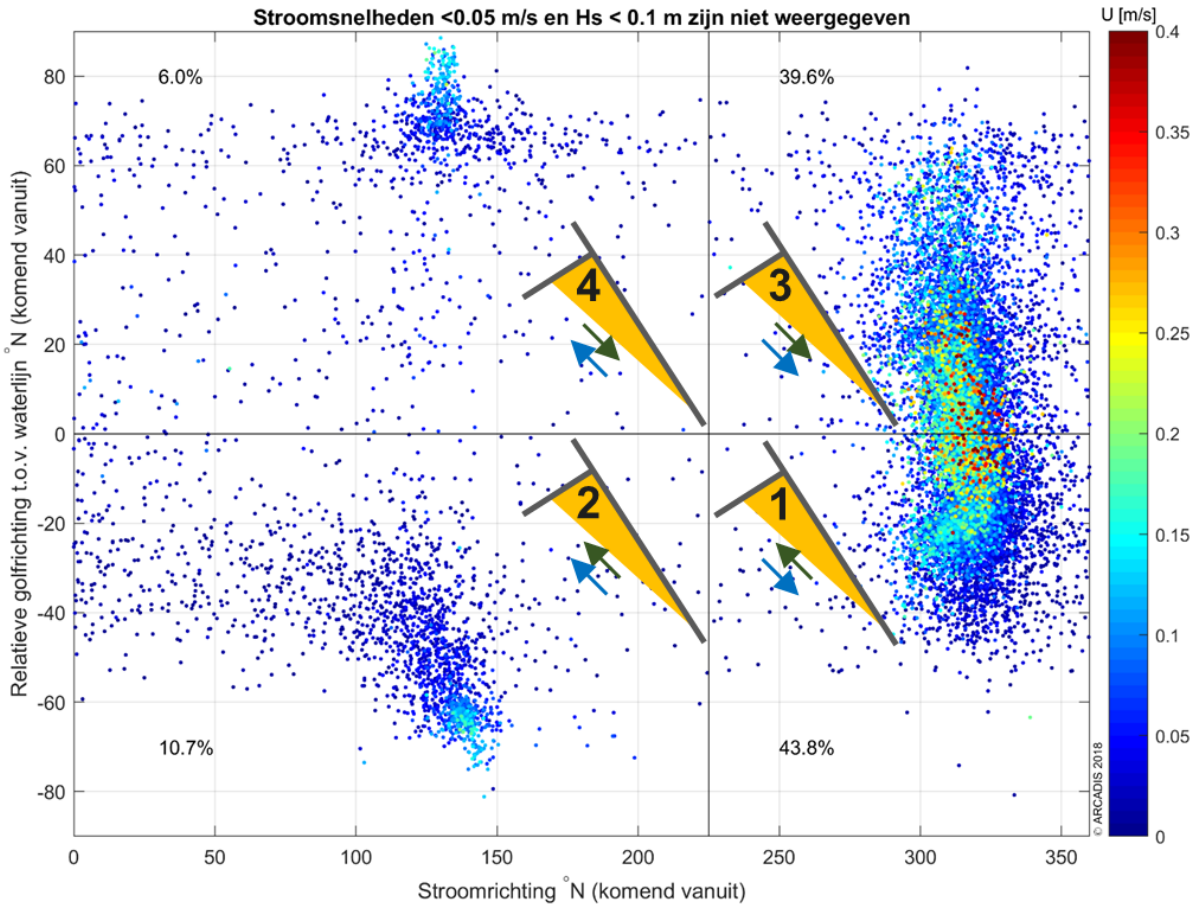
De relatie tussen de golfrichting en de stromingsrichting gepresenteerd in Figuur 18. Het belangrijkste verschil met Figuur 16 is dat golven met een hoogte lager dan 0,1 m niet weergegeven zijn. Hetzelfde geldt voor stromingssnelheden kleiner dan 0,05 m/s, omdat deze snelheden te laag zijn om sediment te kunnen verplaatsen. Hierdoor worden land afwaarts gerichte golven gefilterd en blijven de meer relevante golven voor de ontwikkeling van de proefsectie over.

Om te vinden welke van de twee stromingen (wind of golfgedreven stromingen) maatgevend is voor het sedimenttransport, is in Figuur 18 gepresenteerd hoe vaak de combinaties uit Figuur 17 voorgekomen zijn. De sterkste stromingen die onder het meetframe gemeten zijn, zijn gericht naar het zuidoosten. Hierbij komen de golven ongeveer haaks op de proefsectie binnen. De meeste meetpunten (43,8% van het totaal) bevonden zich echter in het regime met zuidwestelijke stroming en golven invallend onder een hoek kleiner dan 225 graden Noord. In principe zullen golven die onder deze hoek invallen resulteren in een nearshore stroming richting het noordwesten.

De offshore en nearshore stromingen hebben dus in 49,8% van de gevallen een tegengestelde richting. Voor 50,2% van de gemeten datapunten zijn ze complementair in hun richting. Voor slechts 16,7% van de meetpunten is de offshore stroming gericht naar het noordwesten. Dit suggereert dus dat de golf-geïnduceerde stroming nearshore en de offshore gemeten stroming niet direct aan elkaar gerelateerd zijn, omdat ze in de helft van de gevallen tegengesteld zijn.

Door de golfhoogtes kleiner dan 0,1 m niet weer te geven, worden in praktijk enkel de punten verwijderd die betrekking hebben op golfrichtingen richting het Markermeer. Wanneer de minimale golfhoogte gevarieerd wordt, dan verandert de verdeling en kan bepaald worden wat de maatgevende situatie is bij stormen. In Tabel 2 worden deze golfhoogtevariaties en het effect daarvan op de verdeling weergegeven. In de vierde kolom staan het aantal meetpunten weergegeven die gebruikt zijn voor het berekenen van de percentages. Het totaal aantal meetpunten bestaat uit de punten die gemeten zijn in de 3 jaar dat de proefsectie gemeten is. Figuur 19 onder de tabel geeft schematisch weer hoe de verdeling tussen de vier situaties is voor de variërende minimale golfhoogtes.

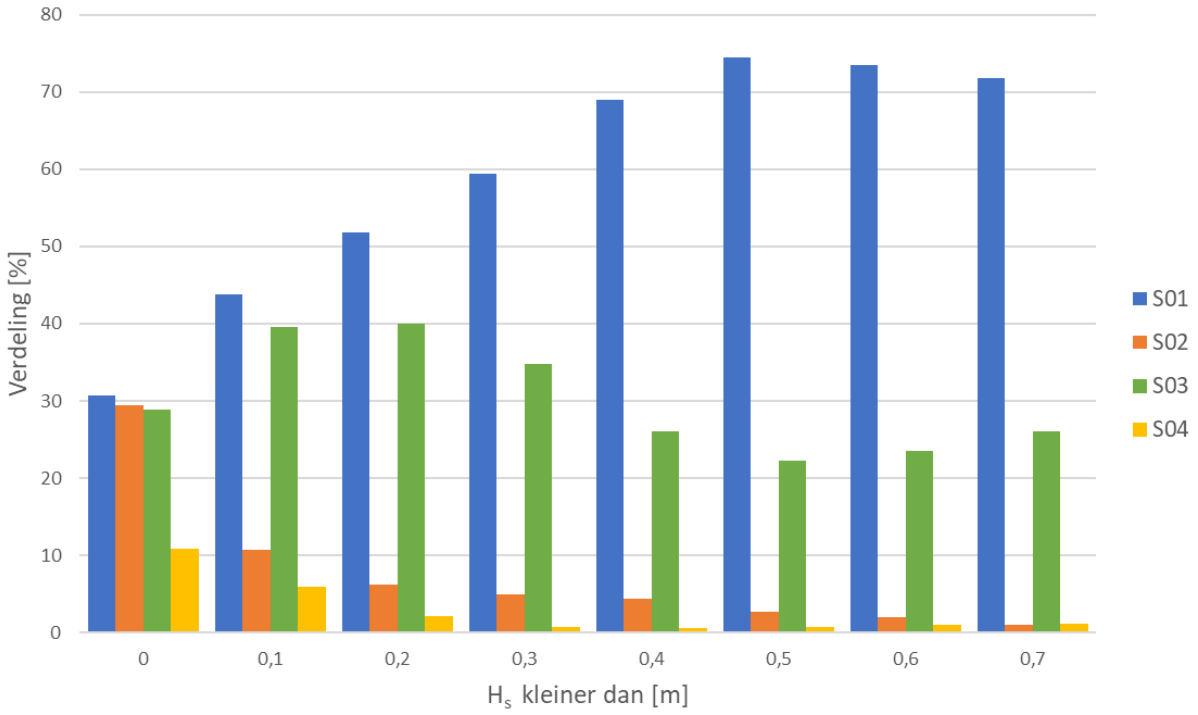
In alle gevallen bevinden de meeste punten zich in situatie 1 (S01), gevolgd door situatie 3 (S03). In deze situaties is de wind gedreven circulatiestroming naar het zuidoosten gericht. De verdelingen per scenario en situaties uit Tabel 2 zijn ook gepresenteerd in Figuur 19. Hierin wordt duidelijk dat de hoogste golven overeen komen met situatie 1 (S01), dus ze creëren een nearshore stroming richting het noordwesten. De offshore stroming is gericht naar het zuidoosten, richting Lelystad.



Figuur 18 *De verdeling van de relatieve golfrichting ten opzichte van de waterlijn tegenover de stroomrichting bij het offshore meetstation. Met de percentages is aangegeven hoeveel punten van het totaal in het vak vallen die de schematische situatie 1 tot en met 4 representeert.*

Tabel 2 *De verdelingen voor de verschillende situaties. Het scenario dat weergegeven is in het grijs is weergegeven in Figuur 18. Situaties 1 (S01) tot en met 4 (S04) zijn de verschillende situaties met waterbewegingen die plaats kunnen vinden voor de proefsectie van de Pilot Houtribdijk (zie ook Figuur 17).*

Scenario	U [m/s] <	Hs [m] <	Aantal punten	S01 [%]	S02 [%]	S03 [%]	S04 [%]
1	0,05	0,00001	28.914	30,7	29,5	28,9	10,8
2	0,05	0,1	17.608	43,8	10,7	39,6	6,0
3	0,05	0,2	12.157	51,8	6,2	40,0	2,1
4	0,05	0,3	7.154	59,4	5,0	34,8	0,7
5	0,05	0,4	3.615	68,9	4,4	26,1	0,6
6	0,05	0,5	1.844	74,4	2,7	22,2	0,7
7	0,05	0,6	945	73,5	2,0	23,5	1,0
8	0,05	0,7	518	71,8	1,0	26,1	1,2



Figuur 19 De verdeling voor de vier situaties bij een variërende minimale golfhoogte.

4.3 Conclusies

Uit de beknopte analyse van de hydrodynamica is te concluderen dat:

- Zowel de golfrichting als de stromingsrichting veranderen van oriëntatie ten opzichte van de windrichting bij een oriëntatie van 180-225 graden noord.
- Er zijn vier verschillende situaties met waterbewegingen beschreven die plaats kunnen vinden voor de proefsectie. De waterbewegingen bestaan uit combinaties van golfgedreven langsstroming en de richting van de grootschalige circulatiestroming. Voor meer dan 80% van de tijd vinden situaties 1 en 3 plaats. Dit betekent dat in het overgrote deel van de tijd de windgedreven circulatiestroming richting het zuidoosten (Lelystad) staat.
- Tijdens stormcondities bevindt zelfs meer dan 91% van de gemeten punten zich in situaties 1 en 3. De circulatiestroming is dan gericht naar het zuidoosten. Van deze 91% beschrijft circa 70% van de meetpunten een nearshore transport richting Enkhuizen en circa 20% een nearshore transport richting Lelystad.

