

Ecologische verrijking van breuksteenconstructies

Onderzoek naar stabiliteit van ecologische verrijking op
bodembescherming en vooroeververdediging

BSc Afstudeerscriptie

Mei 2019



Ecologische verrijking van breuksteenconstructies

Onderzoek naar stabiliteit van ecologische verrijking op bodembescherming
en vooroeververdediging

Rotterdam, Mei 2019

Jan Rigter

Jan-Willem Bekendam

Kevin van Donselaar

Comité:

Ir. E.M.M. van Eekelen

Dr. J.J. de Vries

Ir. E.H. Rob

Ing. H.G.M. uit het Broek

Van Oord

Van Oord

Hogeschool van Arnhem & Nijmegen

Hogeschool van Arnhem & Nijmegen

Voorblad illustratie: (Access, 2015 & Marianne B, 2017)

Voorwoord

Voor u ligt de afstudeerscriptie “Ecologische verrijking van breuksteenconstructies”. Om deze scriptie tot stand te brengen is een onderzoek gedaan naar de stabiliteit van diverse ecologische verrijkingen op breuksteenconstructies.

Met deze scriptie en bijbehorend onderzoek ronden wij, Jan-Willem Bekendam, Kevin van Donselaar en Jan Rigter, onze opleiding Civiele Techniek met als afstudeerrichting Waterbouw aan de Hogeschool van Arnhem en Nijmegen af. Aan dit onderzoek is gewerkt van februari 2019 tot juni 2019. Het onderzoek bleek dusdanig uitgebreid dat in overleg met de begeleiders is besloten het aantal toegestane woorden te overschrijden met als doel een volledig en leesbaar rapport te verkrijgen.

Dit onderzoek had niet kunnen slagen zonder de samenwerking met Van Oord. Graag willen wij onze directe begeleiders van Van Oord, Erik van Eekelen en Jurre de Vries bedanken voor hun leerzame discussies/gesprekken en feedback.

Uiteraard kan een dankwoord voor de begeleiding vanuit de HAN door onze begeleiders hier niet ontbreken. Ernst Rob en Hans uit het Broek hebben ons steun en begeleiding gegeven wanneer het nodig was. Samen met hen hebben wij leerzame en nuttige gesprekken gehad, bedankt hiervoor!

Voor het uitvoeren van de proeven is in dit onderzoek gebruik gemaakt van het waterlaboratorium van de HAN. Onze dank gaat uit naar de beheerder van dit lab Paul Scholten voor alle hulp en assistentie tijdens het uitvoeren van de proeven.

Wij wensen u veel plezier met het lezen van deze scriptie en hopen een leerzame discussie omtrent dit ontwerp met u te kunnen voeren.

Jan-Willem Bekendam, Kevin van Donselaar & Jan Rigter

Rotterdam, Mei 2019

Summary

Sustainability is an upcoming topic within the field of marine engineering. Quarry rock constructions with ecological enrichment are perfect examples of this. A great deal of ecological knowledge is already available to initiate the process of making these structures more ecological friendly. However, uncertainties and knowledge gaps in stability of enrichment often lead to not implementing these materials in designs.

This study aims to identify stability problems of ecological enrichment in order to offer more certainty in sustainable designs for scour protections and foreshores. This report is based on the following research question:

What are stability problems associated with the use of ecological enrichment in scour protection and foreshore protection?

Four types of ecological enrichment are examined in this study: seashell material, small rock grading, oyster cages and large rocks. The various types of ecological enrichment are used in scale models based on windfarm Luchterduinen and the foreshore of the Oosterschelde (Zuidhoek). These scale models are then used to carry out flume tests. Stability problems that arise with various flow conditions will be examined during these tests. Results obtained from these tests will be translated back and compared to existing design conditions from windfarm Luchterduinen and the foreshore of the Oosterschelde (Zuidhoek).

Important observations from this study are:

- The baseline structure (without enrichment) does not move in both model configurations.
- Small rock grading on scour protection is not stable under design conditions.
- The moment of movement for oyster cages is very unpredictable and strongly depends on its position and orientation.
- Seashell material on scour protection is not stable under design conditions.
- The moment of movement for large rocks is very variable and strongly depends on its position.
- Small rock grading on foreshore protection is stable under design conditions.
- Seashell material on foreshore protection is not stable under design conditions.
- Seashell material and small rock grading combined are stable under design conditions.
- Enrichment material remains in pores of the structure after constructive failure.

Stability problems that occur when using ecological enrichment differ by type of enrichment. A large part of enrichment settles into pores of the construction and will remain in this position even after constructive failure. The ecological value will retain when sufficient amount of material is present in the pores. Larger rocks will retain their ecological value after movement, but in a new location. Oyster cages lose their function on the scour protections after constructive failure.

The type of ecological enrichment to be applied should be based on the ecological properties needed. Important design factors for enrichment are: species-specific habitat requirements, habitat complexity, variability, stability, durability and source populations. The type of ecological enrichment should be chosen depending on which factors are present and needed in a specific location.

Samenvatting

Voor het verduurzamen van ontwerpen in de waterbouw komt steeds meer aandacht. Breuksteenconstructies lenen zich hier uitstekend voor. Op ecologisch gebied is informatie beschikbaar over het ecologisch verrijken van breuksteenconstructies door het toevoegen van verschillende materialen. Over de stabiliteit van de ecologische verrijking is minder bekend. De huidige kennis met betrekking tot stabiliteit van breuksteen en verrijkingsmaterialen is niet toereikend.

Dit onderzoek heeft als doel stabiliteitsproblemen van ecologische verrijking te onderzoeken, om aan de hand hiervan meer zekerheid te bieden bij het duurzaam ontwerpen van bodembeschermingen en vooroevers. De onderzoeksvraag die hierbij hoort luidt als volgt:

Wat zijn de stabiliteitsproblemen bij het toepassen van ecologische verrijking in bodembescherming en vooroeververdediging?

In dit onderzoek worden 4 typen ecologische verrijking onderzocht: schelpmateriaal, kleine steengradatie, oesterkooien en grote stenen. De diverse typen verrijking worden op een schaalmodelopstelling van bodembescherming Luchterduinen (rondom monopile) en de vooroever van de Oosterschelde (Zuidhoek) toegepast. Met deze schaalmodellen worden proeven gedaan in een stroomgoot. Tijdens de proeven wordt onderzocht welke stabiliteitsproblemen ontstaan onder invloed van diverse stromingsomstandigheden. De resultaten hiervan worden vertaald en teruggekoppeld naar de maatgevende omstandigheden van de casestudies windpark Luchterduinen en de vooroeververdediging Oosterschelde Zuidhoek.

De belangrijkste resultaten uit het modelonderzoek zijn:

- De constructie komt in de 0-meting (zonder verrijking) bij beide modelopstellingen niet in beweging.
- Kleine steengradatie op de bodembescherming is niet stabiel onder maatgevende omstandigheden.
- Het moment van bewegen voor oesterkooien is onvoorspelbaar en afhankelijk van de positie waarin deze is geplaatst.
- Schelpmateriaal op de bodembescherming is niet stabiel onder maatgevende omstandigheden.
- Het moment van bewegen voor grote stenen op de vooroeververdediging is onvoorspelbaar en afhankelijk van de positie.
- Kleine steengradatie op de vooroeververdediging is stabiel onder maatgevende omstandigheden.
- Schelpmateriaal op de vooroeververdediging is niet stabiel onder maatgevende omstandigheden.
- De combinatie van schelpmateriaal en kleine steengradatie op de vooroeververdediging is stabiel onder maatgevende omstandigheden.
- Na constructief falen blijft materiaal achter in de poriën van de constructie.

Stabiliteitsproblemen die optreden bij het toepassen van ecologische verrijking verschillen per verrijkingstype. Wanneer granulair verrijkingsmateriaal constructief faalt blijft een deel van het materiaal achter in de poriën van de onderliggende constructie, hier blijft de ecologisch verrijkende functie behouden. Grote stenen behouden na constructief falen ecologische waarde maar op een andere locatie. Oesterkooien verliezen ecologische waarde op de bodembescherming na constructief falen.

Het toe te passen verrijkingsmateriaal dient gekozen te worden op basis van de gewenste habitateigenschappen. Hierbij zijn een aantal factoren belangrijk: soort specifieke habitat eisen, habitat complexiteit, variabiliteit, stabiliteit, duurzaamheid en bronpopulaties. Het toe te passen type ecologische verrijking dient gekozen te worden op basis van de aanwezige en gewenste habitateigenschappen.

Inhoud

Voorwoord	5
Summary	7
Samenvatting	9
Lijst met symbolen	7
1 Introductie	9
1.1 Probleemstelling	10
1.2 Onderzoeksdoel	10
1.3 Afbakening	10
1.4 Onderzoeksvragen	11
1.5 Onderzoeksmethode	11
1.6 Leeswijzer	11
2 Theoretisch kader	13
2.1 Prototypen	13
2.1.1 Luchterduinen windpark	13
2.1.2 Vooroeververdediging Oosterschelde	14
2.2 Ecologie Noordzee en Oosterschelde	15
2.2.1 Noordzee	15
2.2.2 Ecologie vooroever Oosterschelde	15
2.2.3 Ecologie op harde substraten	16
2.3 Prototype verrijking	17
2.3.1 Grote stenen	17
2.3.2 Kleine steengradatie	18
2.3.3 Schelpmateriaal	19
2.3.4 Oesterkooien	20
2.3.5 Ecologisch falen	21
2.4 Stabiliteit	22
2.4.1 Shields parameter	22
2.4.2 Izbash-formule	23
2.4.3 Fasen in beweging	24
3 Schaalmodel	25
3.1 Verschaling Luchterduinen en Oosterschelde	25
3.1.1 Schaaleffecten bodembescherming	26
3.1.2 Schaaleffecten vooroeververdediging	27
3.1.3 Schaaleffecten algemeen	28
3.2 Proefopstelling	28
3.2.1 Bodembescherming	28
3.2.2 Vooroeververdediging	29
3.2.3 Ecologische verrijking	29
3.2.4 Meetopstelling	30
4 Resultaten en analyse	31
4.1 Algemene observaties	32
4.2 Proef 1: 0-meting bodembescherming	33
4.3 Proef 2: Kleine steengradatie op bodembescherming	35
4.4 Proef 3: Oesterkooien op vooroeververdediging	38
4.5 Proef 4: Schelpmateriaal op bodembescherming	40
4.6 Proef 5: 0-meting vooroeververdediging	43

4.7	Proef 6: Grote stenen op vooroeerverdediging	45
4.8	Proef 7: Kleine steengradatie op vooroeerverdediging	49
4.9	Proef 8: Schelpmateriaal op vooroeerverdediging	53
4.10	Proef 9: Kleine steengradatie en schelpmateriaal op vooroeerverdediging	56
5	Interpretatie en discussie	59
5.1	Discussie	60
6	Conclusies en aanbevelingen	61
6.1	Aanbevelingen	62
6.1.1	Bodembescherming	62
6.1.2	Vooroeerverdediging	63
6.1.3	Algemene aanbevelingen	63
6.2	Vervolgonderzoeken	64
7	Bronnen	65
Bijlagen		
Bijlage I	Plan van aanpak	
Bijlage II	Literatuur studie	
Bijlage III	Prototype Ontwerp	
Bijlage IV	Gradaties	
Bijlage V	Berekeningen	
Bijlage VI	Ecologie matrix	
Bijlage VII	Keuzematrix	
Bijlage VIII	Onderzoeksmethode	
Bijlage IX	Resultaten	
Bijlage X	Foto's	

Lijst met symbolen

Symbol	Omschrijving	Eenheid
A	Scharnierpunt	[-]
C	Coëfficiënt van Chezy	$[m^{1/2}/s]$
D	Diameter granulair materiaal	[m]
D_*	Dimensie loze korreldiameter	[m]
D_{15a}	Diameter toplaag stenen waarbij 15% < D	[m]
D_{15f}	Diameter toplaag filter waarbij 15% < D	[m]
D_{50}	Gemiddelde diameter granulair materiaal	[m]
D_{50a}	Gemiddelde diameter toplaag stenen	[m]
D_{50f}	Gemiddelde diameter toplaag filter	[m]
D_{85f}	Diameter toplaag filter waarbij 85% < D	[m]
D_n	Nominale diameter	[m]
F_D	Trekkracht	[kN]
F_F	Wrijvingskracht	[kN]
F_L	Heftkracht	[kN]
F_S	Schuifkracht	[kN]
F_z	Zwaartekracht	[kN]
F_r	Froude getal	[-]
g	Gravitatie constante	$[m/s^2]$
M	Massa	[kg]
θ	Shields parameter	[-]
θ_c	Kritische Shields-waarde	[-]
ρ_m	Dichtheid materiaal	$[kg/m^3]$
ρ_w	Dichtheid water	$[kg/m^3]$
r	Straal	[m]
Re	Reynolds getal	[-]
τ	Schuifspanning	$[N/m^2]$
τ_c	Kritische schuifspanning	$[N/m^2]$

U	Stroomsnelheid	[m/s]
U_{*C}	Kritische stroomsnelheid	[m/s]
U_r	Radiale stroomsnelheid	[m/s]
u	Stroomsnelheid voor de cilinder	[m/s]
ν	Kinematische viscositeit	[m ² /s]
Δ	Relatieve dichtheid	[-]

1 Introductie

Duurzaamheid is een belangrijk onderwerp binnen de huidige ontwikkelingen van de waterbouwsector. Eén manier waarop dit gerealiseerd kan worden is het toepassen van het principe “Building with Nature”. Dit houdt in gebruik maken van natuurlijke processen en natuur kansen bieden bij het realiseren van projecten zodat zowel de natuur als de maatschappij hier voordeel van hebben. Een aantal voorbeelden van projecten gebaseerd op dit concept zijn: de zandmotor, oesterriffen in de Noordzee en mangroveherstel in Indonesië (Ecoshape, 2019).

Opdrachtgevers hechten naast een goede prijs ook veel waarde aan het stimuleren en behouden van natuur tijdens het uitvoeren van een project. Voor aannemers zoals Van Oord wordt het steeds belangrijker om aan te tonen dat zij een project op een duurzame manier kunnen realiseren. Dit wordt o.a. gedaan door het vervangen van conservatieve materialen door materialen die van oorsprong in het milieu voorkomen. Ook speelt recyclen van bouwmaterialen hierbij een belangrijke rol.

In dit onderzoek wordt de nadruk gelegd op het stimuleren van natuurlijke processen door het aanbrengen van diversiteit benodigd voor een bepaalde habitat. Dit onderzoek richt zich op de ecologische verrijking van breuksteenconstructies bij windmolens en vooroeververdediging. In dit rapport wordt met ecologisch verrijken het volgende bedoeld: *“Het toevoegen van materiaal aan een bestaande breuksteenconstructie waardoor diversiteit in de fysieke habitat ontstaat met als doel de ontwikkeling van een verscheidenheid aan organismen te stimuleren.”*

Dit onderwerp kan worden opgesplitst in een ecologische kant en een constructieve kant. Op ecologisch vlak is reeds veel onderzoek gedaan. Bureau Waardenburg heeft in samenwerking met de Universiteit van Wageningen en Deltares een uitgebreid onderzoek gedaan waarin het gedrag en de ontwikkeling van diverse ecologische verrijkingen is onderzocht. Dit rapport is verschenen in 2017 en verdiept zich in de habitatkenmerken die gecreëerd worden om bestaande breuksteenconstructies op een ecologische manier te verrijken.

Op het gebied van stabiliteit is nog weinig kennis beschikbaar. Op het moment van schrijven loopt het JIP HaSPro project, hierin werken verschillende organisaties en bedrijven samen om een handboek te maken voor het ontwerp van bodembescherming rondom windmolens. Hiervan is het ecologisch verrijken van de constructie een onderdeel. Dit onderzoek is bedoeld om meer inzicht te geven in de stabiliteitsproblemen die bij het toepassen van ecologische verrijking optreden.

Naast het Jip HaSPro project zijn de volgende projecten binnen Van Oord uitgevoerd of in pilotfase:

- Ecologisch verrijkte vooroeververdediging in de Oosterschelde ter hoogte van de Zeelandbrug d.m.v. schelpmateriaal, grote steengradatie en specifieke steenstructuren.
- In 2017 zijn Van Oord en Eneco samen met stichting De Noordzee en Natuur & Milieu een pilot gestart in windpark Luchterduinen waar oesterkooien zijn aangebracht om bronpopulatie aan te brengen.

De uitgangspunten van het onderzoek zijn gebaseerd op de condities uit bovenstaande projecten. In dit rapport zal voor deze projecten de benaming “casus” worden gebruikt.

1.1 Probleemstelling

Op dit moment worden typen ecologische verrijking op verschillende plaatsen toegepast, echter wordt hierbij enkel gekeken naar het ecologische aspect van de verrijking. Het constructief aspect is tot op heden op basis van gezond verstand gedaan en niet verder wetenschappelijk onderbouwd. Om de toepassing van verschillende materialen als verrijking ontwerptechnisch als wel ecologisch effectiever te maken is het van belang dat de ecologische verrijking op stabiliteit wordt onderzocht.

1.2 Onderzoeksdoel

Het doel van dit onderzoek is te bepalen hoe ecologische verrijking op bodembescherming en vooroevers zich fysiek gedraagt zodat toekomstige projecten waarin ecologische verrijking wordt toegepast effectiever kunnen worden ontworpen. Hierbij wordt de stabiliteit van verrijking op de bestaande breuksteenconstructie en fysieke habitatsverandering onderzocht.

1.3 Afbakening

In dit onderzoek wordt enkel bestaande bodembescherming bij windparken en bestaande vooroever onderzocht. Het gaat hier specifiek om de bodembescherming van windpark Luchterduinen en de vooroever van de Oosterschelde (Zuidhoek). Eventuele andere projecten en constructies, waarmee Van Oord zich bezig houdt, worden buiten beschouwing gelaten.

De vier typen ecologische verrijking waar onderzoek naar wordt gedaan zijn:

- Schelpmateriaal
- Kleine steengradering
- Grote stenen
- Oesterkooien

In hoofdstuk 2.3 Prototype Verrijking wordt hier uitgebreid op ingegaan.

Verschillende factoren kunnen de externe stabiliteit van de bovengenoemde ecologische verrijkingen en onderliggende constructie beïnvloeden. Gekozen is om te focussen op de stroming welke in de stroomgoot getest kan worden.

In dit onderzoek wordt enkel op externe stabiliteit en fysieke habitatsverandering van ecologische verrijking en de onderliggende constructie gefocust. Andere relevante zaken zoals de ecologische impact van de verrijking, de invloed van de onderliggende zandbodem en de effecten op langere termijn worden in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten. Daarnaast komt de modelopstelling vlak op de bodem van de goot te liggen waardoor eventuele bodemeffecten zoals bodeminstabiliteit en zandgolven wegvallen.

