15-6-2021

KLEINSCHALIGE ZANDSUPPLETIES

E.S. Smits

Afstudeeronderzoek naar de mogelijkheid van het bepalen van morfologische processen tijdens proeven uitgevoerd in het Aqualab-RDM

Afstudeeronderzoek Kleinschalige Zandsuppleties

Door:

E.S. Smits

Hogeschool Rotterdam

Instituut voor de gebouwde omgeving

Civiele techniek

Student

Emma Smits

studentnummer: 0950323

Hogeschool Rotterdam begeleiding

W.J.J.M. Kuppen (William)

Community of Practice Hoogwaterveiligheid

Heijplaatstraat 23

3089 JB, Rotterdam

Community of Practice Hoogwaterveiligheid begeleiding

L.A. van Gelder (Leo)

Opdrachtgever / begeleider

RDM Campus Rotterdam

RDM-kade 59,

3089 JR, Rotterdam

RDM Campus Rotterdam begeleiding

J.C. Scholtens (Jan)

W. Semp (Willem)

RDMAqualab@rdm.nl

Versie	Opgesteld door	Datum
1.0	E.S. Smits	7-5-2021
1.1	E.S. Smits	24-5-2021
1.2	E.S. Smits	8-6-2021
1.3	E.S. Smits	15-6-2021

VOORWOORD

Voor u ligt de scriptie over kleinschalige zandsuppleties. Ter afronding van de bachelor Civiele Techniek aan de Hogeschool Rotterdam is er een onderzoeks-scriptie geschreven over de mogelijkheid om de morfologische processen bij kleinschalige zandsuppleties waar te nemen in de modelbak Aqualab-RDM.

De uitvoering van dit onderzoek heeft plaatsgevonden in de periode februari 2021 tot en met juni 2021. De opdrachtgever voor dit onderzoek is het kenniscentrum Centre of Practice Hoogwaterveiligheid binnen de Hogeschool Rotterdam. Dit rapport is bedoeld voor hen die geïnteresseerd zijn in de uitvoering van proeven in het Aqualab-RDM met betrekken tot morfologische processen in een (verschaald) model door middel van kleinschalige zandsuppleties. In het rapport is de bronvermelding bij de figuren en in de tekst zelf geplaatst, mocht er niks bij staan is de bron door de student zelf gemaakt.

Ik zou graag de heer Kuppen en Van Gelder willen bedanken voor de begeleiding gedurende het onderzoek. Daarnaast zou ik alle bedrijven willen bedanken voor de samenwerking en verleende data en informatie over voorgaande onderzoeken. Ten derde zou ik de heer Leeuwestein willen bedanken voor het meedenken en verlenen van zijn kennis binnen dit morfologische onderzoek. Als laatst wil ik T. Urošević, J. Goorden en alle anderen bedanken voor de verleende hulp waardoor het uitvoeren van mijn proeven mogelijk is gemaakt.

Emma Smits

Rotterdam, juni 2021

SAMENVATTING

De duinen en het strand zijn de natuurlijke zeewering van Nederland en beschermen het Nederlandse achterland van overstroming. Door optredende weersomstandigheden zoals golven en wind, kent de Nederlandse kust veel erosie en wordt de kustlijn steeds meer landwaard geduwd. Om deze reden wordt er ter bescherming van de Nederlandse kust al jaren lang extra zand gesuppleerd.

Het aanbrengen van deze suppleties wordt op grote schalen uitgevoerd en tast daarbij het bodemleven van de kust en de mogelijkheid van recreatie op de stranden erg aan. Vandaar is er een onderzoek gestart naar het uitvoeren van kleinschaligere zandsuppleties door middel van gebruik van een pijpleidingen systeem. Nadat er in een voorgaande studie onderzoek is gedaan naar de beste vorm van het pijpleidingen systeem en daarbij de aan te leggen suppletievorm ligt in dit onderzoek de focus op het beproeven van deze kleinschalige zandsuppletie in het Aqualab-RDM. Tijdens de proeven is het doel te achterhalen of het mogelijk is binnen het Aqualab-RDM de optredende morfologische processen kwalitatief te omschrijven. Het Aqualab-RDM is een waterlab van de Hogeschool Rotterdam wat gevestigd is op het RDM-terrein in de Rotterdamse haven en beschikt onder anderen over een modelbak van 10x20x1 m. met een golfschot dat golven op kan wekken tot ongeveer 15 cm.

De gekozen locatie van de kust viel op de kust van Goeree-Overflakkee door interesse vanuit de opdrachtgever, het Centre of Practice voor Hoogwaterveiligheid. Door middel van literatuurstudies en analyses van optredende weersomstandigheden van dit gebied zijn de belangrijke morfologische parameters verzameld. Deze parameters moesten worden verschaald om in het Aqualab-RDM nagebootst te kunnen worden.

Om het proces van verschaling te kunnen starten is er door middel van literatuurstudies onderzoek gedaan naar de te gebruiken schaalwaarden van de betreffende proeven. De schaalwaarde (n) geeft de verhouding tussen de waarde van de werkelijkheid (ook wel prototype) en van het model weer ($n_x = \frac{x_{werkelijk}}{x_{model}}$). De voorkeur van laboratorium proeven is om alle optredende kengetallen (Froude, Reynolds, Shields, ξ-parameter, dimensieloze korreldiameter, enz.) na verschaling gelijk aan 1 te houden zodat alle optredende processen zowel in werkelijkheid als in het model gelijk zijn. Echter blijkt dit in praktijk niet mogelijk te zijn, dus moest er een keuze gemaakt worden welke van deze kengetallen dominant werd gesteld.

Er werd al snel ondervonden dat het Froude kengetal dominant werd gesteld ten opzichte van het Reynolds getal en is er dus verschaald met de Froude-voorwaarden. De volgende keuze is gevallen op het dominant stellen van de golfbrekersparameter. Doordat in werkelijkheid de golven het sediment loswoelen en het vervolgens door stroming en dergelijken wordt verplaatst, is dit de eerste stap van het sedimenttransport. Echter viel het al snel op dat door het toepassen van deze twee eerste eisen ($n_{Froude} = 1 \,\&\, n_{\xi} = 1$) het werken met een vertrokken schaal binnen de beperkingen van het Aqualab-RDM niet mogelijk was. Bij een vertrokken schaal zou binnen het Aqualab-RDM bij een waterdiepte van 0,20 meter een golfhoogte van 0,40 m gebruikt moeten worden. Het Aqualab-RDM kan daarentegen, afhankelijk van de aanwezige waterdiepte, golven opwekken tot zo'n 0,15 meter dus viel deze optie af.

Als laatst is er onderzocht of de Shields-parameter na verschalen gelijk aan 1 kon blijven. De Shields-parameter is ook erg belangrijk voor het sedimenttransport aangezien deze parameter bepaald of en wanneer een sedimentkorrel gaat bewegen. Binnen de proeven uitgevoerd in het Aqualab-RDM bleek dat het toepassen van deze schaalvoorwaarden niet mogelijk was. Hier is gewerkt met de eis dat de Shields-parameter zowel in werkelijkheid als in model hoger is dan de kritische Shields-parameter. Het

wordt echter aanbevolen om voor nader onderzoek wel te werken naar de eis ($n_{Shields} = 1$) aangezien de Shields-parameter terug komt in de transportformules die worden gebruikt voor het bepalen van transport hoeveelheden.

Met de mogelijkheden van het Aqualab-RDM, de gekozen dominante kengetallen en de gevonden parameters van de kust voor Goeree is een schaalfactor van 12 vastgesteld waarna de modelwaarde voor in het lab konden worden berekend. Aan de hand van deze modelwaarden is een houten proefopstelling ontworpen die in het Aqualab-RDM is gemonteerd en dient als kusthelling.

Er zijn in totaal tien proeven van elke een uur uitgevoerd waarbij een kleinschalige zandsuppletie van 30 kg in een ronde vorm is aangebracht. Deze ronde suppletie heeft bij de eerste acht proeven in de brekerslijn van de golven gelegen waarbij de verwachting was dat hier de meeste morfologische processen op zouden treden. Bij de laatste twee proeven is de ronde suppletie vorm net boven de brekerslijn van de golven geplaatst om het verschil in verplaatsing te analyseren.

Na het uitvoeren van de proeven zijn de twee proeven met de meest betrouwbare uitkomst uitgewerkt en geanalyseerd. De waarnemingen van de optredende processen zijn vergeleken met een eerder uitgevoerd onderzoek in het US Army lab. De analyse van de processen gaven een duidelijk beeld van de richting van het sedimenttransport.

Op basis van deze bevindingen kan er worden geconcludeerd dat het Aqualab-RDM gebruikt kan worden voor onderzoeken naar enkele morfologische processen. Hierbij is het belangrijk te melden dat er wel rekening moet worden gehouden met de beperkingen van het lab in ruimte maar ook in geld. Om dieper in te gaan op de werkelijke waarde van het gebruiken van het Aqualab-RDM als morfologisch onderzoekslab zullen er vervolgproeven en onderzoeken moeten worden uitgevoerd. Hierbij wordt aanbevolen de proefopstelling te optimaliseren en de schaalwaarde van de Shields-parameter te herzien zodat er uiteindelijk een schakeling naar een kwantitatief onderzoek kan worden gemaakt.

SUMMARY

The Netherlands' natural sea defenses consist of its coastline and dunes, which protect the Dutch hinterland from flooding. Due to the weather conditions which occur, such as waves and wind, the Dutch coastline is experiencing structural erosion and is being pushed further inland. For that reason, extra sand has been supplied over the years to protect the Dutch coast.

These beach replenishments are carried out on a large scale and seriously affect the benthic life of the coast and the possibilities for recreation on the beaches. Therefore, a study into carrying out smaller-scale beach replenishments by means of a pipeline system has been initiated. Following a previous study in which optimally shaped pipeline and replenishment system were constructed, this research focuses on experimenting with the small-scale beach replenishments in the Aqualab-RDM. During the experiments, the aim is to find out whether it is possible to qualitatively describe the occurring morphological processes within the Aqualab-RDM. The Aqualab-RDM is the Rotterdam University of Applied Sciences' water lab, which is located at the RDM-site in the Port of Rotterdam and consists, among other things, of a 10m wide, 50m long, and 1m deep basin that includes a wave generator that generates waves of up to 15 cm.

Due to interest from the client, the Centre of Practice voor Hoogwaterveiligheid, the chosen coastal location is Goeree-Overflakkee. The important morphological parameters have been collected by means of literature studies and analyses of the occurring weather conditions in this area. The parameters had to be scaled to be simulated in the Aqualab-RDM.

In order to be able to start the scaling process, literature studies were carried out into the scale factors to be used for the research concerned. The scale factor (n) represents the ratio between the value of reality (also known as prototype) and the model value ($n_x = \frac{x_{reality}}{x_{model}}$). The preference for hydraulic laboratory experiments is to retain similitude of the dimensionless parameters (Froude, Reynolds, Shields, ξ-parameter, dimensionless grainsize, etc.) between reality and in the model, so the scale factor is equal to 1. However, in practice it turned out to be impossible to achieve similitude between all scale ratios, so a choice has to be made as to which of these dimensionless parameters was made dominant.

It was quickly observed that the Froude number was made dominant with respect to the Reynolds number and that it was therefore scaled with the Froude conditions. Subsequently, the surf similarity parameter was made dominant because in reality the waves stir up the sediment, so that the flow then displaces it. Though, it soon became apparent that by applying these two first requirements ($n_{Froude} = 1$ & $n_\xi = 1$) it was not possible to use a distorted scale model within the limitations of the Aqualab-RDM. With the use of a distorted scale model within the Aqualab-RDM, a wave height of 0.40m should be used at a water depth of only 0.20m. The Aqualab-RDM, on the other hand, can generate waves up to 15cm (depending on the existing water depth), so this option was not considered.

Finally, it was investigated whether the Shields-parameters could retain similitude after scaling. The Shields-parameter appears to be very important for the sediment transport as it determines if and when the sediment grain will move. The experiments carried out in the Aqualab-RDM showed that it was not possible to apply the Shields scaling conditions. Therefore, during the experiments it was only required that the occurring Shields-parameter be higher than the critical Shields-parameter. However, it is recommended that for further research the scale factor of the Shields-parameter will be

$(n_{Shields} = 1)$, since the Shields-parameter is reflected in the transport formulas used for determining transport quantities.

Within the possibilities of the Aqualab-RDM, the chosen dominant dimensionless parameters and the parameters found for the Goeree coast, a scale factor of 12 was determined, after which the model values for the lab could be determined. Based on these model values, an experiment set-up was designed and assembled in the Aqualab-RDM as a coastal slope.

A total of ten experiments of one hour each were carried out in which a small-scale sand replenishment of 30 kg was applied in a round shape. In the first eight experiments, this round nourishment was located in the breaker line of the waves, where it was expected that most morphological processes would occur. In the last two experiments, the round shape was placed just above the breakers line of the waves to analyze the difference in displacement.

After these experiments were performed, the two tests with the most reliable results were elaborated and analyzed. The observations of the occurring processes have been compared with a previous study carried out in the US Army lab. The analysis of the processes gave a clear picture of the direction of the sediment transport.

Based on these findings, it can be concluded that the Aqualab-RDM can be used for studies of some morphological processes. It is important to note that the limitations of the lab in space, but also in budget, must be taken into account. To go deeper into the real value of using the Aqualab-RDM as a morphological research lab, follow-up experiments and studies will have to be carried out. It is recommended to optimize the experiment set-up and to revise the scale value of the Shields-parameter so that eventually a switch to a quantitative study can be made.

DEFINITIES EN AFKORTINGEN

Aqualab-RDM	= Op het RDM-terrein van de Rotterdamse haven bevindt zich een waterlab dat onderdeel is van de Hogeschool Rotterdam en bestaat uit onder anderen een bassin van 20x10x1 meter met daarin een golfschot waar proeven uitgevoerd kunnen worden.
Bodemtransport	= Deel van het totale transport dat min of meer continue contact met de bodem heeft en dus afhankelijk is van de effectieve schuifspanning. (Eng. b*ed-load*)
Diffractie	= Het veranderen van golfrichting door een (ondoordringbaar) obstakel.
Doodtij	= Periode van het getij waarin het verschil tussen hoog- en laagwater minimaal is. Eerste- of laatste kwartier van de maan.
Froude kengetal	= Het dimensieloze kengetal dat een weergave van stroming van het vloeistofoppervlak geeft.
Golfbrekersparameter	= Een dimensieloze die de manier van breken van een golf weergeeft.
Golfschot	= Het beweegbare onderdeel van het Aqualab-RDM waarbij een bepaalde frequentie en amplitude met een computersysteem kan worden ingesteld zodat er golven kunnen worden gemaakt tot ongeveer 15 centimeter.
Kengetallen	= Een dimensieloze combinatie van grootheden.
Kleinschalige – Zandsuppleties	= Zand dat zich op kleinschaligere manier (bijv. met pijpleidingen systeem) richting de kust wordt verpompt.
Kustfundament	= Het gebied dat van belang is voor de bescherming tegen overstromingen van de laag gelegen delen in Nederland. Waarbij de zeewaartse grens voor de Nederlandse kust op een lijn van -20 meter NAP ligt.
Model	= De te gebruiken naam in het onderzoek waarbij het Aqualab-RDM wordt bedoeld.
Morfologie	= Vormleer, in dit geval de leer van de vorm van de bodem van de kust.
Onvervormd model	= De schaalverhouding voor de lineaire afmetingen van het model en de werkelijkheid zijn gelijk. (Eng. *undistorted model*)
Refractie	= Verbuiging van de golfrichting door snelheidsverandering.
Reynolds kengetal	= Het dimensieloze kengetal dat bepaald of een stroming (om een sedimentkorrel) laminair of turbulent is.
Schaalmodel	= Over verschillende hydraulische parameters wordt een schaalfactor ingevoerd.
Schaalfactor	= De waarde in de werkelijkheid gedeeld door de waarde in het model.
Schaalfout	= Afwijking tussen het gedrag van de fysische grootheden in het model en de werkelijkheid door onjuiste weergave van fysische parameters of ruimtebeperkingen in het model.

Schaalwetten	= Schaalregels waar niet van mag worden afgeweken.
Schaal voorwaarden	= De voorwaarden die bij bepaalde schaalwetten van kengetallen komen kijken.
Sedimenttransport	= Beweging van vaste deeltjes sediment door middel van stroming, golven en getijden.
Shields-parameter	= Dimensieloze parameter die de verhouding tussen de bodemschuifkracht op de korrels en gewicht onder het water van de korrels weergeeft, dit wordt ook wel het begin van bewegen van sediment genoemd
Spoeltransport	= Sediment wat fijner is dan wat op de bodem ligt en daardoor met suspensie wordt vervoerd. (Eng. w*ash load*)
Springtij	= Extra hoog water wat optreedt na de Nieuwe- of de Volle maan.
Structurele erosie	= Erosie waarvan de oorzaak altijd aanwezig is.
Vervormd model	= Wanneer de schaalverhoudingen geometrisch niet gelijk zijn aan die van de werkelijkheid, men spreekt ook wel van een vertrokken schaal. (Eng. *distorted model*)
Werkelijkheid	= De waarde gevonden bij de kust van Goeree (Zuid-Holland), ook wel bekend als prototype.
Zandhonger	= Een tekort aan zand aan de kust door het langzaam wegspoelen van zand.
Zwevend transport	= Deel van het totale transport wat beweegt zonder continue contact met de bodem en is gerelateerd aan de totale schuifspanning. (Eng. s*uspended load*)

BKL	= Basiskustlijn, referentie kader voor 'dynamisch handhaven', als deze lijn wordt overschreden wordt er ingegrepen.
ERDC	= U.S. Army Engineer Research and Development Centre's
JARKUS	= Jaarlijkse Kustmetingen
LSTF	= Large-scale Sediment Transport Facility, laboratorium onderdeel van de ERDC.
MKL	= Momentane kustlijn, geeft actuele positie van de kustlijn in een bepaald jaar weer.
TKL	= Te toetsen kustlijn. De feitelijke toetsing van de ligging van de kustlijn in een bepaald jaar.
RDM	= Rotterdamsche Droogdok Maatschappij
RSP	= Rijksstrandpalen. Referentiepalen die de kust raaien verdeeld.