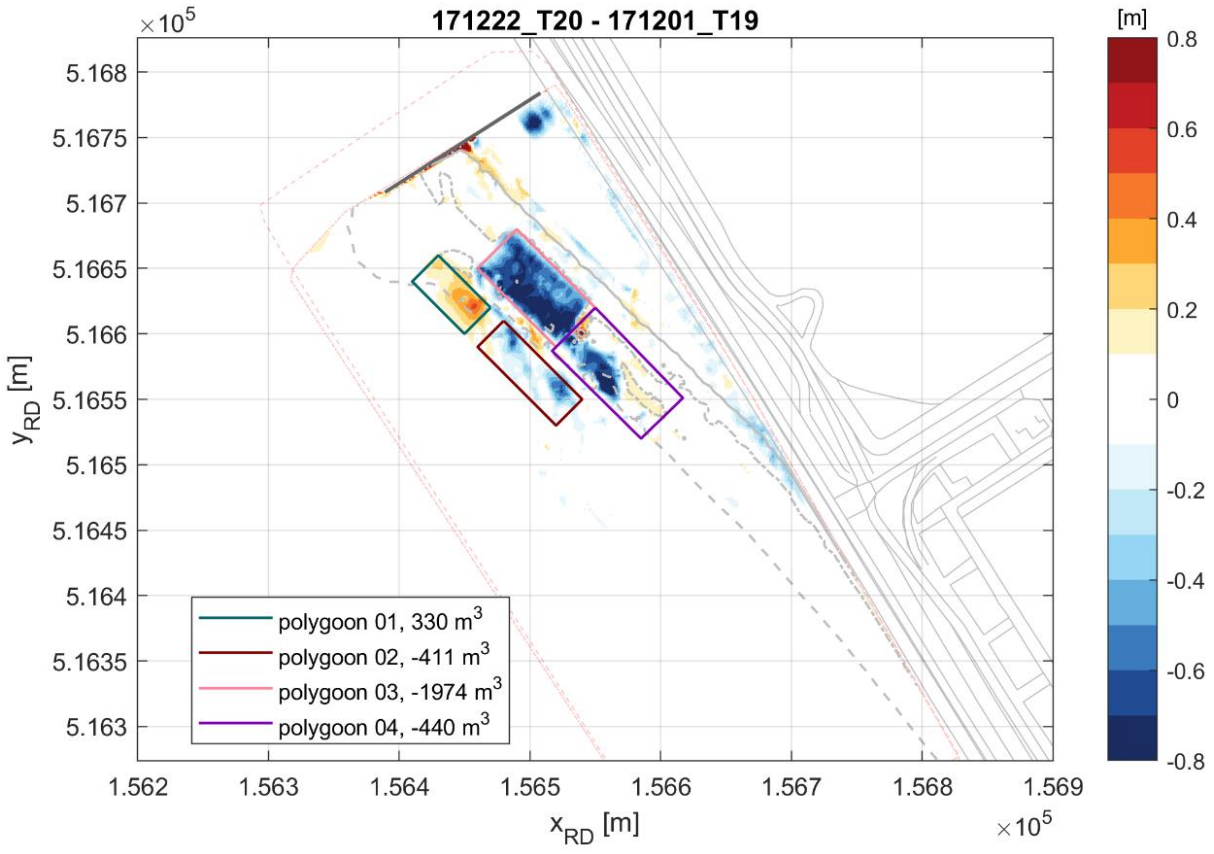
5 ANALYSE INGREEP

De afgraving van het onderwaterplateau was gereed op 21 december 2017. Om verschillende redenen was het niet mogelijk om de gehele oorspronkelijk geplande ingreep binnen de gestelde uitvoeringsperiode te realiseren. Uiteindelijk is dus een deel van de geplande ingreep gerealiseerd; het morfologische gedrag van deze ingreep is vervolgens gemonitord. In dit hoofdstuk wordt (de ontwikkeling van) de afgraving geëvalueerd en is een beschrijving gepresenteerd hoe het onderwaterplateau zich ontwikkeld heeft.

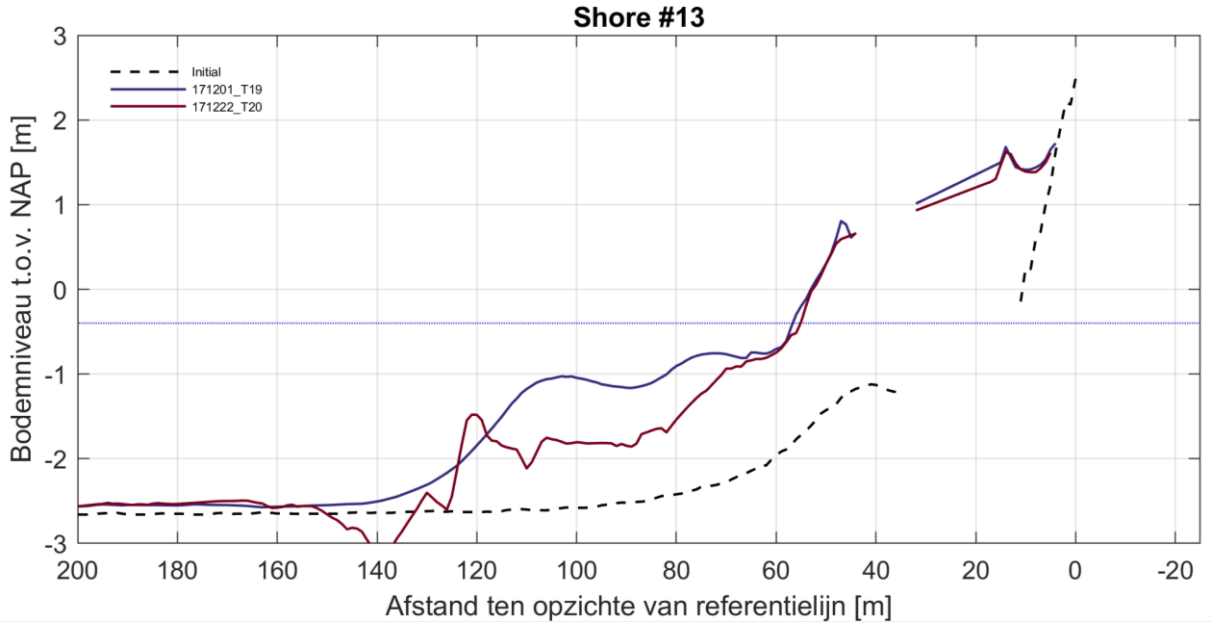
5.1 Evaluatie van de afgraving

In Figuur 20 is het verschil in de bodem van 1 december en vlak na de afgraving te zien. Volgens het ontwerp zou de afgraving 130 m lang worden, maar met een uiteindelijke lengte van circa 80 m is dit veel korter uitgevallen. Verder is na het afgraven een onregelmatig bodemprofiel zichtbaar aan de Markermeerzijde van het afgegraven plateau. Dit komt ook naar voren in Figuur 21, waar een dwarsdoorsnede in het midden van de afgraving gepresenteerd is.

In Figuur 20 zijn met verschillende polygonen de veranderingen uitgedrukt in volumes. Hiermee wordt inzichtelijk dat bij de ingreep circa 2.000 m^3 zand uit het profiel verwijderd is. In de daar omheen liggende gebieden is ook voornamelijk zand uit het profiel verwijderd, behalve aan de westzijde van de ingreep. Dit nieuwe bodemprofiel (T20-meting) wordt gebruikt als referentiesituatie voor de ontwikkelingen die in de maanden na de afgraving plaatsvinden.



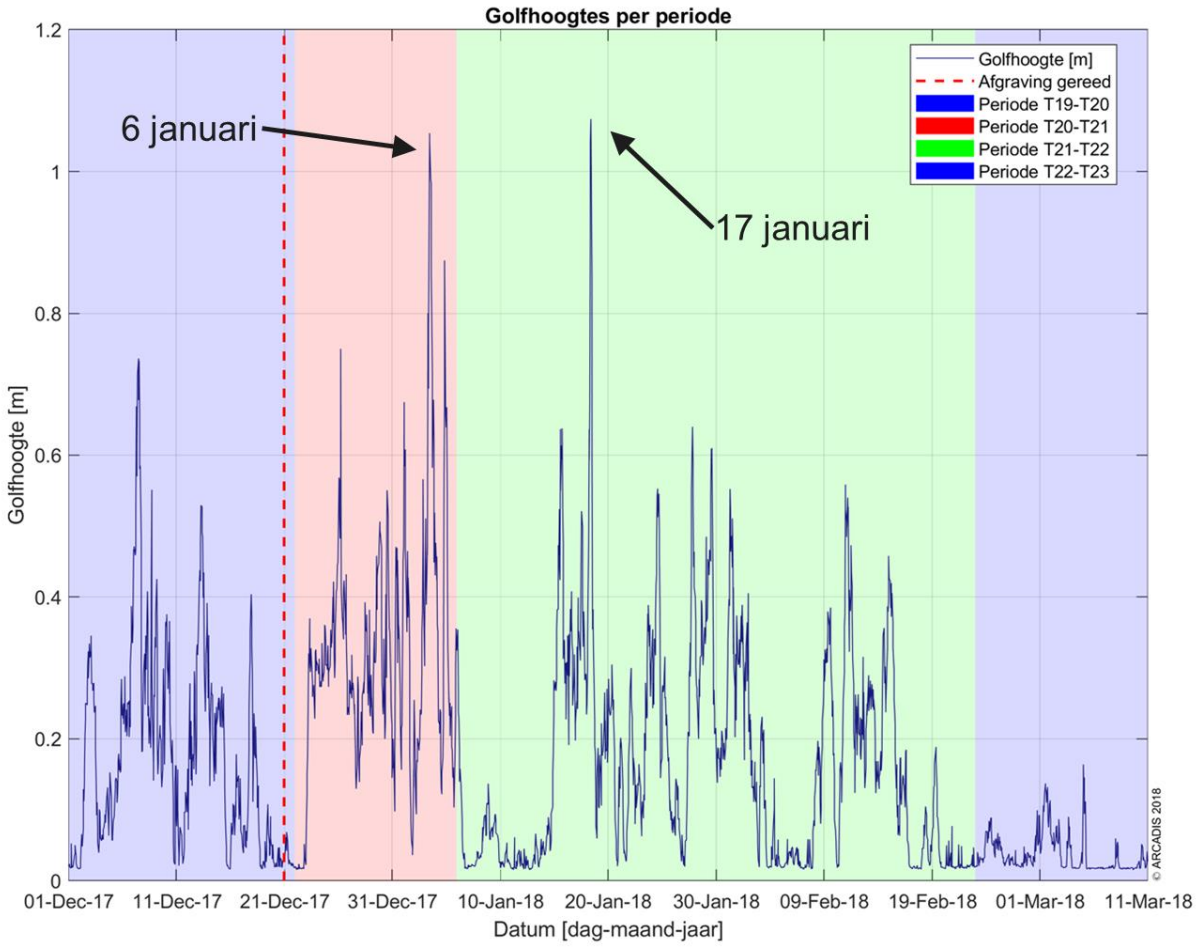
Figuur 20 *De ontwikkeling van het bodemprofiel in de periode T19-T20 weergegeven met een verschilkaart. De contourlijnen representeren de niveaus NAP-0,3 m (gemiddelde waterlijn), NAP-1,0 m en NAP-2,0 m van de T20 meting.*



Figuur 21 *Dwarsprofiel #13, te midden van de afgraving. Presentatie van de laatste meting voor en de eerste meting na de afgraving van het onderwaterplateau.*

5.2 Hydrodynamische condities tijdens het experiment

In de periode na de realisatie van de plateauverlaging hebben de sterkste en meeste stormen plaatsgevonden sinds de aanleg van de proefsectie Pilot Houtribdijk. Figuur 22 toont de golfhoogtes die bij het meetframe gemeten zijn in de periode na de plateauverlaging. Hierin komen de stormen van 6 en 17 januari duidelijk naar voren, waarvan verwacht wordt dat deze voor grote veranderingen in het onderwaterprofiel zorgen. Of de veranderingen te verklaren zijn met de stormen of door gemiddelde condities is lastig te bepalen, omdat tijd tussen de metingen verschilde. Verder was in de periode T22-T23 de golfslag uiterst beperkt, wat te verklaren is door de ijsvorming voor de proefsectie.

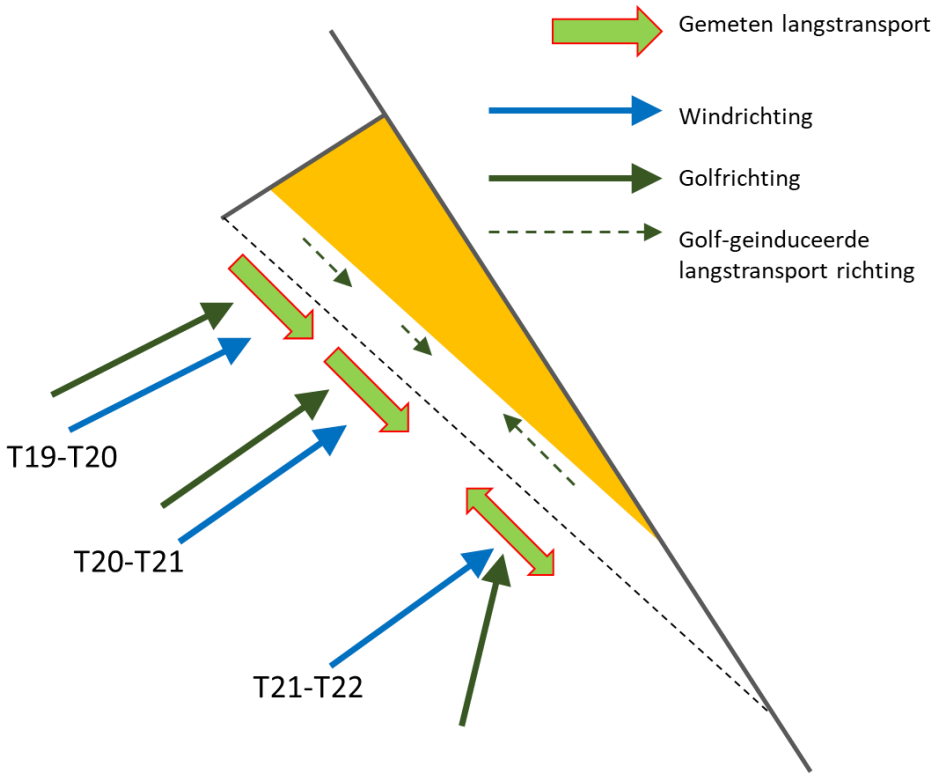


Figuur 22 De golfhoogtes die plaats hebben gevonden in periode na de afgraving.