1.4 Onderzoeksvragen

Ten behoeve van het onderzoek is de volgende hoofdvraag gedefinieerd:

Wat zijn de stabiliteitsproblemen bij het toepassen van ecologische verrijking op bodembescherming en vooroeververdediging?

Om deze vraag te kunnen beantwoorden is deze opgedeeld in de volgende drie deelvragen:

1. *Wat is de invloed van ecologische verrijking op de constructieve stabiliteit van bestaande breuksteenconstructies toegepast als bodembescherming en vooroeververdediging?*
2. *Onder welke hydraulische omstandigheden faalt ecologische verrijking constructief op bestaande breuksteenconstructies toegepast bij bodembescherming in windpark Luchterduinen en vooroeververdediging in de Oosterschelde, sectie Zuidhoek?*
3. *Hoe veranderen de fysieke habitat eigenschappen van ecologische verrijking na constructief falen?*

1.5 Onderzoeksmethode

De vraagstukken worden onderzocht door middel van een experimenteel onderzoek in het waterbouwkundig laboratorium van de HAN. De parameter die wordt gemanipuleerd in diverse modelopstellingen is de stroomsnelheid. Dit wordt gedaan door een hydraulisch fysiek model in een stroomgoot te plaatsen.

Ten eerste is een literatuuronderzoek uitgevoerd waarbij theorie is geraadpleegd voor het bepalen van: een bodembescherming ontwerp, vooroeververdediging ontwerp, hydraulisch fysiek model, verschalingsmethodes, ecologie op harde substraten, typen ecologische verrijking, stabiliteitsfactoren, hydraulische randvoorwaarden en het uitvoeren van een schaalproef. Ook zijn twee casussen gekozen ter referentie waarmee de uitgangpunten zijn bepaald. Het prototype ontwerp is gebaseerd op de casussen. Vanuit het prototype wordt doormiddel van verscaling het model ontworpen, hierbij is het belangrijk dat de schaaffecten minimaal zijn. Nadat het model is ontworpen wordt de proef voorbereid en uitgevoerd. Zie Figuur 1.



Figuur 1 Onderzoeksmethode

Dit resulteert in een kwantitatieve analyse van de resultaten waarin de resultaten worden vergeleken met de prototypen en geanalyseerd aan de hand van de theorie, hieruit wordt kennis vergaard omtrent ecologische verrijken van breuksteenconstructies.

1.6 Leeswijzer

Ten eerste wordt een theoretisch kader gegeven met achtergrondinformatie die nodig is om het onderzoek te begrijpen. Vervolgens wordt het verschalingsproces van de casussen en het uiteindelijk fysieke model zoals deze zal worden getest toegelicht. De bodembescherming en verdediging bevatten beiden verschillende soorten ecologische verrijking. Tot slot worden de resultaten uit de proeven vergeleken met de theorie en de casussen bodembescherming windpark Luchterduinen en vooroeververdediging Oosterschelde Zuidhoek. Hieruit volgt een analyse waaruit conclusies worden getrokken en aanbevelingen worden gedaan.

2 Theoretisch kader

In het theoretische kader worden de uitgangspunten besproken ten behoeve van het onderzoek naar stabiliteit van ecologische verrijking. Het onderzoek is gebaseerd op 2 casussen, weder in het verslag worden de casussen als prototypen benoemd.

2.1 Prototypen

Aan de hand van de casussen zijn de parameters van het onderzoek bepaald. De resultaten die uit de proeven van dit onderzoek volgen worden vergeleken met de casussen. Voor het bodembeschermingsmodel is het windpark Luchterduinen gekozen en als vooroevermodel is de vooroeververdediging bij de Oosterschelde (Zuidhoek) genomen.

2.1.1 Luchterduinen windpark

Het prototype bodembescherming is gebaseerd op windpark Luchterduinen (Van Oord, 2013). Het windpark is sinds 2015 volledig in gebruik. Het ligt ongeveer 23 km ten westen van de haven van IJmuiden, zie Figuur 2 Locatie windpark Luchterduinen figuur 2. In totaal zijn 43 windmolens geïnstalleerd met een vermogen van 3MW.

De diameter van de monopile is bij de bodem 5 m en loopt toe tot 4,5 m. De verwachting is dat marine-organismen aan zullen groeien op de paal met een maximale dikte van 0,2 m. Hierdoor wordt van een diameter van 5,4 m uitgegaan. De waterdiepte varieert tussen de 19m en de 24m.

De windturbines worden ontworpen op een levensduur van 20 jaar. Het ontwerp is ontworpen op hydraulische omstandigheden die eens in de 50 jaar voorkomen. De prototype-omstandigheden zijn gebaseerd op gegevens uit de "technical note: Basis for an optimized design" (Van Oord, 2013). Hieruit blijkt dat bij een storm van 1/50 jaar een maximale stroomsnelheid plaatsvindt van 0,93 m/s. De duur van de storm waarmee wordt ontworpen is 6 uur. De maximale golf eigenschappen zijn te vinden in bijlage III.

De bodembescherming is opgebouwd uit twee lagen gestorte breuksteen en heeft een tweevoudige werking. De filterlaag bestaat uit 32/90 mm breuksteen met een diameter van 27,4 m rondom de monopile. De toplaag bestaat uit 10-200 kg breuksteen met een diameter van 18,2 m rondom de monopile. Voor de gradatie-curven zie Bijlage IV. De minimale filterlaag dikte bedraagt 0,23 m en de minimale toplaag dikte is 0,8 m. Het minimale talud aan de voorzijde van de toplaag en filterlaag zijn beide 1:2,5.

Het ontwerp en een samenvatting van de parameters is te vinden in bijlage III.



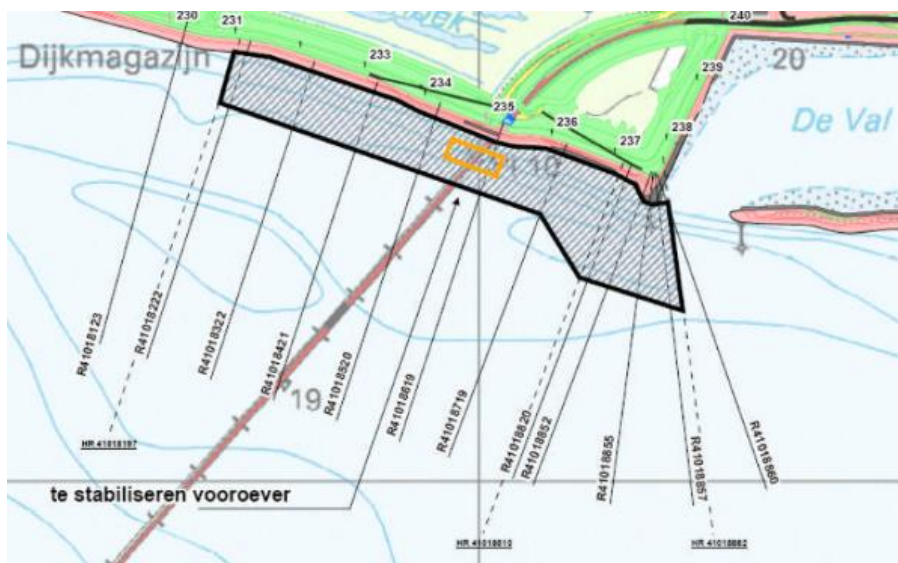
Figuur 2 Locatie windpark Luchterduinen (Van Oord, 2013)

2.1.2 Vooroeververdediging Oosterschelde

Het vooroever-prototype is gebaseerd op de vooroeververdedigingen uitgevoerd tussen 2011 en 2014 in de Ooster- en Westerschelde (Van Oord, 2009). In het verleden heeft van Oord de vooroeververdediging gestabiliseerd ter hoogte van Zierikzee. Het gebied is opgedeeld in Cauwersinlaag (250m, 2,1 ha) en Zuidhoek (800m, 3,8 ha). Het onderzoek is gebaseerd op het gebied met de meest ongunstige situatie, in dit geval gebied Zuidhoek (figuur 3). In dit gebied zijn op de vooroever staalslakken aangebracht en rond de Zeelandbrug breuksteen. In het onderzoek wordt de breuksteen constructie buiten beschouwing gelaten omdat deze zich enkel rond de brugpilaar bevindt.

De maatgevende stroomsnelheid van 1/50 jaar is in de Oosterschelde 1,3 m/s. Echter is bij het ontwerpen de kritische stroomsnelheid van de Westerschelde van 2,5 m/s toegepast, hiermee zal in de resultaten ook worden vergeleken. Uit de stabiliteitsberekeningen blijkt een hoogovenslakken-toplaag gradiering van 40-200 mm van toepassing te zijn met een D50 van 0,075m. Wegens een gebrek aan geotechnische informatie kan de filterwerking tussen de toplaag en de huidige onderlaag niet gegarandeerd worden. Hierdoor is er gekozen om een minimale laagdikte toe te passen van 10 kN/m² aan staalslakken. De maximale toepassingshoek is 1:2,5, bij steilere hoeken wordt de hoek door middel van staalslakken aangevuld. De duur van de maatgevende omstandigheden waarmee wordt ontworpen is 3 uur.

De Zuidhoek vooroever begint op een diepte van NAP -1,73m en loopt tot een diepte van NAP -20,21m. De staalslakken-gradatie wordt aangebracht tussen het einde van de kreukelberm (Nap -1,73m) tot aan de Oosterscheldebodem. De onderwaterhelling heeft een maximaal talud van 1:2,5. In Bijlage III bevindt zich een dwarsprofiel en een samenvatting van de parameters.



Figuur 3 Overzichtstekening vooroever Oosterschelde, Zuidhoek (Van Oord, 2009)

2.2 Ecologie Noordzee en Oosterschelde

Het doel van het toepassen van ecologische verrijking is de bestaande habitat te verrijken met bepaalde gewenste eigenschappen. Ten eerste wordt de bestaande habitat behandeld waarna de verschillende eigenschappen van een habitat met hard substraat worden besproken.

2.2.1 Noordzee

De Noordzee is een dynamisch systeem waarin van nature veel verschillende habitattypen voorkomen. Deze habitattypen zijn door natuurlijke omstandigheden en menselijk ingrijpen aan verandering onderhevig. De habitattypen worden bepaald door de fysische en morfologische eigenschappen van de omgeving met als leidende factoren zeestroming, diepte en bodemgesteldheid. De verschillende habitattypen bieden mogelijkheden voor de ontwikkeling van ecosystemen. De Noordzee wordt door veel soorten organismen gebruikt. Sommige soorten zijn het gehele jaar aanwezig en hebben specifieke foerageer-, paai en opgroeigebieden, waar andere soorten de Noordzee tijdelijk gebruiken wanneer deze gunstige omstandigheden biedt voor bijvoorbeeld foerageren of voortplanting. De verschillende habitattypen die in de Noordzee voorkomen zijn (Lindeboom, Witbaard, Bos, & Meesters, 2008):

- Fronten
- Zand
- Zandbanken
- Slib
- Grind
- Schelpenbanken

Deze habitattypen zijn toegelicht in bijlage II, hoofdstuk 8. Daarnaast zijn de volgende door de mens gemaakte habitattypen aanwezig waarvan enkel het windmolenpark wordt toegelicht in bijlage II hoofdstuk 8 (Lindeboom, Witbaard, Bos, & Meesters, 2008):

- Windmolenpark
- Geploegde zeebodem
- Geharkte zeebodem
- Mijnbouwplatform
- Zandwinputten
- Wrak

2.2.2 Ecologie vooroever Oosterschelde

De Oosterschelde is een dynamisch gebied dat gekenmerkt wordt door het tij en stromingen vanuit de Noordzee. Daarnaast komt vanuit het binnenland via de Schelde en het Hollands Diep zoet water in het systeem waardoor een brak-water-situatie ontstaat. In de Oosterschelde zijn diepe geulen tot 45 m aanwezig. Ten oosten van de Zeelandbrug zijn zandbanken aanwezig en in het noorden en oosten komen slikken voor. De geomorfologie van de Oosterschelde is sterk veranderd na de afronding van de Deltawerken. Een zandhonger is ontstaan waardoor de geulen zich vullen en de platen, schorren en slikken netto eroderen totdat een nieuw evenwicht ontstaat. Naast de natuurlijke zachte ondergrond zijn door mensen aangebrachte structuren aanwezig (dammen, dijken, Zeelandbrug). Hierdoor ontstaat een diversiteit aan harde en zachte substraten (Rijkswaterstaat, 2016).

2.2.3 Ecologie op harde substraten

Dit onderzoek focust zich op de ontwikkeling en verrijking van harde substraten die aangebracht worden op vooroeerverdediging of bodembescherming. De volgende factoren zijn van belang voor het vestigen van organismen op hard substraat (Lengkeek, Didderen, & Teunis, 2017):

- Soort-specifieke habitateisen
- Habitat complexiteit
- Habitat variabiliteit
- Habitat stabiliteit
- Habitat duurzaamheid
- Bronpopulaties

Soort-specifieke habitateisen

Uiteraard is de aanwezigheid van hard substraat vereist voor de doelsoorten om zich te kunnen vestigen. Daarnaast is voor sommige soorten bekend dat er extra specifieke vereisten zijn. Voor oesterlarven bijvoorbeeld zijn bepaalde chemische omstandigheden zoals aanwezig op schelpmateriaal vereist voor vestiging (Lengkeek, Didderen, & Teunis, 2017).

Habitat complexiteit

Gaten en spleten tussen stenen kunnen dienen als schuilplaats voor verschillende organismen. Met name de mobiele soorten zijn gebaat bij de aanwezigheid van schuilplaatsen van verschillende grootte. Waar kleine of jonge vissen kleine gaten en spleten nodig hebben, hebben grotere soorten zoals volwassen kabbeljouw grotere gaten en spleten nodig. Hoe meer variatie in de grootte van de schuilruimte hoe meer soorten en afmetingen van soorten worden aangetrokken (Lengkeek, Didderen, & Teunis, 2017).

Habitat variabiliteit

Dit overlapt gedeeltelijk met de vorige eis. Echter focust deze eis zich op het feit dat sommige soorten voordeel hebben bij de aanwezigheid van verschillende materialen in dezelfde omgeving. Van een aantal soorten is bekend dat deze de voorkeur geven aan een uniform grind-habitat. Daardoor zal een mix van complexe structuren en bijvoorbeeld grind een hogere biodiversiteit tot gevolg hebben (Lengkeek, Didderen, & Teunis, 2017).

Habitat stabiliteit

De stabiliteit van vestigingsmateriaal is het meest van belang voor langzaam groeiende organismen zoals sponzen, oesters en koralen. Deze soorten kunnen zich alleen ontwikkelen als het harde substraat over langere tijd stabiel is. Wanneer het substraat gaat bewegen door golfinvloeden of stroming kunnen de organismen beschadigen. Stabiel substraat is nodig voor de ontwikkeling van een divers systeem (Lengkeek, Didderen, & Teunis, 2017).

Habitat duurzaamheid

Een potentieel probleem is wanneer hard substraat zand uit de omgeving in gaat vangen in de loop van de tijd waardoor de hard-substraat-eigenschappen zoals schuilruimtes en harde ondergrond verloren gaan. Het is van belang dat het substraat zo wordt ontworpen dat in de loop van de tijd de habitat blijft bestaan (Lengkeek, Didderen, & Teunis, 2017).

Bronpopulaties

Normaal gezien wordt ervan uitgegaan dat wanneer een ideaal habitat voor een bepaalde soort is gecreëerd deze zich daar automatisch zal gaan vestigen. Over het algemeen klopt dit doordat veel soorten wijde verspreidingsmogelijkheden hebben. Echter voor sommige soorten zoals de platte oester is dit niet het geval waardoor deze moet worden geïntroduceerd in het gebied. Eenmaal geïntroduceerd kan deze zichzelf voortplanten in de gecreëerde habitat (Lengkeek, Didderen, & Teunis, 2017).

2.3 Prototype verrijking

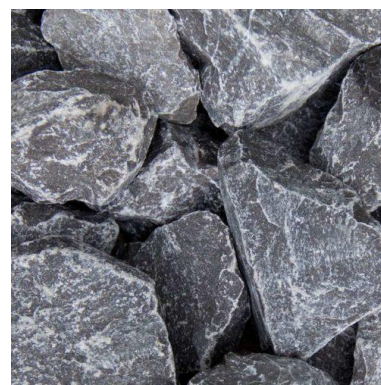
In dit onderzoek zijn 4 typen ecologische verrijking onderzocht op stabiliteit. De volgende typen zijn onderzocht en worden verder in dit hoofdstuk uitgewerkt:

- grote stenen (Situatie: Vooroeververdediging Oosterschelde zuidhoek);
- kleine steengradatie (Situatie: Bodembescherming Luchterduinen, Vooroeververdediging Oosterschelde zuidhoek);
- schelpmateriaal (Situatie: Bodembescherming Luchterduinen, Vooroever Oosterschelde);
- oesterkooien (Situatie: Bodembescherming Luchterduinen).

2.3.1 Grote stenen

Grote stenen worden als ecologische verrijking gebruikt om grote gaten en spleten te creëren waar organismen kunnen schuilen voor stroming en golfinvloeden. De stenen zorgen voor habitat variabiliteit en complexiteit. De aanbevolen grootte van stenen is volgens Lenkeek (Lengkeek, Didderen, & Teunis, 2017) dusdanig dat gaten en spleten van 1-2 meter ontstaan. Deze gat- en spleetgrootte kan schuilplaats bieden aan grotere organismen zoals de kabeljauw (*Gadus Morhua*).

Grote stenen worden toegepast bij de vooroeververdediging Oosterschelde Zuidhoek. Met grote stenen wordt bedoeld een aanzienlijk grotere gradatie dan de top laag. De top laag is hier ontworpen om stormcondities die eens in de 50 jaar voorkomen te kunnen weerstaan.



Figuur 4 Grote stenen (Tuinseentjes, 2018)

Om de invloed van de hoek op de stabiliteit te onderzoeken zijn 3 verschillende steen gewichten genomen, namelijk 500, 1000 en 2000 Kg. Op dit moment ligt bij de casus een 40-200 Kg gradatie die als ecologische verrijking dient. In verband met de vele sportduikers in het gebied is de toegepaste maximale steendiameter in principe gelimiteerd vanwege het risico op instortingsgevaar. Voor dit onderzoek worden 500, 1000 en 2000 Kg stenen onderzocht om te onderzoeken of deze inderdaad instabiel zijn onder een hoek van 1:2,5.