SYMBOLEN EN EENHEDEN

A	=	amplitude van orbitaal beweging vlak boven bodem	[m]
C	=	Chézycoëfficiënt	$[\mathrm{m}^{0.5}/\mathrm{s}]$
D50	=	mediane korreldiameter	[µm]
D_*	=	"dimensieloze" korreldiameter	[m]
Fr	=	Froude getal	[-]
f_w	=	frictiecoëfficiënt	[-]
g	=	gravitatie versnelling	[m/s²]
h	=	waterdiepte	[m]
$\mathrm{H_0}$	=	golfhoogte diep water	[m]
$\mathrm{H_b}$	=	golfhoogte bij breken	[m]
k_s	=	bodemruwheid	[m]
K	=	Einstein-Brown coëfficiënt	[-]
$\mathrm{L_0}$	=	golflengte diep water	[m]
$\mathrm{L_b}$	=	golflengte bij breken	[m]
l	=	horizontale lengte	[m]
m	=	weergave van helling[1]	[-]
n	=	schaalwaarde	[-]
q_b	=	bodemtransport	[m³/s]
Re	=	Reynolds getal	[-]
s	=	$\frac{\rho_s}{\rho_w}$	[-]
T	=	golfperiode	[s]
Tm	=	morfologische tijdschaal	[s]
u	=	orbitaalsnelheid	[m/s]
u_*	=	schuifspanningssnelheid	[m/s]
U_m	=	maximale orbitaalsnelheid	[m/s]

[1] d.w.z. dat de helling 1:m (1 op m) is

ν	=	kinematische Viscositeit	[m²/s]
ws	=	valsnelheid	[m/s]
θ	=	Shieldsparameter	[-]
θ'	=	effectieve Shields-parameter	[-]
θ_{cr}	=	kritische Shieldsparameter	[-]
τ	=	schuifspanning	[N/m²]
τ_b	=	bodemschuifspanning	[N/m²]
τ_b'	=	effectieve schuifspanning	[N/m²]
τ_c	=	bodemschuifspanning door stroming	[N/m²]
τ_w	=	bodemschuifspanning door golven	[N/m²]
τ_{max}	=	maximale bodemschuifspanning	[N/m²]
ρ_s	=	soortelijk gewicht sediment	[kg/m³]
ρ_w	=	soortelijk gewicht water	[kg/m³]
ξ	=	surfzone-parameter	[-]
β	=	hellingshoek kust	[graden]
Δ	=	relatieve dichtheid	[kg/m³]
γ	=	Invalshoek golven	[graden]

INHOUD

Voorwoord i
Samenvatting ii
Summary iv
Definities en afkortingen vi
Symbolen en eenheden viii
1 Inleiding 1
1.1 Achtergrond en probleemstelling 1
1.2 Doel van het onderzoek 2
1.2.1 Hoofd- en deelvragen 2
1.3 Onderzoeksopzet 2
2 Gebiedsanalyse 3
2.1 Inleiding 3
2.2 Morfologische processen Goeree 3
2.2.1 Bollen van de Ooster 4
2.2.2 Gevolg morfologische processen 4
2.3 Hydraulische randvoorwaarden Goeree 5
2.3.1 Getij 5
2.3.2 Golven 5
2.3.3 Extremen 6
3 Vooronderzoek 7
3.1 Schaalmodellen 7
3.2 Bestaande schaal wetten 8
3.2.1 Vertrokken schaal of niet-vertrokken schaal 8
3.2.2 Dimensieloze getallen 8
3.3 Schaalwetten toegepast in Aqualab-RDM 13
3.3.1 Uitgangspunten waterbak 13
3.3.2 Niet-vertrokken schaal Aqualab-RDM 14
4 Proefopstelling 17
4.1 Oriënterende proeven 18
4.2 Dimensionering ontwerp 19
5 Uitvoering proeven 23
5.1 Inleiding 23
5.2 Instellingen Aqualab-RDM 23
5.3 Proef omschrijving 23

5.4 Analyse & waarnemingen 24
5.4.1 Proef 5 25
5.4.2 Proef 8 27
5.4.3 Vergelijking eindresultaat proef 5 en proef 8 29
5.5 Meetwaarden in vergelijking met literatuur 30
5.5.1 Vergelijking voorgaand laboratorium proef 30
5.6 Vervolg proeven 31
5.6.1 Optimaliseren van de proefopstelling 32
5.6.2 Optimalisering van de proefuitvoering 32
5.6.3 Transportformules 32
5.6.4 Kwantitatief onderzoek 33
6 Conclusies en aanbevelingen 34
6.1 Conclusies 34
6.2 Aanbevelingen 36
Schaalwaarden 36
Proefopstelling 36
Uitvoering proef 36
7 Bibliografie 37
8 Figurenlijst 39
8.1 Figurenlijst 39
8.2 Tabellenlijst 39
9 Bijlagen 40
9.1 Bijlage A: Oriënterende Proef 40
9.2 Bijlage B: Proefopstelling 40
9.3 Bijlage C: Werkplan 40
9.4 Bijlage D: Meetresultaten 40
9.5 Bijlage E: Uitgewerkt beeldmateriaal proeven 40

1 INLEIDING

1.1 ACHTERGROND EN PROBLEEMSTELLING

Nederland ligt voor een groot deel aan de Noordzee en kent daarbij 350 km kustlengte. De duinen en stranden beschermen het Nederlandse achterland tegen het water. Dit wordt ook wel de natuurlijke zeewering genoemd. Echter wordt er door de golven, stroming en wind veel zand verplaatst, wat leidt tot een tekort aan sediment voor de Nederlandse kust. Daarnaast is er sprake van een veranderend klimaat en een stijging van de zeespiegel die ervoor zorgen dat de Nederlandse kust nog meer wordt aangetast.

In 1990 heeft de regering besloten om de kusterosie aan te pakken en sindsdien wordt de Nederlandse kust dynamisch beheerd. Zo is er in dit jaar een basiskustlijn (BKL) vastgesteld die geldt als referentiepunt voor de kustlijn. In 2001 bleek echter dat niet alleen in de ondiepe delen van de kust erosie plaatsvond, maar ook in de dieper geleden delen. Hierom is in 2001 besloten het gehele kustfundament te handhaven waardoor het gemiddelde jaarlijks suppletievolume van 6 miljoen kubieke meter zand naar 12 miljoen kubieke meter zand steeg (Mastbergen, Nederhoff, & Quataert, 2019). Om ervoor te zorgen dat Nederland nog steeds droge voeten heeft, wordt er jaarlijks vanuit de overheid ongeveer 12 miljoen m^3 zand extra gesuppleerd (Rijskwaterstaat, 2021).

Door de hedendaagse grootschalige kust suppleties wordt onder anderen het bodemleven van de kusten en de mogelijkheid van recreatie zwaar gehinderd. Om deze reden zijn er onderzoeken gaande naar de mogelijkheid van kleinschalige zandsuppleties, waarbij de kusten toch worden onderhouden, maar de impact op de omgeving mogelijk wordt beperkt. Afgelopen jaar (2020) heeft F. Boll, een voormalig Civiele Techniek student van de Hogeschool Rotterdam, onderzoek uitgevoerd naar de mogelijkheid van het gebruik van een pijpleidingensysteem als gebruik voor kleinschalige zandsuppleties. In dit onderzoek heeft hij proeven uitgevoerd naar de meest efficiënte vorm van het pijpleidingen systeem met keuze uit de volgende zeven vormen: rond, ovaal dwars op de kust, ovaal parallel langs de kust, hoefijzervorm open richting de kust, hoefijzervorm open richting het water, een zandmotor vorm met punt gericht naar de kust en een zandmotor vorm met de punt gericht naar het water. Tijdens deze vormproef is rekening gehouden met verschillende dimensies waarbij de volgende parameters in beschouwing zijn genomen: de vorm, de golfhoogte, de waterdiepte en de tijd. Uit deze proeven bleven de zandmotorvorm met de punt richting de kust en de hoefijzervorm open richting de kust het langst liggen. Daarnaast is er gekeken naar de traditionele ronde vorm, aangezien dit het meest standaard is binnen Nederland.

Om verder in te gaan op de kleinschalige zandsuppleties wordt in dit rapport onderzoek gedaan naar de mogelijkheid van het gebruiken van het Aqualab-RDM voor het bepalen van morfologische processen bij het aanleggen van een kleinschalige zandsuppletie. Doordat de werkelijke omstandigheden en parameters van de kust in grootte en waarden niet constant zijn, zijn deze gegevens lastig te modelleren in een modelbak. Hoewel er in het onderzoek van Boll een start is gemaakt naar het uitvoeren van proeven van de morfologische processen in een modelbak, is er nog geen antwoord gegeven op de vraag of deze proeven kwalitatief waardig uitgevoerd kunnen worden. Hierdoor wordt er in dit onderzoek een slag gemaakt naar het vinden van een antwoord op de vraag of het mogelijk is een stuk kust in een modelbak te beproeven nadat er een schaalfactor overheen gaat. Zo komt er meer inzicht in de mogelijkheid van het gebruiken van modelbakken voor het verklaren van morfologische processen.

1.2 DOEL VAN HET ONDERZOEK

Het doel van het onderzoek is het onderzoeken van de mogelijkheid om de fysische fenomenen van kleinschalige zandsuppleties binnen de kustmorfologie te bepalen door middel van proeven in het waterlaboratorium van het RDM terrein waarbij verschaling wordt gebruikt.

1.2.1 Hoofd- en deelvragen

Middels dit rapport wordt aangetoond of de doelstelling behaald kan worden. Om hier antwoord op te kunnen geven is de volgende hoofdvraag opgesteld:

"Is het mogelijk om in het Aqualab-RDM een kwalitatief onderzoek te doen waar de fysische fenomenen van kleinschalige zandsuppleties worden verklaard?"

Het antwoord op de hoofdvraag wordt gevonden door eerst bepaalde deelvragen uit te werken. Deze deelvragen zijn als volgt:

D1 Welke locatie aan de Nederlandse kust wordt in de proef gemodelleerd en wat zijn de te gebruiken parameters?

D2 Wat zijn de dominante schaalwaarden (die van morfologie, de golven, het tij)?

D3 Welke schaalwaarde wordt gebruikt en hoe groot is de schaalfactor die gebruikt zal worden in het Aqualab-RDM?

D4 Op welke locatie/afstand van het water worden de kleinschalige zandsuppleties gepositioneerd?

D5 Zijn de gevonden (tussen)waarden van de proeven in het lab te vergelijken met de werkelijkheid en de literatuur?

1.3 ONDERZOEKSOPZET

Het onderzoek kan worden ingedeeld als laboratoriumonderzoek waarbij eerste beschikbare theorie bestudeerd is.

Het onderzoek is gestart door eerst een literatuurstudie uit te voeren naar de gegevens over morfologische processen.

Naar aanleiding van de te gebruiken schaalwetten is een proefopstelling ontworpen en gemaakt. Bovendien is er een werkplan geschreven voor het uitvoeren van de proeven in het Aqualab-RDM. Door gebruik te maken van schaalmodellen wordt het stuk gekozen Nederlandse kust in het Aqualab-RDM gemodelleerd en de proeven uitgevoerd.

2 GEBIEDSANALYSE

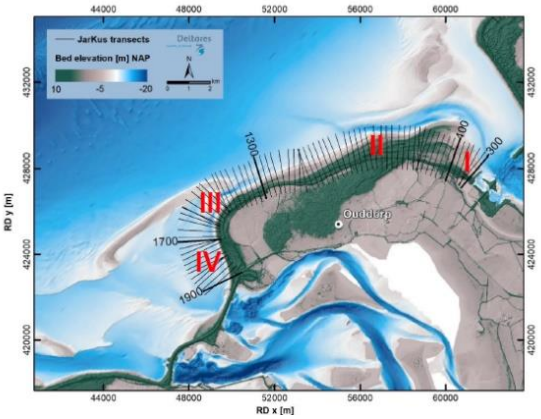
2.1 INLEIDING

Om de proeven kundig uit te kunnen voeren is er een locatie aan de Nederlandse kust gekozen die in het Aqualab-RDM gemodelleerd zal worden.

De gekozen locatie is de kust bij Goeree Overflakkee. Deze locatie ligt binnen het dijkringgebied 25 van Waterschap Hollandse Delta en staat onder toezicht van provincie Zuid-Holland. De keuze voor deze locatie komt voort uit het feit dat binnen het Centrum voor Hoogwaterveiligheid ook andere onderzoeken in dit gebied bezig zijn, zoals de zandvangers in de duinen en het onderzoek naar verstuivingsdynamica in het duingebied.

De kust van Goeree wordt in vier deelgebieden onderverdeeld (Mastbergen, Nederhoff, & Quataert, 2019):

I. Het oostelijke kustgebied vanaf de havendam van Stellendam
II. Het noordelijk gerichte stuk kust
III. De kop van Goeree
IV. Kust op het westen gericht tot aan de dam bij Brouwersdam



Figuur 1 Deelgebieden kust Goeree bron: (Mastbergen, Nederhoff, & Quataert, 2019)

In dit onderzoek wordt er gewerkt met het derde (III) genoemde deelgebied van de kust van Goeree. Dit deelgebied ondervindt al eeuwenlang structurele erosie waardoor het handhaven van deze locatie erg belangrijk is. Zo worden er regelmatig suppleties uitgevoerd die ervoor zorgen dat de kust veilig blijft en blijft voldoen aan de eisen van de staat. Om deze reden zal dit stuk van de Nederlandse kust ook erg interessant zijn voor dit onderzoek.

2.2 MORFOLOGISCHE PROCESSEN GOEREE

Het gedrag van water en sediment wordt door verschillende factoren beïnvloed. Het is van belang dat de processen van het sediment rondom een kust in de gaten worden gehouden, zodat er kennis over toekomstige veranderingen aan de kust wordt verleend en men tijdig kan handelen.

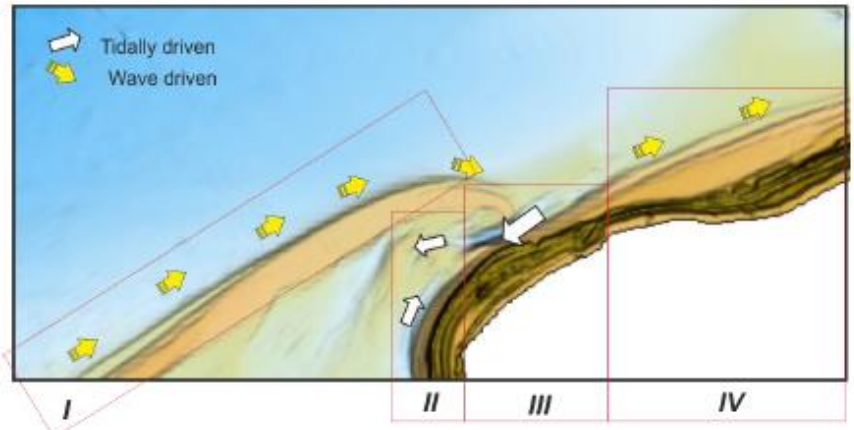
In de geschiedenis is er op morfologisch gebied veel veranderd rondom de kust van Goeree. Eén van de belangrijkste morfologische processen in dit gebied is ontstaan na de bouw van de Brouwersdam in 1971. Door de realisatie van deze dam ontstond er een forse afname in getijdestroming, waardoor golven meer vat kregen op het voorliggende zandplaten en zo het sediment loswoelde en dit langzaam in de richting van de Bollen van de Ooster (een zandbank voor de kust van Goeree) stuwden (Mastbergen, Nederhoff, & Quataert, 2019). De Bollen van de Ooster werden steeds hoger en langwerpiger. Tegenwoordig migreert deze zandbank geleidelijk richting het noordoosten wat ervoor zorgt dat er een geul ontstaat tussen de kust en de zandhoop die door de jaren heen steeds meer richting de kust verplaatst. Door dit verplaatsen van de geul is er structurele erosie op de kust aanwezig. Om ervoor te zorgen dat de kust van Goeree blijft bestaan en Nederland droge voeten blijft houden, wordt er vanuit de overheid jaarlijks gecontroleerd of de kust nog voldoet aan de gestelde eisen voor een kust. Dit wordt gedaan door middel van Jaarlijkse Kust metingen (JarKus) met behulp van de basiskustlijn (BKL), de momentane kustlijn (MKL) en de te toetsen kustlijn (TKL).

2.2.1 Bollen van de Ooster

De Bollen van de Ooster zijn een erg belangrijke factor op de morfologische processen voor de kust bij Ouddorp. (Mastbergen, Nederhoff, & Quataert, 2019)

De Bollen van de Ooster zijn opgedeeld in vier deelgebieden met daarbij allemaal een andere factor verantwoordelijk voor de processen. Figuur 2 laat de morfologische processen rondom de Bollen van de Ooster per deelgebied zien. Hierbij wordt aangeduid of er vooral golf- en/of stroming-gedreven sedimenttransport ontstaat. Opvallend is dat waar de golven komen golf-gedreven transport dominant is en daar waar de Bollen van de Ooster een geul maken net voor de kust de getijstroming dominant is voor het sedimenttransport door het ontstaan van versnellingen in stroming.

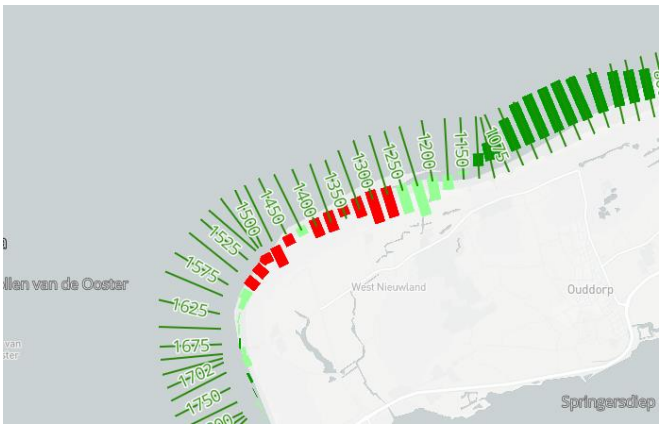
Opvallend is dat zowel stroming als golven een grote invloed hebben op het sedimenttransport aanwezig bij de kust van Goeree. In het onderzoek binnen het Aqualab-RDM wordt vooral het door golven opgewekte transport onderzocht, dit gaat dan ook om deelgebied I en IV.



Figuur 2 Deelgebieden Bollen van de Ooster met weergave van morfologische processen bron: (Mastbergen, Nederhoff, & Quataert, 2019)

2.2.2 Gevolg morfologische processen

Met behulp van de jaarlijkse kustmetingen (JarKus) wordt aan de hand van de ligging van de BKL, MKL en TKL bepaald of er op een locatie gesuppleerd zou moeten worden. In onderstaand figuur 3 staat de toetsing van 01-01-2021, waarbij te zien is dat tussen de Bollen van de Ooster en de kust van Goeree de kusttrend landwaarts beweegt (rood) en daar waar het sediment van de zandplaat naar toe beweegt de kustlijn zeewaarts groeit (groen). Om dit probleem van erosie tegen te gaan, wordt er dit jaar weer 1,1 miljoen kuub zand gesuppleerd tussen raaivak 1200 tot 1625 (Rijkswaterstaat, 2021).



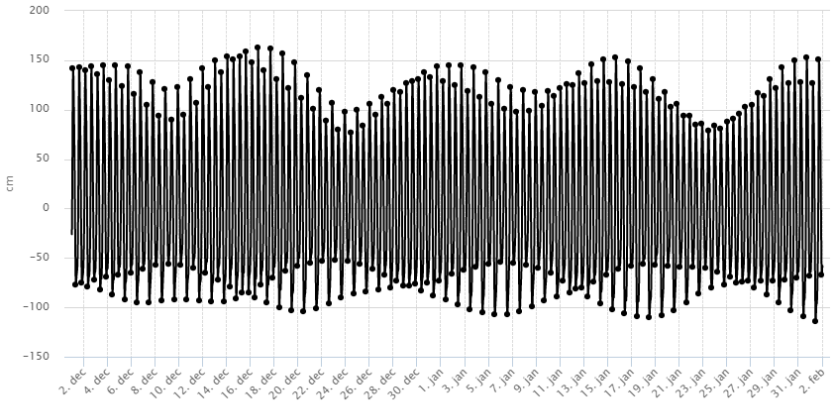
Figuur 3 Trend kustlijn per 01-01-2021 bron: (Deltares & Rijkswaterstaat, 2021)

2.3 Hydraulische randvoorwaarden Goeree

Om de kust van Goeree juist te kunnen modelleren in de modelbak is het ook van belang om te weten wat de meespelende hydraulische randvoorwaarden zijn. Er zijn drie variabele die invloed hebben op stroming en daarmee door sedimenttransport de kust vorm geven. Deze drie variabelen zijn: de wind, de golven en het getij. In onderstaande paragrafen zullen de variabelen getij en golven kort worden omschreven met betrekking tot de locatie bij Ouddorp, Goeree. De variabele wind wordt buiten beschouwing gelaten aangezien deze het minst invloed heeft op het sedimenttransport onder water.

2.3.1 Getij

Het getij blijkt een belangrijke rol voor het sedimenttransport bij de kust van Goeree te spelen, zoals te lezen in paragraaf 2.2.1. In figuur 4 is het getij weergegeven gemeten bij Haringvliet 10, ongeveer 8 kilometer van de kust van Goeree over een periode van een ongeveer twee maanden: 01-12-2020 tot 01-02-2021.

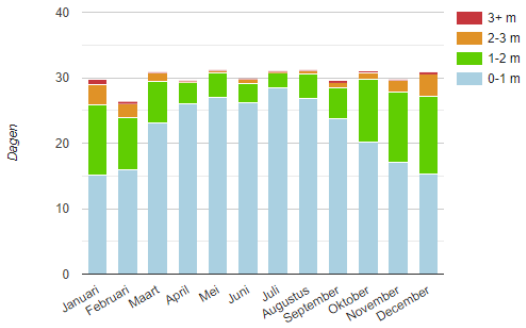


Figuur 4 Waterhoogte astronomisch getij t.o.v. NAP in cm ter hoogte van Haringvliet 10 gedurende 1 december 2020 tot 1 februari 2021 (bron: (RIJKSWATERSTAAT, 2021))

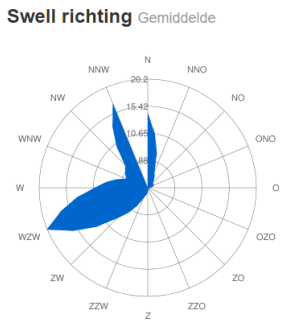
2.3.2 Golven

De golven voor het eiland Goeree zorgen voor de meest prominent aanwezige stroming die vervolgens het sediment vervoert. De golven worden opgewekt door de wind op zee en hebben daarbij een significante golfhoogte van 1,3 meter gericht vanuit het zuidwesten (Mastbergen, Nederhoff, & Quataert, 2019). De golfperiode voor de kust bij Goeree is gemeten op het Lichteiland Goeree. Hier is de golfperiode gemeten van 30 januari tot en met 26 februari 2021 en geeft dit een gemiddelde golfperiode van 5,5 seconde.