5.2.1 Gemiddelde condities

In het rapport van HKV (2018) zijn de karakteristieke hydrodynamische gegevens per meetperiode gerapporteerd. Hieruit is geconcludeerd dat de offshore stroming onder gemiddelde windcondities naar het zuidoosten gericht is. Dit volgt ook uit de puntenwolk in Figuur 18. Alleen in de periode T21-T22 kan de stroming zowel uit het noordwesten als het zuidoosten komen. Data met deze golf invalshoek is namelijk niet eenduidig in Figuur 23.

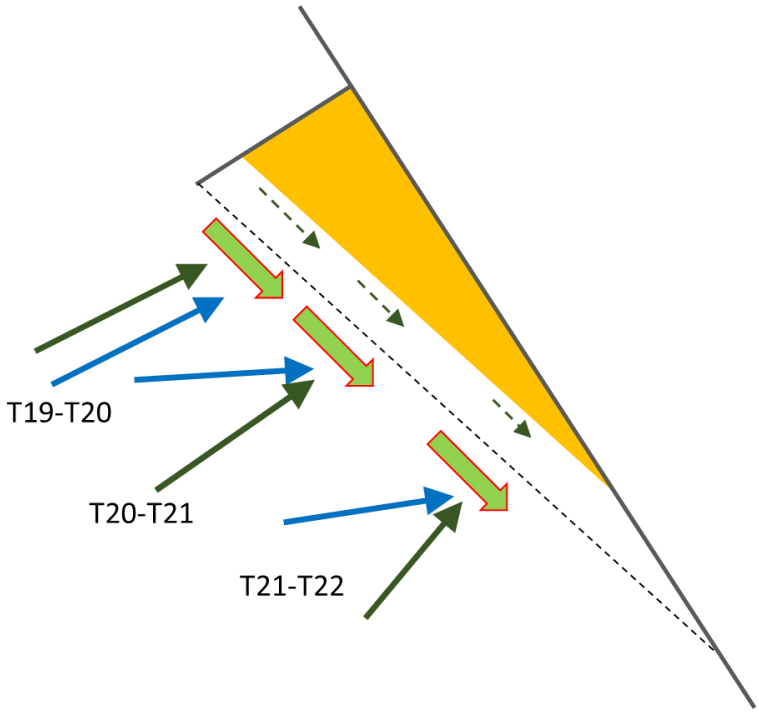
Gebaseerd op de golf invalshoek is de golf-geïnduceerde langs stromingsrichting geschat. Deze is voor de periode T19-T21 gericht naar het zuidoosten en voor de periode T21-T22 gericht naar het noordwesten. Daarnaast is de relatieve invalshoek in de laatste periode het grootst, waardoor sterkere langs stromingen verwacht worden. De sterkte van de stroming is ook afhankelijk van andere golfcondities, welke hier buiten beschouwing gelaten zijn. De reflectie op de verwachtingen staan in de volgende paragraaf uitgewerkt, waar ook de sedimentverplaatsingen per periode geanalyseerd worden.



Figuur 23 Overzicht van de gemeten gemiddelde condities bij het offshore meetstation.

5.2.2 Stormcondities

Met stormcondities is de offshore stroming bij alle meetperioden gericht naar het zuidoosten. Dit volgt wederom ook uit de puntenwolk in Figuur 18. Gebaseerd op de relatieve invalshoek zorgen ook de golven voor een zuidoostwaarts transport in de nearshore zone. Hierdoor is de verwachting dat na een storm sediment verplaatst is in zuidoostwaartse richting, zoals getoond in Figuur 24.



Figuur 24 Overzicht van de gemeten stormcondities bij het offshore meetstation.

5.3 Sedimentverplaatsingen

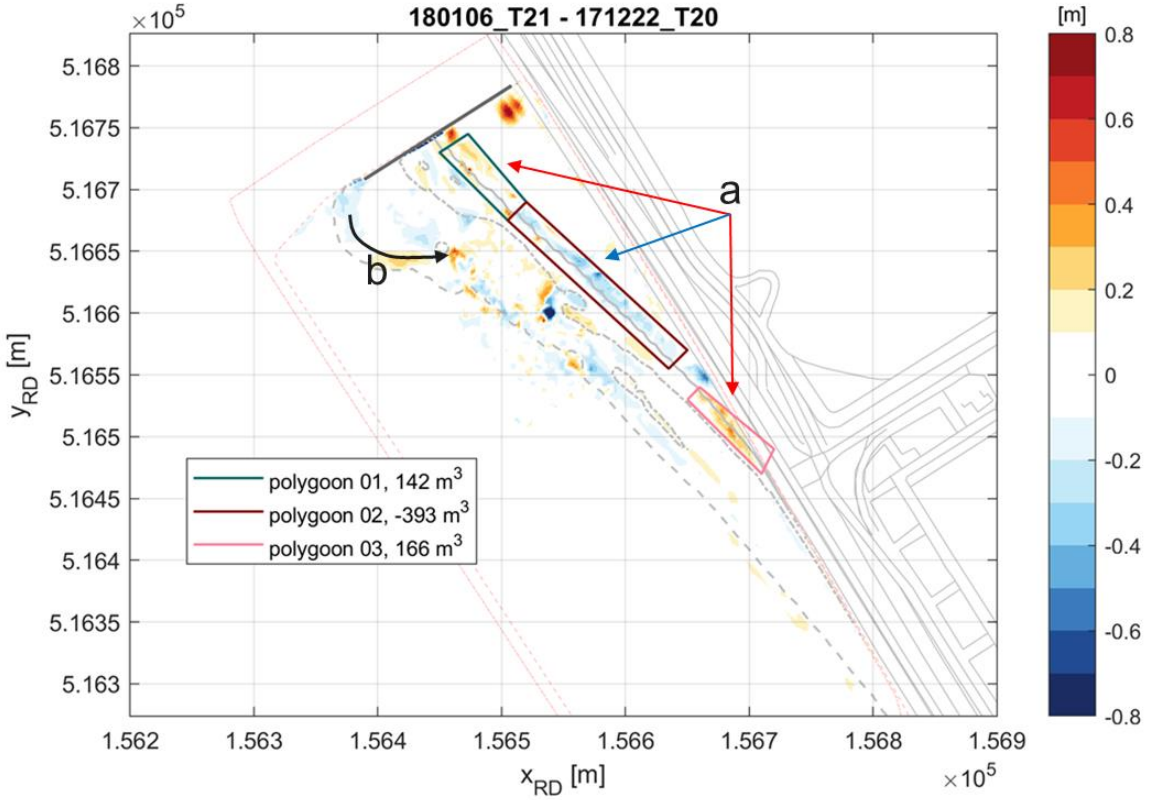
Aan de hand van verschilkaarten en de hydrodynamische condities zijn hier de sedimentverplaatsingen rond de afgraving geanalyseerd. Per meetperiode worden de ontwikkelingen beschreven.

Periode T20-T21 direct na afronding ingraving

Meting T21 vond twee weken na meting T20 plaats en in deze periode zijn verschillende zwaardere stormen opgetreden. Figuur 25 toont het verschil tussen deze twee metingen en het is zichtbaar dat rond de afgraving veranderingen plaats hebben gevonden. De grootte van deze veranderingen hebben echter voornamelijk te maken met het plaatselijk uitvlakken van het afgegraven profiel.

Eveneens is bij de waterlijn een erosieve trend zichtbaar (circa 400 m^3), wat verklaard kan worden door golfwerking. Een deel van deze erosie is afgezet aan de landwaartse zijde van de afgraving. Het grootste deel van dit geërodeerde materiaal is terug te vinden aan de noordoostelijke en noordwestelijke zijde van het zandlichaam voor de dijk. De volumes in deze gebieden zijn getoond in Figuur 25 en onderbouwen deze bevinding. Sedimentatie vindt plaats op de hellingen aan de zijkanten. Uit dit figuur is niet duidelijk zichtbaar of meer erosie heeft plaatsgevonden in het midden van de ingreep dan daarbuiten. Een dergelijk verschil werd op voorhand echter wel verwacht.

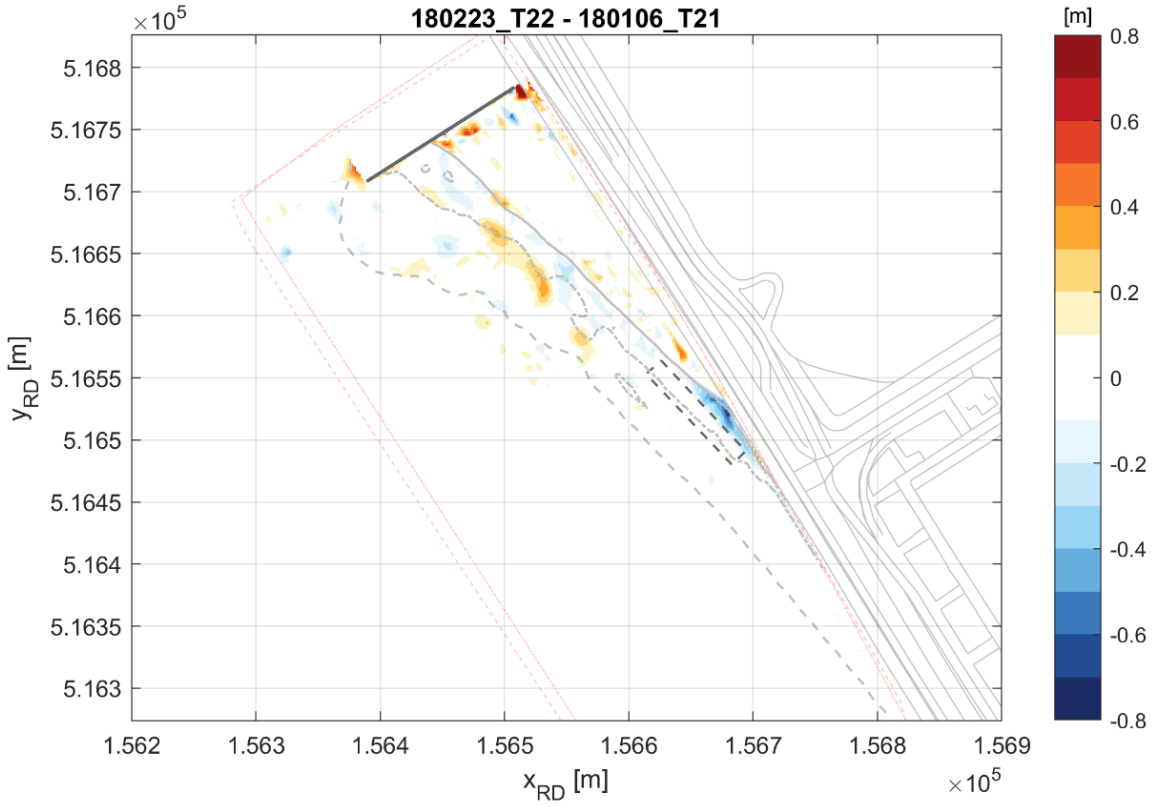
Gezien de hydrodynamische condities (zie paragraaf 5.2) werd een bijdraaiing van de oeverlijn verwacht, dus erosie nabij de damwand en sedimentatie aan de zuidoostzijde. Dergelijke aanpassingen zijn ook eerder waargenomen. Dit heeft echter nu niet zo plaatsgevonden. Zowel aan de noordzijde als de zuidzijde is zand afgezet en in het midden van de proefsectie is het geërodeerd (zie pijl *a* in Figuur 25). Wel is er volgens verwachting sediment van het uiteinde van de damwand naar de afgraving toe verplaatst (zie pijl *b* in Figuur 25), wat de bevindingen van de hydrodynamische condities uit de vorige paragraaf bevestigen. Verder lijken de veranderingen voornamelijk de uitvlakking van het profiel weer te geven, wat als gevolg van de winterse condities waarschijnlijk sneller is verlopen dan met normale condities het geval zou zijn geweest.