Om de vergelijking met de literatuur te maken is de diameter (Tabel 1) van deze stenen is bepaald door:

$$D_n = \left(\frac{M}{\rho_{app}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad [1]$$

M = Massa steen (Kg)
 ρ = Dichtheid steen (3000 kg/m³)

$$D = D_n / 0,84$$

Tabel 1 Diameters grote stenen

Massa (Kg)	Diameter (D) (m)
500	0,66
1000	0,83
2000	1,04

2.3.2 Kleine steengradatie

Het toepassen van kleine steengradatie op de toplaag van bodembescherming of op onderwatertalud van zeedijken heeft als meerwaarde dat kleinere holtes ontstaan. Deze holtes zorgen voor variabiliteit in de habitat en extra stabiliteit door het opvullen van holtes in de constructie. De holtes kunnen met verschillende doelen ontworpen worden:

- Sediment in de holtes vangen om habitat te creëren voor benthos.
- Habitat creëren zonder dat de holtes verstopt raken met sediment zodat larven zich kunnen vestigen.

In een eerder ecologische onderzoek (Lengkeek, Didderen, & Teunis, 2017) is de kleine steengradatie onder de toplaag aangebracht, hierbij is de steengradatie gebaseerd op de holtegrootte van de toplaag. Een anderen mogelijkheid is om de kleine steengradatie op de toplaag aan te brengen, hierbij is een belangrijk aspect dat de holtes onder de toplaag niet volledig worden opgevuld. Dit kan effecten hebben op de stabiliteit van de bodembescherming. Voor de vestiging van (benthische) diertje is het van belang dat het materiaal stabiel ligt.



Figuur 5 Kleine steengradatie (Grintjezeker, 2019)

De kleine steengradatie is gebaseerd op de toplaag uit de Luchterduinen en Oosterschelde casus. De kleine steengradatie wordt bij de Oosterschelde als filterlaag toegepast, hierbij zal er een zandvangende constructie ontstaan. Bij de bodembescherming van windpark Luchterduinen wordt de kleine steengradatie toegepast om kleine holtes te creëren, hierbij is het niet wenselijk dat de constructie zand vangt. Bij beide situaties is van belang dat de kleine steengradatie niet kleiner is dan de holtes van de toplaag. Voor het bepalen van de kleinst toepasbare steengradatie worden de onderstaande vergelijkingen gebruikt, hierbij wordt gekeken naar de stabiliteits-eis (Tabel 2), segregatie-eis (Tabel 2) en permeabiliteits-eis (Tabel 2) (Bijlage V) (The Rock Manual, 2007).

Tabel 2 Resultaten Eisen (zie Bijlage IV)

Stabiliteits-eis	
$\frac{D_{15a}}{D_{85f}} < 5$	Luchterduinen: De verrijkingslaag voldoet aan de stabiliteits-eis.
	Oosterschelde: De verrijkingslaag voldoet aan de stabiliteits-eis.
Segregatie-eis	
$\frac{D_{50a}}{D_{50f}} < 25$	Luchterduinen: De verrijkingslaag voldoet aan de segregatie-eis.
	Oosterschelde: De verrijkingslaag voldoet aan de segregatie-eis.
Permeabiliteits-eis	
$\frac{D_{15a}}{D_{15f}} < 5$	Luchterduinen: De verrijkingslaag voldoet aan de permeabiliteits-eis.
	Oosterschelde: De verrijkingslaag voldoet aan de permeabiliteits-eis.

Aan de hand van de vergelijkingen blijkt dat de gradatie 32-90 mm van toepassing is op zowel Luchterduinen als de Oosterschelde. In bijlage IV is de gradatiecurve hiervan te vinden. In theorie kan kleiner materiaal worden toegepast voor de Oosterschelde, alleen kan het dan niet meer worden verschaald omdat het materiaal te klein wordt voor de filters van de stroomgoot, hier wordt uitgebreid op ingegaan in hoofdstuk 3.

De variatie in laagdikte ten behoeve van de verrijkingseffecten is in het verleden nog niet onderzocht. Lengkeek (Lengkeek, Didderen, & Teunis, 2017) adviseert een laagdikte van enkele decimeters toe te passen. In het ontwerp wordt uitgegaan van $2D_{50}$ laagdikte. Het materiaal is van toepassing op de toplaag.

2.3.3 Schelpmateriaal

De meerwaarde van het toevoegen van schelpmateriaal op breuksteen is gebaseerd op twee soort-specifieke eigenschappen van schelpmateriaal. Ten eerste biedt schelpmateriaal een hard substraat voor larven van organismen om zich op te vestigen. Ten tweede biedt schelpmateriaal een chemisch (kalkrijk) interessant milieu voor larven van organismen om zich te vestigen, bijvoorbeeld de platte oester (*Ostrea edulis*). Deze kenmerken kunnen tevens worden gecreëerd door middel van kalkrijk substraat, echter gaat de voorkeur uit naar een natuurlijk product waarmee het natuurlijk milieu wordt nagebootst omdat de exacte chemische vereisten voor vestiging nog niet bekend zijn. (Lengkeek, Didderen, & Teunis, 2017)



Figuur 6 Schoon schelpmateriaal (deklintersierbestrating.nl, 2016)

Wanneer kleine ruimtes in het substraat worden gecreëerd dicht bij de zandige bodem bestaat de kans dat de ruimtes gevuld worden met zand. Wanneer dit gebeurt gaan de kenmerkende verrijkingseigenschappen verloren.

Voor het vestigen van organismen is het van belang dat het substraat stabiel is.

In dit onderzoek wordt gebruikt gemaakt van schelpmateriaal dat op industriële schaal wordt gewonnen uit de Noordzee. Hiervoor wordt gekozen omdat dit ruim voor handen is en relatief goedkoop.

Er zijn drie typen schelpmateriaal verkrijgbaar op de markt:

- Schone/gewassen schelpen
- Kleischelpen
- Schelpengrit

Voor dit onderzoek is gebruik gemaakt van schone/gewassen schelpen (zie figuur 6). Het geleverde schelpmateriaal bestaat voor het grootste gedeelte uit de volgende typen schelpen: kokkel, halfgeknotte strandschelp, zaagje en grote strandschelp. Door het baggerproces zitten er nog oneffenheden in zoals kleine stenen, deze zijn er voor het grootste gedeelte uitgehaald. De gradatie schelpen is 0-40 mm. De gradatiecurve die bij deze gradatie hoort is gegeven in Bijlage IV. De dichtheid van het schelpmateriaal is 2750 Kg/m³, volumiek gewicht is 800 Kg/m³.

2.3.4 Oesterkooien

De oesterkooi die in dit onderzoek wordt gebruikt staat in figuur 7 afgebeeld. Het design hiervan is gebaseerd op oesterkooien die zijn toegepast tijdens een pilot in windpark Luchterduinen. De oesterkooi wordt op de bodembescherming rondom windmolens geplaatst om het plaatselijke ecosysteem een boost te geven met een nadruk op oestergroei. De oesterkooi is met name bedoeld om het ecosysteem van een oesterbron te voorzien om oestergroei op gang te brengen.

In de oesterkooien bevindt zich de platte oester (*Ostrea edulis*). Deze leeft op de bodem van de Noordzee, kan biogene riffen vormen, en wordt daarom ook wel "biobouwer" genoemd. Dit is een belangrijke reden waarom de oesters zo interessant zijn als verrijkmateriaal. De oesterkooien leveren een positieve bijdrage aan het bestaande ecosysteem door als bron van oesterlarven te dienen. Deze larven kunnen zich aan omliggend hard substraat hechten.



Figuur 7 Ontwerp oesterkooi (Van Oord, 2013)

Uit Tabel 3 blijkt dat bodembescherming rondom windmolens een gunstige leefomgeving biedt voor oesters. De troebelheid van het water is een risico voor de leefbaarheid van de oester. Bij een te hoog zwevend stofgehalte raken de kieuwen van een oester verstopt waardoor deze geen zuurstof en voeding meer kunnen opnemen. Het zwevend stofgehalte dient daarom op locatie onderzocht te worden. (Kamermans, Walles, Kraan, & al., 2018)

Tabel 3 omgevingsparameters platte oester. (0=minimaal geschikt, 1=geschikt, 2=zeer geschikt) (Smaal, 2017)

Omgevingsparameter	Geschiktheid			Luchterduinen
	0	1	2	1,5
Bodemschuifspanning (N/m ²)	> 1,00	> 0,60	0,25 – 0,60	0,60
Zwevend-stofgehalte (mg/l)	>180	60 – 180	< 60	10-35
Sedimentsamenstelling	Grof zand	Fijn zand	Stevig slibbig zand, slibbig gravel met schelpen, stenen	Fijn zand
Stroomsnelheid (m/s)	> 0,80	< 0,25	0,25 – 0,80	0,3-0,5 (gem.)
Waterdiepte (m beneden NAP)	>80	79 - 1	<1	20-27

Het ontwerp van de oesterkooi bestaat uit een stalen frame (1025 x 1370 x 550 mm). In dit stalen frame bevinden zich een aantal betonnen tegels voor extra gewicht om de stabiliteit te bevorderen. De platte oester wordt in een individuele PVC korf geplaatst zodat de ontwikkeling van de oester los van de stalen korf gemonitord kan worden. Het totale gewicht van de korf is in Tabel 4 te vinden.

Tabel 4 Opbouw Oesterkooi

Onderdeel	Gewicht (kg)
Stalen frame (1025 x 1370 x550 mm)	135 kg
Betonnen tegels	342 kg
PVC korf inclusief oester	33 kg
Totaal gewicht	510 kg

2.3.5 Ecologisch falen

Twee definities worden in dit onderzoek gehanteerd voor het falen van ecologische verrijking. Dit zijn constructief falen en ecologisch falen. Op het moment dat de verrijking constructief faalt betekent dit niet gelijk dat ook de ecologische waarde van de verrijking wegvalt. In deze paragraaf wordt per type verrijking beschreven wanneer deze ecologisch faalt en dus geen ecologische waarde meer toevoegt. De definitie van constructief falen wordt in paragraaf 2.4.3 behandeld.

Schelpmateriaal

Schelpmateriaal is bedoeld als substraatbron waar organismen zich aan kunnen hechten. Zodra het schelpmateriaal in beweging komt en verplaatst zal het voor organismen niet mogelijk zijn om te hechten, waardoor de ecologische waarde van deze verrijking wegvalt. Echter is het mogelijk dat na constructief falen voldoende verrijkingsmateriaal op de constructie aanwezig is om te herstellen

Kleine steengradatie

De kleine steengradatie kan verschillende doelen hebben:

- Kleine holtes
Wanneer het kleine steenmateriaal wordt toegepast om kleine holtes te creëren is het noodzakelijk dat het materiaal stabiel blijft en geen zand vangt. De verrijking faalt wanneer het in beweging komt en/of zand vangt.
- Zand vangen
Wanneer het materiaal wordt toegepast als filter om zand te vangen is het noodzakelijk dat er geen uitspoeling plaatsvindt. Wanneer het materiaal in beweging komt of er uitspoeling plaatsvindt faalt het materiaal.

Oesterkooien

Oesterkooien falen op zowel ecologisch als constructief gebied wanneer deze in beweging komen. Wanneer een oesterkooi eenmaal in beweging is gekomen blijft deze instabiel wat een grote kans tot beschadigen van de constructie of monopile met zich mee brengt. Wanneer een oesterkooi in beweging komt en van de constructie wegspoelt is de functie als bronpopulatie lokaal verloren.

Grote stenen

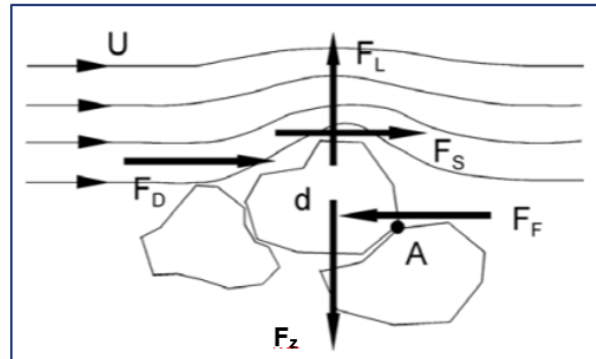
Grote stenen dienen als schuilplaats voor organismen en zullen hun ecologische waarde behouden zolang deze zich op het talud of in de teen van het talud bevinden. Na constructief falen verplaatst de grote steen zich naar een nieuwe locatie waar deze opnieuw kan dienen als schuilplaats voor organismen.

2.4 Stabiliteit

Materiaal in een stroming is onderhevig aan mobiliserende en stabiliserende krachten. Het materiaal is stabiel wanneer deze krachten met elkaar in evenwicht zijn. Zodra dit evenwicht wordt verstoord zal het materiaal in beweging komen.

Om dit evenwicht, ook wel stabiliteit genoemd inzichtelijk te maken is het noodzakelijk om de krachten uit dit evenwicht te definiëren. De krachten die invloed hebben op de stabiliteit van materiaal in een stroming kunnen als volgt worden uitgedrukt (figuur 8). Verdere toelichting van deze krachten is in bijlage II, hoofdstuk 1 te vinden.

U	[m/s]	<i>Stroomsnelheid</i>
D	[m]	<i>Diameter granulair</i>
A	[-]	<i>Scharnierpunt</i>
F_z	[kN]	<i>Zwaartekracht</i>
F_l	[kN]	<i>Hefkracht</i>
F_s	[kN]	<i>Schuifkracht</i>
F_F	[kN]	<i>Wrijvingskracht</i>
F_D	[kN]	<i>Trekkkracht</i>



Figuur 8 Krachten op een granulair materiaal in stroming (Schiereck, 2004)

2.4.1 Shields parameter

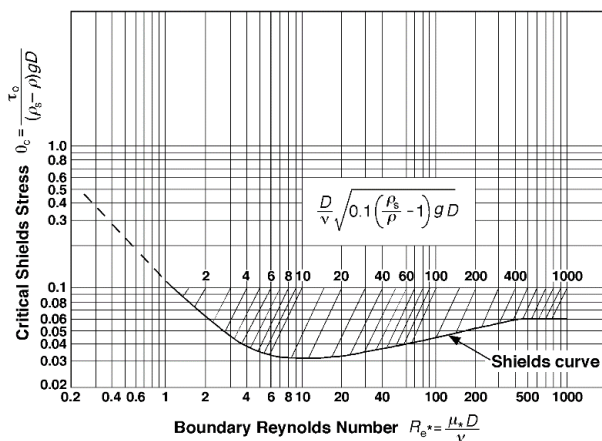
De meest gebruikte methode om de stabiliteit van granulair materiaal te bepalen is gebaseerd op het moment van bewegen. Het moment van bewegen van granulair materiaal onder invloed van horizontale stroming in één richting is beschreven volgens de Shields criteria. De volgende vergelijking is hiervoor gedefinieerd:

$$\theta = \frac{\tau}{(\rho_m - \rho_w)gD} \quad [2]$$

Zodra de krachten niet meer met elkaar in evenwicht zijn zal materiaal in beweging komen. Dit moment van bewegen wordt aangeduid met een kritische Shields-waarde, θ_c .

$$\theta_c = \frac{\tau_c}{(\rho_m - \rho_w)gD} \quad [3]$$

In deze vergelijking is ρ_m de dichtheid van het materiaal en τ_{cr} de kritische schuifspanning. In figuur 9 is het verband van Shields weergegeven.



Figuur 9 Shields-curve (Media, 2019)

Op de x-as van figuur 9 is het Reynolds nummer Re^* weergegeven. De Re^* waarde kan aan de hand van de volgende vergelijking bepaald worden:

$$Re_* = \frac{U_{*c} d}{\nu} \quad [4]$$

U_{*c} wordt in deze formule bepaald door:

$$u_{*c} = u_c * \frac{\sqrt{g}}{c} \quad [5]$$

Hierin is ν de viscositeit en d de diameter van het materiaal.

In dit onderzoek zal de Re^* altijd boven de 200 liggen bij een diameter groter dan 3 mm. (Lamb, Dietrich, & Venditti, 2018)

Shields onder een hoek

Uit onderzoek is gebleken dat de kritische Shields-waarde bij granulair materiaal toeneemt wanneer dit zich onder een hoek bevindt (Lamb, Dietrich, & Venditti, 2018). Deze waarneming is tegenstrijdig met het theoretisch verhaal. Volgens de wetten van de zwaartekracht moet de mobiliteit van granulair materiaal juist toenemen wanneer dit zich op een helling bevindt doordat de hellingkracht toeneemt.

Een verklaring hiervoor kan zijn dat de lokale snelheid rond de granulaire deeltjes lager is dan de snelheid die over het geheel wordt gemeten. Een oorzaak hiervoor kan de fluctuerende turbulentie rondom het granulaire materiaal zijn. Verder onderzoek moet uitwijzen of dit daadwerkelijk ook het geval is.

2.4.2 Izbash-formule

De Izbash-formule is naast Shields een veelgebruikte methode om de stabiliteit van korrelig materiaal te bepalen. De Shields-formule is vooral geschikt voor granulair materiaal (zoals zand en grind), terwijl de Izbash-formule meer gebruikt wordt voor het bepalen van de stabiliteit bij grotere stenen.

De Izbash-formule is als volgt gedefinieerd:

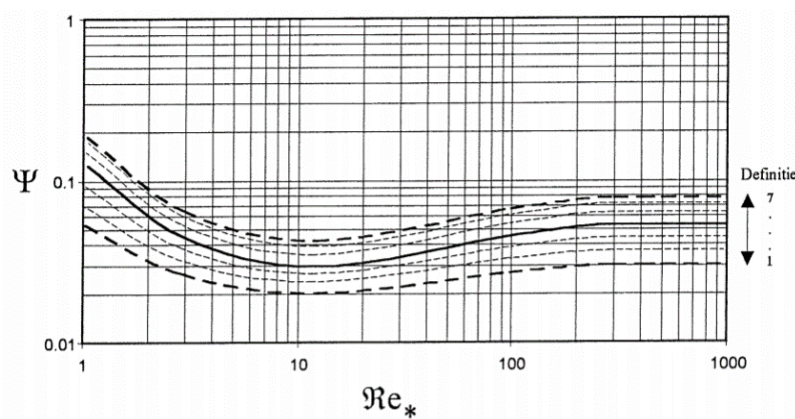
$$U_c = 1,7 * \sqrt{\Delta g d} \quad [6]$$

2.4.3 Fasen in beweging

De Shields-parameter kan in theorie nauwkeurig bepaald worden, maar in de praktijk is dit niet meetbaar en wordt getoetst op hoe het materiaal zich gedraagt het resultaat is hierdoor subjectief. De grens tussen materiaal in rust en materiaal in beweging is vaak onduidelijk. In het verleden zijn verschillende methodes gebruikt om het begin van bewegen te definiëren. Zie bijlage II hoofdstuk 2 voor meer informatie hierover. Bij veel van deze methodes is een persoonlijk oordeel van de omstandigheden ingesloten waardoor spreiding van de resultaten ontstaat.

In dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van 7 stadia van bewegen. Deze stadia, ook wel fasen te noemen, komen voor uit het ontgrondingsonderzoek M648/M863 en zijn gedefinieerd in rapport S-159-I (Schukking & Breusers, 1972). De definitie van de onderstaande fasen is te vinden in bijlage VIII paragraaf 2.4:

0. Geen verplaatsing van korrels
1. Verplaatsing van de korrels, af en toe
2. Korrels aan de wandel, hier en daar
3. Korrels aan de wandel, op vrij veel plaatsen
4. Korrels aan de wandel, bijna overal
5. Korrels aan de wandel, overal doch niet permanent
6. Korrels aan de wandel, overal en permanent
7. Begin opmars van de korrels



Figuur 10 Definitie begin van bewegen (Lammers, 1997)

In figuur 10 zijn de 7 stappen weergegeven in de Shields-curve. Met behulp van deze figuur kan bij elke fase een corresponderende Shields-waarde bepaald worden. Aangezien de Re^* waarden in dit onderzoek boven de 200 liggen kan voor dit onderzoek de onderstaande Tabel 5 als referentie worden gebruikt.

Tabel 5 Shields-waarden per fase ($Re^* > 200$)

Fase	0	1	2	3	4	5	6	7
θ_c	n.v.t.	0,03	0,037	0,045	0,053	0,064	0,072	0,078

Aan de hand van de kritische Shields-waarden uit Tabel 5 kan een kritische snelheidsfase bij een soort materiaal berekend worden.

Volgens de (The Rock Manual, 2007) komt fase 2 (verplaatsing van korrels hier en daar) overeen met een Shields waarden van 0,035. Op basis van deze bevindingen wordt in dit onderzoek fase 2 als grens voor constructief falen gehanteerd.

3 Schaalmodel

In dit onderzoek naar de stabiliteit van ecologische verrijking worden schaalmodellen onderzocht in de stroomgoot van de HAN. Bij de stabiliteit van verrijking zijn veel factoren van invloed. Het doel van de proeven in dit onderzoek is het verzamelen van data met betrekking tot de kritische stroomsnelheid voor bewegingsfasen van diverse typen ecologische verrijkingen en de originele constructie (0-meting). Het model is afgeleid van een bestaande situatie (prototype) zoals beschreven in paragraaf 2.1. Niet alle hydraulische factoren uit het prototype kunnen nagebootst worden in een stroomgoot. Dit wordt gecompenseerd door invloeden zoals golfslag en monopile in het stroomprofiel te vertalen naar een stroomsnelheid. Deze stroomsnelheid wordt gecombineerd met de bestaande maatgevende stroomsnelheid waardoor de uiteindelijke modelsituatie representatief is voor het prototype. Twee model situaties worden getest met elk 3 verschillende verrijkingstypen. Daarnaast wordt bij beide situaties een 0-meting gedaan wat een totaal van 8 proefopstellingen maakt. Tijdens de proef zal de variabele parameter de stroomsnelheid zijn. Andere factoren worden constant gehouden en zijn ontworpen volgens aanbevelingen voor proefopstellingen (Whitehouse, 1998).

3.1 Verschaling Luchterduinen en Oosterschelde

In het literatuuronderzoek (Bijlage II hoofdstuk 5) zijn de verschillende schaalmethododes benoemd. Omdat het van belang is dat de geometrische eigenschappen en de kinetische eigenschappen van het prototype en het schaalmodel in verhouding zijn, is er gekozen om te verschalen door middel van het Froude-getal. Omdat de geometrische eigenschappen van enkele verrijkingstypen in het prototype maar enkele centimeters zijn is het van belang dat de verschalingsfactor zo klein mogelijk is, wanneer de factor te groot is kunnen de karakteristieke eigenschappen van de verrijking verloren gaan. In theorie (The Rock Manual, 2007) mag maximaal 60 x verschaald worden zonder dat grote schaafeffecten optreden. In Tabel 6 worden de algemene randvoorwaarden verschaling toegelicht die aan de hand van de afmetingen van de stroomgoot en het materiaal zijn bepaald.

In bijlage VII zijn de keuzematrixen weergegeven voor Luchterduinen en de Oosterschelde waarin de parameters uit het prototype worden verschaald door middel van verschillende factoren. Hieruit blijkt dat 10 maal verschalen de grootste toepasbare verschaling is met de minste schaaflouten. De optredende schaaflouten en consequenties worden voor Luchterduinen en Oosterschelde verder uitgewerkt.

Tabel 6 Randvoorwaarden verschaling

Randvoorwaarden:
Materiaal < 3 mm wordt uit de gradering gefilterd i.v.m. de eisen vanuit het waterlaboratorium, zwevend transport moet worden voorkomen.
Tot een diameter van 2 mm kan zonder viscose effecten verschaald worden.
Diameter monopile max 10 cm i.v.m. breedte stroomgoot.
Karakteristieke vorm zo veel mogelijk behouden.
Bodembescherming maximaal 30 cm breed i.v.m. breedte stroomgoot.
Lengte/breedte oesterkooien maximaal 15 cm i.v.m. stroomgoot breedte.
Dichtheid model en prototype gelijk.
Waterdiepte <30 cm i.v.m. maximale waterhoogte stroomgoot.
Stroomsnelheid < 2 m/s i.v.m. maximale snelheid stroomgoot.
In de stroomgoot kunnen geen golven worden gecreëerd.
Geen vervuilende materialen in de stroomgoot.
De stroomgoot is een zoetwater goot.

3.1.1 Schaaffecten bodembescherming

Uit de keuzematrix (Bijlage VII) blijkt dat bij geometrisch 10 x verscalen de minste schaalfouten optreden, de schaalfouten die optreden zullen zo goed mogelijk gecompenseerd worden. De onderdelen die niet in verhouding verschaald kunnen worden zijn: monopile diameter, bodembescherming diameter en waterdiepte. Ook is het niet mogelijk om golven te creëren in de stroomgoot. Doormiddel van de theorie worden de schaaffecten bepaald en gecompenseerd door berekende factoren. Onderstaand bevindt zich per onderdeel de genomen maatregel.

Monopile diameter

Wanneer de prototype monopile 10x verschaald wordt komt dit neer op een model diameter van 50 cm. De breedte van de stroomgoot is 30 cm, hierdoor kan de monopile niet verschaald worden. Om een zo betrouwbaar mogelijk model te creëren is het van belang dat de effecten ten gevolge van de monopile op de bodembescherming worden gecompenseerd.

De effecten van een cilinder (monopile) staan beschreven in bijlage II. Hieruit blijkt dat de stroming die door de cilinder (monopile) wordt veroorzaakt grote invloed heeft op de stroming bij de bodembescherming. De stroming wordt bepaald door de formules 7, 8 en 9. Hieruit volgt een stroomsnelheid zoals weergegeven in Bijlage V.

$$U_r = u(1 - \frac{R^2}{r^2})\cos\theta \quad [7]$$

$$U_\theta = -u(1 + \frac{R^2}{r^2})\sin\theta \quad [8]$$

$$U = (U_r^2 + U_\theta^2)^{1/2} \quad [9]$$

Uit het literatuuronderzoek blijkt dat de horse-shoe vortex alleen gecreëerd wordt doormiddel van het plaatsen van een cilinder in een stroming. De monopile kan niet geometrisch verschaald worden. Hierdoor is gekozen om tijdens de Luchterduin-proeven de berekende kritische stroomsnelheid naast de monopile toe te passen.

Bodembescherming oppervlakte

Wanneer de prototype bodembescherming 10x verschaald wordt komt dit neer op een schaalmodel diameter van 300 cm. De breedte van de stroomgoot is 30 cm, hierdoor kan de bodembescherming niet geheel verschaald toegepast worden in de stroomgoot. Om de kritische omstandigheden na te bootsen wordt een strook van 30 cm breed uit de gehele diameter van de bodembescherming als model gebruikt. De lengte van de bodembescherming blijft 10 x verschaald. De locatie van de 30 cm brede strook is zo dicht mogelijk op de monopile gekozen, hier gelden de maatgevende omstandigheden.

Golf effecten

In Bijlage V worden de maatgevende hydraulische omstandigheden bepaald door de combinatie van golven en getijdestroming. In de beschikbare stroomgoot kan alleen een stroming worden gecreëerd. Om het effect van de golven mee te nemen in de stroomgoot is een extra factor berekend zoals beschreven in Bijlage II. De factor die wordt meegenomen staat voor de orbitaalstroming wat een horizontale stroming bij de bodem is ten gevolge van de windgolven. Om een zo realistisch mogelijk situatie te krijgen is voor de golven het JONSWAP spectrum toegepast. De liftende werking van golven is niet meegenomen in deze factor. De liftende werking kan er voor zorgen dat de verrijking wordt opgepakt en eenmaal opgepakt in de waterkolom met de stroming mee getransporteerd wordt. Dit effect kan niet worden onderzocht in de stroomgoot. Om een beeld te krijgen van dit effect kan een golf worden gecreëerd door middel van het eerst opstuwen van water door een schot te plaatsen bovenstrooms van het model en deze weg te trekken waardoor een golf ontstaat. Hiermee kan een beeld worden gecreëerd van de invloed van de golf op de constructie, dit leidt tot een kwalitatieve indicatie maar kan echter niet gekwantificeerd worden. Tevens kan maar een enkele golf worden gecreëerd waardoor de herhalende werking van de golf niet wordt meegenomen.

Waterdiepte

De waterdiepte dient geometrisch verschaald te worden. Bij een verscaling van 10x komt een schaalmodel waterdiepte van 1,95 m. Dit is niet te realiseren in de stroomgoot die beschikbaar is gesteld door de HAN welke 0,4 m hoog is. Hierdoor treedt een schaalfout in de waterdiepte op. De waterdiepte in de goot wordt op 0,3 m gehouden. De gevolgen hiervan zijn dat het verticaal stroomprofiel niet verschaald is. Van het prototype wordt alleen de onderste 3 meter verschaald. Dit is een klein deel van het verticaal stroomprofiel. In de stroomgoot kan alleen een volledig ontwikkeld verticaal stroomprofiel worden gecreëerd waardoor het verticale stromingsprofiel niet meer overeen komt. Het gevolg hiervan is dat de gemeten stroomsnelheid op een bepaalde hoogte niet één op één overeen komt met de stroomsnelheid in het prototype.

3.1.2 Schaaffecten vooroeerverdediging

Uit de keuzematrix (Bijlage VII) blijkt dat bij geometrisch 10 x verscalen de minste schaalfouten optreden, de schaalfouten die optredende zullen zo goed mogelijk gecompenseerd worden. De onderdelen die niet in verhouding verschaald kunnen worden zijn: breedte van vooroeerverdediging, lengte vooroeerverdediging, staalslakken, waterdiepte en prototypemateriaal kleiner dan 30mm. Door middel van factoren en het nabootsen van de effecten worden de niet te verscalen onderdelen gecompenseerd. Onderstaand staat per onderdeel een maatregel.

Breedte van vooroever

Het schaalmodel vooroeerverdediging is 5m breed, de stroomgoot is 30 cm breed, hierdoor is het niet mogelijk om de gehele breedte te testen daarom is gekozen om de waterstand in de stroomgoot zo hoog mogelijk te houden om de minst gunstige situatie te creëren. De helling van het model wordt gelijk gehouden aan het prototype talud van 1:2,5.

Staalslakken

De vooroeerverdediging heeft een toplaag van 40-200 mm staalslakken. In het model kon echter geen gebruik worden gemaakt van staalslakken. De reden hiervoor is dat het niet bekend is of staalslakken de stroomgoot vervuilen.

In plaats van staalslakken is daarom besloten breuksteen als vervanger te nemen. Het nadeel is dat dit een schaalfout met zich meebrengt. Om deze schaalfout te beperken is bij het omzetten van de staalslakken naar breuksteen gekozen om de schuifspanning en Shields-parameter gelijk te houden. Hiervoor is de onderstaande formule gebruikt.

$$\tau_{cr} = (\rho_m - \rho_m)gD_{50}\theta_{cr} \quad [10]$$

De berekening hiervan is in bijlage V te vinden.

Waterdiepte

De prototype waterdiepte bij de vooroeerverdediging loopt van -3 m tot -20 m. De minst gunstige situatie ligt rond de -20 m. Wanneer de waterdiepte 10x verschaald wordt komt dit neer op een waterdiepte van 2 m, dit is niet mogelijk in de stroomgoot. Hierdoor kan het verticale stroomprofiel niet juist verschaald worden. Om de schaaffecten te minimaliseren wordt de waterhoogte tijdens de proeven zo hoog mogelijk gehouden op een hoogte van 0,3 m.

3.1.3 Schaaleffecten algemeen

Zoet water

De beschikbare stroomgoot is een zoetwatergoot, hierdoor is het niet mogelijk om zout water te gebruiken. Om het verschil aan te tonen is met behulp van Shields het moment van bewegen bepaald (bijlage V hoofdstuk 5) voor zoet en zout water, het verschil is klein.

Graniet

In het ontwerp van de casussen Luchterduinen en de Oosterschelde is graniet gebruikt. De benodigde gradaties voor de modelopstelling waren echter niet in graniet beschikbaar. Gekozen is om hier basalt voor te gebruiken in het model. Basalt heeft een grotere dichtheid. Hierdoor komt het materiaal volgens Shields bij een hogere stroomsnelheid pas in beweging. Om de resultaten te kunnen vergelijken met de casus wordt een factor 1,12 (bijlage V hoofdstuk 5) toegepast op de maatgevende stroomsnelheid van het prototype. In deze factor is tevens het verschil tussen zoet en zout water verwerkt.

3.2 Proefopstelling

In de onderstaande paragrafen worden de modelontwerpen beschreven van de bodembescherming, vooroeververdediging en het verrijkmateriaal. Hierin wordt alleen ingegaan op het ontwerp van de constructie zelf. De liggingen van de ontwerpen in de stroomgoot worden benoemd in de onderzoeksmethode (bijlage VIII). Beide situaties en het verrijkmateriaal zijn 10x verschaald.

3.2.1 Bodembescherming

Het ontwerp van de bodembescherming is gebaseerd op het 10x geometrisch verschaalde prototype-ontwerp met de schaalfouten geïntegreerd. De afmetingen van het ontwerp zijn 2740 (L) x 300 (B) x 103 (D). De laagdikte (D) bestaat uit een filterlaag van 23 mm en een toplaag van 80 mm. De toplaag heeft een totale lengte van 1820 mm, de filterlaag bevindt zich onder de gehele toplaag en loopt 460mm door aan de voor- en achterzijde. Het talud van de filterlaag en toplaag is 1:2,5. Een samenvatting van het ontwerp is te vinden in Tabel 7. De ontwerp maatgevende stroomsnelheid is bepaald door middel van Froude-verschaling, hierbij zijn de schaaleffecten meegenomen. In bijlage V bevindt zich de berekening voor de range van de maatgevende stroomsnelheid. De minimale en de maximale stroomsnelheid worden vervolgens vermenigvuldigd met factor 1,12

Tabel 7 Ontwerp samenvatting Bodembescherming

Bodembescherming	Toplaag	Filter
Gradering toplaag:	19-50 mm	3,2-9 mm
D50:	35,5 mm	4,5 mm
Materiaal:	Basalt	Basalt
Laag dikte	80 mm	23 mm
Talud	1:2,5	1:2,5

Tabel 8 Stroomsnelheid Luchterduinen

	Prototype		Model		Model met factor 1,12	
Min	1,90	m/s	0,60	m/s	0,68	m/s
Max	2,30	m/s	0,72	m/s	0,82	m/s

3.2.2 Vooroeververdediging

Het vooroever-modelontwerp is gebaseerd op het 10x geometrisch verschaalde prototype-ontwerp. De afmetingen van het totale ontwerp zijn 3000 mm (L) x 300 mm (B) x max: 125 mm, min: 0 mm (H). De hoogte varieert omdat de constructie onder een talud ligt, de maximale hoogte is 12,5 cm en is gebaseerd op een breedte van 30 cm met een talud van 1:2,5. Een samenvatting van het ontwerp is te vinden in Tabel 9. De ontwerp maatgevende stroomsnelheid is bepaald door middel van Froude-verschaling, hierbij zijn de schaaffecten meegenomen. In bijlage V hoofdstuk 3 bevinden zich de berekeningen voor de Oosterschelde en de Westerschelde maatgevende stroomsnelheid. Beide stroomsnelheden worden vervolgens vermenigvuldigd met factor 1,12.

Tabel 9 Stroomsnelheid Oosterschelde en Westerschelde

	Prototype		Model		Model met factor 1,12	
Westerschelde	2,5	m/s	0,79	m/s	0,88	m/s
Oosterschelde	1,3	m/s	0,41	m/s	0,46	m/s

3.2.3 Ecologische verrijking

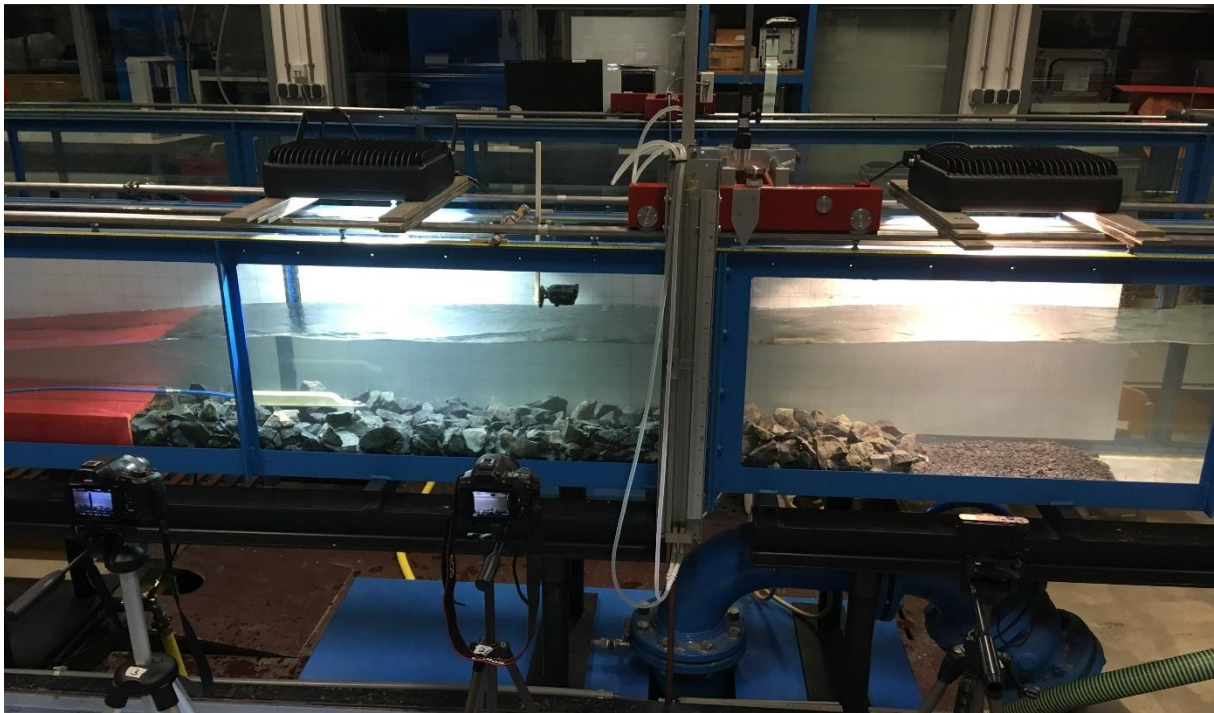
In de stroomgoot worden schelpmateriaal, kleine steengradatie, oesterkooien en groten stenen in twee verschillende situaties beproefd op stabiliteit. Zowel de bodembescherming als de vooroeververdediging zijn 10x geometrisch verschaald. Het verrijkingsmateriaal wordt ook ieder 10x geometrisch verschaald. De volledige gradatiecurven voor schelpmateriaal en kleine steengradatie bevinden zich in bijlage IV. De oesterkooien zijn gemaakt met behulp van een 3D printer, vervolgens zijn er in de Oesterkooien zakjes met schelpen aangebracht. Het gewenste gewicht wordt bereikt door op de bodem stalen plaatjes te leggen zie Tabel 10.