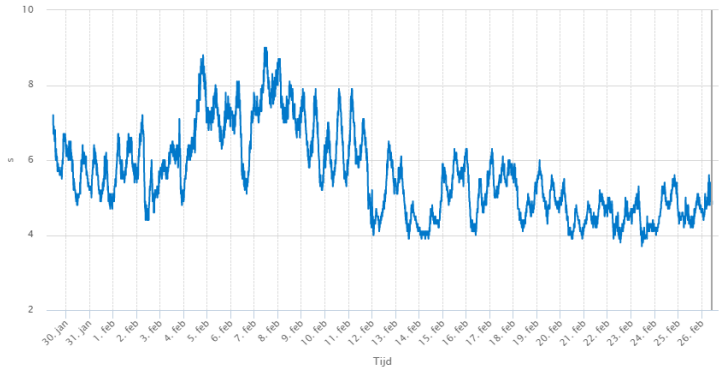
In de onderstaande figuren 5 tot en met 7 zijn de gegevens die invloed hebben op de golven rondom de kust van Goeree weergegeven:



Figuur 5 Gemeten golfhoogtes over een jaar voor de kust van Ouddorp (bron: (Wisuki, 2012))



Figuur 6 Gemeten swell richting over een jaar voor de kust van Ouddorp (bron: (Wisuki, 2012))



Figuur 7 Gemiddelde golfperiode langste 1/3 deel van de golven gemeten op Lichteiland Goeree (Bron: (Rijkswaterstaat, 2021))

2.3.3 Extremen

Nederland kent jaarlijks een aantal stormen. Een storm treedt op als er minimaal één uur lang sprake is van windkracht 9 is (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, 2021). Tijdens een storm treden er extreme waarden van golfhoogtes en de daarbij komende waterstanden op. Hierbij kunnen golfhoogtes van zes tot acht meter optreden en de waterstand kan stijgen met twee tot drie meter. Deze extreme weersomstandigheden kunnen in een korte tijdsperiode veel invloed hebben op de morfologische processen van een kust. In dit onderzoek wordt echter gewerkt met de normale weersomstandigheden zoals in de voorgaande paragrafen behandeld.

3 VOORONDERZOEK

Er zijn verschillende methodieken om morfologische processen waar te nemen en vast te leggen. Zo zijn er veldonderzoeken, numerieke/ computer modellen en laboratoriumonderzoeken, waarin zoals eerder genoemd in dit onderzoek vooral ingegaan wordt op de laatste methodiek. (Waterloopkundig laboratorium, 1996).

Het uitvoeren van laboratoriumonderzoeken binnen de kustmorfologie brengt verschillende moeilijkheden met zich mee. Om de proeven zo kundig mogelijk uit te kunnen voeren is het belangrijk studie te doen naar de al eerder gevonden kennis over de morfologische processen en schaalmodellen. In dit hoofdstuk zullen de te gebruiken formules, wetten en nuttige uitkomsten van voorgaande proeven worden behandeld.

3.1 SCHAALMODELLEN

Aangezien er een beduidend verschil in ruimte is tussen de werkelijkheid en de beschikbare ruimte in het model, wordt er gebruik gemaakt van verschaling. In de loop der jaren is er al veel onderzoek gedaan naar het gebruik van verschaling bij kustmodellen. Zo zijn er meerdere schaalwetten ontstaan die in het dagelijks leven regelmatig worden gebruikt. Echter zijn er nog veel opkomende vragen rondom de opkomende schaaleffecten bij het toepassen van verschaling.

Er wordt onderscheid gemaakt tussen twee soorten schaalmodellen:

- Een niet-vertrokken schaalmodel (ook wel *undistorted model*)
- Een vertrokken schaalmodel (ook wel *distorted model*)

Afhankelijk van de grootte van de parameters van het te gebruiken prototype en de beschikbare ruimte binnen het laboratorium waar de proeven worden uitgevoerd, wordt er een keuze gemaakt tussen deze twee schaalmodellen. Bij een niet-vertrokken schaalmodel zijn de schaalwaarden van de lineaire dimensies van de werkelijkheid en het model gelijk. Bij een vertrokken schaalmodel is dit niet het geval, hier zijn één of enkele schaalwaarden van de werkelijkheid en het model niet gelijk aan elkaar. Een vertrokken model breng ongelukkigerwijze wel een groot nadeel met zich mee: door het verschil in grootte van de schaalwaarden ontstaan er schaalfouten in de uitkomst van de proeven.

Het is van belang dat deze schaalfouten goed worden begrepen en eruit worden gefilterd, door bijvoorbeeld een factor over de uitkomst te halen. Zo kan er alsnog een kwalitatief antwoord gegeven worden op wat er met de morfologische processen gebeurt.

Hoewel schaalfouten en schaaleffecten bijna onvermijdelijk zijn in laboratorium proeven, zijn dit soort proeven toch erg waardevol voor morfologische onderzoeken. De waterbeweging kan in een schaalmodel, vooral met vaste bodem, goed worden weergegeven. Daarnaast kunnen de uitkomsten uit de modelproeven een opstart zijn naar morfologische procesmodellen (Waterloopkundig laboratorium, 1996).

3.2 BESTAANDE SCHAAL WETTEN

Zoals bovenstaand genoemd, zijn er in de loop van jaren enkele schaalwetten ontstaan uit verschillende grote onderzoeken naar schaalmodellen voor kust en duin processen. Het verschalen van parameters wordt altijd aangegeven met de schaalfactor (n). De schaalfactor is de verhouding tussen de waarde van de werkelijkheid (werkelijk, ook wel prototype genaamd) en die van het model:

$$n_x = \frac{x_{werkelijk}}{x_{model}} \qquad [3.1]$$

In de ideale situatie zijn de schaalwaarde van zowel geometrisch, kinematisch als dynamische parameters gelijk aan elkaar (een onvervormd schaalmodel). Echter is het bijna onmogelijk om hieraan te voldoen tenzij het op schaal van de werkelijkheid is. Hierom is het belangrijk om de dominante kengetallen te bepalen zodat de andere "verwaarloosd" kunnen worden.

3.2.1 Vertrokken schaal of niet-vertrokken schaal

Zoals eerder behandeld, is een niet-vertrokken schaal de meest ideale situatie voor een laboratorium proef. Hier geldt dat alle waarden in het model volgens de schaalwetten met dezelfde schaalfactor kunnen worden verschaald.

Een schaalmodel is vertrokken zodra één of meerdere van de schaalwaarden niet gelijk zijn aan elkaar. In een laboratoriumproef bepaalt de relatie van de horizontale lengte schaal (n_l) met de verticale lengte schaal (n_h), vaak of een schaalmodel vertrokken of niet-vertrokken moet zijn in verband met de beschikbare ruimte. De hierbij horende vervormingsfactor is (Van Rijn, Tonnon, Arcilla-Sanchez, Caceras, & Grüne, 2011):

$$n_l/n_h \qquad [3.2]$$

3.2.2 Dimensieloze getallen

Het verschalen van parameters in laboratoriumproeven is dus gebaseerd op het behouden van gelijkenis van dimensieloze parameters tussen model en werkelijkheid, zodat er een correcte weergaven van de fysische processen gegeven kan worden. In de meest ideale situatie zijn deze dimensieloze getallen (kentallen) hetzelfde in de werkelijkheid als in het model. Echter is het moeilijk, vaak onmogelijk, om hieraan te voldoen, dus ontstaan er zogenaamde schaalfouten. Het is van belang om de dominante kentallen (= de kentallen die belangrijk zijn om het fysisch-proces te beschrijven) te bepalen, zodat er een keuze gemaakt kan worden welke kentallen gelijk aan 1 moeten blijven ($n_{Kental} = 1$). Uit deze keuze volgen de zogenoemde schaalvoorwaarden (De Vries, 1975).

Voor het huidige onderzoek naar het beproeven van kleinschalige zandsuppletie in het Aqualab-RDM, moet worden bepaald welke van de bestaande kentallen dominant zijn voor het behouden van de morfologische processen van de werkelijkheid. De kentallen en parameters te behandelen bij dit onderzoek zijn: Froude, Reynolds, Shields en de golfbrekersparameter (ook wel surfzone-parameter). Deze kentallen en parameters omschrijven onder andere de manier van stromen in algemeen en rondom een korrel, het begin van bewegen van het sediment en de manier van breken van golven.

Het is belangrijk op te merken dat de kentallen Froude en Reynolds na verschalen niet beide gelijk aan 1 kunnen blijven. De kentallen omschrijven beide een manier van stroming, maar bepalen niet hetzelfde en kunnen dus ook niet samen gebruikt worden. Het Froude kengetal omschrijft een weergave van het gedrag van stroming van het vloeistofoppervlak. Het Reynolds getal omschrijft het gedrag van de stroming rondom een korrel sediment en bepaalt of een stroming laminair of turbulent is (Robert L. Mott, 2014). Dit getal heeft onder andere met de snelheid van de stroming te maken en

is belangrijk bij een langzame stroming. Uit voorgaande onderzoeken naar het bepalen van morfologische processen is gebleken dat de Froude en Reynolds kengetallen bij verschalen niet beide gelijk aan 1 kunnen blijven[2]. Zo wordt dan ook in de onderzoeken van onder andere Vellinga (1986) en Ranieri (2007), gesteld dat voor kleine schaal proeven het voldoende is om te werken met de eis $n_{Froude} = 1$ (Van Rijn, Tonnon, Arcilla-Sanchez, Caceras, & Grüne, 2011).

In vergelijking met het onderzoek van Vellinga, waar de golfparameter niet als dominant wordt beschouwd, kan worden gezegd dat deze voor het huidige onderzoek wel dominant is voor het verschalen van de parameters. Doordat het bij Vellinga om duinerosie gaat (Vellinga, 1986) en bij het betreffende onderzoek om kusterosie, wordt er in het huidige onderzoek gesteld dat de golfbrekersparameter één van de dominante parameters is tijdens het verschalen. Deze keuze is gemaakt omdat de golven en de manier van breken een grote invloed hebben op het los woelen van het sediment aan de kustlijn, wat ervoor zorgt dat er sedimenttransport ontstaat. Er kan dus worden gezegd dat de golfbrekersparameter in werkelijkheid en in model gelijk aan elkaar zijn, ook wel $n_{golfbrekersparameter} = 1$.

Ook de Shields-parameter is één van de dominante parameters. Deze parameter is misschien nog belangrijker dan de golfbrekersparameter, aangezien deze bepaalt of en wanneer het sediment gaat bewegen door middel van stroming en bodemschuifspanning door golven. Deze parameter kan zorgen voor sedimenttransport zonder dat de manier van breken van golven er invloed op heeft, puur door stroming. Door deze parameter na verschaling gelijk te houden aan 1, kan er later ook nauwkeuriger onderzoek worden gedaan naar hoeveelheden in het sedimenttransport. Ook hiervoor geldt de eis: $n_{Shields} = 1$.

In het huidige onderzoek kan worden gesteld dat de volgende drie parameters en kentallen dominant zijn en deze dus bij verschaling gelijk aan 1 moeten worden gehouden:

- **i.** Stroming (Froude);
- **ii.** Golven (Golfbrekersparameter);
- **iii.** Bewegen van sediment (Shields).

i. Het Froude kengetal:

Het Froude kengetal (Fr) geeft een weergave van gedrag van vloeistofoppervlak (sub kritische stroming of kritische stroming):

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{g*L}} \qquad [3.3]$$

met daarin:

u = orbitaal snelheid amplitude
L = een specifieke lengte, bijv. de waterdiepte (h)

Aangezien ernaar gestreefd wordt de schaalfactor van de kengetallen op 1 te houden en dit zeker geldt voor de dominante kengetallen, die het proces wat onderzocht moet worden beheersen.

---

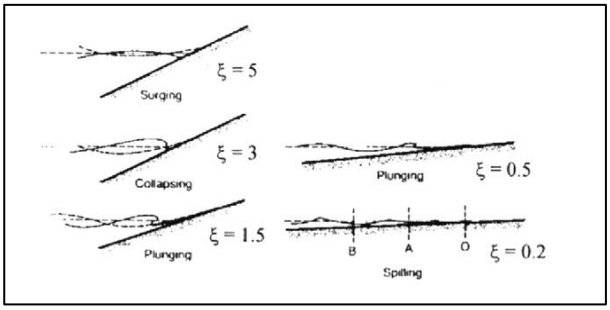
[2] $Re = \frac{u*L}{\nu} \quad \rightarrow \quad n_{Re} = \frac{u_w*L_w}{\nu_w} * \frac{\nu_m}{u_m*L_m} = \frac{n_u*n_L}{n_\nu} = n_u * n_L$ als $n_\nu = 1$ $en\ n_{Re} = 1 \rightarrow \quad n_T = (n_T n_u) * n_L = (n_L)^2$

Wanneer de schaalfactor van het Froude kengetal gelijk moet blijven aan 1 ($n_{Fr} = 1$) en die van zwaartekracht versnelling ook gelijk is in zowel werkelijkheid als in het model ($n_g = 1$) zal de Froude-schaal (ook wel de Froude-voorwaarde) als gevolg hebben dat: (Van Rijn, Tonnon, Arcilla-Sanchez, Caceras, & Grüne, 2011)[3]:

$$n_u = n_T = \sqrt{n_L} = \sqrt{n_H} = \sqrt{n_h} \qquad [3.4]$$

ii. De golfbrekersparameter:

Daarnaast heeft het breken van de golven ook veel invloed op de kustprocessen. Er zijn vier manieren van breken van een golf. De manier van breken wordt bepaald door de golfbrekersparameter (Battjes, COMPUTATION OF SET-UP, LONGSHORE CURRENTS, RUN-UP AND OVERTOPPING DUE TO WIND-GENERATED WAVES, 1974).



Figuur 8 Manier van breken golven (Battjes, 1974)

Voor de classificatie van de manier waarop de golven breken kan gebruik worden gemaakt van de golfbrekersparameter (ξ) en is gegeven door Battjes (Battjes, COMPUTATION OF SET-UP, LONGSHORE CURRENTS, RUN-UP AND OVERTOPPING DUE TO WIND-GENERATED WAVES, 1974):

$$\xi = \frac{\tan(\beta)}{\sqrt{H/L_0}} = \frac{1/m}{\sqrt{H/L}} = \frac{1}{m}\sqrt{L/H} \qquad [3.5]$$

met daarin:

β = hellingshoek

m = $\frac{1}{\tan(\beta)}$

Uit $n_{Fr} = 1$ volgt de ξ -schaal (ξ -voorwaarde):

$$n_m = \sqrt{n_{L0}/n_{H0}} \qquad [3.6]$$

Voor een niet-vertrokken schaal geldt dan automatisch dat n_m=1. Voor een vertrokken schaal, dat wil zeggen dat de lengte- en hoogteschaal niet aan elkaar gelijk zijn ($n_l \neq n_h$), waarbij $n_m = \frac{n_l}{n_h}$[4] volgt dan:

$$n_{L0} = \left(\frac{n_l}{n_h}\right)^2 * n_{H0} \qquad [3.7]$$

Door gebruik te maken van de Froude-voorwaarde wordt de vergelijking [3.8] verkregen (van Onselen, 2017)[5]:

$$n_T = (n_h)^{0.5} * \left(\frac{n_l}{n_h}\right)^{6} \qquad [3.8]$$

---

[3] $Fr = \frac{u}{\sqrt{g*L}} \rightarrow \quad n_{Fr} = \frac{F_{r,w}}{F_{r,m}} = \frac{u_w}{\sqrt{g_w h_w}} * \frac{\sqrt{g_m h_m}}{u_m} = \frac{n_u}{\sqrt{n_g n_h}} = \frac{n_u}{\sqrt{n_h}} \; en \; n_{Fr} = 1 \rightarrow n_u = n_T = \sqrt{n_L} = \sqrt{n_H} = \sqrt{n_h}$

[4] $m_{werkelijk} = \frac{n_l * l_{model}}{n_h * h_{model}} = \frac{n_l}{n_h} * m_{model} \rightarrow n_m = \frac{n_l}{n_h}$

[5] $n_m = \frac{n_l}{n_h} \quad en \quad n_m = \sqrt{n_{L0}/n_{H0}} = \frac{n_T}{\sqrt{n_{H0}}} \quad \rightarrow \quad n_T = \sqrt{n_{H0}} * \left(\frac{n_l}{n_h}\right)$

Vergelijking [3.8] is de vertrokken Froude schaal. Echter laat vergelijking [3.8] zien dat correcte weergave van de golfdynamica alleen weergegeven kan worden in een niet-vertrokken schaal ($n_l = n_h$). In een vertrokken schaal met een steilere helling ($n_l/n_h > 1$), zou de golflengte korter moeten zijn bij dezelfde golfhoogte, om ervoor te zorgen dat de surfzone-parameter gelijk blijft. In praktijk blijkt de laatste parameter niet zo belangrijk, zolang de golven maar breken in een bepaalde breek-range. Hierdoor wordt er in de meeste gevallen meer gebruik gemaakt van de Froude schaal [3.4] in plaats van de vertrokken Froude schaal [3.8] (Van Rijn, Tonnon, Arcilla-Sanchez, Caceras, & Grüne, 2011).

iii. De Shieldsparameter:

De Shields-parameter (θ) staat voor de verhouding tussen de bodemschuifkracht op de korrels en gewicht onder het water van de korrels. Dit wordt ook wel het begin van bewegen van sediment genoemd. Deze parameter kan worden omschreven aan de hand van de bodemschuifspanning door stroming (τ_c) en aan de hand van de bodemschuifspanning door golven (τ_w) (Shields, 1936) (Liu, 2001):

$$\theta_{Stroming} = \frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho_w) g D_{50}} = \frac{{u_*}^2}{\Delta g D_{50}} \qquad [3.9]$$

$$\theta_{golven} = \frac{\frac{1}{2} * \tau_w}{(\rho_s - \rho_w) g D_{50}} = \frac{\frac{1}{2} * \rho * f_w * (U_m)^2}{(\rho_s - \rho_w) g D_{50}} \qquad [3.10]$$

Voor de schaal van de Shields-parameter kan worden gesteld dat:

$$n_{\theta,golven} = \frac{n_{\tau_w}}{n_\Delta * n_{D50}} \text{ [7]} \qquad [3.11]$$

$$n_{\theta,stroming} = \frac{(n_u)^2}{n_\Delta * (n_C)^2 * n_{D50}} \text{ [8]} \qquad [3.12]$$

Zoals eerder hierboven omschreven, is het gewenst om te werken met de eis $n_{Shields} = 1$. Echter zijn er binnen dit onderzoek voor het bepalen van de te gebruiken Shields-schaalwaarde drie gradaties waar mee kan worden gewerkt:

1. De meest gewenste situatie, waarbij de Shields waarde in werkelijkheid en in model gelijk zijn:
   $$n_{Shields} = 1$$
2. De waarschijnlijke situatie in proef, waarbij de Shields waarde in model en werkelijkheid zo dicht mogelijk bij elkaar liggen:
   $$n_{shields} \approx 1$$
3. De minimale situatie in proef, waarbij in ieder geval uit wordt gegaan van een Shields waarde waarbij het sediment in zowel het model als de werkelijkheid beweegt. Dat wil zeggen dat de Shields waarde in ieder geval hoger is dan de kritische Shields waarde.