Figuur 25 *De ontwikkeling van het bodemprofiel in de periode T20-T21 weergegeven met een verschilkaart. De contourlijnen representeren de niveaus NAP-0,3 m (gemiddelde waterlijn), NAP-1,0 m en NAP-2,0 m van de T21 meting. De erosie-sedimentatietrends in het bovenwaterprofiel nabij de damwand zijn geen morfologische ontwikkeling, maar ontstaan door interpoleren.*

Periode T21-T22

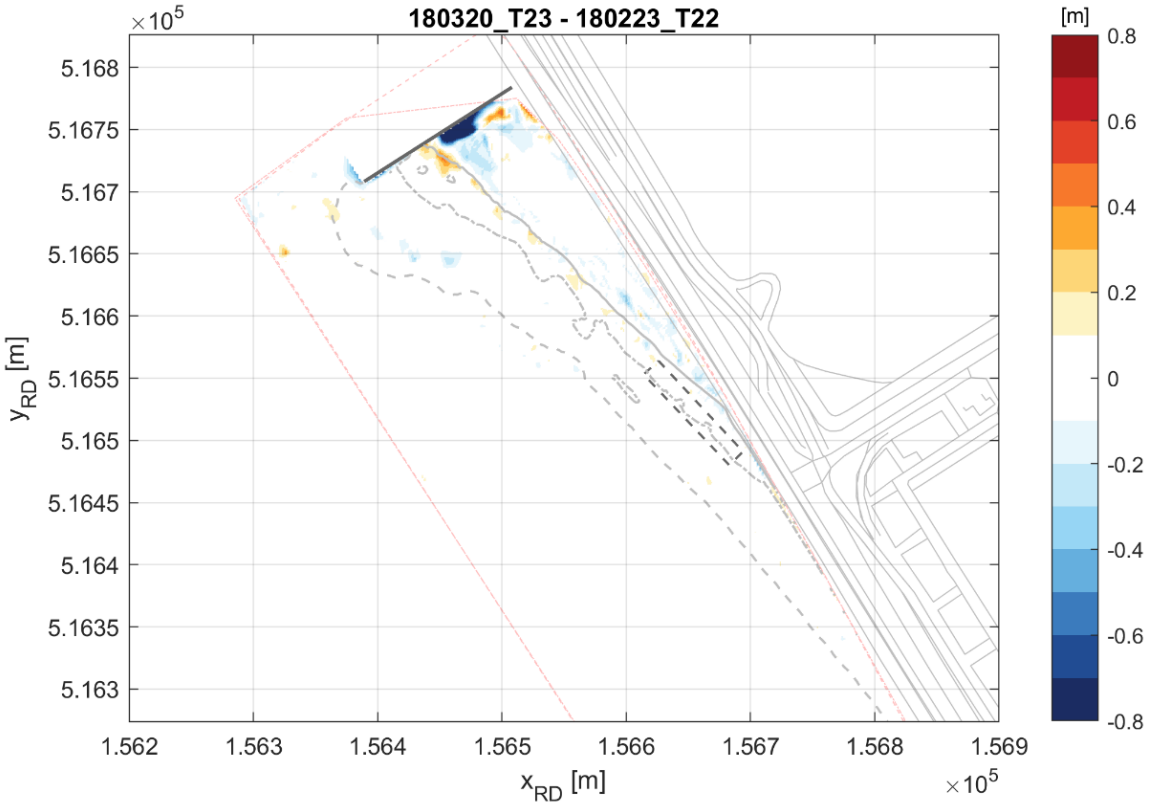
In de verschilkaarten van vóór het afgraven van het onderwaterplateau Was soms sprake van een bijdraaiing van de waterlijn. Dat wil zeggen erosie aan de zuidkant en aanzanding aan de noordzijde van de proefsectie (of vice versa). In Figuur 26 is dezelfde trend zichtbaar, maar dan met een ander resultaat als direct gevolg van de afgraving. Aan de zuidzijde is erosie rond de waterlijn zichtbaar, maar in tegenstelling tot eerdere situaties vindt de aanzanding niet plaats rond de waterlijn maar in het afgegraven deel. De afgegraven proefsectie vult op met zand dat is aangebracht vanuit het langstransport. De sterkere sedimentatie aan de zijkanten van de afgraving toont dit aan. Tevens laat dit figuur zien dat de opvulling van de afgraving begint vanuit de waterlijn, omdat er weinig sedimentatie plaatsvindt op de rest van het onderwaterplateau.



Figuur 26 *De ontwikkeling van het bodemprofiel in de periode T21-T22 weergegeven met een verschilkaart. De contourlijnen representeren de niveaus NAP-0,3 m (gemiddelde waterlijn), NAP-1,0 m en NAP-2,0 m van de T22 meting. De erosie-sedimentatietrends in het bovenwaterprofiel nabij de damwand zijn geen morfologische ontwikkeling, maar ontstaan door interpoleren.*

Periode T22-T23 (laatste fase)

Figuur 27 toont de geringe ontwikkeling die plaatsgevonden heeft in de periode T22-T23. IJsvorming voor de proefsectie heeft ervoor gezorgd dat er nauwelijks golven aanwezig waren die voor erosie konden zorgen (zie Figuur 28). Daarnaast is de erosie in het bovenwaterprofiel te verklaren door het opruimen van de vegetatie op de proefsectie en het uitvlakken van het strand.

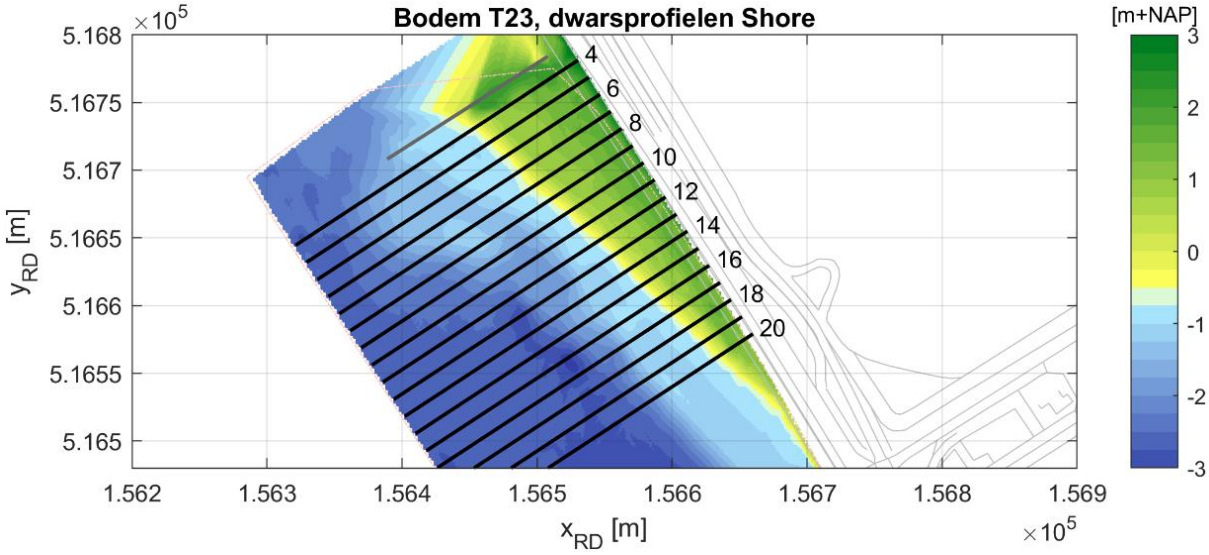


Figuur 27 *De ontwikkeling van het bodemprofiel in de periode T22-T23 weergegeven met een verschilkaart. De contourlijnen representeren de niveaus - NAP-0,3 m (gemiddelde waterlijn), NAP-1,0 m en NAP-2,0 van de T23 meting. De erosie-sedimentatietrends in het bovenwaterprofiel nabij de damwand zijn geen morfologische ontwikkeling, maar ontstaan door interpoleren.*

Figuur 28 *IJsvorming voor de proefsectie die de ontwikkelingen tussen meting T22 en meting T23 geremd hebben.*

5.4 Dimensies plateau rond afgraving

Om te identificeren of dwarstransport een belangrijk proces is bij de ontwikkeling van de proefsectie worden hier dwarsprofielen en langsprofielen ter hoogte van de afgraving gepresenteerd. Eerst worden de ontwikkelingen in het dwarsprofiel beschreven. Vervolgens worden de volumes in het dwarsprofiel uitgewerkt om te identificeren of de opvulling van het plateau ontstaat vanuit erosie rond de waterlijn, of door langstransport.

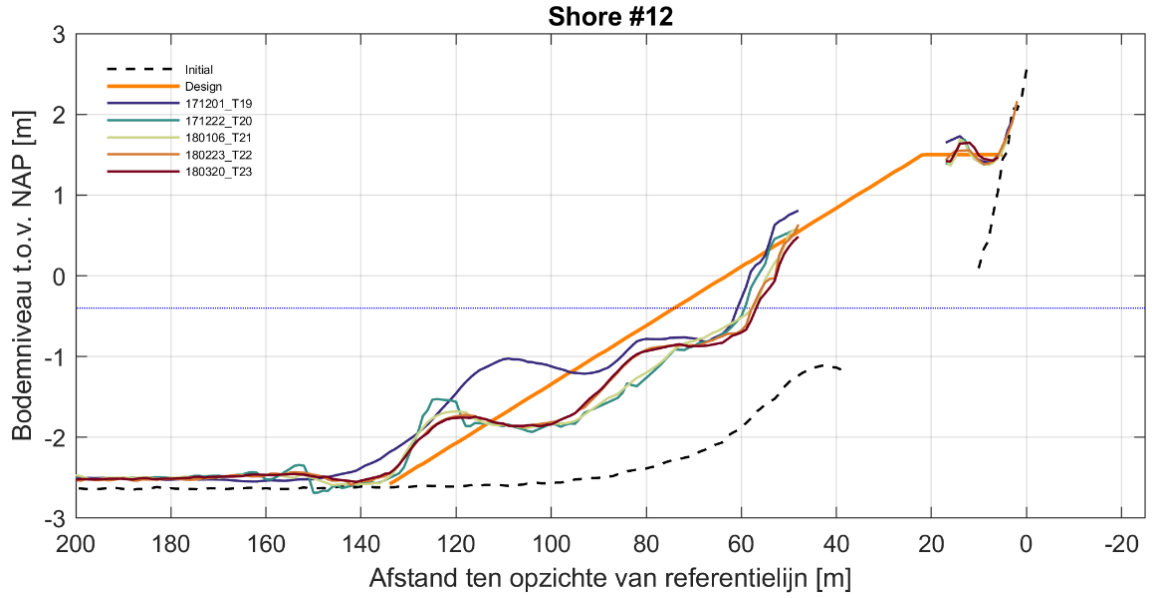


Figuur 29 Definitie van de (even genummerde) dwarsprofielen langs de proefsectie.

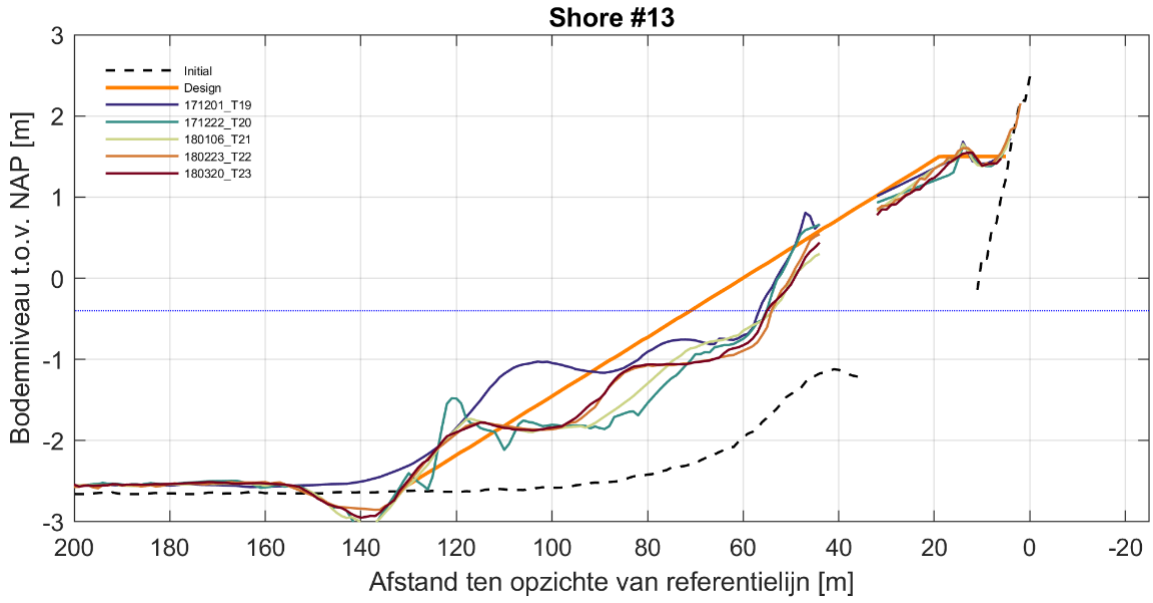
5.4.1 Niveau en breedte van het onderwaterplateau

Met het afgraven is het plateau ongeveer een meter lager komen te liggen, zoals zichtbaar in Figuur 30. Dit figuur presenteert de ontwikkelingen te midden van de afgraving in de periode T19-T23. De belangrijkste ontwikkelingen zijn de uitbouw van het onderwaterprofiel richting het Markermeer en de erosie rond de waterlijn. Daarnaast vormt zich een nieuw plateau ter hoogte van NAP-1 m.