Tabel 10 Samenvatting verrijkingsmateriaal

	Prototype	Model	Afbeelding Model
Schelpmateriaal	0-40 mm	3 – 4 mm	Bijlage X
Kleinen steengradatie	32-90 mm	3,2-9 mm	
Oesterkooien	1370 x 1025 x 550	137 x 102,5 x 55	
Groten steen (D)	500 kg (700 mm)	68 mm	
	1000 kg (900 mm)	86 mm	
	2000 kg (1100 mm)	108,4 mm	

3.2.4 Meetopstelling

De stroomsnelheid is gemeten d.m.v. 2 pitotbuizen en een NIVUS-meter. De eerste pitotbuis aan het begin van de opstelling, de tweede pitotbuis halverwege en de NIVUS-meter aan het einde van de proefopstelling. Door de beperkte waterdiepte in de stroomgoot ontstaat bij hoge snelheden een watersprong aan de achterzijde van de opstelling. De NIVUS-meter is achteraan gepositioneerd om zo min mogelijk invloed op de proefopstelling uit te oefenen, echter wordt door de watersprong de gemeten stroomsnelheid hoger dan de werkelijke stroomsnelheid bij de proefopstelling. Pitotbuis 1 is niet bij alle proeven gebruikt waardoor deze niet voor iedere proef kan worden gebruikt als referentie. Wel kan met deze pitotbuis het verschil in stroming tussen begin en eind van de proefopstelling worden bepaald. De resultaten worden vergeleken met pitotbuis 2 omdat deze in het midden en boven de proefopstelling hangt. Hier worden de meest betrouwbare waarden gemeten (Figuur 10).



Figuur 6 Foto Opstelling (eigen werk)

4 Resultaten en analyse

In dit hoofdstuk zijn de resultaten en analyses van de proeven uitgewerkt. Ten eerste de proeven 1 tot en met 4 met betrekking tot de bodembescherming (casus windpark Luchterduinen). Ten tweede de proeven 5 tot en met 9 met betrekking tot de vooroeververdediging (casus Oosterschelde). Voor iedere proef zijn de resultaten weergegeven in een grafiek waarin de stroomsnelheid met bijbehorende fase is geplot. Op deze manier kunnen de proeven goed met elkaar vergeleken worden. In bijlage IX is een overzicht van alle data weergegeven met daarin tevens een grafiek waarin de tijd wordt meegenomen.

In de grafiek zijn standlijnen aangebracht waarmee vergeleken wordt. Voor de proeven 1 t/m 4 wordt vergeleken met de maatgevende omstandigheden zoals beschreven in de casus Luchterduinen. De rode lijnen zijn de maatgevende omstandigheden (verschaald volgens Froude). Bij de bodembescherming is door de samenvoeging van verschillende factoren een range gegeven waarbinnen de maatgevende stroomsnelheid zich bevindt. De maatgevende stroomsnelheid bevindt zich tussen 1,9 en 2,3 m/s (verschaald 0,68 en 0,82 m/s). De proeven 5 t/m 9 worden vergeleken met de maatgevende omstandigheden zoals beschreven in de casus Oosterschelde. Voor de vooroever is dit bij de Oosterschelde 1,3 m/s (0,46 m/s) (paarse lijn). Omdat de vooroeververdediging is ontworpen met uitgangspunten van de Westerschelde (waar hogere maatgevende omstandigheden heersen) worden de resultaten ook hiermee vergeleken, hiervoor geldt een maatgevende stroomsnelheid van 2,5 m/s (0,89 m/s) (rode lijn). Met een donker blauwe lijn is aangegeven wat het verwachte moment van bewegen is op basis van Shields, dit is weergegeven in de proeven 1, 2, 5, 7 en 9. Voor proef 6 is de vergelijking met Izbash gemaakt.

Het koppelen van fasen van bewegen aan een bepaalde situatie is subjectief. Om dit te minimaliseren zijn de gemaakte videobeelden bestudeerd. Hiermee zijn interpretatieverschillen geminimaliseerd. Deze data worden gebruikt om de resultaten te analyseren.

Per proef worden de observaties en verkregen resultaten weergegeven in een grafiek. Vervolgens worden de resultaten per proef geanalyseerd en vergeleken met de casussen en bestaande literatuur.

De proeven zijn als volgt genummerd, zie Tabel 11.

Tabel 11 proeven overzicht

Bodembescherming		Vooroeververdediging	
Verrijking	Proef nr.	Verrijking	Proef nr.
0-meting	1.1-1.3	0-meting	5.1-5.2
Kleine steengradatie	2.1-2.5	Grote stenen	6.1-6.3
Oesterkooi	3.1-3.4	Kleine steengradatie	7.1-7.3
Schelpen	4.1-4.4	Schelpen	8.1-8.3
		Schelpen en kleine steengradatie	9.1-9.2

4.1 Algemene observaties

Een aantal observaties gelden voor meerdere proeven en worden kort beschreven.

Het klein granulair materiaal in proef 2, 4, 7, 8 en 9 (kleine steengradatie en schelpmateriaal) gedraagt zich in grote lijnen hetzelfde. In eerste instantie begint het materiaal te trillen waarbij enkele zeer ongunstig liggende deeltjes op een gunstiger plek vallen. Vervolgens beginnen enkele deeltjes te bewegen. Er komt naarmate de stroomsnelheid oploopt meer materiaal in beweging waarbij uiteindelijk constant transport optreedt.

Na opvoeren van de stroomsnelheid is aan het begin meer beweging van verrijking zichtbaar dan aan het einde van dezelfde stap. Naarmate de stap langer duurt is dit effect beter zichtbaar. In Bijlage X bevinden zich situatie foto's.

Na verloop van tijd worden de gaten in de constructie opgevuld met verrijking, er lijkt een evenwicht te ontstaan. Het overtollig materiaal wordt naar achteren afgevoerd waar het de gaten tussen de stenen opvult en de verrijking afvlakt. De verrijking wordt vrij stabiel en de fase van bewegen gaat omlaag.

De constructie zelf komt niet tot nauwelijks in beweging. Doordat de constructie met de 0-meting niet in beweging komt is niet aan te tonen of de constructie sterker is geworden door het toevoegen van kleine steengradatie als verrijking. Wel kan worden gekeken of de constructie zwakker is geworden door het toevoegen van ecologische verrijking. Wanneer de proef is afgelopen en de proefopstelling wordt opgeruimd valt op dat de constructie erg solide aanvoelt. In de discussie is hiervoor een mogelijke verklaring opgenomen.

4.2 Proef 1: 0-meting bodembescherming

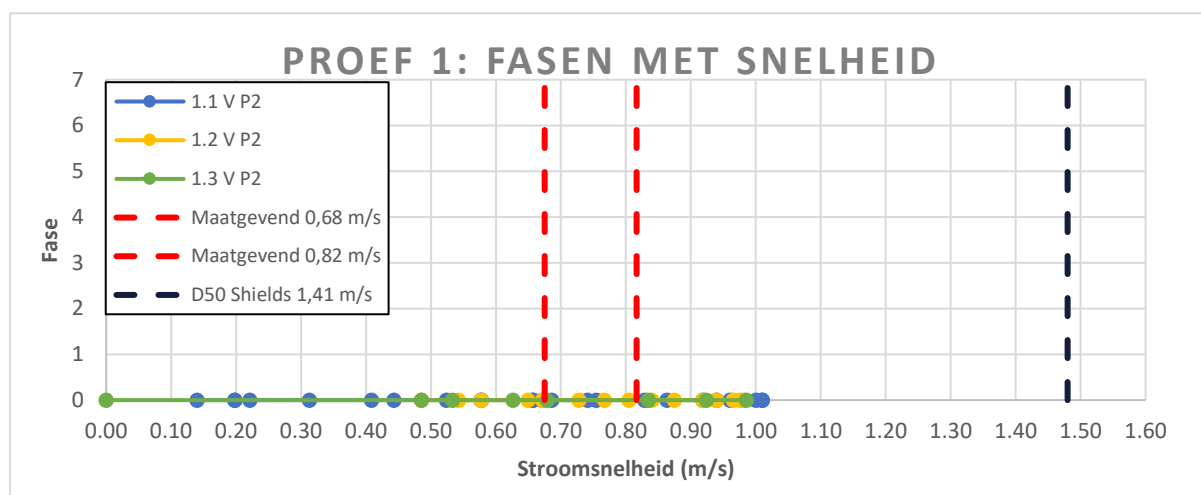
De 0-meting is 3 keer uitgevoerd om de stabiliteit van de bodembescherming mét en zonder ecologische verrijking te vergelijken. Belangrijkste bevinding van proef 1 is dat de constructie stabiel is onder maximale stroming.

4.2.1 Resultaten

De constructie komt nauwelijks in beweging. De stroomsnelheid is niet hoog genoeg om fase 1 te bereiken. Hierdoor kan enkel worden onderzocht of de ecologische verrijking een verzwakkend effect heeft op de constructie maar kan dit niet gekwantificeerd worden. Enkele stenen die schijnbaar op een kantelpunt liggen beginnen te wiebelen, dit is geen trillen te noemen aangezien de stenen niet opgetild worden en het uitzonderingen zijn. Zoals te zien in de grafiek wordt geen fase hoger dan 0 bereikt tijdens de proeven. Zoals weergegeven in de grafiek 1 en Tabel 12 is fase 0 de hoogst behaalde fase.

Tabel 12 Proef 1 Fasen – gemeten stroomsnelheid

Fase	Stroomsnelheid Model (m/s)
0	0-1,0



Grafiek 1 Proef 1 Fasen met snelheid

4.2.2 Analyse

De maatgevende omstandigheden zijn tijdens de proeven behaald, hieruit is gebleken dat het materiaal tijdens de maatgevende omstandigheden stabiel blijft en niet hoger komt dan fase 0.

Shields-vergelijking

Volgens Shields komt de toplaag van de bodembescherming bij een Shields-waarde van 0,035 (waarmee standaard wordt ontworpen) in beweging bij een stroomsnelheid van 1,41 m/s. De stroomsnelheid die behaald is in de proeven is niet hoog genoeg om de stenen te laten bewegen. Dit betekent dat de resultaten van de proef overeenkomen met de verwachting volgens Shields (Tabel 13).

Tabel 13 Proef 1 Maatgevende omstandigheden en fase

Werkelijke stroomsnelheid	Verschaalde stroomsnelheid	Fase
1,9	0,68	0
2,3	0,82	0

4.2.3 Conclusie van deze proef

De constructie komt nauwelijks in beweging. De stroomsnelheid is niet hoog genoeg om fase 1 te bereiken. Hierdoor kan enkel worden onderzocht of de ecologische verrijking een verzwakkend effect heeft op de constructie, het is niet mogelijk om dit te kwantificeren.

4.3 Proef 2: Kleine steengradatie op bodembescherming

De proef met kleine steengradatie op de bodembescherming is vijf keer uitgevoerd. Nadat de constructie van de bodembescherming is opgebouwd, wordt de verrijking door middel van een maatbeker vanaf de waterlijn los op de constructie aangebracht. De verrijking is gelijkmatig verdeeld zodat overal ongeveer een even dikke laag ontstaat.

De belangrijkste bevindingen van proef 2 zijn, dat de kleine steengradatie de poriën in de constructie opvult en er na constructief falen en na hogere fasen nog materiaal aanwezig blijft in de poriën. De verrijking bereikt onder maatgevende omstandigheden maximaal fase 2 van bewegen.

4.3.1 Resultaten

Proef 2.1 komt tot fase 1 doordat er een lagere stroomsnelheid wordt toegepast. Dit komt omdat hier de opstelling niet versmald is zoals bij de anderen proeven met kleine steengradatie.

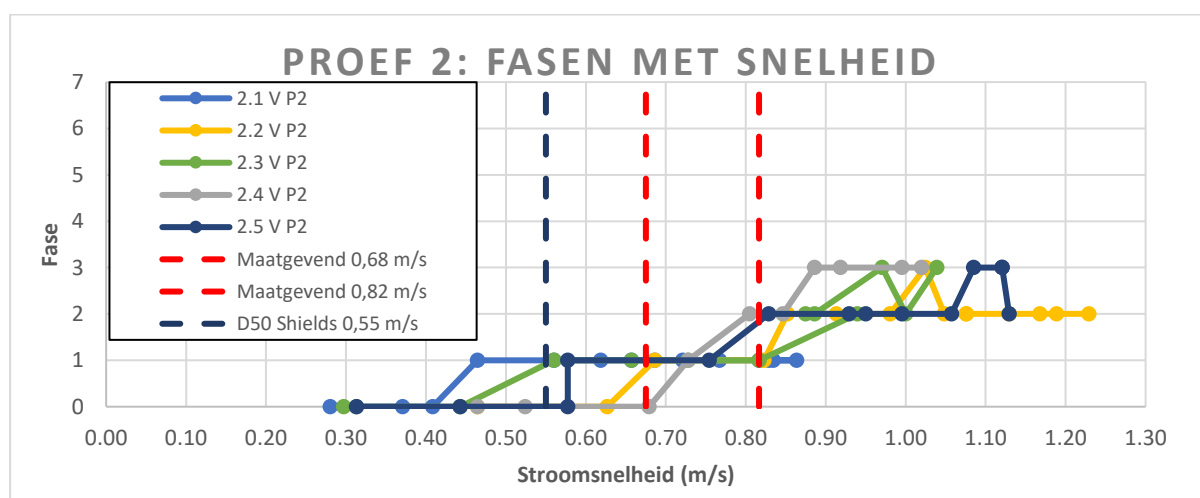
Voornamelijk wordt het verrijkingsmateriaal wat bovenop de constructie ligt in beweging gebracht. Wanneer dit materiaal zich in een luwte of holte van de onderliggende constructie bevindt blijft het stabiel. Uiteindelijk komen de toppen van de stenen van de constructie bloot te liggen en verplaatst het verrijkingsmateriaal in de poriën en holtes nauwelijks.

De constructie zelf komt niet in beweging en lijkt versterkt te worden.

In de verkregen data is te zien dat er weinig spreiding is tussen de drie proeven. In Tabel 14 zijn de fasen met behaalde stroomsnelheid in het model weergegeven die voortkomen uit grafiek 2 waarin de stroomsnelheid tegen de fase is uitgezet.

Tabel 14 Proef 2 Fasen – gemeten stroomsnelheid

Fase	Stroomsnelheid model (m/s)
0	0,0-0,68
1	0,46-0,86
2	0,80-1,06
3	0,89-1,13



Grafiek 2 Fasen met snelheid

4.3.2 Analyse

Naarmate de tijd vordert en de stroomsnelheid omhoog gaat is te zien dat de fasen schommelen of teruggaan van fase 3 naar fase 2. Dit komt door het evenwicht dat bereikt wordt. Hier is het overtollig materiaal al weggespoeld en blijft enkel het “beschermde” materiaal liggen.

De spreiding tussen de proeven kan worden veroorzaakt door de duur van de proef of hoeveel verrijkmateriaal is aangebracht. Wanneer wordt gekeken naar de duur van de proef zijn proef 2.1, 2.2 en 2.4 ongeveer even lang (1 uur) en steken proef 2.3 en 2.5 daar bovenuit (1,25 en 1,5 uur). Er is verschil in hoeveelheid aangebracht verrijkmateriaal tussen proeven 2.1 tot 2.3 en de proeven 2.4 en 2.5. Bij de proeven 2.1 tot 2.3 is rond de 4000 gram aangebracht en bij de proeven 2.4 en 2.5 is rond de 7000 en 8000 gram aangebracht.

Vergelijking met maatgevende omstandigheden

Uit de vergelijking tussen de resultaten en de maatgevende omstandigheden kan worden geconcludeerd dat het verrijkmateriaal op de bodembescherming van windpark Luchterduinen nagenoeg stabiel is. Alleen onder de uiterste maatgevende omstandigheden is het mogelijk dat het verrijkmateriaal begint met bewegen (Tabel 15).