---

[7] $\theta = \frac{\frac{1}{2}\tau_w}{(\rho_s-\rho)gD_{50}} = \frac{\frac{1}{2} * \rho_w * f_w * {U_m}^2}{(\rho_s-\rho)gD_{50}} = \frac{\frac{1}{2} * \rho_w * f_w * \left(\left(\frac{\frac{1}{2}H}{\sinh(K*h)}\right) * \left(\frac{2\pi}{T}\right)\right)^2}{(\rho_s-\rho)gD_{50}} \rightarrow n_\theta = \frac{1}{n_\Delta n_{D_{50}}} * \frac{\left(\frac{f_w}{2g}\left(\frac{\pi H}{T*sinh(kh)}\right)^2\right)_w}{\left(\frac{f_w}{2g}\left(\frac{\pi H}{T*sinh(kh)}\right)^2\right)_m}$

[8] $\theta = \frac{\tau_c}{(\rho_s-\rho)gD_{50}} = \frac{(u_*)^2}{\Delta g D_{50}} = \frac{\left(\frac{u\sqrt{g}}{C}\right)^2}{\Delta g D_{50}} = \frac{(u)^2}{\Delta C^2 D_{50}} \rightarrow n_\theta = \frac{(n_u)^2}{n_\Delta (n_C)^2 n_{D_{50}}}$

De Shields-parameter is afhankelijk van meerdere grootheden. De mediane korreldiameter (D_{50}) is er daar een van. Aangezien alle parameters zoals golfhoogte, golflengte, golfperiode, waterdiepte, enz., allemaal worden verschaald tijdens het laboratoriumonderzoek, zou ook de mediane korreldiameter moeten worden verschaald. Het verschalen hiervan blijkt lastig, aangezien het sediment niet te klein mag worden in verband met het feit dat het sediment nog moet kunnen bezinken. Zo hebben verschillende deskundigen al onderzoek gedaan naar het juist verschalen van de korreldiameter. In onderstaande tabel zijn de verschillende relaties van n_{D50} met lengteschaal ofwel: $n_{D50}= f(n_h,n_l)$ gegeven door verschillende deskundigen opgesomd, uit deze relaties kan vervolgens worden bepaald welke uitspraak het dichtst bij de omstandigheden in het Aqualab-RDM ligt:

Bron	**relatie van n_{D50} met lengteschaal ofwel: $n_{D50}= f(n_h,n_l)$**	**Restrictie**	
Noda (1972)	$n_{D50} = (n_h)^{0.55}$ $n_l/n_h = (n_h)^{0.32}$	Grof zand (>0,5 mm)	[3.13] [3.14]
Ito and Tsuchiya (1984, 1986, 1988)	$n_{D50} = {n_h}^{0.55}$ $n_{D50} = 1.7{n_h}^{0.2}$	Voor $n_h < 2.2$ Voor $n_h \geq 2.2$	[3.15] [3.16]
Van Rijn (2011)	$n_{D_{50}} = n_{f_w} * n_h * \left(\frac{n_l}{n_h}\right)^2$ $n_{D_{50}} = \frac{n_{f_w} * n_l}{n_\Delta}$	Afgeleid van Shields (stroming)[9] Belangrijk bij vertrokken schaal	[3.17] [3.18]

Tabel 1 Uitspraken over verschaling D50 van verschillende deskundigen (Van Rijn, Tonnon, Arcilla-Sanchez, Caceras, & Grüne, 2011)

De dimensieloze korrel grootte:

Mocht er gekeken worden naar de derde gradatie voor het bepalen van de Shields-schaal: dan is het belangrijk om vast te stellen óf het sediment beweegt. Hiervoor is het van belang de Kritische Shields-parameter (θ_{cr}) te achterhalen. De kritische Shields-parameter kan worden bepaald met de onderstaande formules van Van Rijn (Van Rijn, Sediment transport, 1984):

$$\theta_{cr} = \begin{cases} \frac{0.24}{D_*} & \text{als} \quad 1 < D_* \leq 4 \\ \frac{0.14}{{D_*}^{0.64}} & \text{als} \quad 4 < D_* \leq 10 \\ \frac{0.04}{{D_*}^{0.1}} & \text{als} \quad 10 < D_* \leq 20 \\ 0.013{D_*}^{0.29} & \text{als} \quad 20 < D_* \leq 150 \\ 0.055 & \text{als} \quad 150 < D_* \end{cases} \qquad [3.19]$$

In deze formules is te zien dat de Kritische Shields-parameter afhankelijk is van de dimensieloze korrel diameter (D_*). Deze wordt bepaald met onderstaande formule (Van Rijn, Sediment transport, 1984):

$$D_* = D_{50} * \left((s-1) * \frac{g}{v^2}\right)^{\frac{1}{3}} \qquad [3.20]$$

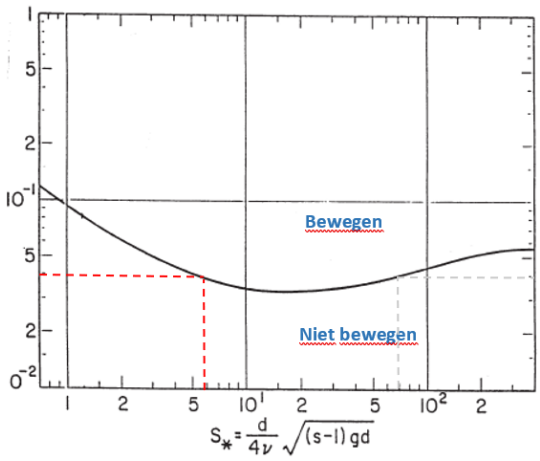
[9] $\theta = \frac{\frac{1}{2}\tau_w}{(\rho_s-\rho)gD_{50}} = \frac{\frac{1}{2}f_w * u^2}{\Delta g D_{50}} \rightarrow n_\theta = \frac{n_{f_w}*(n_u)^2}{n_\Delta n_g n_{D_{50}}}$ stel $n_\theta = 1$ dan is $n_{D_{50}} = \frac{n_{f_w}*(n_u)^2}{n_\Delta} = \frac{n_{f_w}*n_l}{n_\Delta}$

Hieruit kan worden geleid dat de schaal voor de kritische Shields-waarde geldt[10]:

$$n_{\theta cr} = n_{f(D_*)} \qquad [3.21]$$

Met de werkelijk optredende parameters is de kritische Shields-parameter bepaald voor de kust van Goeree en aangegeven met de rode stippellijn in onderstaande grafiek van figuur 9. Voor het betreffende onderzoek kan worden gezegd dat de Shields-parameter groter of gelijk is aan het punt waar de rode stippellijnen elkaar kruisen op de curve. Dat wil zeggen dat voor de situatie in het lab en in de werkelijkheid liggen de Shields-waarden boven de θ_{cr}:

$$\theta_{cr} \geq 0{,}037 \qquad \text{en} \qquad 5{,}78 \leq S_* \leq 70$$ [11]



Figuur 9 Grafiek Shields parameter Madsen (bron: (Liu, 2001))

3.3 SCHAALWETTEN TOEGEPAST IN AQUALAB-RDM

De vraag binnen dit onderzoek gaat uit naar in hoeverre het Aqualab-RDM gebruikt kan worden voor het bepalen van morfologische kustprocessen. Om tot dit antwoord te komen is het van belang de bovenstaande theorie zo correct mogelijk toe te passen binnen de mogelijkheden van het Aqualab-RDM. Daarbij is het essentieel om te ontdekken tot hoever de parameters kunnen worden verschaald zonder dat de dimensieloze parameters worden overschreden, dat wil zeggen bij het kengetal van Shields, de kritieke waarde waarbij het sediment beweegt of niet.

3.3.1 Uitgangspunten waterbak

Aangezien het Aqualab-RDM maar een beperkte ruimte biedt voor het uitvoeren van de proeven ging de voorkeur van de student uit naar het gebruik van een vertrokken schaal. Daarbij zijn de

---

[10] $n_{D_*} = n_{D50} * \left(\frac{n_\Delta * n_g}{n_\nu}\right)^{\frac{1}{3}} = n_{D50} * \left(\frac{n_\Delta}{n_\nu}\right)^{\frac{1}{3}}$, d. w. z.:

$n_{\theta cr} = (n_{D_*})^{-1}$ als $1 < D_* \leq 4$

$n_{\theta cr} = (n_{D_*})^{-0.64}$ als $4 < D_* \leq 10$

$n_{\theta cr} = (n_{D_*})^{-0.1}$ als $10 < D_* \leq 20$

$n_{\theta cr} = (n_{D_*})^{0.29}$ als $20 < D_* \leq 150$

$n_{\theta cr} = 1$ als $150 < D_*$

[11] Dit is berekend met de aanwezige mediane korreldiameter van $D50 = 326 * 10^{-6}$ meter, wat een dimensieloze korreldiameter gaf van $D_* = 8{,}14$ en dus leidde tot het gebruik van

$$\theta_{cr} = \frac{0{,}14}{D_*^{0{,}64}} = \frac{0{,}14}{8{,}14^{0{,}64}} = 0{,}037$$

$$S_* = \frac{D}{4\nu}\sqrt{(s-1)g * D} = \frac{326*10^{-6}}{4 10^{-6}} * \sqrt{1{,}59 * 9{,}81 * (326 * 10^{-6})} = 5{,}78$$

verschillende dimensieloze getallen naast elkaar gelegd en is er gekeken welke van grote invloed zijn op de morfologische processen bij kleinschalige zandsuppleties. Bij het maken van de keuze welke dimensieloze kengetallen in het Aqualab-RDM worden gebruikt, is gebruik gemaakt van voorgaande onderzoeken waar literatuur en laboratorium onderzoeken zijn samengevoegd, zoals onder anderen het onderzoek naar duinerosie van Vellinga (Vellinga, 1986) de schaalwetten voor kusterosie en sedimenttransport van Van Rijn en Liu (Van Rijn, Sediment transport, 1984) (Liu, 2001).

Aangenomen is dat de te gebruiken waterstand in het Aqualab-RDM tijdens de proeven op 0,20 meter ligt. Aangezien de modelbak een totale lengte van 20 meter heeft maar een maximale effectieve lengte van 15 meter heeft, geeft een helling van 1:60 een maximaal te gebruiken waterdiepte van 0,20 meter (Boll, 2020). Dit geeft voor de schaalfactor van de waterdiepte:

$$n_h = \frac{2.4}{0.2} = 12.$$

De vertrokken schaal is op de lengte en diepte schaal toegepast. In werkelijkheid is de helling van de kust van Goeree vastgesteld op 1:60. Aangezien er zo dicht mogelijk bij de werkelijke helling gebleven wilde blijven, maar dit niet te realiseren was in de beschikbare ruimte in de waterbak moet er ten minste gewerkt worden met een helling van 1:30. Daarom is dit een schaalfactor $n_m = \frac{m_w}{m_{model}} = \frac{60}{30} = 2$, dus met $n_m = \frac{n_l}{n_h}$ geeft dan $n_l = 2n_h$.

Met de twee bovenstaand genoemde schaalwaarde vastgelegd te hebben is er vervolgens naar de dimensieloze getallen gekeken. De surfzone-parameter bepaalt de manier van breken van de golven. Het breken van de golven zorgt ervoor dat het sediment loswoelt, waarna het gemakkelijker verplaatst kan worden. Aangezien in het Aqualab-RDM voornamelijk de golven kunnen worden gereproduceerd met het golfschot, is verondersteld dat het essentieel is dat de surfzone-parameter gelijk bleef aan 1 na verschaling in het model.[12] Met de omstandigheden en daarbij behorende parameters van de kust bij Goeree zou het bij een vertrokken schaal betekenen dat er in het Aqualab-RDM gewerkt zou moeten worden met een golfhoogte van 0,40 m op een waterdiepte van 0,20 meter[13]. Dit is echter niet mogelijk in het Aqualab-RDM, aangezien het aanwezige golfschot golven kan creëren tot 15 centimeter. Om deze reden is ervoor gekozen te werken met een niet-vertrokken schaal voor bepaling van morfologische processen in de waterbak van het RDM.

3.3.2 Niet-vertrokken schaal Aqualab-RDM

Zoals in de bovenstaand is paragraaf is uitgelegd, wordt er door de combinatie van te gekozen dominante schaalwaarden en gebrek aan ruimte gewerkt met een niet-vertrokken schaal. Dat wil zeggen de lengte en diepteschaal gelijk zijn aan elkaar ($n_h = n_l$).

In verband met het ruimtegebrek binnen het Aqualab-RDM wordt er voor de proef aangenomen dat de helling van het strand in werkelijkheid 1:30 is, zodat deze in de proef gelijk blijft ($n_m = 1$).

De waterdiepte waar de brekerszone begint, is bij de kust voor Goeree 2,4 meter. De waterdiepte in het Aqualab-RDM is vastgesteld op 20 centimeter door de beschikbare ruimte van het Aqualab-RDM (zie paragraaf 3.3.1). Deze waarde is leidend voor het bepalen van de schaalwaarden.

---

[12] Uit de proeven moet vervolgens nog blijken of deze keuze verstandig is geweest.

[13] $n_{L0} = n_m^2 n_{H0}$ met $n_m = 2$ wordt dat: $n_{H0} = \frac{n_{L0}}{4}$ dus is de golfsteilheid in de modelbak een factor 4 groter dan in werkelijkheid. Dat geeft met de Froude voorwaarde: $n_H = \frac{12}{4} = 3 \rightarrow H_{model} = \frac{H_{werkelijk}}{3} = \frac{1{,}30}{3} = 0{,}40\ m$

$$n_h = \frac{h_w}{h_m} = \frac{2{,}4}{0{,}2} = 12$$

Voor de proeven in het Aqualab-RDM zijn er twee dimensieloze getallen als dominant en maatgevend gekozen. Zoals in paragraaf 3.2.2 al wordt genoemd, moest er een keuze gemaakt worden tussen het gebruiken van Froude of Reynolds. Hierbij is gekozen om Froude als dominante schaalwet te gebruiken. Volgens de schaalwet van Froude geldt de vergelijking $n_u = n_T = \sqrt{n_L} = \sqrt{n_H} = \sqrt{n_h}$. Deze is ook gegeven in vergelijking [3.4]. Als tweede is de surfzone-parameter als maatgevend voor de proeven gekozen, aangezien de manier van breken van de golven van groots belang is voor de morfologische processen binnen de kustmorfologie. De schaalwetten bij een niet-vertrokken schaal omtrent de surfzone-parameter zijn:

$n_T = (n_h)^{0.5} * \left(\frac{n_l}{n_h}\right)$ en $n_{H0} = n_{L0}$ gegeven in vergelijking [3.6] en [3.8].

Voor het gebruik van de schaalwetten met betrekking op gelijkenis van de Shields-parameter wordt het ingewikkelder. Binnen het Aqualab-RDM wordt alleen gewerkt met de Shields-parameter afhankelijk van golven dat geeft de schaalwet, gegeven in vergelijking [3.11]:

$$\mathrm{n}_\theta = \frac{1}{\mathrm{n}_\Delta \mathrm{n}_{\mathrm{D}_{50}}} * \frac{\left(\frac{f_w}{2g}\left(\frac{\pi H}{T*sinh(kh)}\right)^2\right)_w}{\left(\frac{f_w}{2g}\left(\frac{\pi H}{T*sinh(kh)}\right)^2\right)_m} \text{ [14]} \qquad [3.22]$$

De Shields-parameter blijkt afhankelijk van onder anderen de mediane korreldiameter (D_{50}). In tabel 1 op bladzijde 11 & 12 zijn de verschillende uitspraken over schaalregels m.b.t. de mediane korreldiameter opgesomd. Kijkende naar de proef in het Aqualab-RDM is de schaal voor de waterdiepte vastgesteld op 12 ($n_h = 12$), wat betekent dat er voor juiste weergave van de korreldiameter schaal gewerkt wordt met de stelling (Ito & Tsuchiya, 1984, 1986, 1988):

$$n_{D50} = 1{,}7{n_h}^{0.2} = 1{,}7 * (12)^{0.2} = 2{,}8$$

Dit zou betekenen dat in het model gebruik gemaakt zou moeten worden van een mediane korreldiameter van $D50_m = 117$ µm.

Echter, er wordt in het Aqualab-RDM gebruik gemaakt van het aanwezige zand in het lab. Het aanwezige zand heeft hier een mediane korreldiameter van $D50_m = 352$ µm. Wat een schaalwaarde geeft van:

$$n_{D50} = \frac{326*10^{-6}}{352*10^{-6}} = 0{,}93 \approx 1 \text{ [15]}$$

In combinatie met $\mathrm{n}_\Delta \approx 1$ en kijkende naar vergelijking [3.22], kan worden gezegd dat $n_{\tau_w} \approx 1$[16] benodigd is om ervoor te zorgen dat de schaal van Shields gelijk aan 1 blijft.

---

[14] $\theta = \frac{\frac{1}{2}\tau_w}{(\rho_s-\rho)gD_{50}} = \frac{\frac{1}{2}*\rho_w*f_w*{U_m}^2}{(\rho_s-\rho)gD_{50}} = \frac{\frac{1}{2}*\rho_w*f_w*\left(\left(\frac{\frac{1}{2}H}{\sinh(K*h)}\right)*\left(\frac{2\pi}{T}\right)\right)^2}{(\rho_s-\rho)gD_{50}} \rightarrow \mathrm{n}_\theta = \frac{1}{\mathrm{n}_\Delta \mathrm{n}_{D_{50}}} * \frac{\left(\frac{f_w}{2g}\left(\frac{\pi H}{T*sinh(kh)}\right)^2\right)_w}{\left(\frac{f_w}{2g}\left(\frac{\pi H}{T*sinh(kh)}\right)^2\right)_m}$

[15] Het zou voor een vervolgonderzoek interessant zijn om bij een korreldiameter verschaald met $n_{D50} = 2{,}8$ de morfologische processen te bestuderen.

[16] $n_{\theta,golven} = \frac{n_{\tau_w}}{n_\Delta * n_{D50}} \rightarrow met\ daarbij\ n_\Delta \approx 1\ en\ n_{D50} \approx 1\ geeft\ als\ de\ eis\ is\ n_{\theta,golven} \approx 1\ dat\ n_{\tau_w} \approx 1$

Er is na berekening geconcludeerd dat de Shields-parameter niet gelijk aan 1 kan zijn in verband met de beperkingen van het Aqualab-RDM. De eis geldt nu dat de Shields-waarde ten alle tijde boven de grafieklijn uit figuur 9 op blz. 13 moet blijven.

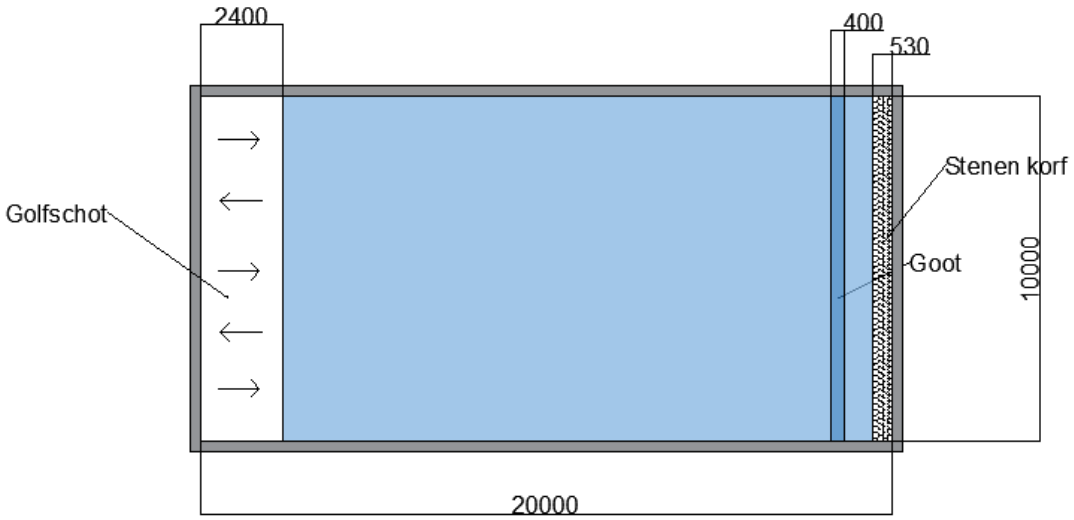
Met gebruik van de dimensieloze (ken)getallen en bijbehorende schaalwetten zijn de volgende schaal- en modelwaarden bepaald:

Grootheid	Eenheid	Symbool	Werkelijke waarde	Schaal waarde	Model waarde
Helling kust (1:m)	-	m	1:30	1	1:30
Waterdiepte	m	h	2,4	12	0,20
Horizontale lengte	m	l	90	12	7,5
Golfhoogte breken	m	H_b	1,3	12	0,108
Golfhoogte diep water	m	H_0	1,27	12	0,106
Golflengte breken	m	L_b	24,9	12	2,08
Golflengte diep water	m	L_0	47,2	12	3,93
Golfperiode	s	T	5,5	$\sqrt{12}$	1,59
Stroomsnelheid	m/s	u	0,70	$\sqrt{12}$	0,20
Gravitatie versnelling	m/s²	g	9,81	1	9,81
Dichtheid water	kg/m^3	ρ_w	1025	1,025	1000
Mediane korreldiameter	µm	D_{50}	326	0,93	352

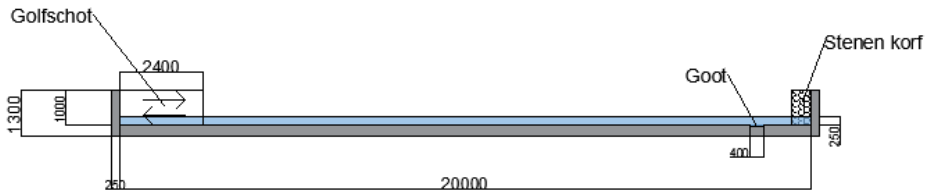
Tabel 2 Schaalwaarden proef aan de hand van Froude & surfzone-parameter verschaling

4 PROEFOPSTELLING

In dit hoofdstuk wordt de proefopstelling van het onderzoek omschreven. De proeven zullen, zoals eerder behandeld, worden uitgevoerd in het Aqualab-RDM van de Hogeschool Rotterdam. In onderstaande figuren 10 en 11 is een schets van de modelbak met afmetingen weergegeven (let op afmetingen in millimeters).



Figuur 10 Bovenaanzicht Aqualab-RDM (bron: (Smits))



Figuur 11 Doorsnede Aqualab-RDM (bron: (Smits))

Om tot het gewenste ontwerp van de kust te komen wordt gebruik gemaakt van diverse aspecten die in de overwegingen van het ontwerp worden meegenomen. De verschillende aspecten zijn: de dimensionering vuistregels, de schaalwetten behandeld in het voorgaande hoofdstuk, de morfologische processen en de praktische overwegingen die bij het lab komen kijken. Uit het vooronderzoek zijn de volgende criteria samengesteld:

Dimensionering kust criteria:
- De afmetingen van het stuk kust zijn afhankelijk van de beschikbare ruimte binnen het Aqualab-RDM;
- De helling van de kust is 1:30 in verband met de beperkingen binnen het Aqualab-RDM.