Dwarsprofiel #12 laat zien dat de meeste morfologische veranderingen plaatsvinden in de periode T21-T22. Dit valt te relateren aan de zware storm van 17 januari en doordat tussen meting T21 en T22 meer tijd zat dan tussen andere metingen. Rond de waterlijn is het profiel circa vier meter landwaarts verplaatst. Bij dwarsprofiel #13 in Figuur 31 is het profiel minder ver landwaarts verplaatst rond de waterlijn.



Figuur 30 De ontwikkeling na afgraven bij dwarsprofiel #12, centraal voor de afgraving.



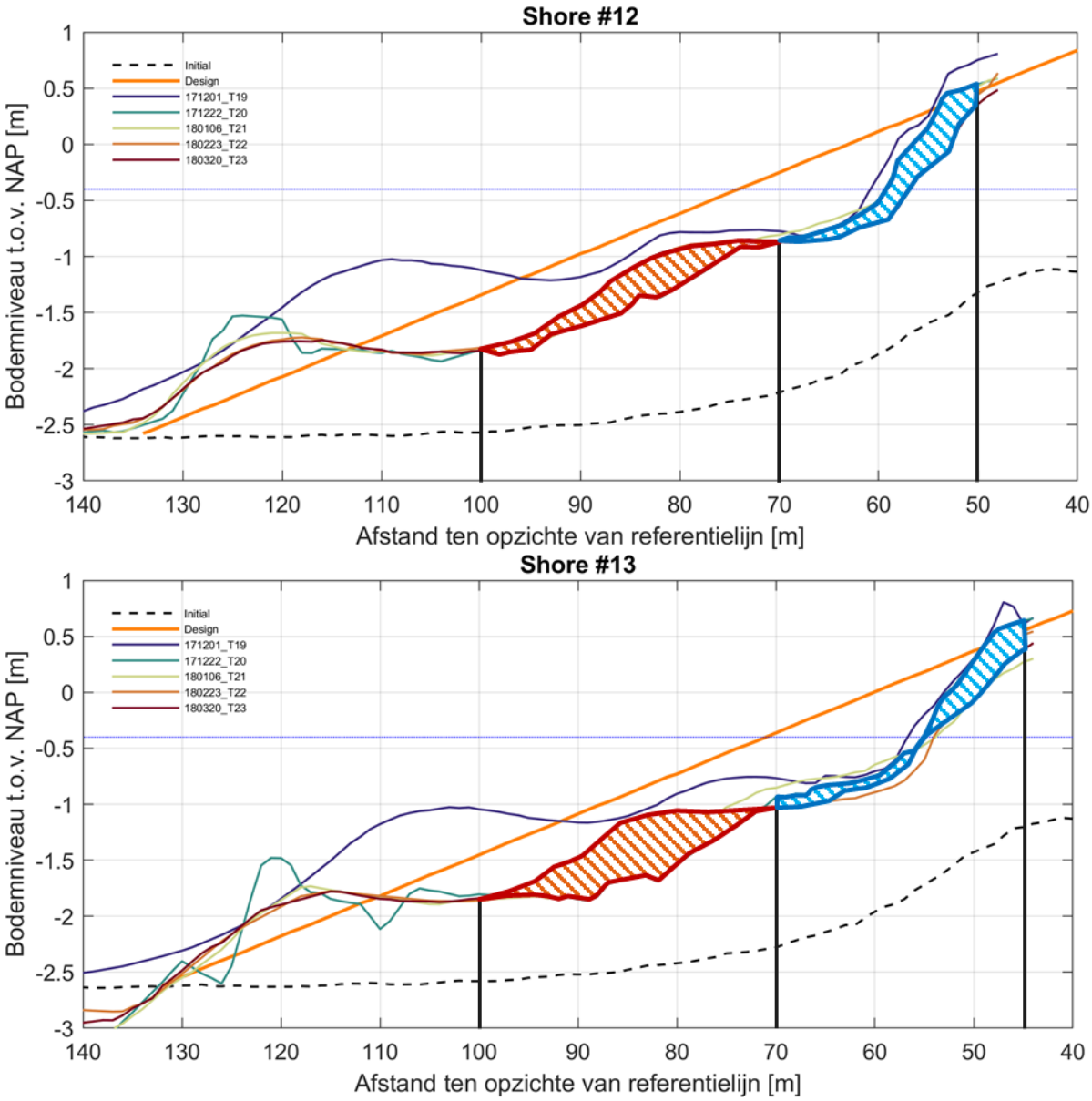
Figuur 31 De ontwikkeling van het onderwaterprofiel na de afgraving ter hoogte van dwarsprofiel #13.

Om te bepalen waar het sediment voor het nieuwe onderwaterplateau vandaan komt, is de verandering boven en onder water berekend. Tabel 3 presenteert de uitkomsten van deze analyse. De oppervlakte tussen de grenzen uit kolom 3 is bepaald voor het dwarsprofiel van T20 en T23, zie Figuur 32. Het verschil in oppervlakte geeft de vooruitgang of achteruitgang van het profiel op de betreffende locatie weer.

Uit deze analyse komt naar voren dat zowel bij dwarsprofiel #12 als #13 het sediment in het onderwaterprofiel niet volledig afkomstig is van het gebied rond de waterlijn. Dus wanneer het plateau afgegraven wordt, bouwt het in eerste instantie uit door erosie bij de waterlijn. Vervolgens stopt de erosie van de waterlijn en bouwt het onderwaterplateau uit met sediment aangeleverd door langstransport. Deze uitbouw vindt plaats vanuit de waterlijn richting het Markermeer. Omdat tussen x = 100 m en x = 200 m amper veranderingen plaatsvinden, zal het aangezande sediment in het profiel afkomstig moeten zijn van het langstransport.

Tabel 3 Oppervlaktebepaling om te bepalen waar het sediment in het onderwaterplateau vandaan komt.

Dwarsprofiel	Verschil periode	Grenzen	Verschil in [m^2]	Verschil veranderingen waterlijn en plateau
12	T20-T23	x = 50 m tot x = 70 m	-4,58	-
	T20-T23	x = 70 m tot x = 100 m	+5,48	+0,9 m^2
13	T20-T23	x = 45 m tot x = 70 m	-4,38	-
	T20-T23	x = 70 m tot x = 100 m	+8,06	+3,68 m^2

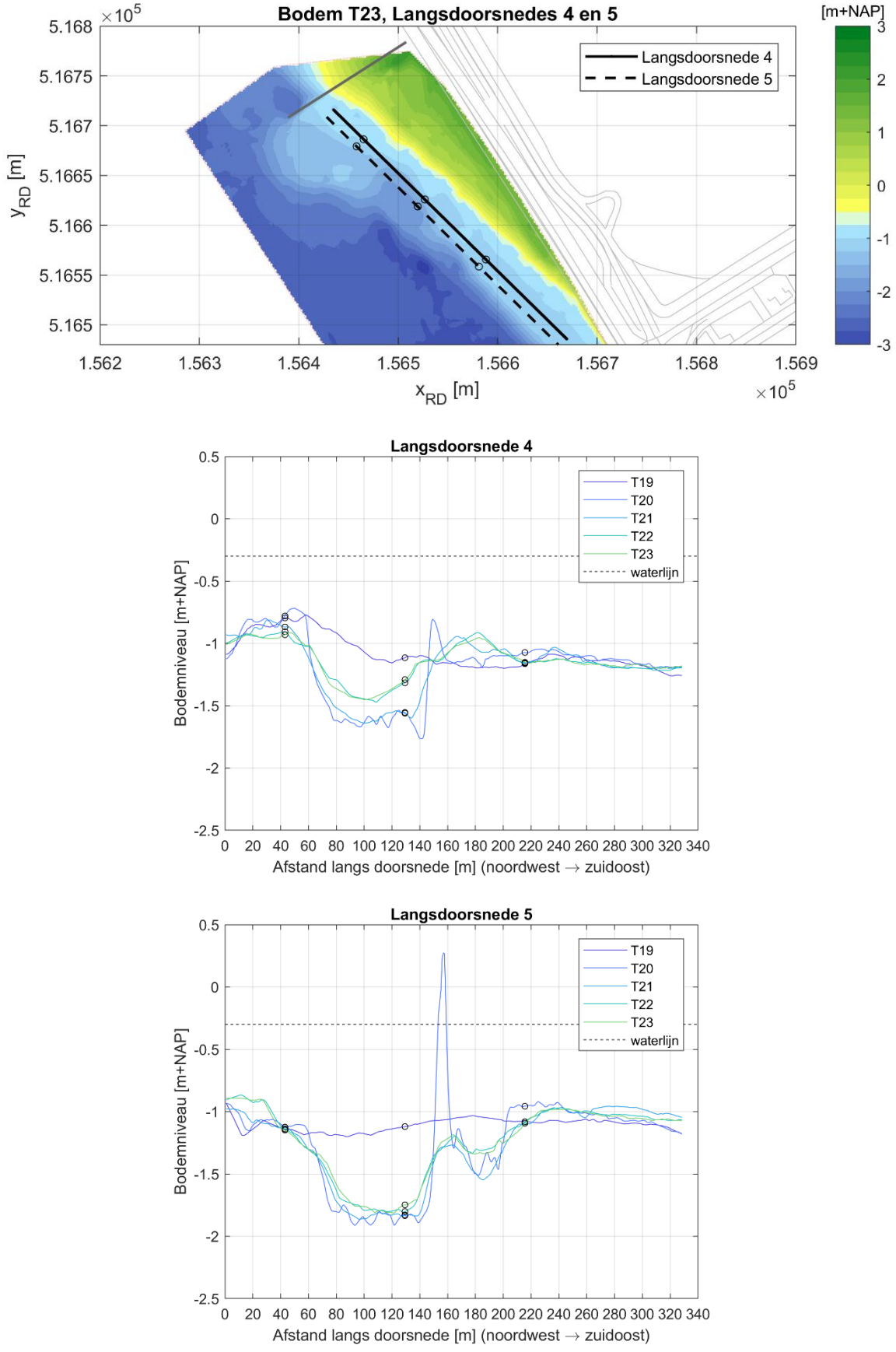


Figuur 32 *Weergave van de oppervlaktes waarmee het verschil tussen de veranderingen rond de waterlijn en op het onderwaterplateau bepaald worden. De rood gearceerde gebieden representeren sedimentatie en de blauw gearceerde gebieden erosie.*

5.4.2 Lengte van de afgraving

In paragraaf 5.4.1 wordt geconcludeerd dat sediment door middel van langstransport naar de afgraving moet zijn verplaatst. Door zeven profielen parallel aan de oeverlijn te bestuderen kan bestudeerd worden hoe de aanzanding door langstransport plaatsvindt.

In Figuur 33 zijn langsdoorsneden 4 en 5 gepresenteerd met daarbij de ontwikkeling van het bodemprofiel. Te zien is dat het grillige profiel van de T20-meting in de T21-meting uitgevlakt is. Met een eenvoudige schatting van de helling bij de randen is berekend dat de helling bij x = 60 m circa 1:34 is voor T20 en circa 1:46 is voor T21. Daarnaast is de piek in langsdoorsnede 5 rond x = 160 m, die ontstaan is tijdens het afgraven, bijna volledig geërodeerd. Deze is deels in, en deels ten zuiden van de afgraving terecht gekomen. Bij langsdoorsnede 4 is te zien dat de lengte van de afgraving op het niveau van NAP-1,7 m met circa 10 m afgenomen is tot 35 m. Op het niveau van NAP-1 m is de afname circa 15 m tot 65 m voor langsdoorsnede 4 en bij langsdoorsnede 5 is de afname minimaal gebleven op dit niveau. De hellingen aan de zijkanten van de afgraving zijn dus flauwer geworden en het wordt wederom duidelijk dat de afgraving opvult vanuit de oeverlijn naar buiten toe.



Figuur 33 *De locaties van de beschouwde langsdoorsneden parallel aan de oeverlijn. De cirkels in het profiel zijn toegevoegd als referentiepunten in de figuren.*

5.5 Conclusies

Om verschillende redenen is de daadwerkelijk gerealiseerde ontgraving kleiner dan het oorspronkelijke ontwerp. Desondanks was het mogelijk om de ontwikkelingen rond de afgraving te analyseren. Aan de hand van verschilkaarten, doorsnedes en de opgetreden hydrodynamische condities gedurende de meetperiodes zijn de sedimentverplaatsingen geanalyseerd.