Tabel 15 Maatgevende omstandigheden en fase

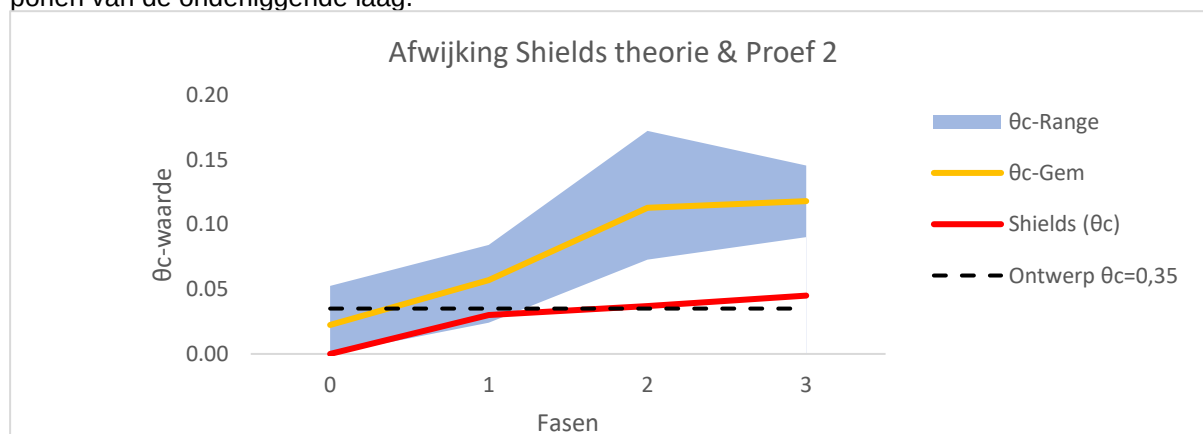
Werkelijke stroomsnelheid	Verschaalde stroomsnelheid	Fase
1,9	0,68	1
2,3	0,82	1 - 2

Shields-vergelijking

Volgens Shields komt de D50 van de kleine steengradatie bij een Shields-waarde van 0,035 (waarmee standaard wordt ontworpen) in beweging bij een stroomsnelheid van 0,55 m/s. Dit komt ongeveer overeen met de bevindingen uit de proeven. De lijn zoals zichtbaar in de grafiek staat op de grens van overgang van fase 0 naar fase 1.

$$0,55 \text{ m/s} = 1$$

Dit betekent dat het begin van bewegen van de kleine steengradatie als verrijking veilig kan worden ontworpen met behulp van de Shields-curve bij een waarde van 0,035 of lager. In grafiek 3 is te zien dat fase 1 bij zowel Shields als de waarnemingen bij een Shields-waarde van 0,03 ligt. Fase 2 begint echter pas ver boven de volgens Shields gedefinieerde fasen. Een oorzaak hiervan kan het verschil in interpretatie zijn van de fasedefinities. Daarnaast is de lokale stroomsnelheid mogelijk lager door de poriën van de onderliggende laag.



Grafiek 3 Afwijking Shields theorie & proef 2

Ecologische waarde

De verrijking van de vooroever door middel van kleine steengradatie heeft als doel variabiliteit en complexiteit toe te voegen waar organismen zich kunnen vestigen. Op de bodembescherming blijft de verrijking goed liggen waardoor dit goed zal werken als verrijking. Wanneer een dikke laag wordt toegevoegd gaat echter de variabiliteit en complexiteit verloren. Bij een dunne laag na constructief falen is de habitat passender.

4.3.3 Conclusie van deze proef

De kleine steengradatie heeft geen verzwakkend effect op de constructieve stabiliteit van de vooroeververdediging. De verrijking lijkt echter sterkte toe te voegen, hoeveel sterkte de verrijking aan de constructie toevoegt is alleen niet te bepalen met deze proeven.

De kleine steengradatie faalt constructief bij het bereiken van fase 2 (begin van bewegen). Dit treedt op bij een stroomsnelheid vanaf 0,8 m/s. Dit is net binnen de maatgevende omstandigheden waardoor de verrijking wellicht net in beweging komt.

De verandering van habitat na constructief falen is dat de laag dunner wordt. Wanneer een dikke laag is aangebracht komt dit de variabiliteit en complexiteit ten goede. Er zal in de poriën, waar de verrijking beschut ligt, materiaal blijven liggen.

4.4 Proef 3: Oesterkooien op vooroeververdediging

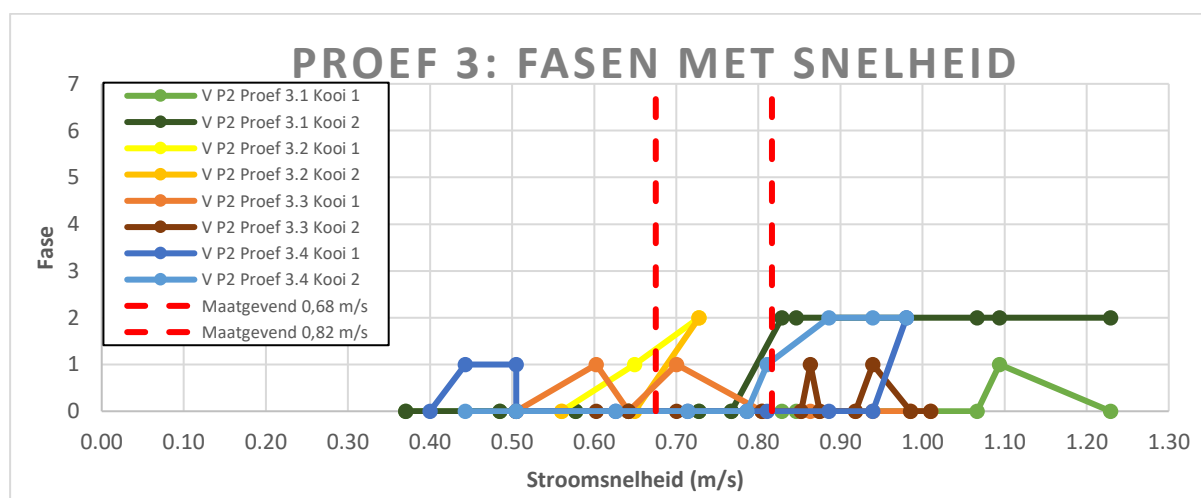
De proef met oesterkooien op de bodembescherming is vier keer uitgevoerd. Er zijn op 2 plaatsen oesterkooien aangebracht waarbij de eerste kooi in de lengterichting op de stroming staat en de tweede kooi in de breedterichting. De kooien zijn op willekeurige plaatsen neergezet.

De belangrijkste bevinding van proef 3 is dat de stabiliteit van de oesterkooien zeer sterk afhankelijk is van de positie zoals deze geplaatst zijn. Wanneer de onderkant aanstromend oppervlak heeft zijn de oesterkooien zeer instabiel. Door de grote spreiding tussen de proeven is niet eenduidig vast te stellen wat het begin van bewegen voor oesterkooien is.

4.4.1 Resultaten

Er is veel spreiding in stabiliteit tussen de verschillende proeven. De stabiliteit van de oesterkooi is sterk afhankelijk van de positie waarin deze zich bevindt. Een aantal oesterkooien verplaatsen eerst licht voordat ze compleet wegspoelen, andere kooien spoelen ineens weg. De onderkant van de oesterkooi bestaat in het model uit metalen plaatjes en in het prototype uit stoeptegels. Wanneer de oesterkooi dusdanig is gepositioneerd dat de onderkant aanstromend oppervlak krijgt, komt de kooi zeer gemakkelijk in beweging. Hierin is de positie, in de breedte of in de lengte ten opzichte van de stroming, niet van invloed. In proef 3.4 is verschillend gewicht toegepast bij de oesterkooien om te onderzoeken of dit invloed heeft op de stabiliteit. Wanneer de proeven met elkaar worden vergeleken lijkt het erop dat de positie en oriëntatie van de oesterkooi een groter effect heeft op de stabiliteit dan het gewicht (grafiek 4).

Het effect op de bestaande constructie is, dat wanneer de oesterkooi in beweging komt, stenen worden aangetikt die vervolgens ook in beweging komen. Dit effect is over het algemeen zeer beperkt, maar aanwezig.



Grafiek 4 Proef 3 Fase met snelheid

4.4.2 Analyse

In de resultaten is te zien dat er spreiding is binnen de proef tussen de verschillende oesterkooien. Tevens hebben de oesterkooien onderling invloed op elkaar zoals in proef 3.2 waar de kooien elkaar raken. Tussen de proeven zitten ook verschillen. Het begin van bewegen van de oesterkooien is niet vast te stellen op basis van deze proeven.

Vergelijking met maatgevende omstandigheden

Wanneer de resultaten worden vergeleken met de maatgevende omstandigheden blijkt hier veel fasevariatie in te zitten. Bij een aantal proeven komt de oesterkooi voor de maatgevende omstandigheden

in beweging en bij sommige proeven erna. Het risico van het toepassen van de oesterkooien op bodembescherming is groot door de schade die kan worden aangericht aan de monopile wanneer de oesterkooi hiermee in aanraking komt zie Tabel 16.

Tabel 16 Maatgevende omstandigheden en fase

Werkelijke stroomsnelheid	Verschaalde stroomsnelheid	Fase
1,9	0,68	Variabel
2,3	0,82	Variabel

Ecologische waarde

Zolang de oesterkooien op de plaats blijven voegen ze waarde toe aan de habitat als bron voor nieuwe populatie en als hechtingsmateriaal. Zodra ze in beweging komen is de kans groot dat ze van de bodembescherming verdwijnen en lokaal geen ecologische waarde toevoegen.

4.4.3 Conclusie van deze proef

De ecologische verrijking door middel van oesterkooien heeft invloed op de stabiliteit van de constructie doordat, wanneer de kooi in beweging komt, er stenen van de toplaag worden aangetikt die daardoor ook in beweging komen. Er is geen invloed op de constructie zolang de oesterkooi niet verplaatst. De ecologische verrijking door middel van oesterkooien faalt op verschillende momenten sterk afhankelijk van de positie van de kooi. Na constructief falen kan de oesterkooi problemen veroorzaken aan de omliggende constructies zoals de monopile. Wanneer de oesterkooi constructief faalt kan het ecologische nog wel een functie hebben.

4.5 Proef 4: Schelpmateriaal op bodembescherming

De proef met schelpmateriaal op de bodembescherming is vier keer uitgevoerd. Nadat de constructie van de bodembescherming is aangebracht, wordt de verrijking door middel van een maatbeker vanaf de waterlijn los op de constructie aangebracht. De verrijking is gelijkmatig verdeeld zodat overal ongeveer een even dikke laag ontstaat.

De belangrijkste bevindingen van proef 4 zijn dat het schelpmateriaal de poriën in de constructie opvult en er na constructief falen en na hogere fasen nog materiaal aanwezig blijft in de poriën. De verrijking bereikt fase 3 tot 5, daarmee is het schelpmateriaal niet stabiel onder maatgevende omstandigheden.

4.5.1 Resultaten

Na verloop van tijd worden de poriën in de constructie opgevuld en ontstaat een evenwicht van de hoeveelheid schelpmateriaal die wordt opgenomen in de constructie en blijft liggen. De toppen van de stenen van de constructie komen bloot te liggen en is er nog maar weinig transport van verrijking.

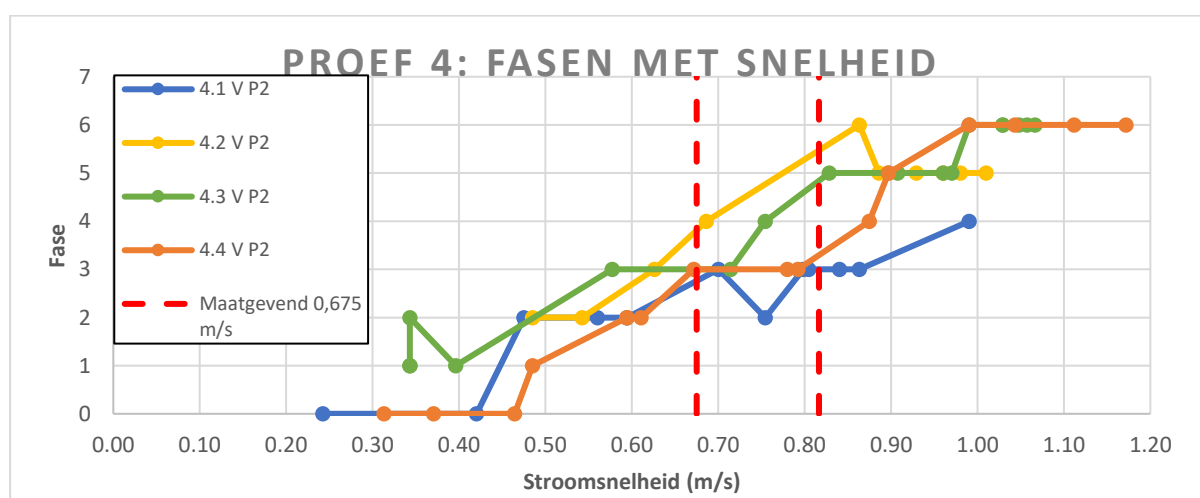
Wanneer de constructie verzadigd is begint bij zeer hoge stroomsnelheid de verrijking achter de stenen van de toplaag uit te spoelen. Hier ontstaan holtes door turbulentie van de voorliggende steen.

De constructie zelf komt niet in beweging en lijkt versterkt te worden.

Resultaten zijn weergegeven in Tabel 17 en grafiek 5

Tabel 17 Proef 4 Fasen – gemeten stroomsnelheid

Fase	Stroomsnelheid (m/s)
0	0,0-0,46
1	0,34-0,49
2	0,34-0,61
3	0,58-0,86
4	0,69-0,99
5	0,83-1,01
6	0,87-1,17



Grafiek 5 Proef 4 Fasen met snelheid

4.5.2 Analyse

Tussen de grafieken is spreiding aanwezig. Wanneer wordt gekeken naar proef 4.1 is fase 4 de hoogst behaalde fase, dit komt door de kleine hoeveelheid materiaal dat aangebracht is op de constructie. Doordat er weinig materiaal is aangebracht is het evenwicht al relatief vroeg in de proef bereikt waardoor er minder transport optreedt bij hogere stroomsnelheden.

Voor proef 4.2 is extra materiaal toegevoegd na afloop van proef 4.1. Hierdoor is een situatie ontstaan waarin de bodembescherming al verzadigd was en dus het materiaal niet eerst de poriën op zal vullen. De bereikte fasen zijn in vergelijking met proef 4.2 hoger bij lagere stroomsnelheden omdat er veel materiaal onbeschut ligt.

Bij proef 4.3 verandert de stroomsnelheid niet maar de fasen wel. Dit is waarschijnlijk een meetfout aangezien in de NIVUS-data een oplopende stroomsnelheid zichtbaar is. Dit kan worden verklaard doordat wellicht nog een zeer kleine hoeveelheid lucht in de pitotbuis aanwezig was.

Proef 4.4 haalt hogere stroomsnelheden dan de overige proeven, hier is extra pompcapaciteit aangebracht om de stroomsnelheid te verhogen.

De spreiding tussen de proeven kan worden veroorzaakt door de duur van de proef of hoeveel verrijkmateriaal is aangebracht. Wanneer wordt gekeken naar de duur van de proef zijn proef 4.1, 4.2 en 4.3 ongeveer even lang (1 uur) en steekt proef 4.4 daar boven uit (2 uur). Er is verschil in hoeveelheid aangebracht verrijkmateriaal tussen proef 4.1 en de proeven 4.2, 4.3 en proef 4.4. Bij proef 4.1 is rond de 5000 gram aangebracht en bij de proeven 4.2 en 4.3 is rond de 9000 gram aangebracht. Bij proef 4.4 is rond de 8500 gram aangebracht maar op een korter stuk dan de proeven 4.2 en 4.3 waardoor een dikkere laag ontstaat.

Vergelijking met maatgevende omstandigheden

Zoals eerder is aangegeven zijn de verschaalde maatgevende omstandigheden weergegeven in de grafiek als standlijnen. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de verrijking van de bodembescherming met schelpmateriaal niet stabiel is onder maatgevende omstandigheden. Het materiaal zal in beweging komen, pas na enige tijd blijft het schelpmateriaal, wat zich in de poriën en holtes bevindt van de toplaag, stabiel (Tabel 18).

Tabel 18 Maatgevende omstandigheden en fasen

Werkelijke stroomsnelheid	Verschaalde stroomsnelheid	Fase
1,9	0,68	3/4
2,3	0,82	3/5

Ecologische waarde

De verrijking van de bodembescherming door middel van schelpmateriaal heeft als doel hard substraat te bieden en een gunstig chemisch milieu te creëren. Na falen is er nog schelpmateriaal aanwezig in de poriën van de stenen, hier voegen de schelpen nog extra waarde toe aan het milieu. Echter is het materiaal niet stabiel, wat stress kan veroorzaken voor de organismen, dit wordt minder naarmate het evenwicht wordt bereikt. Nadeel van het opvullen van de poriën is dat hierdoor complexiteit en variabiliteit verloren gaat.

4.5.3 Conclusie van deze proef

Het schelpmateriaal heeft geen negatief effect op de constructieve stabiliteit van de vooroeververdediging. De verrijking lijkt sterkte toe te voegen aan de constructie, hoeveel is echter niet te bepalen met deze proeven.

Het schelpmateriaal faalt constructief bij het bereiken van fase 2. Uit de proeven is naar voren gekomen dat onder maatgevende omstandigheden tussen fase 2 en fase 4 wordt bereikt. Dit geeft aan dat het schelpmateriaal niet stabiel is onder maatgevende omstandigheden.

De habitat verandert na constructief falen doordat het materiaal dat niet in de poriën van de constructie ligt wegspoelt. Er blijft een deel liggen dat een verrijkende functie blijft vervullen.

4.6 Proef 5: 0-meting vooroeververdediging

De 0-meting is 2 keer uitgevoerd om de stabiliteit van de vooroever te kunnen vergelijken mét en zonder ecologische verrijking.

Belangrijkste bevinding is dat de constructie nauwelijks in beweging komt. Hierdoor kan enkel worden onderzocht of de ecologische verrijking een verzwakkend effect heeft op de constructie maar dit kan niet gekwantificeerd worden.

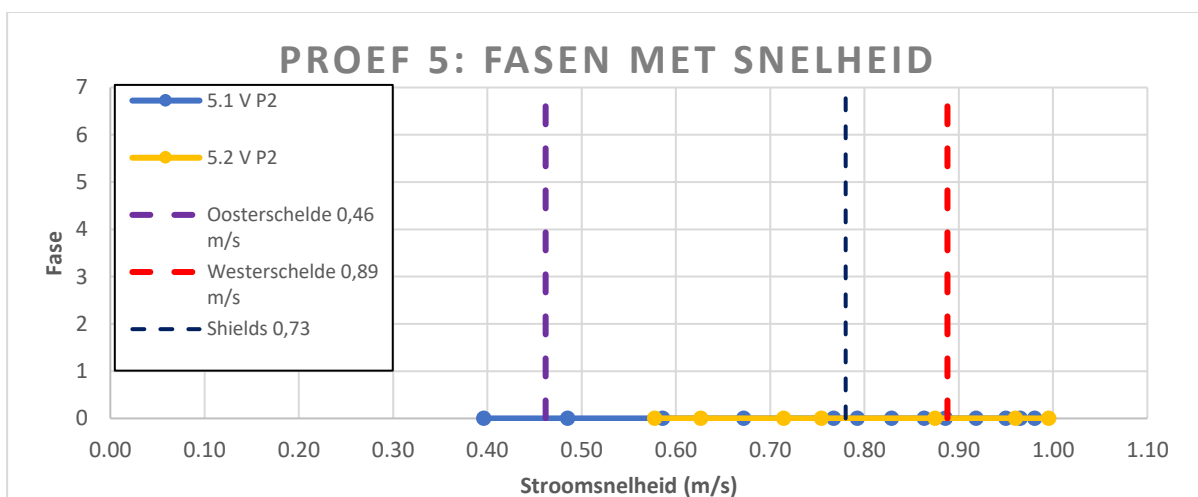
4.6.1 Resultaten

Er is verplaatsing van enkele steentjes aanwezig, echter niet genoeg om dit fase 1 te noemen, dit wordt niet meer of minder naarmate de stroomsnelheid wordt opgevoerd.