Verschaling regels:
- De lengte- en diepteschaal blijven gelijk aan elkaar in zowel werkelijkheid als in model $(n_l = n_h)$;
- Het ontwerp voldoet aan de bijkomende aspecten van de dominante dimensieloze getallen;
- Het model wordt zo realistisch mogelijk verschaald zodat de morfologische processen zo veel mogelijk gelijk blijven aan de werkelijkheid;

- Het zand wordt niet met dezelfde schaalgrootte verschaald in verband met het aanhouden van de dimensieloze Shields-parameter die bepaald wanneer de zandkorrel begint met bewegen.

Morfologische processen:

- De golven moeten zoals de werkelijkheid worden nagebootst. Dit houdt in dat de golfhoogte en manier van breken onder een schaalfactor zoveel mogelijk gelijk zijn aan die van de werkelijkheid;
- De zandkorrels moeten niet mee worden verschaald met de andere parameters zodat de zandkorrels nog wel kunnen zinken en er geen suspensie ontstaat. Belangrijk is daarbij dat de zandkorrels niet te zwaar moeten zijn binnen de omstandigheden van het lab, zodat deze nog wel kunnen bewegen door de golven en de stroming. Hierbij is de Shields-parameter van belang.

Praktische overwegingen:

- Het ontwerp moet veilig te gebruiken zijn;
- Het ontwerp moet zo ontworpen worden dat het gemakkelijk in- en uit elkaar te monteren is;
- Het ontwerp dient hergebruikt te kunnen worden;
- Het ontwerp moet binnen de afmetingen van het Aqualab-RDM passen (10x15m).

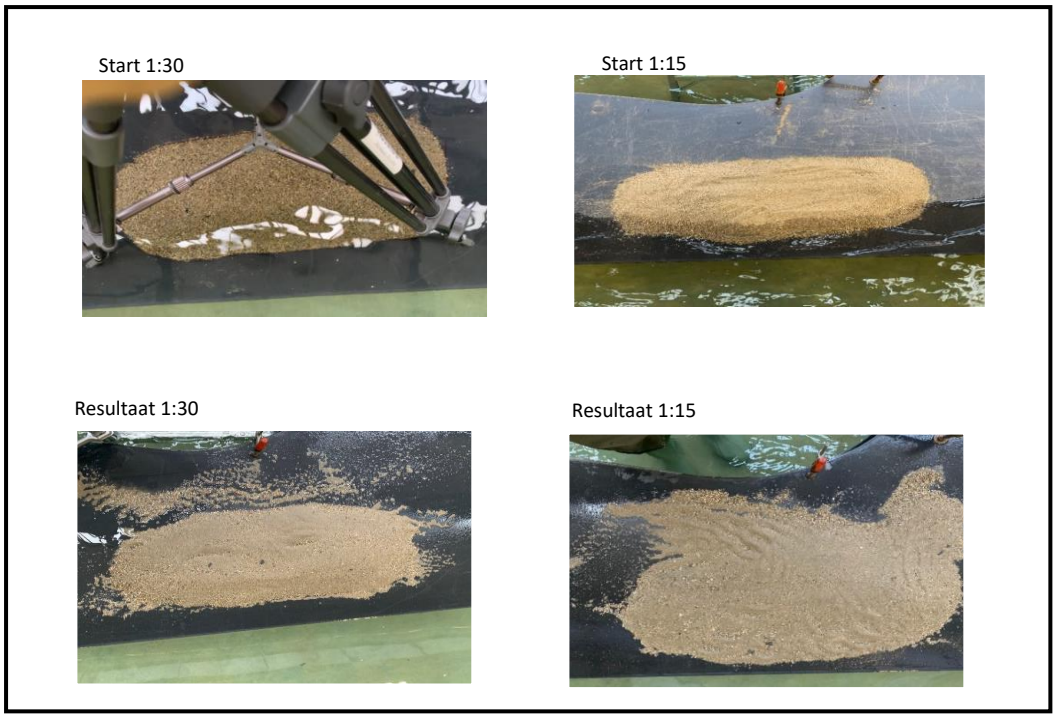
4.1 Oriënterende proeven

Naast de bovengenoemde aspecten zijn er ook enkele oriënterende proeven uitgevoerd in de weken van 15 en 22 maart 2021 om kennis te maken met het Aqualab-RDM en de optredende morfologische processen. Tijdens deze proeven is er kennis gemaakt met de optredende processen die plaatsvinden wanneer er golven op een kleine hoeveelheid zandsuppletie op een harde ondergrond komen. Daarnaast zijn deze oriënterende proeven een basis voor de uiteindelijk uit te voeren proeven. Tijdens deze oriënterende proeven zijn bepaalde obstakels en verbeterpunten ondervonden die voor de eindproeven zijn meegenomen, zodat deze zo efficiënt mogelijk konden worden uitgevoerd.

Allereerst zijn er proeven uitgevoerd waarin de helling van de kust werd aangepast. De werkelijke kust heeft een helling van 1:60. Echter, het is door de beschikbare ruimte binnen het Aqualab-RDM niet mogelijk om deze helling aan te houden in de proefopstelling. De vraag tijdens dit onderzoek was, wat het verschil in morfologische processen was bij een helling van 1:30 (schaalfactor 2) en bij een helling 1:15 (schaalfactor 4).

Tijdens de proef werd een suppletie van 10 kilo droog zand in een ovale vorm op de plaat gelegd. De eerste twee proeven werden als bovenwater-suppletie uitgevoerd. De andere twee proeven werden als onderwater suppletie uitgevoerd. Vervolgens werden de golven met het golfschot opgewekt, zodat deze voor 15 minuten op de suppletie neer kwamen. Dit werd gedurende de proef gefilmd en na vijftien minuten werd een foto gemaakt, zodat deze vergeleken kon worden met het de beginpositie. Het overgebleven zand werd weer opgevangen en in de oven gedroogd, zodat dit weer gewogen kon worden om in te zien bij welke omstandigheden meer erosie/ verplaatsing van het zand plaats vond.

In de volgende afbeeldingen is het verschil van de onderwater suppletie met helling 1:30 en helling 1:15 te zien. De gehele uitkomst van de proef is te vinden in BIJLAGE A. Het valt op dat bij de steilere helling meer zand is verplaatst. Uit deze proeven werd geconcludeerd dat het aanpassen van de helling veel invloed heeft op de morfologische processen van de suppletie. Om deze reden wordt er gewerkt met een zo vlak mogelijke helling, deze moet echter nog wel binnen de afmetingen van het Aqualab-RDM passen. De toe te passen minimale helling binnen de modelbak blijkt 1:30 .



Figuur 12 Hellingproef resultaten

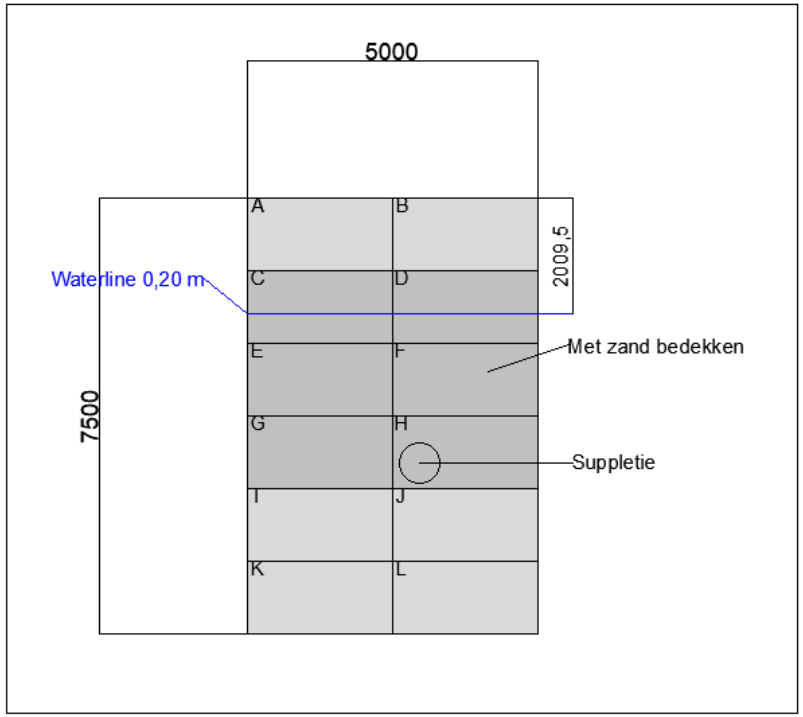
4.2 DIMENSIONERING ONTWERP

Uit de oriënterende proeven is gebleken dat er in het Aqualab-RDM het best gewerkt kan worden met een helling van 1:30. In combinatie met de parameters van de locatie en de schaalmodellen zijn zo de afmetingen van de proefopstelling bepaald.

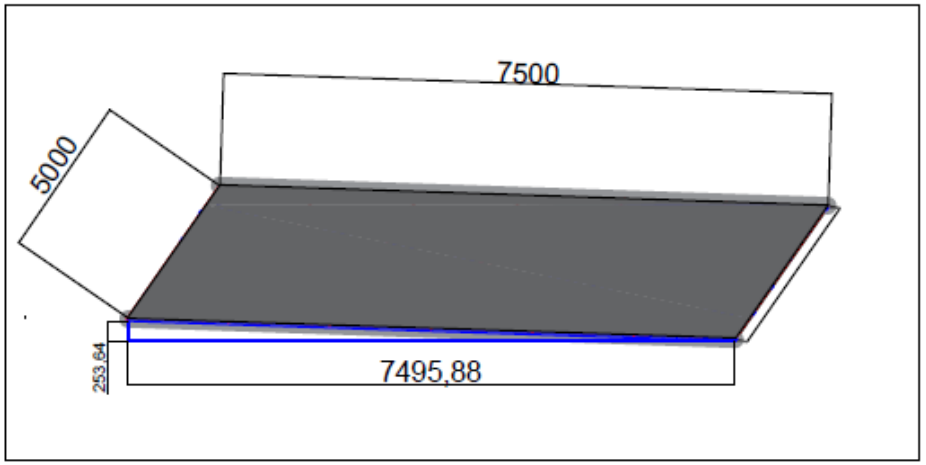
- Voor de proefopstelling is er gekozen een kust ondergrond te maken van hout (betonplex platen) om daar de helling in te verwerken. Deze keuze heeft de voorkeur gekregen ten opzichte van het vol gooien van de modelbak met zand om de kust te kunnen vormen.
- De helling van de proefopstelling is 1:30 en de waterdiepte in het Aqualab-RDM geeft na verschaling een diepte van 0,20 meter. Het is gewenst om circa vijf centimeter hoogte "droge kust" te ontwerpen zodat eventueel de waterstand ook nog kan worden aangepast. Dit geeft dat de lengte van het ontwerp is:

  $$\frac{0{,}20+0{,}05}{1:30} = 7{,}5\ meter$$

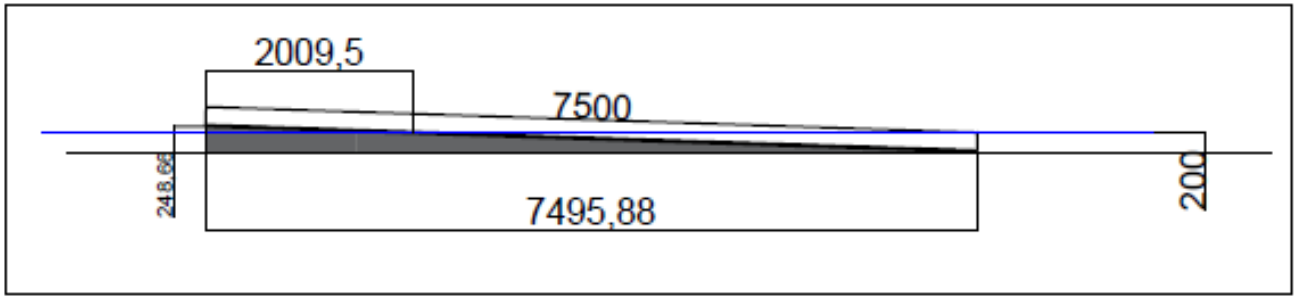
  Aangezien de betonplex platen een standaardafmeting hebben van 2,50 x 1,25 m zijn er minimaal 7 platen achter elkaar nodig om de kust met deze waterdiepte te kunnen nabootsen.
- Voor de breedte van de kust zijn twee planken naast elkaar aangehouden wat een breedte geeft van vijf meter. Deze breedte is aangenomen op een breedte waarbij er duidelijk te meten valt hoever de suppletie zich verplaatst en zodat de constructie nog wel in het Aqualab-RDM past. Belangrijk is dat in deze fase van het onderzoek nog niet wordt gekeken naar de werkelijke afstand dat de suppleties voor Goeree verplaatsen.



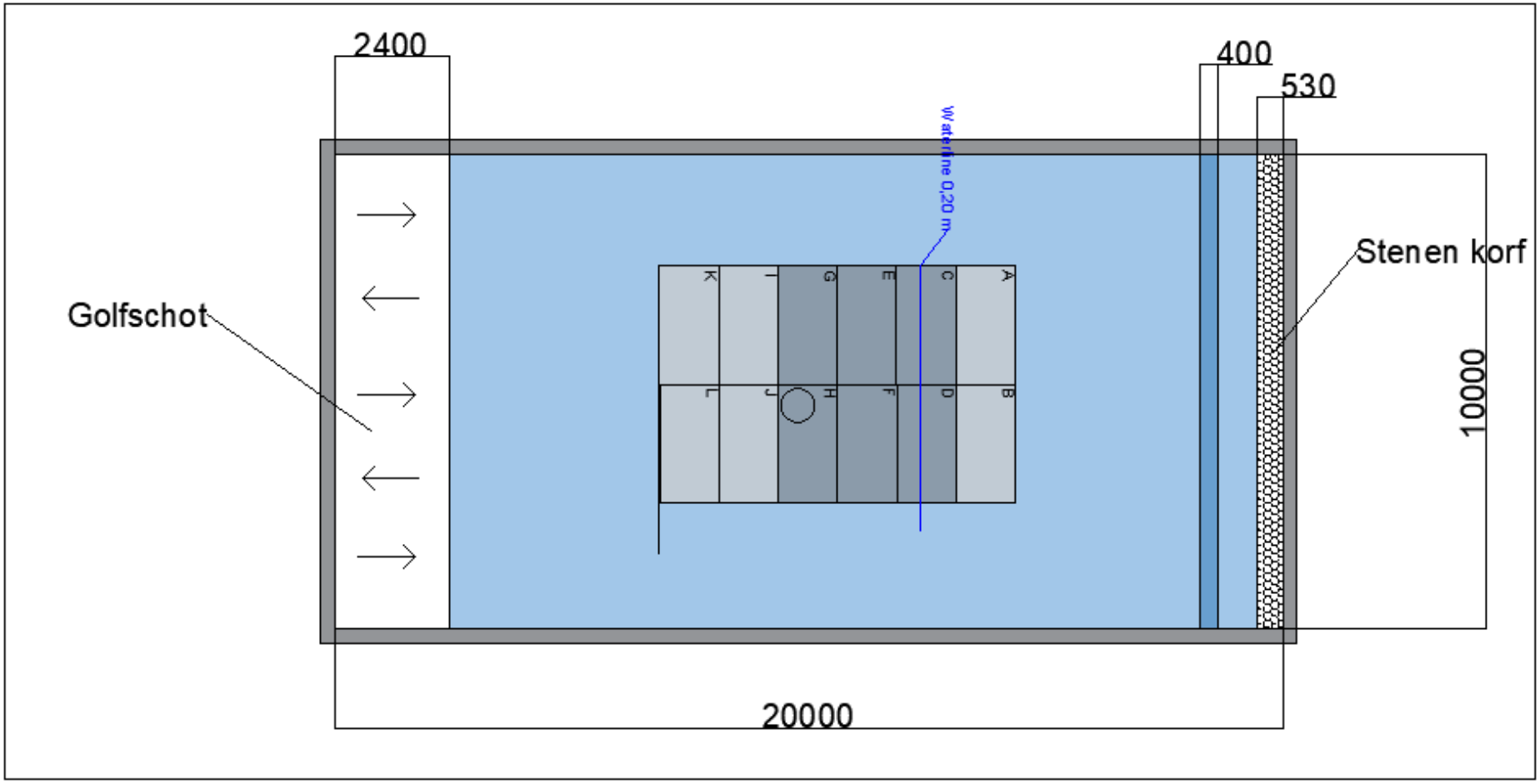
Figuur 13 Bovenaanzicht ontwerp proefstelling (maten in mm)



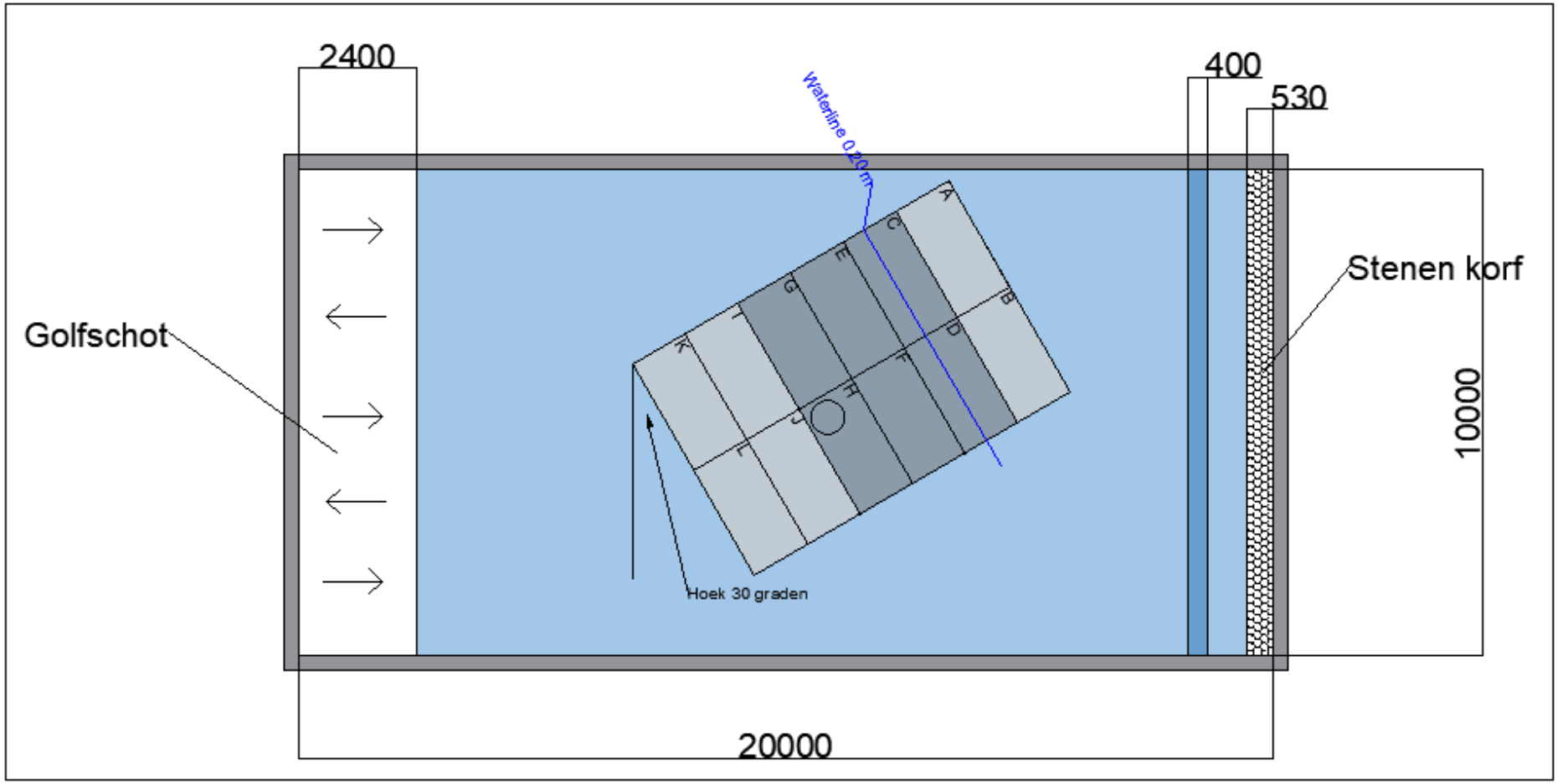
Figuur 14 zij aanzicht ontwerp proefopstelling (maten in mm)



Figuur 15 Doorsnede ontwerp proefopstelling (maten in mm)



Figuur 16 Bovenaanzicht indeling Aqualab-RDM inclusief proefopstelling gedurende 0-proef: Golven recht op suppletie. (maten in mm)



Figuur 17 Bovenaanzicht indeling Aqualab-RDM inclusief proefopstelling gedurende proef 2: golven onder hoek van 30 graden op suppletie. (maten in mm)

5 UITVOERING PROEVEN

5.1 INLEIDING

In de voorgaande hoofdstukken zijn door middel van literatuurstudie, berekeningen en oriënterende proeven verschillende gegevens verzameld om de proeven uit te kunnen voeren. Voor het uitvoeren van de proef werden er keuzes gemaakt welke parameters en kengetallen dominant waren voor de te testen morfologische processen. Deze gemaakte keuzes zijn terug te vinden in de hoofdstukken 2, 3 en 4. In dit hoofdstuk worden de daadwerkelijk uitgevoerde proeven behandeld. Daarbij worden de meetwaarden geanalyseerd en is een beeld geschetst van de morfologische processen van een kleinschalige zandsuppletie binnen het Aqualab-RDM.