Uit de verschillende bodemmetingen kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- De afgraving wordt opgevuld vanuit de zijkanten. Aangezien er weinig erosie rond de waterlijn plaatsvindt moet het sediment via langstransport verplaatst worden naar de afgraving.
- Uit de dwarsprofielen blijkt dat de meeste erosie rond de waterlijn plaatsvindt bij profiel #12, in het midden van de afgraving. Desondanks is het geërodeerde volume rond de waterlijn minder dan het aangezande volume onder de waterlijn. Ook bij de naastliggende profielen is dit het geval, waardoor wederom geconcludeerd wordt dat het sediment via langstransport de afgraving ingebracht wordt. Dit is ook zichtbaar in de langsdoorsnedes, waar te zien is dat de hellingen aan de zijkanten van de afgraving flauwer worden.
- In meetperiode T22-T23 lag er ijs voor de proefsectie, waardoor er weinig golven waren. In deze periode hebben ook geen veranderingen plaatsgevonden, waardoor geacht wordt dat de sedimentverplaatsingen door golven gedreven worden. In deze periode was er ook relatief weinig wind die de circulatiestroming aan kon drijven.
- Het onderwaterplateau bouwt zich uit richting het Markermeer en ontwikkelt zich weer op -1 m+NAP. Dit wordt verder uitgewerkt in Hoofdstuk 6.

6 EVALUATIE THEORIEËN MET MEETRESULTATEN

De resultaten van de monitoringsanalyses van de ingreep worden in dit hoofdstuk gerelateerd aan de opgestelde theorieën uit Hoofdstuk 3. Daartoe wordt eerst kort de theorie herhaald om vervolgens de bevindingen per theorie uit te werken.

6.1 Theorie breedte plateau

Theorie "Breedte plateau 1a"
Het dwarstransport beperkt zich tot de oeverlijn. Er vindt voornamelijk golfgedreven langstransport plaats over het plateau en dit zorgt ervoor dat het zand naar buiten gevoerd wordt nabij de damwand (noord) en de dijk (zuid).

In paragraaf 5.4 werd geconcludeerd dat het onderwaterplateau zich herstelt na het afgraven. Dit gebeurt in eerste instantie door erosie bij de waterlijn, waarna het uitbouwt met sediment aangeleverd door langstransport. Dat nearshore golfgedreven langstransport zorgt voor veranderingen aan de vooroever wordt bevestigd uit het verschil tussen metingen T20-T21.
Bij de dijk zijn erosie en sedimentatietrends te zien die suggereren dat het zand via langstransport verplaatst wordt. Deze transporten vinden voornamelijk plaats op het onderwaterplateau, waardoor aangenomen wordt dat dit gerelateerd is aan golven. In periode T22-T23 waren er door ijsvorming amper golven aanwezig, wat overeen kwam met een minimale hoeveelheid sedimentverplaatsing. Er is dus golfgedreven langstransport op het plateau dat ervoor zorgt dat het zand naar buiten gevoerd wordt bij de uiteinden van het plateau.

Theorie "Breedte plateau 1b"
De windgedreven circulatiestroming in het Markermeer zorgt voor uitvlakking van het buitentalud. Op deze manier verplaatst het sediment langs de proefsectie en wordt het afgezet aan de offshore zijde van het plateau. Deze afzetting resulteert in het uitbouwen van het plateau.

Figuur 34 toont dwarsdoorsnede #13 en hierin is geen aanzanding zichtbaar rond x = 140 m. Daardoor wordt aangenomen dat in de periode van meten geen sediment richting het offshore gedeelte van de vooroever verplaatst is. Langs het buitentalud is alleen sediment verplaatst bij de 'bult' bij de damwand. Bij zuidoostwaarts gerichte stromingen zorgt de damwand daar voor een stroomversnelling, waardoor erosie plaats kon vinden rond de damwand (zie Figuur 25). De afgraving is getest in de winterperiode, waarin de hoogste golven in de driejarige meetperiode gemeten zijn. Ondanks dat zijn er te weinig veranderingen rond het buitentalud te zien, waardoor de afvlakking door langstransport niet bewezen kan worden.

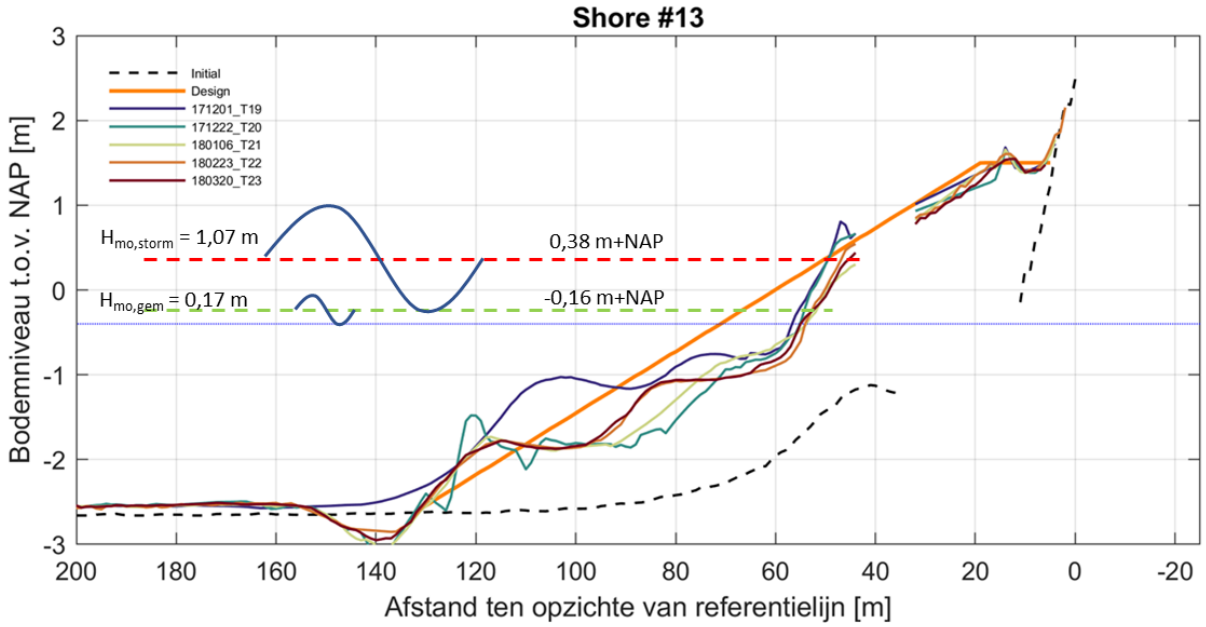
Theorie "Breedte plateau 2"
De vorm en de afmetingen van het onderwaterplateau zijn primair gevormd door dwarstransporten. Hierbij verplaatst het zand richting het Markermeer en wordt tegen het buitentalud afgezet.

In de analyse in paragraaf 5.4.1 is naar voren gekomen dat erosie rond de waterlijn plaatsvond in het midden van de afgraving. Daarnaast is de afgraving opgevuld vanuit de zijkanten, wat verklaard wordt met golfgedreven langstransport. Dit leidt tot de conclusie dat in eerste instantie dwarstransporten dominant zijn en dat vervolgens het langstransport deze dominantie overneemt. Wanneer meer sediment en meer tijd beschikbaar zou zijn, was het plateau naar verwachting verder uitgebouwd richting het oude buitentalud.

6.2 Theorie niveau plateau

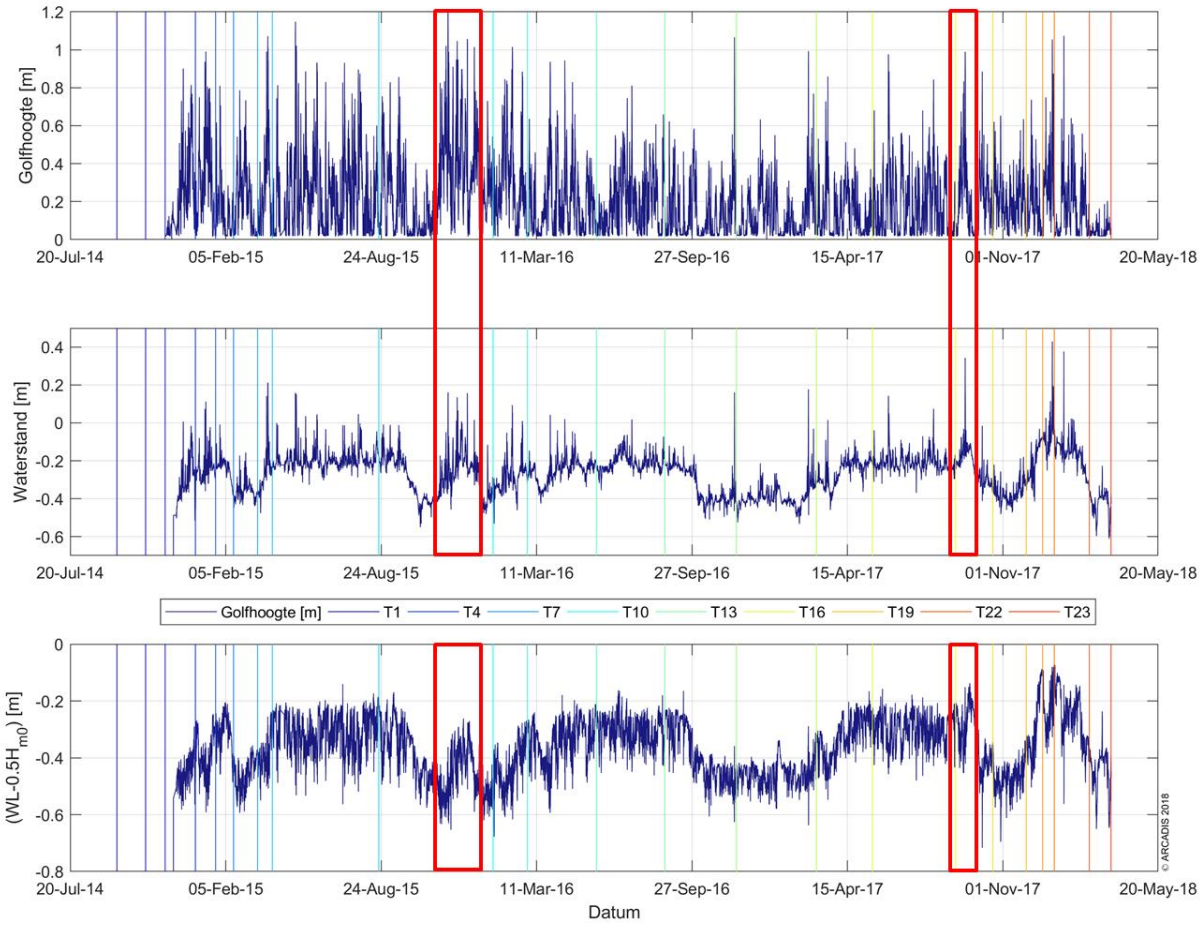
Theorie "Niveau plateau 1"
Het onderwaterplateau heeft een constant niveau bereikt als gevolg van de positieve correlatie tussen de waterstand en golfhoogte.

Dat het onderwaterplateau een constant niveau heeft bereikt is gebleken uit de meetresultaten van de periode voor de afgraving. Omdat de gebruikte golfhoogtes gemeten zijn op een offshore meetstation, is niet met zekerheid te concluderen dat er een correlatie tussen de waterstand en golfhoogte bestaat. Wel is het opvallend dat wanneer de waterstand en golfhoogte van de sterkste storm (17 januari 2018) afgezet worden tegen dezelfde gegevens bij gemiddelde condities, de waterdiepte onder de golf ongeveer gelijk blijft. Dit is weergegeven in Figuur 34 met de schets van de golfhoogte.



Figuur 34 *Weergave van de optredende gemiddelde en maximale golfcondities in combinatie met de waterstand op het moment van voorkomen.*

Wanneer de gehele meetperiode bestudeerd wordt, dan blijkt de relatie minder vanzelfsprekend te zijn. In Figuur 35 zijn de golfhoogtes en de waterstand weergegeven. De derde grafiek toont het verschil tussen de waterstand (WL) en de golfamplitude. Hierin komt naar voren dat de seizoenafhankelijke waterstands-verschillen dominant zijn over de golfhoogtes. Daarnaast is op enkele momenten te zien dat er een duidelijke correlatie is tussen de golfhoogte en waterstandsopzet. Deze momenten zijn weergegeven met rode kaders.