Resultaten zijn weergegeven in Tabel 19 en grafiek 6

Tabel 19 Fase – gemeten stroomsnelheid

Fase	Stroomsnelheid (m/s)
0	0-1,0



Grafiek 6 Fasen met snelheid

4.6.2 Analyse

Zoals eerder is aangegeven zijn de verschaalde maatgevende omstandigheden weergegeven in de grafiek als standlijnen.

Vergelijking met maatgevende omstandigheden

De maatgevende omstandigheden zijn tijdens de proeven behaald, hieruit is gebleken dat het materiaal onder maatgevende omstandigheden stabiel blijft en niet hoger komt dan fase 0 (Tabel 20).

Tabel 20 Maatgevende omstandigheden en fasen

Werkelijke stroomsnelheid	Verschaalde stroomsnelheid	Fase
1,9	0,68	0
2,3	0,82	0

Shields-vergelijking

Volgens Shields komt de vooroeververdediging bij een Shields-waarde van 0,035 (waarmee standaard wordt ontworpen) in beweging bij een stroomsnelheid van 0,78 m/s. De stroomsnelheid die behaald is in de proeven is hoog genoeg om de stenen te laten bewegen. Echter blijft het materiaal stabiel, een reden kan zijn omdat het materiaal onder een talud ligt, zie paragraaf 2.4.

4.6.3 Conclusie van deze proef

De constructie komt nauwelijks in beweging. De stroomsnelheid is niet hoog genoeg om fase 1 te bereiken. Hierdoor kan enkel worden onderzocht of de ecologische verrijking een verzwakkend effect heeft op de constructie, het is niet mogelijk om dit te kwantificeren.

4.7 Proef 6: Grote stenen op vooroeververdediging

De proef met grote stenen op de vooroeververdediging is drie keer uitgevoerd. Nadat de constructie van de vooroeververdediging is aangebracht wordt de verrijking met de hand neergelegd op de constructie.

De belangrijkste bevindingen van proef 6 zijn dat de stabiliteit van de grote stenen zeer sterk afhankelijk is van de positie zoals deze geplaatst zijn. Daarnaast rollen de stenen direct naar beneden wanneer deze van kleine hoogte boven de constructie worden losgelaten. Door de grote spreiding tussen de proeven is niet eenduidig vast te stellen wat het begin van bewegen voor grote stenen is. Er is geen eenduidig verschil in moment van bewegen tussen de verschillende gewichten van de stenen aangetoond.

4.7.1 Resultaten

0,5 Kg stenen

Steen 1 beweegt onder invloed van stroming en komt tot stilstand in de teen van het talud.

Steen 2 stabiel.

Plaats 3 (samenvoeging van drie stenen) één van de stenen komt in beweging en schuift af tot in de teen van de constructie, deze komt nogmaals in beweging en verplaatst horizontaal wanneer de stroomsnelheid verder wordt opgevoerd. De overige twee stenen zijn stabiel.

1 Kg stenen

Steen 1 beweegt onder invloed van stroming en komt tot stilstand in de teen van het talud.

Steen 2 beweegt later dan steen 1 onder invloed van stroming en komt tot stilstand in de teen van het talud.

Steen 3 komt onder zeer hoge stroomsnelheden zeer licht in beweging door beweging van de constructie rondom de steen. De steen blijft op het talud liggen.

Plaats 4 (samenvoeging van drie stenen) stabiel.

2 Kg stenen

Steen 1 stabiel.

Steen 2 beweegt enkele centimeters en komt tot stilstand op het talud.

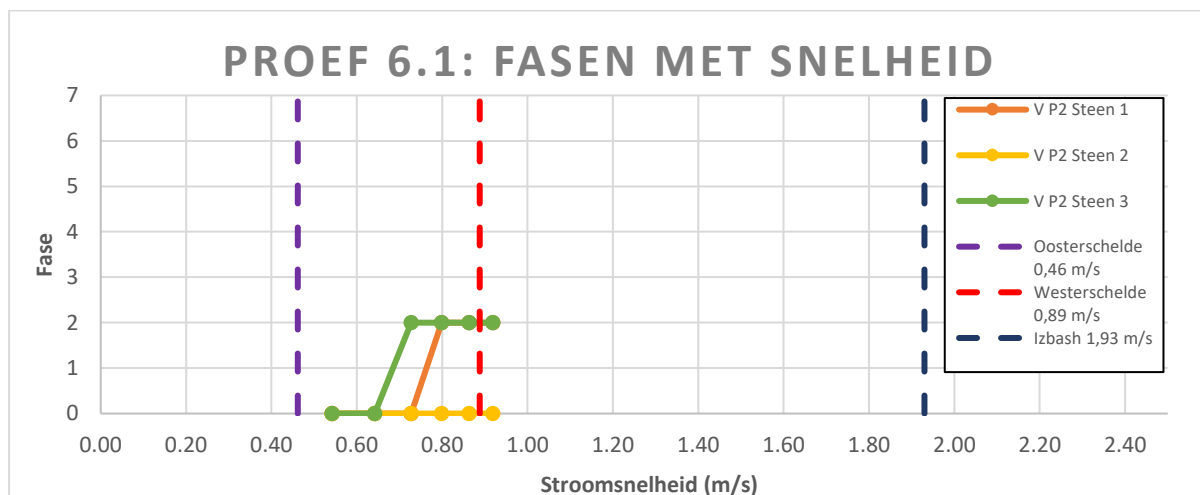
Steen 3 beweegt enkele centimeters en komt tot stilstand op het talud.

Wanneer naar de stenen van 2 Kg wordt gekeken is te zien dat deze stenen, wanneer eenmaal in beweging gekomen, niet direct naar de teen van de constructie rollen maar op het talud blijven liggen. De kleinere stenen rollen direct naar de teen van de constructie (0,5 en 1 Kg).

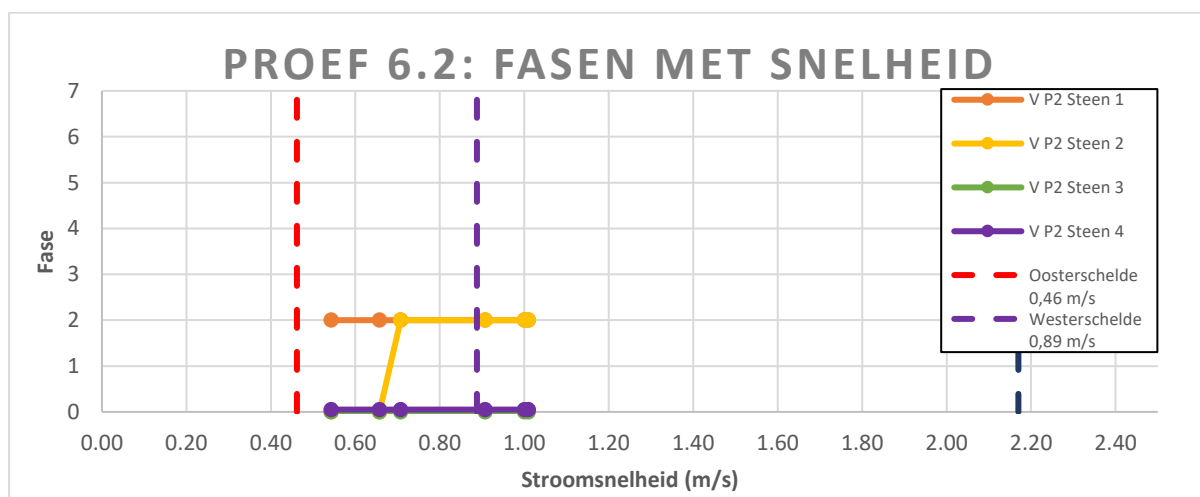
In de data is te zien dat er een grote spreiding is binnen de proeven tussen de verschillende stenen. In iedere proef is er een steen die stabiel is en zijn er twee stenen die bewegen, op verschillende momenten of op hetzelfde moment.

Tijdens het aanbrengen van de stenen valt op dat deze vaak direct naar de teen rollen wanneer deze van enkele centimeters hoogte boven het talud worden losgelaten.

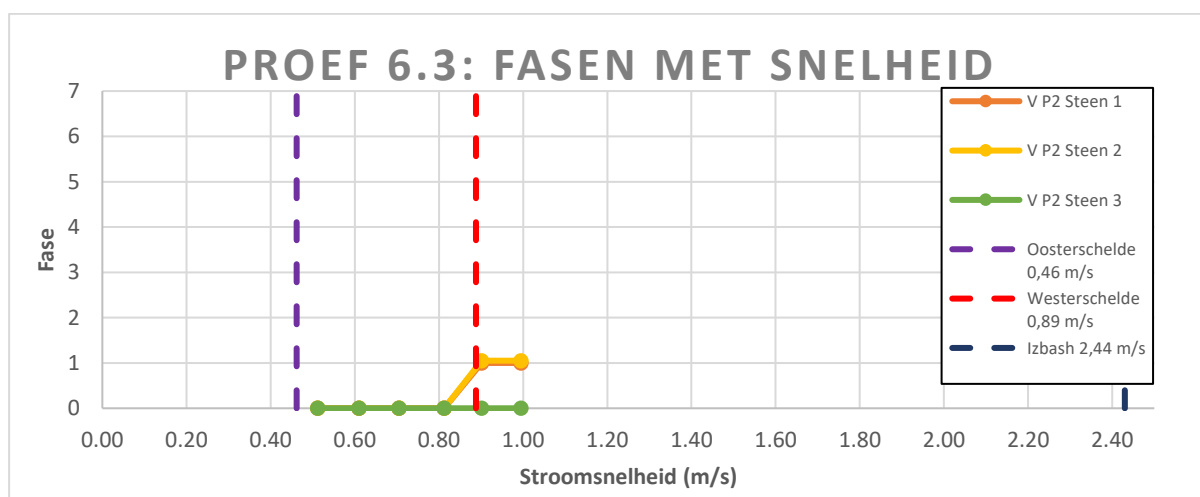
Er vindt lichte ontgronding plaats rondom de stenen waardoor de constructie wordt verzwakt. Dit veroorzaakt tevens verplaatsing van de stenen. Wanneer een steen naar beneden rolt worden enkele stenen van de toplaag meegenomen. Resultaten zijn weergegeven in grafiek 7, 8, 9.



Grafiek 7 Proef 6.1 Fasen met snelheid



Grafiek 8 Proef 6.2 Fasen met snelheid



Grafiek 9 Proef 6.3 Fase met snelheid

4.7.2 Analyse

De stenen komen in beweging tussen de 0,65 en 0,90 m/s. Bij proef 2 is te zien dat een steen bij zeer lage stroomsnelheid in beweging komt, dit komt doordat deze steen zeer instabiel lag bij het aanbrengen. Wanneer de stenen zijn samengelegd zijn deze niet stabiel of minder stabiel dan de losse stenen.

De stabiliteit is sterk afhankelijk van verschillende factoren. Hierdoor is niet eenduidig een patroon te ontdekken. De volgende factoren hebben invloed op de stabiliteit:

- *Aanbrengen*

Tijdens het aanbrengen van de stenen op de constructie valt op dat de stenen op de constructie gelegd moeten worden. Wanneer de stenen vanaf enige hoogte op de constructie worden losgelaten, rollen deze direct naar beneden. Hoe groter de stenen, hoe lastiger het wordt om de stenen aan te brengen. Uitzondering is wanneer de steen een zeer vlakke kant heeft en hierop valt.

- *Positie van de stenen*

De stabiliteit van de steen is sterk afhankelijk van de positie waarin deze is aangebracht. Wanneer de stenen al op een kantelpunt liggen komen deze eerder in beweging dan wanneer de stenen vlak liggen.

- *Stroming rondom de stenen*

Door de stroming rondom en achter de grote stenen die ontstaat vindt uitspoeling rondom de stenen plaats. Na enige tijd wordt de grote steen hierdoor instabiel. Dit is voornamelijk bij de 2 Kg stenen zichtbaar. Dit heeft een negatieve invloed op de bestaande constructie.

Vergelijking met maatgevende omstandigheden

Zoals eerder is aangegeven zijn de verschaalde maatgevende omstandigheden weergegeven in de grafiek als standlijnen. De fasen bij maatgevende omstandigheden staan in Tabel 21.

Tabel 21 Maatgevende omstandigheden en fasen

Werkelijke stroomsnelheid	Verschaalde stroomsnelheid	Fase
1,3	0,46	0
2,5	0,89	1/2

Uit bovenstaande kan worden geconcludeerd dat de verrijking van de vooroeververdediging in de Oosterschelde bij de Zeelandbrug door middel van grote steengradatie stabiel is onder maatgevende omstandigheden. Hierbij moet opgemerkt worden dat de stenen zeer rustig zijn neergelegd zodat deze stil lagen op het talud. Wanneer de stenen niet dusdanig rustig kunnen worden geplaatst zijn deze instabiel. Tevens moet opgemerkt worden dat de metingen begonnen zijn bij hogere snelheden dan de maatgevende omstandigheden waardoor de invloed van tijd niet kan worden meegenomen. Onder maatgevende omstandigheden in de Westerschelde is de verrijking door middel van grote steengradatie niet stabiel. De stenen zullen gaan rollen en naar verwachting in de teen terecht komen.

Izbash vergelijking

Volgens Izbash komt de grote steengradatie in beweging bij een stroomsnelheid van: 1,93 m/s (0,5 kg), 2,17 m/s (1 Kg) en 2,43 m/s (2 Kg). Dit komt niet overeen met de bevindingen uit de proeven. De lijn zoals zichtbaar is in de grafieken 7, 8, 9, staat ver na het moment van bewegen zoals gevonden in de proeven. De afwijkende waarden kunnen het best worden verklaard door het talud, de invloed van de stenen op elkaar en de ontgronding rondom de stenen.

Ecologische waarde

De ecologische waarde die grote stenen toevoegen aan het bestaande habitat door middel van het creëren van schuilruimtes blijft aanwezig maar verandert van plaats wanneer de stenen in de teen van de constructie belanden. De stenen blijven niet op het talud van de vooroever liggen waardoor hier het gecreëerde habitat verdwijnt.

4.7.3 Conclusie van deze proef

De ecologische verrijking door middel van grote steengradatie heeft een negatieve invloed op de stabiliteit van de constructie doordat sterk turbulente stroming ontstaat rondom de steen met als gevolg lichte ontgronding rondom de steen. Tevens neemt de steen een klein deel van de toplaag mee naar de teen van de constructie wanneer deze naar beneden rolt. Hoe groter de steen hoe sterker dit effect.

De ecologische verrijking door middel van grote steengradatie faalt constructief op verschillende momenten wat er voor zorgt dat het erg onvoorspelbaar is wanneer de steen begint met bewegen. Wanneer de steen in beweging komt is de kans groot dat deze direct naar de teen van de constructie rolt.

Na constructief falen verplaatst de ecologische verrijking zich naar de teen van de vooroeververdediging waar de habitat vervolgens wordt verrijkt. Hier behouden de grote stenen hun functie.

4.8 Proef 7: Kleine steengradatie op vooroeververdediging

De proef met kleine steengradatie op de vooroeververdediging is drie keer uitgevoerd. Nadat de constructie van de vooroeververdediging is aangebracht, wordt de verrijking met een maatbeker vanaf de waterlijn los op de constructie aangebracht. De verrijking is gelijkmatig verdeeld zodat overal ongeveer een even dikke laag ontstaat.

De belangrijkste bevindingen van proef 7 zijn dat de kleine steengradatie de poriën in de constructie opvult en er na constructief falen en na hogere fasen nog materiaal aanwezig blijft in de poriën. Na verloop van tijd gaat de fase bij hoge stroomsnelheden weer naar beneden. De verrijking bereikt voor de Oosterschelde maximaal fase 0 van bewegen en voor de Westerschelde maximaal fase 3 van bewegen onder maatgevende omstandigheden.

4.8.1 Resultaten

Na verloop van tijd worden de poriën in de constructie opgevuld en ontstaat een evenwicht van de hoeveelheid materiaal die wordt opgenomen in de constructie en blijft liggen. De toppen van de stenen van de constructie komen bloot te liggen en er is nog maar weinig transport van verrijking.

Het overtollig materiaal wordt schuin naar beneden afgevoerd, het materiaal hoopt zich op in de teen van het model. Wanneer het materiaal helemaal naar achteren is afgevoerd settelt het zich in de blootliggende constructie. Naarmate de stroomsnelheden oplopen wordt de afvoer van materiaal meer horizontaal en settelt het niet meer in de teen van de vooroever.

Wanneer een steentje verplaatst en andere steentjes raakt, komen deze direct in beweging. Er is maar weinig kracht nodig om de steentjes in beweging te brengen.

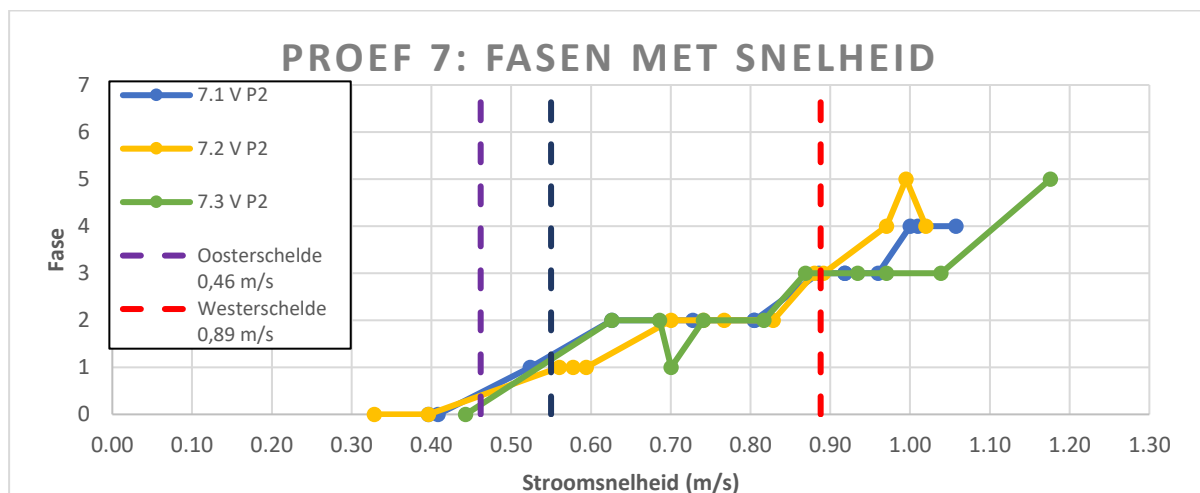
De kleinste steentjes van de verrijking lijken als eerst in beweging te komen. Het fijnere deel van de verrijking komt sneller in beweging dan het grove deel en rolt van het talud af.