Voor de uitvoering van de proeven is het van belang nog een keer te benadrukken wat het doel van de proeven is. Het doel van de proeven is het achterhalen in hoeverre het Aqualab-RDM gebruikt kan worden voor het bepalen van morfologische processen, in dit onderzoek specifiek gericht op kleinschalige zandsuppleties. Deze proeven zijn in dit stadium van het onderzoek puur kwalitatief, mochten er uit de proef significante antwoorden komen, dan is het interessant om een vervolgstudie te doen naar een kwantitatief onderzoek.

5.2 INSTELLINGEN AQUALAB-RDM

Zoals in de voorgaande hoofdstukken genoemd, zijn de te gebruiken waarden bepaald. Samen met deze waarden is de zo genaamde 0-proef ontstaan. De 0-proef is ook wel de start-proef waarbij alle waarden (na verschaling) terug te koppelen zijn aan de gekozen kustlocatie bij de kust van Goeree.

Allereerst zijn er enkele test proeven uitgevoerd om de juiste instelling van het golfschot te vinden en daarbij de brekerslijn te lokaliseren. Aangezien het Aqualab-RDM werkt met een computersysteem dat gekoppeld is aan het golfschot, kan alleen de frequentie en amplitude van het golfschot worden ingesteld. Nadat de juiste waarden voor het golfschot waren gevonden kon de brekerslijn worden bepaald zodat de aan te brengen suppletie op de brekerslijn kan worden aangebracht. De juiste instelling voor het golfschot is bij een waterdiepte van 0,20 meter als volgt:

Amplitude:	0,065	(m)
Frequentie:	0,65	(Hz)

Deze waarden geven daarbij een golfhoogte (H) van 0,10 meter, een golflengte (L) van 2,0 meter en een golfperiode (T) van 1,53 seconden. Dit komt het dichtst bij de te gebruiken modelwaarden uit tabel 2 op bladzijde 16.

5.3 PROEF OMSCHRIJVING

Om de proef uit te kunnen voeren is, zoals in hoofdstuk 4 beschreven, een proefopstelling ontworpen en gemaakt. Deze proefopstelling bestaat uit een grote houten plaat van 7,5 x 5,0 meter, waar een kleinschalige zandsuppletie van 30 kilogram in ronde vorm wordt aangebracht.

De aan te brengen kleinschalige zandsuppletie wordt op de brekerslijn in een ronde vaste vorm aangebracht. Er is hier gekozen om de suppletie aan te brengen op de brekerslijn, omdat dit naar verwachting de meeste morfologische processen zal geven. In de brekerslijn wordt het sediment door de golven losgewoeld en zal naar verwachting het sediment maximaal verplaatsen.

Er zal worden gewerkt met een suppletie hoeveelheid van 30 kilogram. Deze hoeveelheid is niet gebaseerd op een verschaling van een werkelijke suppletie maar puur aangenomen als start voor de proeven met wat er mogelijk is binnen het Aqualab-RDM.

Wanneer de kleinschalige zandsuppletie is aangebracht op de juiste locatie kan het golfschot worden geactiveerd en kunnen de golven circa een uur op de suppletie worden losgelaten. Het is belangrijk dat er voor en na de proef duidelijk beeldmateriaal wordt vastgelegd, waarbij de veranderingen zijn te zien. Dit beeldmateriaal wordt vastgelegd middels het gebruik van een camera die met timelaps een uur lang elke 30 seconden een snapshot boven de opstelling maakt. Daarnaast wordt er middels het gebruik van een laserscanner achteraf een scan van de overgebleven suppletie gemaakt waarmee het volume van de suppletie kan worden bepaald. Naderhand zal er uit de snapshots 6 meetmomenten worden gekozen:

Meetmoment 1:	t= 0 min
Meetmoment 2:	t= 1 min
Meetmoment 3:	t= 15 min
Meetmoment 4:	t= 30 min
Meetmoment 5:	t = 45 min
Meetmoment 6:	t = 60 min

Vervolgens worden er aan de hand van de meetpunten de optredende processen omschreven en waar mogelijk teruggekoppeld aan de werkelijkheid.

5.4 Analyse & waarnemingen

Er zijn uiteindelijk in totaal tien proeven verdeeld over vier dagen uitgevoerd in het Aqualab-RDM. Van deze tien proeven zijn de eerste zes proeven (proef 1 – 6) als 0-proef uitgevoerd, zodat er een duidelijk beeld van de processen werd geschetst. Vervolgens zijn twee proeven (proef 7 – 8) op dezelfde locatie in de brekerszone uitgevoerd, maar dan aan de andere kant van de opstelling (op plaat G in plaats van plaat H). Als laatst zijn er twee proeven (proef 9 – 10) uitgevoerd waarbij de kleinschalige ronde suppletie net boven de brekerszone is geplaatst. Gedurende alle uitgevoerde proeven viel het op dat er al snel een ribbelpatroon op de suppletie vorm nam, dus was er duidelijk transport van het sediment aanwezig. Om een nog duidelijker beeld te krijgen van de te testen morfologische processen is het interessant om als vervolg extra proeven uit te voeren in het Aqualab-RDM met een geoptimaliseerde proefopstelling.

Zoals in paragraaf 5.3 is genoemd, is er na elke proef een scan van de drooggelegde overgebleven suppletie gemaakt. Deze scan zou vervolgens in het programma Autodesk Recap kunnen worden geopend en kunnen hoeveelheden zoals volume, enz. worden bepaald. Van tevoren waren test scans gemaakt om voor te bereiden op hoe de scanner zou werken en of deze het goed functioneerde. Deze test scans waren goed gelukt en duidelijk te analyseren. Vervolgens waren de eerste zes proeven uitgevoerd en de scans gemaakt. Helaas bleek achteraf dat er iets mis was gegaan bij de scans, waardoor ze niet te openen waren op de computers. Als alternatief is er vanaf proef 3 gekozen op het verplaatste zand en het overgebleven zand los van elkaar in een emmer te verzamelen om dit vervolgens te kunnen afwegen. Hierbij is eerst in proef 1 en 3 de porositeit van het zand bepaald aangezien er bij start van de proef altijd 30 kilogram droog zand werd aangebracht.

Van de tien uitgevoerde proeven zijn er twee proeven (proef 5 en 8) gekozen die het beste resultaat gaven. Voor de gehele uitwerking van de proeven wordt verwezen naar Bijlage D & E.

5.4.1 Proef 5

Proef 5 is een van de zes uitgevoerde 0-proef proeven, deze proef is gekozen als representatief, omdat de bewegingen hier duidelijk in beeld zijn gebracht en de proef tijdens de uitvoering geen belemmeringen heeft ondervonden. Belangrijk te melden is dat de bewegingen van proef 1 tot en met 6 allemaal dezelfde transportrichting gaf. Tijdens deze proeven is de suppletie aangelegd op plaat H zoals op de figuur 16 te zien is. De suppletie is hier in de brekerslijn aangebracht.

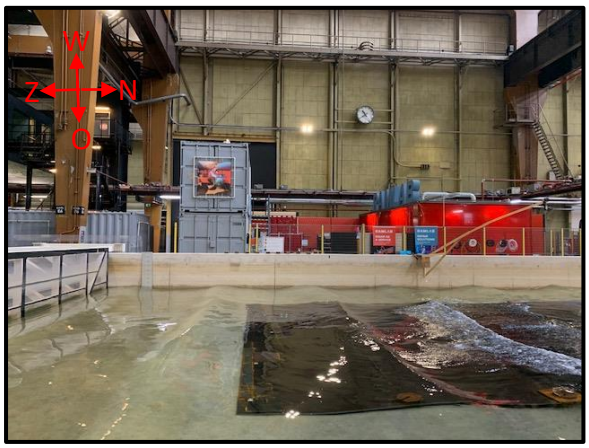
	Modelwaarde	eenheid
Waterdiepte	0,20	m
Golfhoogte	0,10	m
Golflengte	2,00	m
Golfperiode	1,53	s
Suppletie	30,00	kg
Duur proef	1:00	uur
Aanleg suppletie	Plaat H	-

Tabel 3 Waarden proef 5

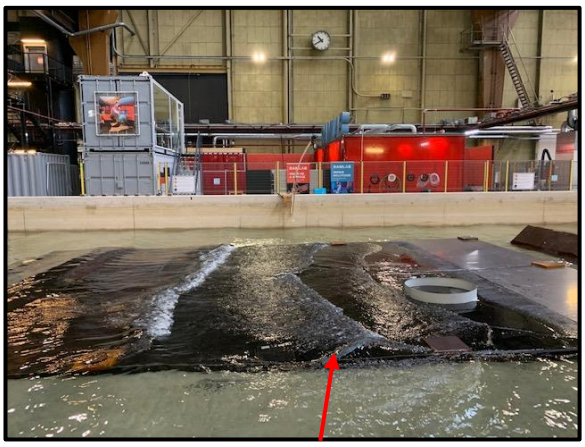
Waarnemingen golven

Het golfschot in het Aqualab-RDM was ingesteld op een frequentie van 0,65 hertz en een amplitude van 0,065 meter. Deze waarden gaven een golfamplitude van 5 centimeter, wat leidde tot een golfhoogte van 10 centimeter.

Deze golven braken op ongeveer zeven meter afstand van het golfschot. Dit punt was op de platen G en H van de proefopstelling. De brekerslijn is bepaald door visuele observaties, daar waar de witte schuimrand op de golven ontstond werd gezien als de brekerslijn. De manier van breken gedurende deze proeven was spilling, dit was visueel te zien en achteraf na berekend met de formule van Battjes[17]. In figuur 18 en 19 zijn twee waarnemingen van de manier van breken te zien waarbij de golf in figuur 18 aan de linker kant voor de opstelling nog onaangetast is en bij figuur 19 de golf door de onderliggende helling breekt.



Figuur 18 Golven en manier van breken Aqualab-RDM

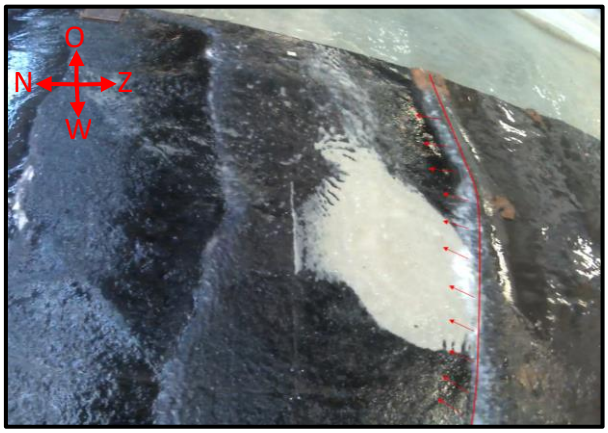


Figuur 19 Manier van breken golven Aqualab-RDM

[17] $\xi = \frac{\tan(\beta)}{\sqrt{H/L_0}} = \frac{\tan(1{,}91)}{\sqrt{0{,}10/((1{,}56*1{,}53^2))}} = 0{,}20 \rightarrow spilling$

Echter, er bleek tijdens de uitvoering van de proeven dat de golven werden verstoord. Ten eerste is in figuur 19 te zien dat rechts onderin (bij de rode pijl) de golf van de buitenkant van de opstelling terug de opstelling op wordt geduwd. Door verandering in snelheid van de golf binnen de waterbak, wordt de richting van de golf gedraaid, ook wel refractie genoemd. Aangezien de golven op de opstelling een weerstand ondervinden door onder anderen de helling, wordt deze golf afgeremd. Terwijl aan de zijkant van de opstelling de golven geen obstakels tegenkomen dus vrijuit kunnen bewegen. Daar waar de golf van de zijkant meer snelheid heeft dan op de proefopstelling ontstaat de buiging.

Ten tweede werden de golven op de proefopstelling zelf ook van richting veranderd en braken niet in een rechte lijn. Dit zou veroorzaakt kunnen zijn door onder andere de aanwezige gewichten en wellicht ongelijkheden in de proefopstelling zelf. Zoals in figuur 20 te zien is, buigen de golven zich na de rij met gewichten lichtelijk naar rechts. Door de diffractie van de golven door het gewicht, wordt het sediment ook lichtelijk in die richting gestuurd.



Figuur 20 Bewegingsproces golven gedurende proef 5

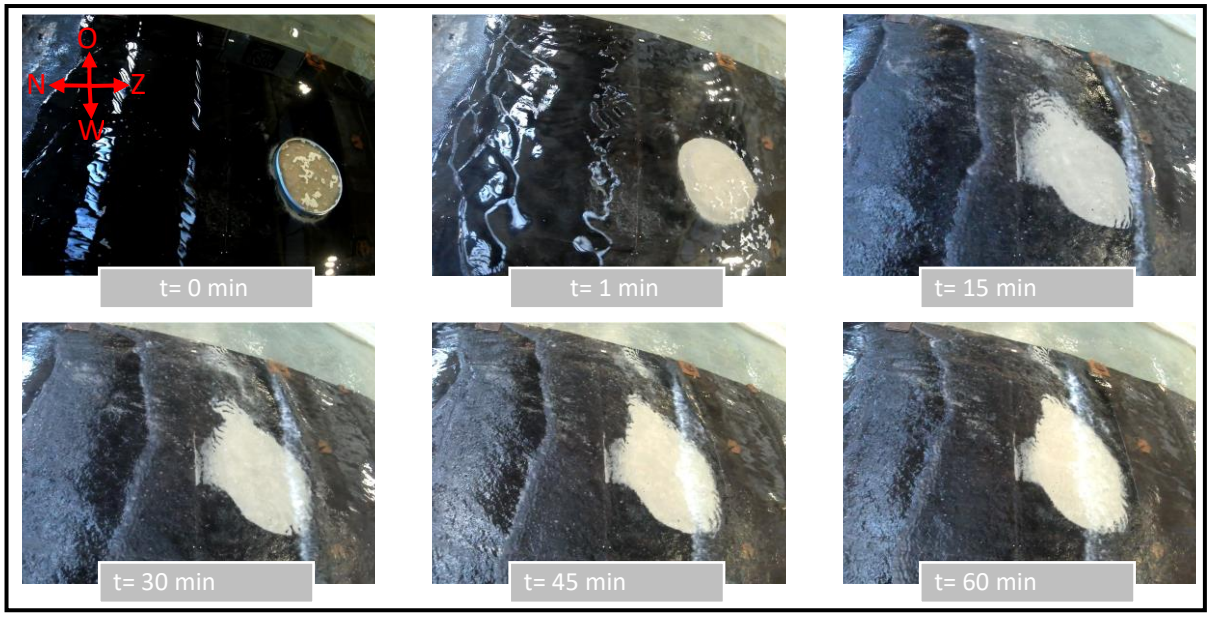
Waarneming Sedimenttransport

Bij de proef werd de ronde suppletie vorm aangelegd op plaat H en werden daarna de golven 1 uur op de golven losgelaten. In de onderstaande figuur 21 zijn de snapshots van de timelaps gemaakt gedurende het uur van proef 5. Zoals bij meetmoment 1 en 2(t=0 min & t=1 min) te zien is, ligt de ronde suppletie nog netjes in zijn vormhouder en blijft hij na verwijdering van de vormhouder in een ronde vorm. Hierbij is te zien dat de platen nog zwart zijn en er enkel onder de vormhouder wat zand onderdoor is gesijpeld. Op meetmoment 3 (t=15 min) valt het op dat de ronde vorm al gelijk is uitgespreid tot een platte pannenkoek waarbij de hoofdrichting van het transport naar de zijkant (Oosten) is. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de eerste golven die op de suppletie neerkwamen zorgden voor de meeste verandering in vorm van de suppletie in een korte tijd. Vervolgens is er op de volgende meetpunten te zien dat het sedimenttransport zich per 15 minuten steeds meer richting het oosten van de opstelling plaatsvindt.

Het optredende proces, waarbij het zand niet alleen naar achteren, maar ook naar de zijkant wordt verplaatst, is een gewenst proces. Wanneer de suppletie enkel in de verticale richting over de kust beweegt, wordt de kust niet gevoed met zand waar nodig. Door het optredende proces van verplaatsing in zowel verticale als horizontale richting zal het zand zich bewegen langs de kust en blijven hangen waar nodig.

Nadat de proef was uitgevoerd, was de waterstand weer verlaagd zodat de suppletie weer volledig droog kwam te liggen. Hier is het zand uit de officiële ronde vorm en het verplaatste zand apart van elkaar verzameld en opnieuw afgewogen. Door uit enkele proeven de porositeit te berekenen, kon

het verschil in nat en droog zand in gewicht worden bepaald. Uit deze proeven (1 t/m 6) bleek dat er gemiddeld na een uur 14,5 kilogram zand nog in de oorspronkelijke ronde vorm lag en er gemiddeld 13,3 kilogram zand was verplaatst. Daarbij kwam een verlies van zo'n 2,2 kilogram zand wat van de opstelling af was gevallen of tijdens het verzamelen achter bleef. Dat houdt in dat binnen een uur ongeveer 48% van de suppletie bleef liggen en zeker 44% van de suppletie is verplaatst.



Figuur 21 Overzicht sedimenttransport proef 5

5.4.2 Proef 8

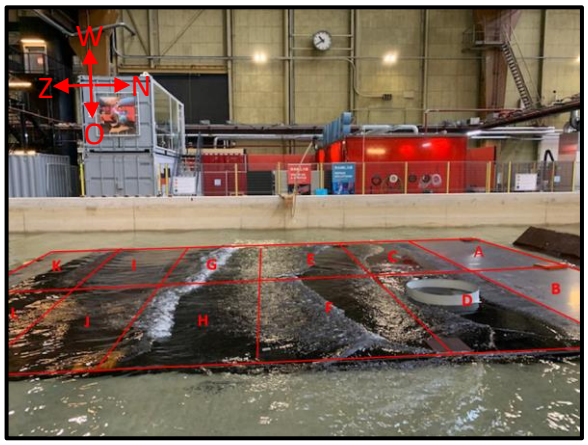
Proef 8 representeert de proeven 7 en 8. Tijdens deze proeven is de suppletie wederom in de brekerslijn aangelegd. Aangezien, zoals bij proef 5 omschreven, het sedimenttransport daar steeds richting het oosten verplaatste, zijn de proeven 7 & 8 uitgevoerd om te onderzoeken of er bij een suppletie aangelegd op plaat G dezelfde processen zou tonen. Deze proef is verder uitgevoerd met alle waarden uit de 0-proef:

	Modelwaarde	Eenheid
Waterdiepte	0,20	m
Golfhoogte	0,10	m
Golflengte	2,00	m
Golfperiode	1,53	s
Suppletie	30,00	kg
Duur proef	1:01	uur
Aanleg suppletie	Plaat G	-

Tabel 4 Modelwaarde proef 8

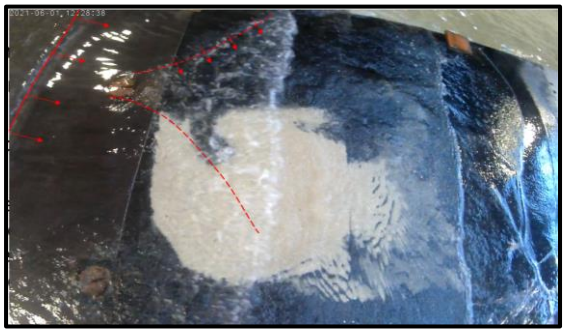
Waarneming golven

Zoals in bovenstaand alinea is genoemd, is de suppletie weer in de brekerslijn geplaatst. Op naast staande figuur is te zien dat de golven wederom breken (de witte rand) op de platen G en H.

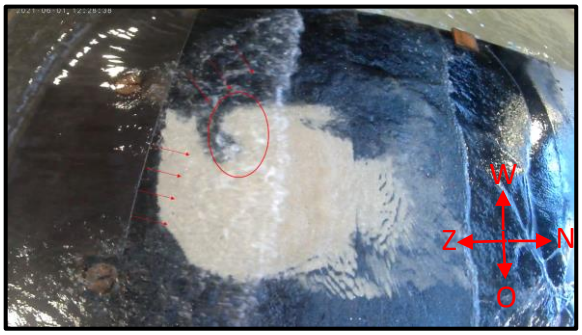


Figuur 22 Breken van golven op plaat G & H

Ook bij de proeven 7 en 8 hebben de gewichten veel invloed op het proces van de golven. Door de voorliggende rij met gewichten wordt de richting van de golven gedraaid zoals aangegeven in figuur 23 en 24. De golven komen in eerste instantie recht op de suppletie af, maar door het gewicht in het midden, wordt een deel van de golf tegen gehouden en ontstond diffractie waardoor de golf richting het oosten werd gedraaid.