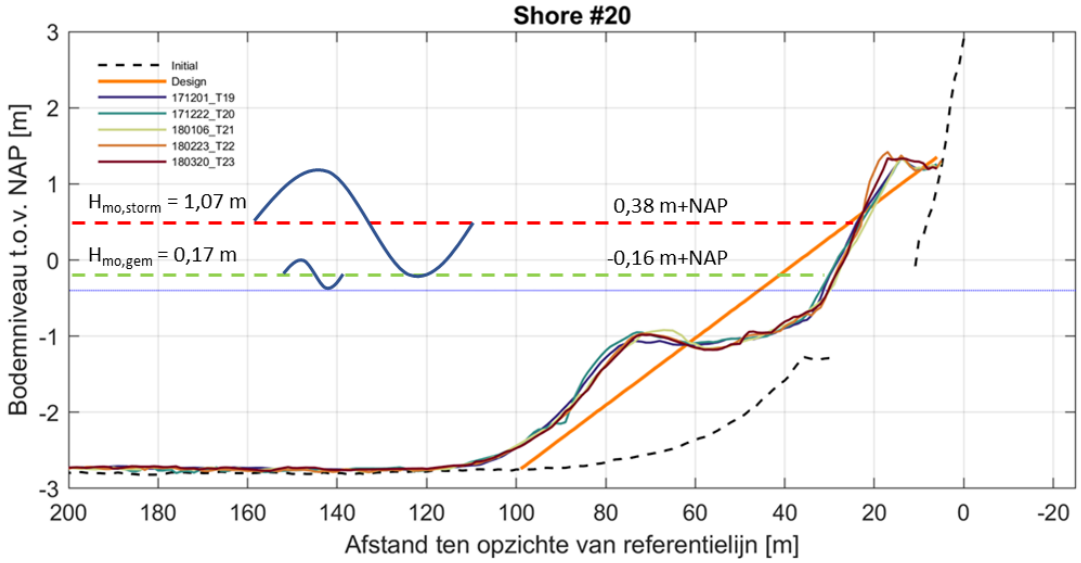


Figuur 35 *De golfhoogtes, waterstand en het niveau van het golfdal voor de gehele driejarige meetperiode. Met de rode kaders zijn stormen aangegeven waarbij de relatie tussen de golfhoogte en verhoogde waterstand duidelijk naar voren komt.*

Theorie "Niveau plateau 2"

Het niveau van het onderwaterplateau wordt volledig bepaald door de zwaarst opgetreden conditie, omdat elke zwaardere storm 'dieper' aangrijpt.

De tweede theorie beschrijft dat de vorm, breedte en hoogte van het plateau wordt bepaald door de sterkste storm. Een grotere golf zal minder energie verliezen over het plateau en daardoor erosie aan de waterlijn veroorzaken. In het geval van dwarsdoorsnede #13 is niet te concluderen dat dit gebeurd, omdat het plateau op deze locatie afgegraven is. Doordat de hoogste golven uit de gehele meetperiode plaats hebben gevonden, zou dit wel moeten plaatsvinden bij een dwarsdoorsnede buiten de afgraving. Figuur 36 toont dwarsdoorsnede 20 (zie Figuur 29 voor locatie), waarin te zien is dat de profielverandering minimaal is. Wel vond er rond dwarsdoorsnede 20 erosie plaats, wat voor een bias in de resultaten kan zorgen. Om deze redenen kan niet bewezen worden of deze theorie stand houdt.



Figuur 36 *Weergave van de optredende gemiddelde en maximale golfcondities in combinatie met de waterstand op het moment van voorkomen.*

6.3 Conclusies

Door de opgestelde theorieën te koppelen aan de analyse van de ingreep kan het volgende geconcludeerd worden:

- In eerste instantie vindt er erosie van de waterlijn plaats, dus golf gedreven dwarstransport. Vervolgens breidt het onderwaterplateau zich uit met het sediment dat door langstransport aangevoerd wordt. Dit remt de erosie rond de waterlijn en is dus langstransport dominant.
- Het plateau bouwt zich uit vanuit de waterlijn richting het Markermeer en ontwikkelt zich weer op een niveau van NAP-1 m.
- Uit de sedimentatie-erosie kaarten kwam naar voren dat de windgedreven circulatiestroming niet sterk genoeg is om sediment te verplaatsen rond het buitentalud. Alleen bij de damwand, waar de stroming versnelt, vindt erosie plaats aan het buitenprofiel. Daarom is bevonden dat de breedte van het plateau afhankelijk is van (eerst) dwarstransport en (vervolgens) golf gedreven langstransport op het plateau.
- Er is (nog) geen directe kwantitatieve relatie gevonden tussen H_{m0}/WL en het niveau van het onderwaterplateau. Dit kan mede komen doordat de golven gemeten zijn bij het offshore meetframe en daardoor wordt golfombuiging door het variërende bodemprofiel niet meegenomen. De theorie blijft staan dat er een relatie is tussen de positieve correlatie Hs en WL en het niveau van het onderwaterplateau, en behoeft verder onderzoek om het te bewijzen.

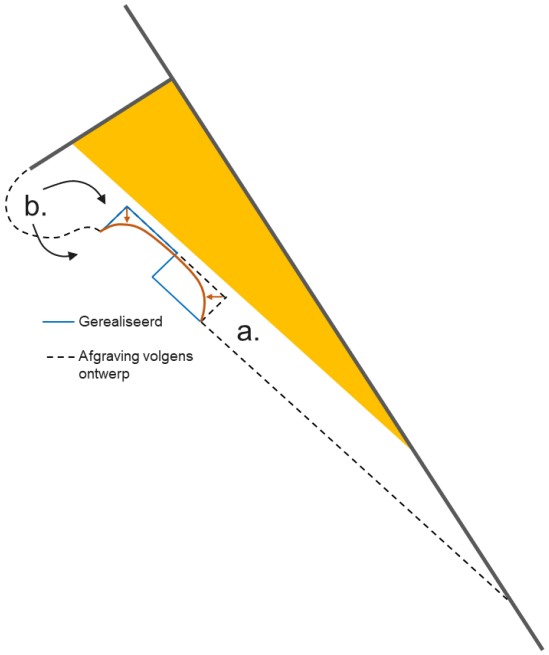
7 GEDACHTENEXPERIMENTEN

Bij de definitie van de ingreep die is uitgevoerd als onderdeel van het project Pilot Houtribdijk zijn op voorhand diverse scenario's beschouwd die op enige wijze relevante inzichten kunnen bieden ten aanzien van de morfologische ontwikkeling van het aanwezig onderwaterplateau. Uiteindelijk kon (uiteraard) slechts één configuratie van een ingreep in praktijk getest worden. Hieronder volgt een nadere theoretische beschouwing van het gedrag van andere mogelijke configuraties, op basis van de opgedane kennis.

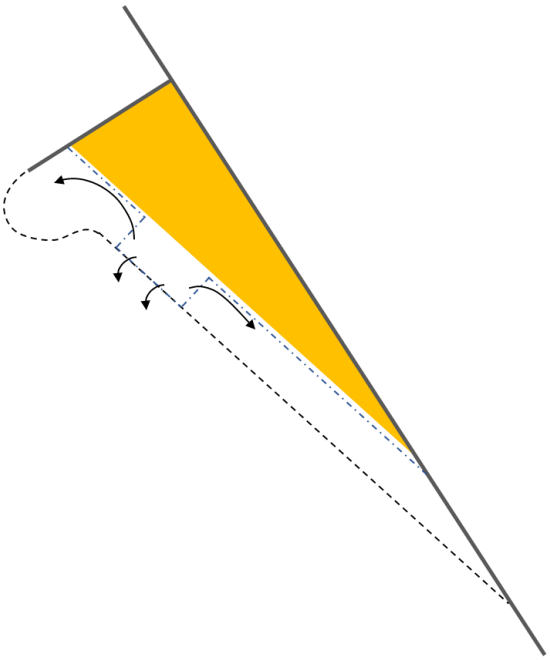
7.1 Alternatieve configuraties

a. Langere afgraving

Wanneer de afgraving volgens het ontwerp uitgevoerd was, zou minder sediment aanwezig zijn ten zuidoosten van de afgraving (bij *a*). Het helemaal opvullen van de afgraving zou daardoor minder zichtbaar worden en/of het zou meer tijd gekost hebben. Niet vanwege de grotere lengte, maar vanwege het gereduceerde sedimentbudget zou minder uitbouw zichtbaar zijn geweest in het midden van de afgraving. Ook is de verwachting dat de erosie rond de waterlijn plaats zou vinden over een groter gebied dan alleen rond dwarsprofiel 12 (zie paragraaf 5.4.1).



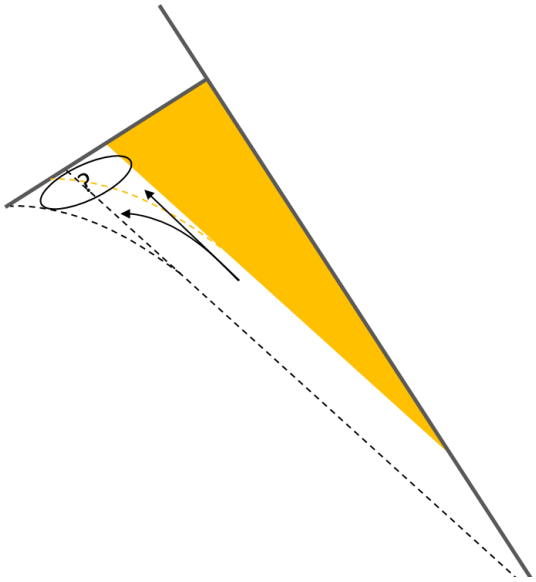
Sediment zal van de 'bult' nabij de damwand verplaatst worden naar de afgraving, waardoor de 'bult' in omvang afneemt (zie *b*). Een andere optie is dat de 'bult' afneemt, doordat minder sediment vanuit de vooroever beschikbaar is om langs de damwand naar buiten te stromen. Omdat in de manier van sedimenttransport niets veranderd, wordt verwacht dat de opvulling aan de zijkanten gelijk blijft. Het veranderde sedimentbudget zou bij deze situatie de belangrijkste verandering zou zijn. De opvulling en ontwikkeling van de afgraving blijft gelijk, maar neemt mogelijk meer tijd in beslag dan in de uitgevoerde situatie.



b. Opvullen tot 0,5 m+NAP in plaats van afgraven

Het toevoegen van zand vergroot het sedimentbudget voor het verplaatsen langs of haaks op het strand. Het sediment dat langs de proefsectie verplaatst wordt, zal eerst terecht komen op het onderwaterplateau. Vervolgens wordt het sediment over het plateau getransporteerd zowel landwaarts als richting het Markermeer. Dit zorgt ervoor dat het plateau en het profiel rond de waterlijn uitbouwt.

Ten noorden van de opvulling zal hetzelfde gebeuren, behalve dat het zand daar in de 'bult' terecht komt. De windgedreven circulatiestroming zal het zand vervolgens vanuit de damwand naar het noordwesten of het zuidoosten verplaatsen. Wanneer de gemeten stromingscondities plaatsvinden, dan zal het sediment voornamelijk richting Lelystad verplaatsen. Uiteindelijk zal de profielvorm vergelijkbaar zijn met de huidige situatie, behalve dat de oeverlijn en het uiteinde van het plateau meer richting het Markermeer zullen liggen.



c. Effect verlengen van de damwand

Bij deze situatie wordt aangenomen dat er geen sediment toegevoegd wordt aan de proefsectie en dat er geen afgraving aanwezig is. Er zijn verschillende ontwikkelingen mogelijk wanneer de damwand verlengd wordt. Ten eerste wordt verwacht dat met een gelijke hoeveelheid sediment de 'bult' bij de damwand kleiner wordt en de vorm van een strandboog krijgt. Een tweede mogelijkheid is dat bij gelijkblijvende hydrodynamische condities de waterlijn en de buitenkant van het plateau niet zullen verplaatsen. Ze zijn in de huidige situatie immers ook al vrij stabiel. Het plateau en de waterlijn nabij de damwand zullen waarschijnlijk veranderen. Wanneer beide uitbouwen en een strandboog vormen, dan zal er erosie aan de zuidoost zijde van de proefsectie plaatsvinden. Of en hoeveel de waterlijn en het onderwaterplateau uitbouwen is niet zeker, maar als het gebeurd groeit het onderwaterprofiel uit naar het uiteinde van de damwand.

d. Effect kortere damwand

In paragraaf 4.2 is geconcludeerd dat de offshore stroming in circa 80% van de tijd naar het zuidoosten gericht is. Sediment dat in de 'bult' terecht komt wordt dus naar het zuiden verplaatst. Met een kortere damwand zal dit niet anders zijn. Echter is de kans wel groter dat sediment door golf gedreven nearshore langstransport verdwijnt ten noorden van de damwand.