Figuur 23 Verandering golfrichting door gewichten



Figuur 24 plek waar verschillende golfrichtingen samen komen

Waarneming sedimenttransport

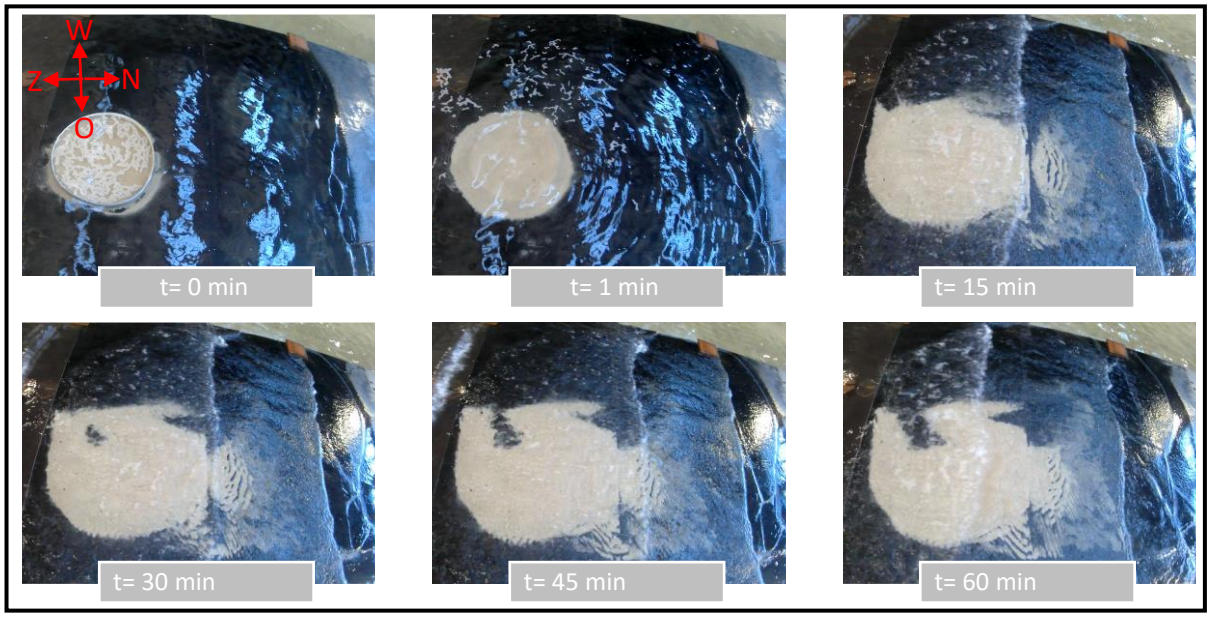
Zoals eerder genoemd is proef 8 uitgevoerd om het morfologisch proces van de suppletie te vergelijken met die van proef 1 tot en met 6. In eerste instantie werd verwacht dat deze suppletie hetzelfde zou doen als de voorgaande proeven of precies het tegenovergestelde (sedimenttransport naar het westen).

Ook hier is in figuur 25 het proces per 15 minuten weergegeven. Zoals bij meetmoment 1 en 2 (t=0 en t=1 min) is te zien, is ook hier het sediment nog in zijn ronde vorm aanwezig. Op meetmoment 3 (t=15) is wederom te zien dat de ronde vorm is uitgeslagen tot een platte pannenkoek vorm. Op meetmomenten 4, 5 en 6 viel het op dat door de beschreven diffractie uit bovenstaande paragraaf ervoor zorgt dat er een gat in de suppletie is ontstaan.

Opvallend is het feit dat het sedimenttransport gedurende proef 8 lichtelijk naar het Oosten is, zoals bij de proeven 1 tot en met 6 maar het hoofdtransport is echter richting het Noorden, ook wel *onshore* transport genoemd. Er is te zien dat het sediment zich voornamelijk uitwaaiert om de startsuppletie heen in plaats van verplaatsing een duidelijke transport richting. Dit proces is in de werkelijkheid niet geheel gewenst, omdat een aangebrachte suppletie zich dan niet over de kust verspreidt naar waar de zandhonger is.

Ook in deze proef is het overgebleven en verplaatste zand verzameld en afgewogen. Zoals op de figuren al te zien is, is er bij deze proeven beduidend minder sediment in de suppletievorm zelf gebleven. Tijdens proef 7 en 8 bleek er na een uur gemiddeld 8,7 kilogram zand in de huidige suppletie vorm achtergebleven terwijl er gemiddeld 18,8 kilogram sediment was verplaatst. Hier

werd een gemiddelde van 2,5 kilogram zand verloren. Kortom, er kan worden gezegd dat bij proef 7 en 8 gemiddeld 29% van de suppletie in de huidige ronde vorm is blijven liggen en er 63% sediment is verplaatst.

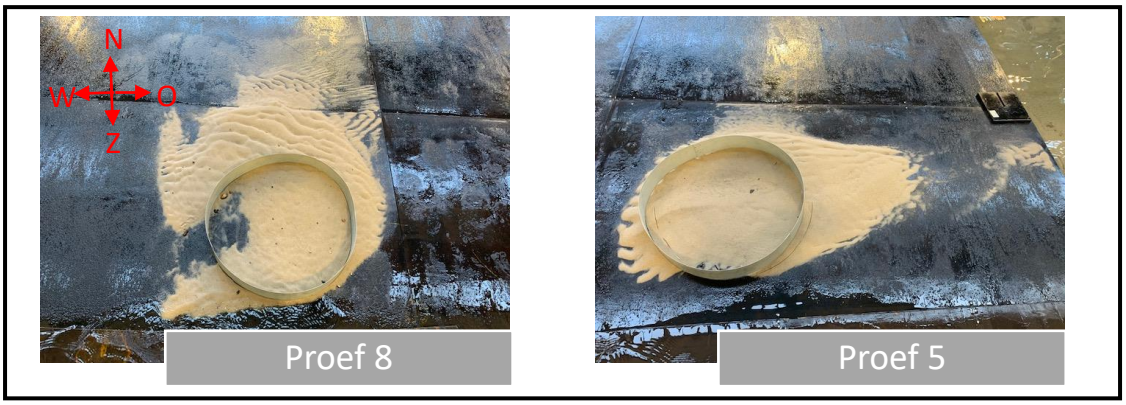


Figuur 25 Overzicht sedimenttransport proef 8

5.4.3 Vergelijking eindresultaat proef 5 en proef 8

Ter vergelijking van de proeven 5 en 8 zijn de eindresultaten in onderstaande afbeelding naast elkaar gelegd. De afbeeldingen zijn naast elkaar gelegd zodat er een duidelijk beeld wordt geschetst wat het verschil in transport tijdens de proeven was. Hoewel beide suppleties in de brekerslijn lagen, is er een duidelijk verschil in transport te zien. Hoe dit verschil is ontstaan, zou door meerdere aspecten kunnen komen:

- De proefopstelling lag niet waterpas. Of dit tijdens de opbouw van de opstelling is gebeurd of dat een deel van de opstelling toch door het water werd opgetild is niet bewezen. Het zou wel een antwoord geven op de vraag waarom het transport op beide locaties niet hetzelfde toonde.
- De proefopstelling lag niet volledig recht voor het golfschot waardoor de golven met een lichte invalshoek op de suppletie kwam. Dit is minder waarschijnlijk aangezien proef 8 dan ook een groter oostelijk transport zou moeten tonen.
- Het gewicht in het midden van de plaat onder de suppletie lag niet op dezelfde plek voor de suppletie.



Figuur 26 Vergelijking eindresultaat proeven 5 en 8

5.5 MEETWAARDEN IN VERGELIJKING MET LITERATUUR

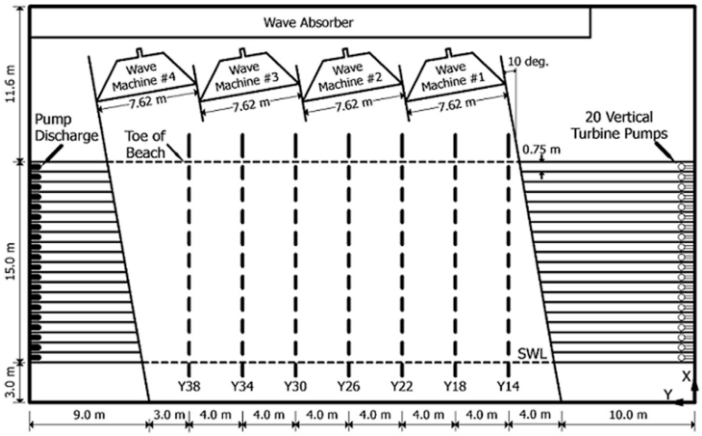
Na uitvoering en analysering van de optredende processen tijdens de proeven is het cruciaal om deze waarnemingen te vergelijken met voorgaande proeven en andere literatuur. Binnen de morfologie zijn veel verschillende soorten onderzoeken uitgevoerd. Kijkend naar het huidige onderzoek waarbij er een bepaalde hoeveelheid zand werd geplaatst en de verplaatsingsprocessen werden bestudeerd, is er één onderzoek wat opviel als vergelijkingsmateriaal: “Nearshore placement of a sand dredged mound” - (Smith, D'Alessandro, Tomasicchio, & Gailani, 2017).

5.5.1 Vergelijking voorgaand laboratorium proef

Het onderzoek van onder andere E. Smith gaat uit naar het correct plaatsen van een hoeveelheid gebaggerd zand. Dit onderzoek is tot stand gekomen omdat er simpelweg te weinig kennis is over de verplaatsing van een suppletie onder normale omstandigheden. Het landwaartse migreren van zand en kustherstel is een geleidelijk proces en vindt alleen plaats bij perioden van lage golfsteilheden en de erosiemodellen zijn slecht geschikt voor de lange termijn simulaties (Smith, D'Alessandro, Tomasicchio, & Gailani, 2017). De focus van dit onderzoek ligt op het onderzoeken van de migratie als gevolg van golven en stroming van een nabij de kust gelegen hoeveelheid gebaggerd materiaal door middel van laboratoriumobservaties en data analyses. Het gebruikte laboratorium bevindt zich in de U.S. Army Engineer Research and Development Centre’s (ERDC), Large-scale Sediment Transport Facility (LSTF). (Smith, D'Alessandro, Tomasicchio, & Gailani, 2017)

Proefgegevens LSTF

Het LSTF bestaat uit een 30 meter breed, 40 meter lang en 1,4 meter diepe bassin en heeft daarbij vier golfschotten van 7,62 meter per stuk die onder een hoek van 0 tot 20 graden kunnen worden ingesteld (zie figuur 27). Gedurende de proeven is een kust gemaakt die volledig uit zand bestond. Hiervoor is zo’n 150 m³ zand met een D50 van 0,15 mm geplaatst waarbij een helling van ongeveer 1:30 gold. Als geplaatste suppletie is gebruik gemaakt van hetzelfde soort zand (D50=0,15 mm) en is geplaatst in een parabolische vorm met een diameter van 3 meter en een hoogte van 0,10 meter, dit gaf een volume van 0,32 m³ zand.
De suppletie is aangelegd op een waterdiepte van 0,217 meter. De gehele proef is 10 uur uitgevoerd met meetpunten op t=1, 3, 5, 7.5 en 10 uur.



Figuur 27 LSTF plattegrond overzicht (Smith, D'Alessandro, Tomasicchio, & Gailani, 2017)

De hydrodynamische omstandigheden waren ingesteld als in de onderstaande tabel gegeven (Smith, D'Alessandro, Tomasicchio, & Gailani, 2017):

	Eenheid	Symbool	Werkelijke waarde	Schaal waarde	Model waarde
Waterdiepte	m	h	18,0	20	0,9
Golfhoogte diep water	m	H_0	3,2	20	0,16
Golfhoogte breken	m	H_b	3,6	20	0,18
Golfperiode	s	T	6,7	$\sqrt{20}$	1,5
Mediane korreldiameter	µm	D_{50}	540	3,6	150

Tabel 5 Waarden proef LSTF USA

Observaties proeven LSTF ten opzichte van proeven Aqualab-RDM
Er kan gezegd worden dat de LSTF (50x30m) ongeveer 5 keer zo breed en twee keer zo lang is dan het Aqualab-RDM(10x20m). Genoemd moet worden dat bij de LSTF proeven de mogelijkheid groter was tot het gebruik van benodigde materialen en het lab zelf beter geschikt is dan dat van het Aqualab-RDM waardoor de observaties van de processen een stuk uitgebreider en professioneler zijn. Onderstaand zijn wat observaties in vergelijking tussen deze twee proeven opgesomd:

- Bij de LSTF proeven braken de golven op gemiddeld 12 meter afstand van de kustlijn en hadden daarbij ook een spilling brekerstype van de golven. Bij het Aqualab-RDM lag de brekerslijn op ongeveer 7 meter van het golfschot.
- Wat opviel tijdens de test bij zowel de LSTF als bij het Aqualab-RDM, was dat bij het eerste echte meetmoment van beide proeven de hoogte van de suppletie sterk was afgenomen.
- Daarnaast viel het op dat beide proeven begonnen met een platte bodem, maar er gelijk ribbels ontstonden nadat de golven op de suppletie kwamen.
- In het eerste uur van de proeven bij LSFT was de hoeveelheid verplaatst zand een stuk groter dan het gemeten aangegroeide zand na 1 uur. Hoe langer de golven aan stonden hoe groter de aangroeisnelheid van de kust werd. In de proeven van het Aqualab-RDM zijn de proeven maar 1 uur in totaal uitgevoerd. In dit uur was vooral veel verplaatsing van het zand aanwezig. Wellicht zou het een idee zijn om de golven langer dan 1 uur aan te zetten om te onderzoeken of ook hier kustaangroei zou optreden.
- Een groot verschil tussen de twee proeven is dat bij het LSTF onderzoek een ondergrond volledig van zand is gemaakt, waardoor ook dit zand zich kon verplaatsen en mee kon helpen aan de kust aangroei. Bij het huidige onderzoek in het Aqualab is de helling van de kust nagebootst met een houten ondervloer, maar dit geeft niet dezelfde wrijfweerstand enz.
- Daarnaast is er bij de LSTF proef in het lab de mogelijkheid ook werkelijke stroming op te wekken waardoor losgewoeld sediment door golven makkelijker verplaatst.

5.6 VERVOLG PROEVEN

Nu er een beeld is geschetst in de transport richtingen en de waarschijnlijke oorzaken hiervoor is het interessant om de proef te optimaliseren en het onderzoek voort te zetten. Het optimaliseren van de proef zou op twee verschillende vlakken kunnen gebeuren:

1. Optimalisatie van de proefopstelling;
2. Optimalisatie van de proefuitvoering.

Vervolgens is het interessant op proeven uit te voeren op de volgende onderdelen zodat deze kunnen worden vergeleken met de huidige uitgevoerde proeven:

1. Na optimalisatie van de proefopstelling is het wellicht interessant om exact dezelfde proef uit te voeren als proef 1 tot en met 6 ter vergelijking van de uitkomst, is de hoofdrichting van het sedimenttransport dan nog steeds (noord)-oostelijk?
2. Om nog dichter naar de werkelijkheid te komen zouden de proeven uitgevoerd moeten worden met een werkelijke invalshoek van de golven. Zoals in figuur 17 is geschetst zou de opstelling onder een hoek van 30 graden gedraaid kunnen worden om de werkelijke transport richting na te bootsen.
3. Het aanbrengen van de suppletie boven, onder of ín de brekerslijn van de golven zou verder onderzocht moeten worden om een correct antwoord te geven op de vraag op welke locatie de suppletie het best kan worden aangebracht.

Ten slotte is het natuurlijk het doel om van het kwalitatieve onderzoek in te gaan op de kwantitatieve onderdelen. Om naar het bepalen van hoeveelheden van sedimenttransport over te stappen, is het belangrijk om naar de transportformules te kijken. Er zijn verschillende formules om het sedimenttransport te bepalen (Liu, 2001).

5.6.1 Optimaliseren van de proefopstelling

Tijdens het uitvoeren van de proeven kwamen enkele belemmeringen van de proefopstelling naar voren. Deze belemmeringen zouden moeten worden verholpen, mochten de proeven verder onderzocht willen worden. In het onderstaande stuk zullen de belemmeringen worden opgesomd:

- Het opdrijfvermogen van de proefopstelling.
  Bij verhoging van de waterstand in het Aqualab-RDM wilde de opstelling gelijk opdrijven. Hiervoor moet op de opstelling zo'n 500 kilogram aan gewichten worden geplaatst. Bij de optimalisering moeten deze zo veel mogelijk in of onder de opstelling worden geplaatst zodat deze het golf- en stroomproces niet verstoren.
- Het niet correct aansluiten van de naden waardoor er zandverlies optrad tijdens de proeven.
  Tijdens het demonteren van de opstelling bleek dat er redelijk wat sediment tussen de naden van de platen door was gevallen. Vooral bij proeven 9 en 10 heeft dit ervoor gezorgd dat de proeven hierdoor niet kwalitatief waardig zijn uitgevoerd. Ter optimalisatie zouden de platen met een waterdichte oplossing met elkaar verbonden moeten zijn, denk hierbij aan bijv. kit of waterdicht tape.

5.6.2 Optimalisering van de proefuitvoering

Naast het feit dat er nog meer proeven uitgevoerd kunnen worden, waarbij wordt gevarieerd in waarden, zijn er gedurende de uitvoering en de analyse van de optredende processen ook dingen opgevallen die anders aangepakt hadden kunnen worden. Onderstaand zijn eerst de optimalisatie punten gegeven voor punten die zijn opgevallen en beter hadden gekund:

- De laserscanner controleren
  Na elke proef controleren of de laserscanner juist heeft gewerkt en een correcte scan heeft gemaakt. Aangezien er veel winst uit gehaald zou kunnen worden door de suppletie te kunnen scannen en daarna volume berekeningen ermee te maken om vervolgens hoogtelijn kaarten te kunnen schetsen is het van belang dat er na elke proef goed en werkzaam materiaal is.
- Ervoor zorgen dat de opstelling recht blijft liggen, dat wil zeggen, met maar één hellingsrichting.
  Tijdens de proeven moet er worden gemeten en worden aangetoond dat de hele opstelling waterpas ligt om de juiste metingen te kunnen uitvoeren.
- De kwaliteit van meetapparatuur verbeteren
  De uitgevoerde proeven waren budget-wijs gestuurd, dat wil zeggen dat er enkele keuze zijn gemaakt aan de hand van kosten. Voor betere analyse van de processen zou survey materiaal voor onder anderen bathymetrie en hoogtelijnen kaarten een toevoeging zijn.

5.6.3 Transportformules

Samen met de transportformules zouden er uitspraken kunnen worden gedaan over de tijd waarin de suppletie zal veranderen, dit is ook wel de morfologische tijdschaal. Voor sediment transport kan worden gesteld dat er drie verschillende soorten transport zijn (Liu, 2001):

1. Spoeltransport (Eng. *Wash load*)
2. Bodemtransport (Eng. *Bed-load*)
3. Zwevend transport (Eng. *Suspended load*)

Het totale transport wordt over het algemeen in twee delen gesplitst, het bodemtransport en het zwevend transport. Deze twee worden los van elkaar gehaald aangezien het bodemtransport afhankelijk is van de effectieve bodemschuifspanning en het zwevend transport is gerelateerd aan de totale schuifspanning (Liu, 2001).

In dit onderzoek zal vooral worden gekeken naar het bodemtransport. Dit transport is bijna altijd in contact met de bodem en is daarom in relatie met de effectieve schuifspanning over de bodem (τ_b).

Daarbij hebben verschillende deskundigen de volgende formules voor het bodemtransport opgesteld:

Kalinkse-Frijlink

$$q_B = 2\,D50\,\sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}}\,\exp\left(\frac{-0{,}27\,(s-1)D50\,\rho g}{\tau_b{}'}\right) \qquad [5.1]$$

Meyer-Peter (Bagnold)

$$q_B = 8 * \left(\theta' - \theta_c\right)^{1{,}5} = 8 * \left(\left(\frac{\frac{\tau_b}{\rho}}{(s-1)gd}\right) - \theta_c\right)^{1{,}5} \qquad [5.2]$$

Einstein-Brown

$$q_B = 40\,K\,(\theta')^3 = 40 * \left(\sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\,v^2}{(s-1)g\,(D50)^3}} - \sqrt{\frac{36\,v^2}{(s-1)g\,(D50)^3}}\right) * (\theta')^3 \qquad [5.3]$$

Wat opvalt bij de transportformules van Meyer-Peter en Einstein-Brown is de terugkomende Shields-parameter. Beide formules laten zien dat het transport afhankelijk is van de Shields-parameter tot een bepaalde macht. Het blijkt dan ook maar weer dat bij verschaling de discussie over welke parameters dominant zijn steeds weer naar voren komt. Bij het ondervinden van transporthoeveelheden is het toch belangrijk dat de Shields-parameter zo correct mogelijk verschaald wordt. Dat betekent dat voor het vervolg onderzoek de discussie over of de golfbrekersparameter of de Shields-parameter de dominante parameter is, die het proces het meest beheerst weer teruggehaald moet worden.