8 CONCLUSIES

In dit rapport zijn de morfologische ontwikkelingen bestudeerd die plaats hebben gevonden nadat een deel van het zandige voorland is ontgraven. Het onderwaterplateau op het zandige voorland heeft zich na de aanleg van de proefsectie van de Pilot Houtribdijk in 2014 in korte tijd gevormd. Het ontstaan van het plateau met deze breedte en dit niveau was niet verwacht. Het doel van dit aanvullend onderzoek is daarom om te verklaren hoe het onderwaterplateau ontstaat en hoe het zich ontwikkelt. Om de ontwikkelingen rond de afgraving te beschrijven en te verklaren, zijn vier vragen opgesteld die hieronder een voor een beantwoord worden:

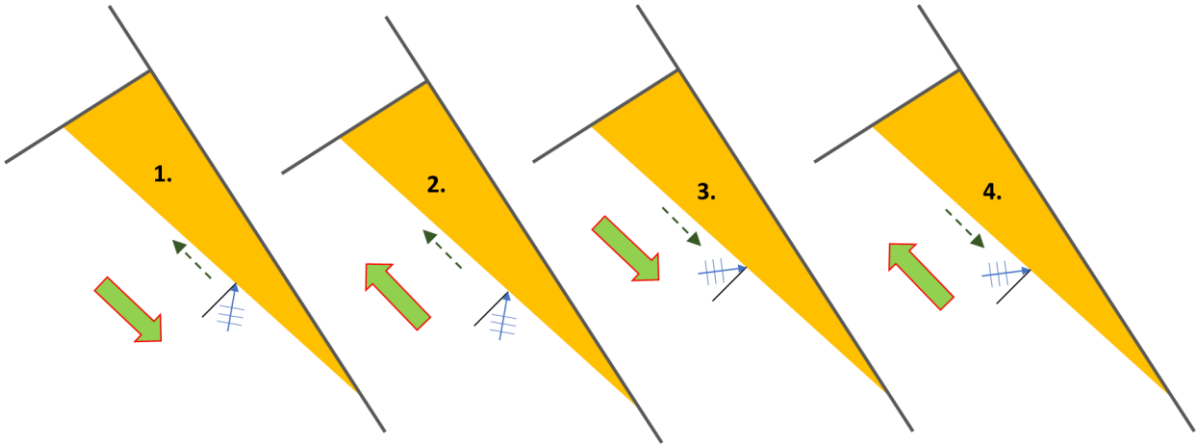
1. *Hoe vult de afgraving zich op in de drie maanden na de afgraving? (morfologische ontwikkeling)*
   Initieel vindt er erosie rond de waterlijn plaats wat gerelateerd wordt aan golfgedreven dwarstransport. Vervolgens breidt het onderwaterplateau zich uit met sediment dat door langstransport aangevoerd wordt. Dit remt de erosie rond de waterlijn en dus is langstransport dominant.

   De erosie rond de waterlijn vindt voornamelijk plaats in het midden van de afgraving. Naar de zijkanten is er minder erosie, wat gerelateerd kan worden aan de opvulling vanuit de zijkanten van de afgraving. Ondanks de erosie is het geërodeerde volume zand rond de waterlijn kleiner dan het aangezande volume onder water. Ook bij de naastliggende profielen is dit het geval, waardoor geconcludeerd wordt dat het sediment via langstransport de afgraving ingebracht wordt. Dit is ook zichtbaar aan de zijkanten van de afgraving, waar te zien is dat de taludhellingen geleidelijk flauwer worden.

   In de dwarsprofielen werd zichtbaar dat het onderwaterplateau in de afgraving zich weer ontwikkelde. Het plateau bouwt zich uit richting het Markermeer en ontwikkelt zich weer op -1 m+NAP. De breedte van het plateau is niet volledig hersteld, maar wanneer over een langere periode gemeten wordt is de verwachting dat de mate van uitbouw nog verder zal toenemen.

   Uit de sedimentatie-erosie kaarten is naar voren gekomen dat de windgedreven circulatiestroming niet sterk genoeg is om sediment te verplaatsen rond het buitentalud. Alleen bij de damwand, waar de stroming versnelt, vindt erosie plaats aan het buitenprofiel. Daarom is bevonden dat de breedte van het plateau afhankelijk is van (eerst) dwarstransport en (vervolgens) golf gedreven langstransport op het plateau.

2. *Welke hydrodynamische processen zorgen voor de zorgen voor het opvullen van de afgraving?*
   Uit de beknopte analyse van de hydrodynamica is gekomen dat de golfrichting en (circulatie-) stromingsrichting veranderen van oriëntatie ten opzichte van de windrichting. Dit gebeurd bij windrichtingen tussen 180 tot 225 graden ten opzichte van noord. Er zijn vier verschillende situaties met waterbewegingen beschreven die plaats kunnen vinden voor de proefsectie. Deze situaties bestaan uit combinaties van golfgedreven langsstromingsrichting en de richting van de grootschalige circulatiestroming. Voor meer dan 80% van de tijd vinden situaties 1 en 3 plaats. Dit betekent dat in het overgrote deel van de tijd de windgedreven circulatiestroming richting het zuidoosten staat en de nearshore stroming varieert.
   Door een minimale golfhoogte te hanteren is bevonden dat tijdens stormen meer dan 91% van de gemeten punten zich in situaties 1 en 3 bevindt. De circulatiestroming is dan gericht naar het zuidoosten. Van deze 91% beschrijft circa 70% van de meetpunten een nearshore transport richting Enkhuizen en circa 20% een nearshore transport richting Lelystad. De resterende 10% bevat punten waarvoor de circulatiestroming naar Enkhuizen gericht is.



Figuur 37 Vier verschillende situaties met waterbewegingen die plaats kunnen vinden voor de proefsectie (= Figuur 17).

3. *Wat is het effect van de afgraving op de positie van de oeverlijn?*
   Zoals onder vraag 1 beschreven, vond de meeste erosie rond de oeverlijn plaats te midden van de afgraving. Meer richting de zijkanten van de afgraving was dit minder. Voor de realisatie van de afgraving vond de voornaamste erosie rond de oeverlijn plaats door het kantelen van de oeverlijn. Door de ontgraving is het sediment dat met langstransport verplaatst wordt in de afgraving terecht gekomen, waardoor de kanteling van de oeverlijn niet meer plaatsvond.

   De meeste erosie vond plaats te midden van de afgraving. Wanneer de afgraving een grotere lengte zou hebben, wordt verwacht dat de erosie rond de oeverlijn plaats zou vinden over een groter gebied dan alleen bij het middelste dwarsprofiel.

4. *Waar moet op gelet worden bij toekomstige ontwerpen van zandige versterkingen, met betrekking tot het ontstaan en ontwikkelen van een onderwaterplateau?*
   Bij toekomstige ontwerpen van zandige versterkingen in het Markermeer moet men er vanuit gaan dat een onderwaterplateau zal kunnen ontstaan. De vorming van een dergelijk plateau kan – in geval hiermee geen rekening is gehouden in het ontwerp – initieel resulteren in ongewenste profielvervormingen (‘vorming evenwichtsprofielvorm’) die potentieel resulteren in de achteruitgang van de waterlijn en daarmee dus invloed hebben op de strandbreedte en in meer algemene zin het zandvolume boven water.

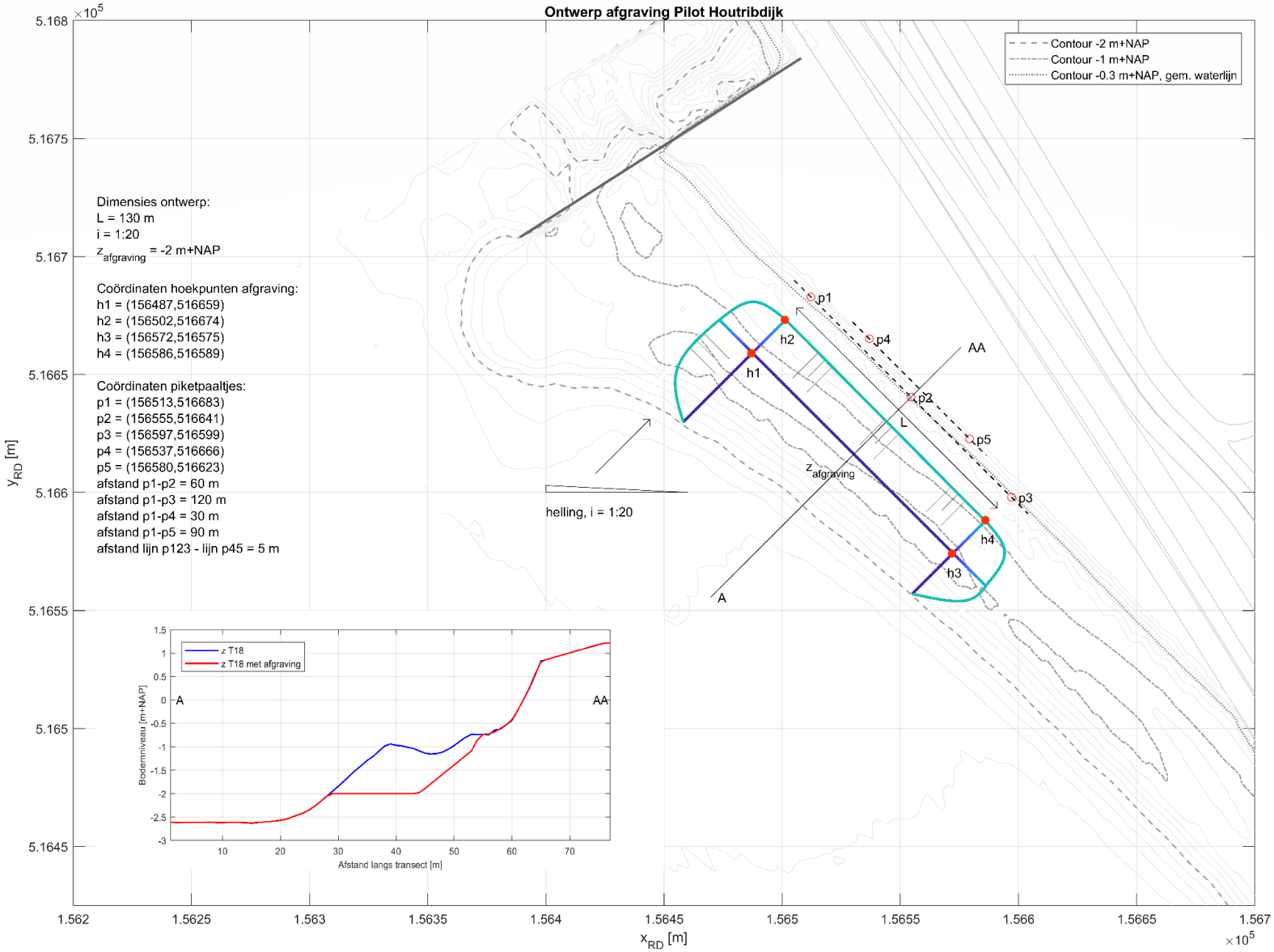
   Hoewel dit met deze studie niet aantoonbaar is, is de verwachting dat de oriëntatie en locatie van het strand een belangrijke invloed hebben op (de wijze van) ontwikkeling van het plateau. Wanneer er bijvoorbeeld geen damwand aanwezig zou zijn geweest, was het niet mogelijk geweest om een stabiele oeverlijnoriëntatie in stand te houden, waardoor er een totaal andere situatie zou zijn ontstaan. Bij een oeverlijn die (bij afwezigheid van een damwand) parallel aan de dijk ligt, is in tegenstelling tot bij de proefsectie een dominante netto langstransport component te verwachten, die resulteert in een meer eenzijdige uitwisseling van zand, en daardoor een ander type profielontwikkeling tot gevolg; wellicht zelfs zonder plateau of met een andersoortig plateau.

LITERATUUR

HKV (2018). Pilot voorlandoplossing Houtribdijk - Analyse hydrodynamica (t/m T23). Memorandum PR2729.20 d.d. 6 april 2018

Shore Monitoring & Research (2018). Veldrapportage(s) monitoring pilot Houtribdijk. Werkdocumenten #01 t/m #23; 20 maart 2018.

BIJLAGE A


Ontwerp afgraving Pilot Houtribdijk
Contour -2 m+NAP
Contour -1 m+NAP
Contour -0.3 m+NAP, gem. waterlijn
Dimensies ontwerp:
L = 130 m
i = 1:20
z afgraving = -2 m+NAP
Coördinaten hoekpunten afgraving:
h1 = (156487,516659)
h2 = (156502,516674)
h3 = (156572,516575)
h4 = (156586,516589)
Coördinaten piketpaaltjes:
p1 = (156513,516683)
p2 = (156555,516641)
p3 = (156597,516599)
p4 = (156537,516666)
p5 = (156580,516623)
afstand p1-p2 = 60 m
afstand p1-p3 = 120 m
afstand p1-p4 = 30 m
afstand p1-p5 = 90 m
afstand lijn p123 - lijn p45 = 5 m
helling, i = 1:20
p1
p2
p3
p4
p5
h1
h2
h3
h4
A
AA
L
z afgraving
y RD [m]
x RD [m]
z T18
z T18 met afgraving
Bodemniveau [m+NAP]
Afstand langs transect [m]

COLOFON

ANALYSE AFGRAVING PROEFSECTIE PILOT HOUTRIBDIJK
MORFOLOGISCHE ONTWIKKELINGEN RONDOM AFGRAVING

AUTEUR
Sjoerd van Til
Robbin van Santen

PROJECTNUMMER
C03041.003128

ONZE REFERENTIE
083686118 A

DATUM
16 oktober 2018

Arcadis Nederland B.V.

Postbus 137
8000 AC Zwolle
Nederland
+31 (0)88 4261 261

www.arcadis.com