5.6.4 Kwantitatief onderzoek

Het uiteindelijke doel van het onderzoek ligt bij het bepalen van de kwantitatieve processen die optreden. In de kwantitatieve onderzoeken wordt gebruik gemaakt van numeriek modellen en software zoals Delft3D.

Delft3D is een geïntegreerd software systeem ontwikkeld door Deltares en is geschikt voor het simuleren van tweedimensionale en driedimensionale interacties tussen de sedimenttransporten, stromingen, golven, waterkwaliteit, ecologie en morfologische processen. (Deltares, 2021)

6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

6.1 CONCLUSIES

Het doel van dit onderzoek was het bepalen of het Aqualab-RDM gebruikt kan worden om morfologische processen kwalitatief te bepalen bij het aanleggen van kleinschalige zandsuppleties. Om hier een antwoord op te kunnen geven zijn er vijf deelvragen opgesteld: 1) Welke locatie aan de Nederlandse kust wordt in de proef gemodelleerd en wat zijn de te gebruiken parameters? 2) Wat zijn de dominante schaalwaarden? 3) Welke schaalwaarde wordt gebruikt en hoe groot is de schaalfactor die gebruikt zal worden in het Aqualab-RDM? 4) Op welke locatie/afstand van het water worden de kleinschalige zandsuppleties gepositioneerd? 5) Zijn de gevonden (tussen)waarden van de proeven in het lab te vergelijken met de werkelijkheid en de literatuur? In dit hoofdstuk worden deze vragen beantwoord door middel van het samenvatten van de gevonden gegevens in de voorgaande hoofdstukken.

Om het onderzoek te kunnen starten was het ten eerste van belang om een locatie aan de Nederlandse kust te zoeken waar morfologische processen plaatsvinden, maar de oorzaak hiervan ook te achterhalen was. Het onderzoek wordt uitgevoerd voor het Centre of Practice voor Hoogwaterveiligheid. Aangezien het COP meerdere onderzoeken in de kuststrook van het eiland Goeree-Overflakkee heeft lopen was er veel interesse in deze locatie. De kust van Goeree was daarbij dan ook erg geschikt voor het onderzoeken van morfologische processen aangezien hier structurele erosie aanwezig is. Door middel van analyse van de optredende weersomstandigheden en literatuurstudies naar het gebied zijn de gemiddelde parameters verzameld die in het Aqualab-RDM onder schaalfactoren konden worden nagebootst.

Om deze gevonden parameters te verschalen was het vervolgens van belang om de dominante kengetallen te bepalen. De voorkeur is om alle dimensieloze kengetallen na verschalen gelijk aan 1 te houden maar de praktijk leert dat ook binnen het Aqualab-RDM het niet mogelijk bleek om alle fysische processen met de daarbij behorende dimensieloze kengetallen een schaalfactor gelijk aan 1 te geven. Hierom moest er een keuze gemaakt worden welke kengetallen dominant waren (Froude, Reynolds, ξ-parameter, Shields, korreldiameter). Allereerst moest er een keuze worden gemaakt welk kengetal dominant werd gesteld met betrekking tot de stroming. De keuze om Froude dominant te stellen en Reynolds te laten vallen was snel gemaakt aangezien het bij de proeven ging om een snelle stroomsnelheid.

Ten tweede was ervoor gekozen om de golfbrekersparameter (Xi) dominant te stellen aangezien het breken van een golf het sediment in eerste instantie loswoelt waardoor het sediment transport begint. Omdat het Aqualab-RDM vooral golven nabootst was de manier van breken dominant gesteld. Echter viel het al snel op dat door deze twee eerste eisen ($n_{Froude} = 1$ & $n_{\xi} = 1$) het toepassen van een vertrokken schaal binnen de beperkingen van het Aqualab-RDM niet zou werken. Bij een vertrokken schaal zou binnen het Aqualab-RDM bij een waterdiepte van 0,20 meter een golfhoogte van 0,40 m gebruikt moeten worden. Het Aqualab-RDM kan daarentegen golven opwekken tot zo'n 0,15 meter (afhankelijk van de aanwezige waterdiepte) dus viel deze optie af.

Ten derde was de voorkeur om de Shields-parameter na verschaling ook gelijk aan 1 te houden ($n_{Shields} = 1$) . De Shields-parameter bleek misschien nog wel belangrijker voor het sedimenttransport aangezien deze bepaalt of en wanneer de sedimentdeeltjes gaan bewegen. Helaas bleek in verband met onder andere het aanwezige zand van het Aqualab-RDM dat het sediment niet kon worden verschaald zoals zou moeten. Volgens de theorie zou Shields-schaal dus (zo dicht

mogelijk) gelijk aan 1 moeten zijn en dus ook dominant, maar daar is met de proeven niet mee gewerkt. Hier is tijdens de proeven besloten dat de Shields waarde in ieder geval groter moest zijn dan de kritische Shields-waarde die het moment van beweging aangeeft.

Op basis van de mogelijkheden van het Aqualab-RDM en de schaalvoorwaarden van Froude en de golfbrekersparameter is een schaalfactor van 12 vastgesteld voor de gevonden parameters van de kust voor Goeree, in onderstaande tabel zijn de gebruikte waardes nogmaals opgesomd:

	Eenheid	Symbool	Werkelijke waarde	Schaal waarde	Model waarde
Helling kust	-	m	1:30	1	1:30
Waterdiepte	m	h	2,4	12	0,20
Horizontale lengte	m	l	90	12	7,5
Golfhoogte breken	m	H_b	1,3	12	0,108
Golfhoogte diep water	m	H_0	1,27	12	0,106
Golflengte breken	m	L_b	24,9	12	2,08
Golflengte diep water	m	L_0	47,2	12	3,93
Golfperiode	s	T	5,5	$\sqrt{12}$	1,59
Stroomsnelheid	m/s	u	0,70	$\sqrt{12}$	0,20
Gravitatie versnelling	m/s²	g	9,81	1	9,81
Dichtheid water	kg/m^3	ρ_w	1025	1,025	1000
Mediane korreldiameter	m	D_{50}	$326 * 10^{-6}$	0,93	$352 * 10^{-6}$

Tabel 6 te gebruiken waarden proeven zoals tabel 2

Met deze modelwaarden is een proefopstelling ontworpen die in het Aqualab gemonteerd is zodat er een kleinschalige suppletie op aangelegd kon worden. De volgende opkomende vraag was waar de suppletie aangelegd moest worden zodat de meeste morfologische processen op zouden treden. Hier is gekozen voor het aanleggen van de suppletie ín de brekerszone van de golven. Deze keuze is tot stand gekomen uit de verwachting dat in de brekerslijn van de golven de meeste processen van het sediment op zouden treden omdat het sediment hier wordt losgewoeld.

Uiteindelijk zijn er in totaal tien proeven uitgevoerd, waarvan acht proeven de suppletie in de brekerslijn was aangelegd en twee proeven de suppletie net boven de brekerslijn had. Daaropvolgend konden de waarnemingen van de uitgevoerde proeven worden geanalyseerd en werden deze vergeleken met de literatuur en werkelijkheid. Doordat de uitgevoerde proeven alleen nog maar een beeld gaven in de verplaatsingsrichting van het sediment was het lastig dit al te vergelijken met de werkelijkheid. Om een waardevol antwoord te geven op de vraag of het mogelijk is de waarnemingen terug te koppelen aan de werkelijkheid zouden de proeven ten eerste langer uitgevoerd moeten worden zoals bij de vergelijkingsproef in het US Army lab. Daarnaast zouden er hoogtelijnkaarten moeten worden gemaakt. Tijdens deze proeven zijn er met een laserscan scans gemaakt, maar deze bleken helaas niet waardevol voor het bepalen van hoeveelheden.

Al met al kan er geconcludeerd worden dat het beproeven van morfologische processen binnen het Aqualab-RDM zeker interessant is, maar helaas wel beperkingen met zich mee brengt. Denk hierbij aan beperkingen als ruimte, maar ook als geld. De uitgevoerde proeven zijn prijsgericht uitgevoerd, waardoor de kwalitatieve waarde van de uitkomst is gedaald. Om een volledig antwoord te geven op de vraag naar de mogelijkheid van het gebruik van het Aqualab-RDM zouden er vervolgproeven met optimalisaties uitgevoerd moeten worden zodat er uiteindelijk naar transporthoeveelheden en numerieke modellen een koppeling gemaakt zou kunnen worden.

6.2 AANBEVELINGEN

Tot slot worden er om het onderzoek voort te kunnen zetten enkele aanbevelingen gegeven:

Schaalwaarden

Voor een vervolg onderzoek wordt aanbevolen om de schaalfactor van de Shields-parameter (zo dicht mogelijk) gelijk aan 1 te houden. Met het oog op het uiteindelijke doel om met dit onderzoek een koppeling te maken met onder andere numerieke modellen is het van belang dat de Shields-parameter dominant wordt gesteld zodat de transporthoeveelheden bepaald kunnen worden.

Proefopstelling

Voor optimalisatie van de proefuitvoering zou de proefopstelling verbeterd moeten worden op de volgende punten:

- Het verzwaren van de proefopstelling.
  Tijdens het uitvoeren van de proeven bleek dat de opstelling steeds opdreef, ook na het verzwaren van de opstelling aan de hand van een berekening van opdrijven bleven de voorste vier platen opdrijven. Om dit probleem op te lossen is er ongeveer 500 kg extra staal om de opstelling gelegd. Dit kon helaas alleen aan de bovenkant van de opstelling. Ter optimalisering van de proefopstelling wordt aanbevolen deze gewichten onder de opstelling te plaatsen aangezien de gewichten nu voor veel verstoring van het proces zorgden.
- Het correct aansluiten van de platen van de proefopstelling.
  De naden tussen de platen van de proefopstelling zorgden ervoor dat het zand er doorheen kon vallen waardoor dit heeft geleid tot sedimentverliezen en verstoringen van de morfologische processen.

Uitvoering proef

Ook voor de uitvoering van de proef zijn enkele aanbevelingen opgesteld:

- Het verlengen van de tijdsduur van de proeven:
  Om een beter beeld van de optredende processen te krijgen wordt er aanbevolen de proeven langer uit te voeren zodat de uitgevoerde proeven beter vergeleken kunnen worden met voorbeeldproeven en de literatuur.
- Algemene optimalisatie:
  Voor algemene optimalisatie van de proeven zou de proef budget-wijs verbeterd kunnen worden. Door middel van verbetering van het meetapparatuur voor bathymetrie en vastlegging van de morfologische processen zodat duidelijke hoogtelijnkaarten kunnen worden gemaakt.

7 BIBLIOGRAFIE

Battjes, J. (1974). *COMPUTATION OF SET-UP, LONGSHORE CURRENTS, RUN-UP AND OVERTOPPING DUE TO WIND-GENERATED WAVES.* Delft: TU Delft.

Battjes, J. (1999). *Korte golven, collegedictaat CTwa4320.* Delft: TU Delft.

Boll, F. (2020). *Kleinschalige Zandsuppleties.* Hendrik-Ido-Ambacht: Hogeschool Rotterdam.

Bosboom, J., & Stive, M. J. (2021). *Coastal Dynamics.* Delft: TU Delft. Opgeroepen op 6 7, 2021

De Vries, M. (1975). *Waterloopkundig onderzoek.* Delft: TU Delft. Opgeroepen op 3 9, 2021

Deltares & Rijkswaterstaat. (2021, 1 1). *coastviewer-static*. Opgeroepen op 2 22, 2021, van openearth: https://www.openearth.nl/coastviewer-static/

Deltares. (2021). *software delft3d-suite*. Opgeroepen op 6 2, 2021, van deltares: https://www.deltares.nl/nl/software/delft3d-suite/

Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in Oceanic and Coastal Waters.* Cambridge: Cambridge University Press.

Ito, M., & Tsuchiya, Y. (1984, 1986, 1988). *Scale-model relationships of beach profiles.* Japan.

Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut. (2021). *uitleg storm*. Opgeroepen op 2 26, 2021, van knmi: https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/uitleg/storm

Kuppen, W., & Langedijk, J. (2020, september 25). Les 2: Sedimenttransport in rivieren. *Morfologie2020_les2_Sedimenttransportinrivieren*. Rotterdam: Hogeschool Rotterdam. Opgeroepen op maart 31, 2021

Liu, Z. (2001). *Sediment transport.* Aalborg: Aalborg Universitet.

Mastbergen, D., Nederhoff, K., & Quataert, E. (2019). *Beheerbibliotheek Voorne en Goeree.* Deltares. Opgeroepen op 2 18, 2021

Rijkswaterstaat. (2021, 2 26). *Expert Golfperiode Lichteiland Goeree*. Opgeroepen op 2 26, 2021, van waterinfo.rws: https://waterinfo.rws.nl/#!/details/expert/Golven/Lichteiland-Goeree(LEG)/Gem.___20golfperiode___20langste___201___2F3___20deel___20v.d.___20golven___20(tijdsdomein)___20Oppervlaktewater___20s

Rijkswaterstaat. (2021, 2 23). *waterinfo astronomisch getij Brouwershavensche gat*. Opgeroepen op 2 23, 2021, van waterinfo rws: https://waterinfo.rws.nl/#!/kaart/

Rijkswaterstaat, K. S. (2021, februari 2). Zandsuppletie Goeree. Rijkswaterstaat. Opgeroepen op 2 9, 2021

Rijskwaterstaat. (2021, 2 8). *kustonderhoud*. Opgeroepen op 2 9, 2021, van Rijkswaterstaat: https://www.rijkswaterstaat.nl/water/waterbeheer/bescherming-tegen-het-water/maatregelen-om-overstromingen-te-voorkomen/kustonderhoud

Robert L. Mott, J. A. (2014). *Toegepaste stromingsleer.* Amsterdam: Pearson Benelux BV.

Shields, A. (1936). *Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung.* Berlijn: der Preußische Versuchsanstalt für Wasser.

Smith, E. R., D'Alessandro, F., Tomasicchio, G. R., & Gailani, J. Z. (2017). *Nearshore placement of a sand dredged mound.* Vicksburg, USA: Elsevier B.V.

Smits, E. (sd). Aqualab model. *Hogeschool Rotterdam.* COP, Rotterdam.

van Onselen, E. (2017). *Scale effects on wave and sediment mobility in the metronome tidal facility.* Utrecht: Utrecht University.

Van Rijn, L. (1984). *Sediment transport.* Delft: TU Delft. Opgeroepen op 5 3, 2021

Van Rijn, L., Tonnon, P., Arcilla-Sanchez, A., Caceras, I., & Grüne, J. (2011). *SCALING LAWS FOR BEACH AND DUNE EROSION PROCESSES.* Delft: Deltares.

Vellinga, P. (1986). *Beach and Dune Erosion during Storms.* Delft: Technische Universiteit Delft. Opgeroepen op Maart & April 2021

Waterloopkundig laboratorium. (1996). *Onderzoek naar zandtransport en kustmorfologische verschijnselen in het laboratorium .* Den Haag: RIKZ.

Wisuki. (2012, 1 1). *statics Ouddorp*. Opgehaald van Wisuki NL: https://nl.wisuki.com/statistics/2324/ouddorp

8 FIGURENLIJST

8.1 FIGURENLIJST

FIGUUR 1 DEELGEBIEDEN KUST GOEREE BRON: (MASTBERGEN, NEDERHOFF, & QUATAERT, 2019) 3
FIGUUR 2 DEELGEBIEDEN BOLLEN VAN DE OOSTER MET WEERGAVE VAN MORFOLOGISCHE PROCESSEN BRON: (MASTBERGEN, NEDERHOFF, & QUATAERT, 2019) 4
FIGUUR 3 TREND KUSTLIJN PER 01-01-2021 BRON: (DELTARES & RIJKSWATERSTAAT, 2021) 4
FIGUUR 4 WATERHOOGTE ASTRONOMISCH GETIJ T.O.V. NAP IN CM TER HOOGTE VAN HARINGVLIET 10 GEDURENDE 1 DECEMBER 2020 TOT 1 FEBRUARI 2021 (BRON: (RIJKSWATERSTAAT, 2021)) 5
FIGUUR 5 GEMETEN GOLFHOOGTES OVER EEN JAAR VOOR DE KUST VAN OUDDORP (BRON: (WISUKI, 2012)) 5
FIGUUR 6 GEMETEN SWELL RICHTING OVER EEN JAAR VOOR DE KUST VAN OUDDORP (BRON: (WISUKI, 2012))
FIGUUR 7 GEMIDDELDE GOLFPERIODE LANGSTE 1/3 DEEL VAN DE GOLVEN GEMETEN OP LICHTEILAND GOEREE (BRON: (RIJKSWATERSTAAT, 2021)) 6
FIGUUR 8 MANIER VAN BREKEN GOLVEN (BATTJES, 1974) 10
FIGUUR 9 GRAFIEK SHIELDS PARAMETER MADSEN (BRON: (LIU, 2001)) 13
FIGUUR 10 BOVENAANZICHT AQUALAB-RDM (BRON: (SMITS)) 17
FIGUUR 11 DOORSNEDE AQUALAB-RDM (BRON: (SMITS)) 17
FIGUUR 12 HELLINGPROEF RESULTATEN 19
FIGUUR 13 BOVENAANZICHT ONTWERP PROEFSTELLING (MATEN IN MM) 20
FIGUUR 14 ZIJ AANZICHT ONTWERP PROEFOPSTELLING (MATEN IN MM) 20
FIGUUR 15 DOORSNEDE ONTWERP PROEFOPSTELLING (MATEN IN MM) 20
FIGUUR 16 BOVENAANZICHT INDELING AQUALAB-RDM INCLUSIEF PROEFOPSTELLING GEDURENDE 0-PROEF: GOLVEN RECHT OP SUPPLETIE. (MATEN IN MM) 21
FIGUUR 17 BOVENAANZICHT INDELING AQUALAB-RDM INCLUSIEF PROEFOPSTELLING GEDURENDE PROEF 2: GOLVEN ONDER HOEK VAN 30 GRADEN OP SUPPLETIE. (MATEN IN MM) 22
FIGUUR 18 GOLVEN EN MANIER VAN BREKEN AQUALAB-RDM 25
FIGUUR 19 MANIER VAN BREKEN GOLVEN AQUALAB-RDM
FIGUUR 20 BEWEGINGSPROCES GOLVEN GEDURENDE PROEF 5 26
FIGUUR 21 OVERZICHT SEDIMENTTRANSPORT PROEF 5 27
FIGUUR 22 BREKEN VAN GOLVEN OP PLAAT G & H 28
FIGUUR 23 VERANDERING GOLFRICHTING DOOR GEWICHTEN 28
FIGUUR 24 PLEK WAAR VERSCHILLENDE GOLFRICHTINGEN SAMEN KOMEN
FIGUUR 25 OVERZICHT SEDIMENTTRANSPORT PROEF 8 29
FIGUUR 26 VERGELIJKING EINDRESULTAAT PROEVEN 5 EN 8 29
FIGUUR 27 LSTF PLATTEGROND OVERZICHT (SMITH, D'ALESSANDRO, TOMASICCHIO, & GAILANI, 2017) 30

8.2 TABELLENLIJST

TABEL 1 UITSPRAKEN OVER VERSCHALING D50 VAN VERSCHILLENDE DESKUNDIGEN (VAN RIJN, TONNON, ARCILLA-SANCHEZ, CACERAS, & GRÜNE, 2011) 12
TABEL 2 SCHAALWAARDEN PROEF AAN DE HAND VAN FROUDE & SURFZONE-PARAMETER VERSCHALING 16
TABEL 3 WAARDEN PROEF 5 25
TABEL 4 MODELWAARDE PROEF 8 27
TABEL 5 WAARDEN PROEF LSTF USA 30
TABEL 6 TE GEBRUIKEN WAARDEN PROEVEN ZOALS TABEL 2 35

9 BIJLAGEN

De bijlagen van het rapport zijn te vinden in het document Bijlagen afstudeeronderzoek Kleinschalige Zandsuppleties. Onderstaand is de nummering van de bijlagen weergegeven:

9.1 BIJLAGE A: ORIËNTERENDE PROEF

9.2 BIJLAGE B: PROEFOPSTELLING

9.3 BIJLAGE C: WERKPLAN

9.4 BIJLAGE D: MEETRESULTATEN

9.5 BIJLAGE E: UITGEWERKT BEELDMATERIAAL PROEVEN