De constructie zelf komt niet in beweging en lijkt versterkt te worden.

In de verkregen data is te zien dat er weinig spreiding is tussen de drie proeven. In Tabel 22 zijn de fasen met behaalde stroomsnelheid in het model weergegeven die voortkomen uit grafiek 10 waarin de stroomsnelheid tegen de fase is uitgezet.

Tabel 22 Proef 7 Fasen – gemeten stroomsnelheid

Fase	Stroomsnelheid (m/s)
0	0-0,44
1	0,52-0,59
2	0,63-0,83
3	0,87-1,04
4	0,97-1,06
5	1,0-1,18



Grafiek 10 Proef 7 Fasen met snelheid

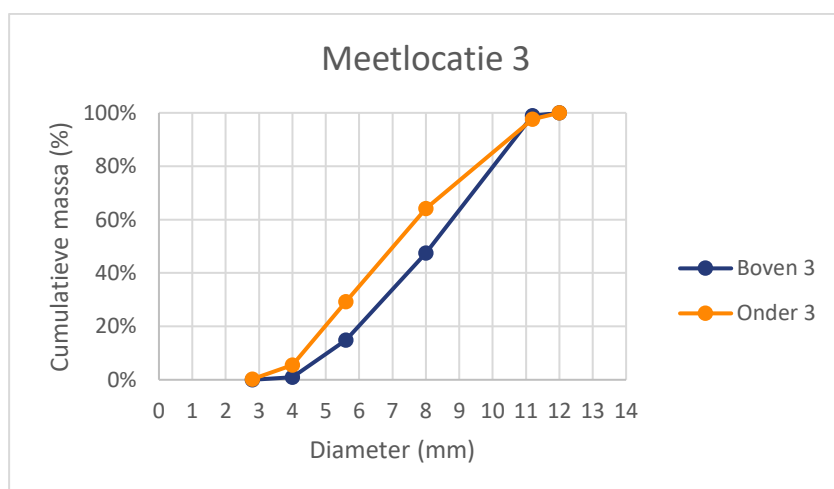
4.8.2 Analyse

De teruggang van fase 2 naar fase 1 bij proef 7.3 is te verklaren doordat de stroomsnelheid erg snel is opgevoerd in het begin waardoor het zeer ongunstig liggende verrijkmateriaal geen tijd heeft gehad om een gunstiger plek te zoeken waardoor het lijkt alsof direct fase 2 optreedt. Wanneer het materiaal een plekje heeft gevonden wordt het stabiel en gaat het dus terug van fase 2 naar 1.

De piek in proef 7.2 bij 1,0 m/s waar deze teruggaat naar fase 4 kan worden verklaard doordat de proef bij deze stroomsnelheid langere tijd duurde. Hier is zichtbaar in de data dat uiteindelijk een evenwicht ontstaat waardoor de fase van bewegen afneemt.

Het eerder wegspoelen van de kleinere deeltjes lijkt het eerste verschijnsel van armouring te zijn. Het gevolg hiervan is dat het grovere deel van de verrijking achterblijft in de poriën wat uiteindelijk voor meer stabiliteit zorgt. Verdere uitleg over armouring is in bijlage II hoofdstuk 3 te vinden.

Na het uitvoeren van de proeven zijn een aantal monsters genomen om de waarneming van armouring te onderbouwen. Van zowel de bovenkant van het model als de onderkant is een verrijkingmonster genomen waarvan de gradatie is bepaald. Uit de resultaten hiervan blijkt dat bovenin het model het grove deel van de verrijking vooral is blijven liggen en het fijnere materiaal naar beneden is verplaatst, zie grafiek 11.



Grafiek 11 Gradatie verrijking monster (monster is 90 cm vanaf voorkant model genomen)

De spreiding tussen de proeven kan worden veroorzaakt door de duur van de proef of hoeveel verrijkmateriaal is aangebracht. Wanneer wordt gekeken naar de duur van de proef zijn proef 7.1 en 7.3 ongeveer even lang (1 uur) en steekt proef 2 daar boven uit (1,5 uur). Er is tevens verschil tussen proef 7.1 en de proeven 7.2 en 7.3 in de hoeveelheid verrijkmateriaal dat is aangebracht. Bij proef 7.1 is ongeveer 7000 gram verrijking aangebracht. Bij de proeven 7.2 en 7.3 is ongeveer 11000 gram verrijking aangebracht.

Vergelijking met maatgevende omstandigheden

Zoals eerder is aangegeven zijn de verschaalde maatgevende omstandigheden weergegeven in de grafiek als standlijnen. Fasen bij maatgevende omstandigheden zijn:

Tabel 23 Maatgevende omstandigheden en fasen

Werkelijke stroomsnelheid	Verschaalde stroomsnelheid	Fase
1,3	0,46	0
2,5	0,89	3

Hieruit kan worden geconcludeerd dat de verrijking van de vooroeververdediging in de Oosterschelde bij de Zeelandbrug door middel van kleine steengradatie stabiel is onder maatgevende omstandigheden. Onder maatgevende omstandigheden in de Westerschelde is de verrijking door middel van kleine steengradatie niet stabiel. Er zal verplaatsing van materiaal plaatsvinden totdat een evenwicht bereikt wordt wanneer de maatgevende omstandigheden voor lange tijd aanhouden.

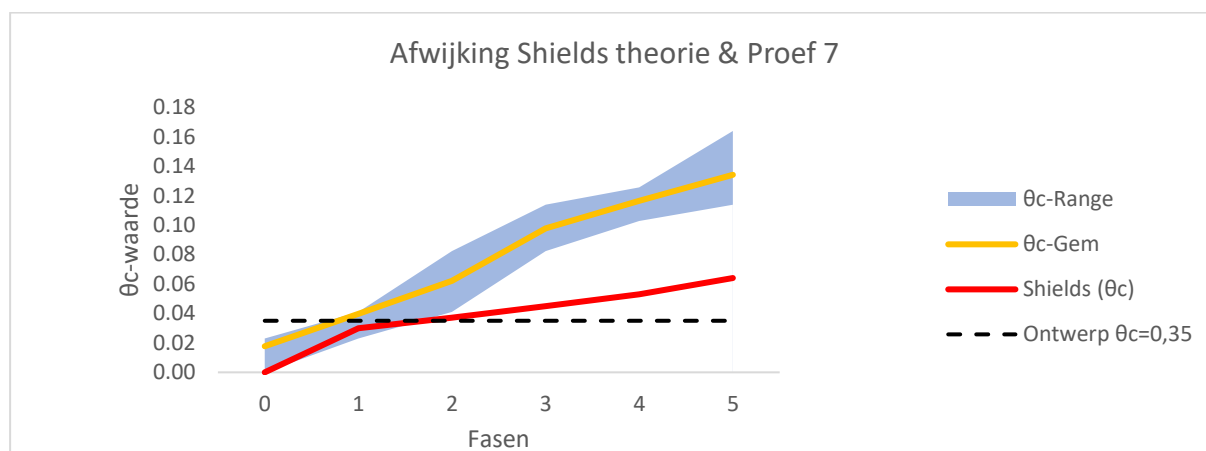
Shields-vergelijking

Volgens Shields komt de D50 van de kleine steengradatie bij een Shields-waarde van 0,035 (waarmee standaard wordt ontworpen) in beweging bij een stroomsnelheid van 0,55 m/s. Dit komt niet overeen met de bevindingen uit de proeven. De lijn zoals zichtbaar in de grafiek staat op de grens van overgang van fase 0 naar fase 1.

$$0,55 \text{ m/s} = 0/1$$

Dit betekent dat het begin van bewegen van de kleine steengradatie als verrijking kan worden ontworpen met behulp van de Shields-curve bij een waarde van 0,035 of lager.

Wat opvalt is dat de fasen volgens Shields en de fasen die tijdens de proeven zijn waargenomen van elkaar verschillen, zie grafiek 12.



Grafiek 12 Afwijking Shields theorie & Proef 7

Ecologische waarde

De verrijking van de vooroever door middel van kleine steengradatie heeft als doel zand in te vangen waarop organismen zich kunnen vestigen. Bij de Oosterschelde-casus blijft de verrijking goed liggen waardoor dit goed zal werken als verrijking. Bij de maatgevende omstandigheden in de Westerschelde zal het minder goed blijven liggen, hier zal enige verplaatsing optreden wat stress voor de organismen kan veroorzaken. Na maatgevende omstandigheden blijft echter een deel liggen waardoor het materiaal een ecologisch verrijkende functie kan behouden.

4.8.3 Conclusie van deze proef

De kleine steengradatie heeft geen verzwakkend effect op de constructieve stabiliteit van de vooroeververdediging. De verrijking lijkt sterkte toe te voegen aan de constructie, hoeveel is echter niet te bepalen met deze proeven.

De kleine steengradatie faalt constructief bij het bereiken van fase 2 van bewegen. Dit treedt op bij een stroomsnelheid van 0,6 m/s. Dit is hoger dan de maatgevende omstandigheden voor de Oosterschelde casus waardoor de verrijking in deze situatie stabiel zal zijn. In het geval van de Westerschelde wordt fase 3 bereikt, hier zal de verrijking instabiel zijn.

De dikke laag verrijking zoals aangebracht verandert naar een dunne laag tussen de poriën waarbij de constructie zichtbaar is. Hier behoudt de kleine steengradering zijn ecologisch verrijkende functie, er zal na afloop van maatgevende omstandigheden nog materiaal over zijn om zand in te vangen.

4.9 Proef 8: Schelpmateriaal op vooroeververdediging

De proef met schelpmateriaal op de vooroeververdediging is drie keer uitgevoerd. Nadat de constructie van de vooroeververdediging is aangebracht, wordt de verrijking met een maatbeker vanaf de waterlijn los op de constructie aangebracht. De verrijking is gelijkmatig verdeeld zodat overal ongeveer een even dikke laag ontstaat.

De belangrijkste bevindingen van proef 8 zijn dat het schelpmateriaal de poriën in de constructie opvult en er na constructief falen en na hogere fasen nog materiaal aanwezig blijft in de poriën. Na verloop van tijd gaat de fase bij hoge stroomsnelheden weer naar beneden. De verrijking bereikt voor de Oosterschelde maximaal fase 2 van bewegen en voor de Westerschelde maximaal fase 5 van bewegen onder maatgevende omstandigheden.

4.9.1 Resultaten

Na verloop van tijd worden de poriën in de constructie opgevuld en ontstaat een evenwicht van de hoeveelheid materiaal die maximaal wordt opgenomen in de constructie en blijft liggen. De toppen van de stenen van de constructie komen bloot te liggen en het transport gaat omlaag.

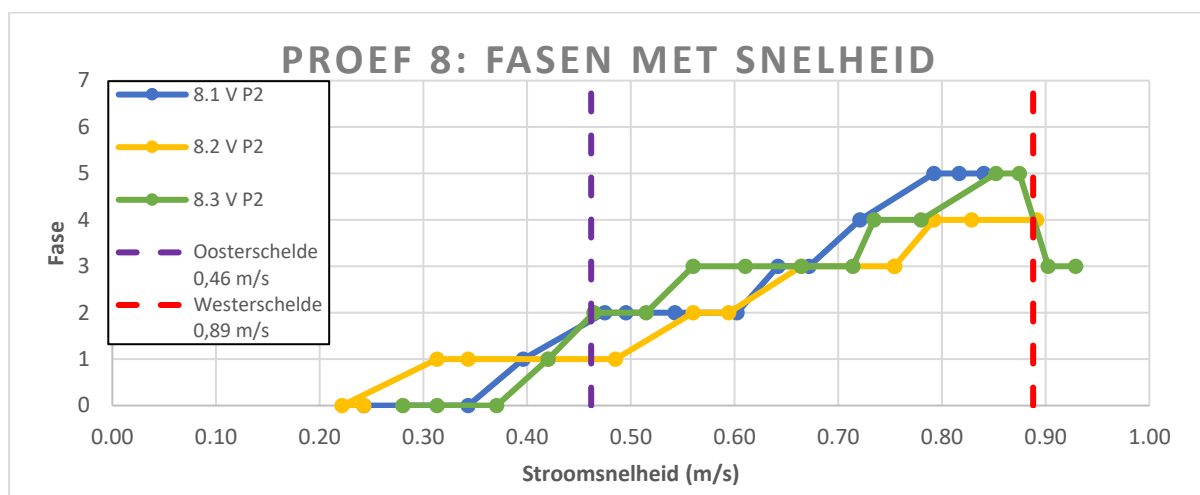
Het overtollig materiaal wordt schuin naar beneden afgevoerd, het materiaal hoopt zich op in de teen van het model. Wanneer het materiaal helemaal naar achteren is afgevoerd bezinkt het in de blootliggende constructie. Naarmate de stroomsnelheden oplopen wordt de afvoer van materiaal meer horizontaal en settelt het niet meer in de teen van de vooroever.

De constructie zelf komt niet in beweging en lijkt versterkt te worden.

In de verkregen data is te zien dat er weinig spreiding is tussen de twee proeven. In Tabel 24 zijn de fasen met behaalde stroomsnelheid in het model weergegeven die voortkomen uit grafiek 13 waarin de stroomsnelheid tegen de fase is uitgezet.

Tabel 24 Proef 8 Fasen – gemeten stroomsnelheid

Fase	Stroomsnelheid model (m/s)
0	0-0,37
1	0,31-0,49
2	0,46-0,60
3	0,56-0,75
4	0,72-0,89
5	0,79-0,89



Grafiek 13 Proef 8 Fasen met snelheid

4.9.2 Analyse

De teruggang van fase 5 naar fase 3 bij proef 8.3 is te verklaren doordat de proef bij deze stroomsnelheid langer duurde dan de andere proeven. Aan de teruggang in fase is te zien dat het niet beschutte materiaal weg is gespoeld en daardoor het transport afneemt. De proef heeft niet lang genoeg geduurd om een lagere fasen te behalen.

De spreiding tussen de proeven kan worden veroorzaakt door de duur van de proef of hoeveel verrijkmateriaal is aangebracht. Wanneer wordt gekeken naar de duur van de proef zijn er verschillen: proef 8.1 en 8.2 duren ongeveer 1,5 uur, proef 8.3 duurt ongeveer 2,5 uur. Het verschil in hoeveelheid verrijking tussen de proeven is klein, tussen de 5000 en 5500 gram.

Vergelijking met maatgevende omstandigheden

Zoals eerder is aangegeven zijn de verschaalde maatgevende omstandigheden weergegeven in de grafiek als standlijnen. Fasen bij maatgevende omstandigheden zijn:

Tabel 25 Maatgevende omstandigheden en fasen

Werkelijke stroomsnelheid	Verschaalde stroomsnelheid	Fase
1,3	0,46	1/2
2,5	0,89	4/5

Hieruit kan worden geconcludeerd dat de verrijking van de vooroeververdediging in de Oosterschelde bij de Zeelandbrug door middel van schelpmateriaal niet geheel stabiel is onder maatgevende omstandigheden. Er zal lichte verplaatsing optreden, echter zeer beperkt. Onder maatgevende omstandigheden in de Westerschelde is de verrijking door middel van kleine steengradatie niet stabiel. Er zal verplaatsing van materiaal plaatsvinden totdat een evenwicht bereikt is wanneer de maatgevende omstandigheden voor lange tijd aanhouden.

Ecologische waarde

De verrijking van de vooroever door middel van schelpmateriaal heeft als doel hard substraat en het juiste chemisch milieu te bieden voor organismen om zich op te kunnen vestigen. Er zal verplaatsing van materiaal plaatsvinden waardoor stress voor organismen kan ontstaan. Wanneer het evenwicht is bereikt is een deel van het schelpmateriaal nog aanwezig dat de ecologisch verrijkende rol vervult.

4.9.3 Conclusie van deze proef

Het schelpmateriaal heeft geen negatief effect op de constructieve stabiliteit van de vooroeververdediging. De verrijking lijkt sterkte toe te voegen aan de constructie, hoeveel is echter niet te bepalen met deze proeven.

Het schelpmateriaal faalt bij het bereiken van fase 2 van bewegen. Dit treedt op bij een stroomsnelheid van 0,45 m/s. Dit is gelijk aan de maatgevende omstandigheden voor de Oosterschelde casus waardoor de verrijking in deze situatie op de overgang van stabiel naar niet stabiel zal zijn. Voor de Westerschelde casus zal de verrijking niet stabiel zijn totdat het overtollig schelpmateriaal dat niet beschut zit is weggespoeld.

De dikke laag verrijking zoals aangebracht verandert naar een dunne laag tussen de poriën waarbij de constructie zichtbaar is. Hier behoudt het schelpmateriaal zijn ecologisch verrijkende functie, echter is de verrijking niet stabiel.

4.10 Proef 9: Kleine steengradatie en schelpmateriaal op vooroeververdediging

De proef met Kleine steengradatie en schelpmateriaal op de vooroeververdediging is twee keer uitgevoerd. Nadat de constructie van de vooroeververdediging is aangebracht, wordt in eerste instantie het schelpmateriaal met een maatbeker vanaf de waterlijn los op de constructie aangebracht. Vervolgens wordt de kleine steengradatie met een maatbeker vanaf de waterlijn los op de constructie aangebracht. De verrijking is gelijkmatig verdeeld zodat overal ongeveer een even dikke laag ontstaat.

De belangrijkste bevindingen van proef 9 zijn dat de combinatie van schelpmateriaal en kleine steengradatie minder hoge fasen van bewegen bereiken dan een van de twee verrijkingen apart. De kleine steengradatie houdt het schelpmateriaal vast waardoor deze later in beweging komt. De verrijking bereikt voor de Oosterschelde maximaal fase 0 van bewegen en voor de Westerschelde maximaal fase 2 van bewegen onder maatgevende omstandigheden.

4.10.1 Resultaten

De eerste beweging die optreedt is van de kleine steengradatie die het meest ongunstig ligt. Deze steentjes zoeken een gunstigere plek waarna het redelijk stabiel wordt. Voor langere tijd vindt beweging in fase 1 plaats van de steentjes. Het onderliggende schelpmateriaal komt niet in beweging zolang hier bovenop de kleine steengradatie ligt.

Wanneer de kleine steengradatie van een bepaalde plek is weggespoeld komt hier het schelpmateriaal bloot te liggen. De bovenste laag van het schelpmateriaal spoelt vervolgens weg en er blijft een deel achter, tevens blijven er enkele kleine steentjes liggen.

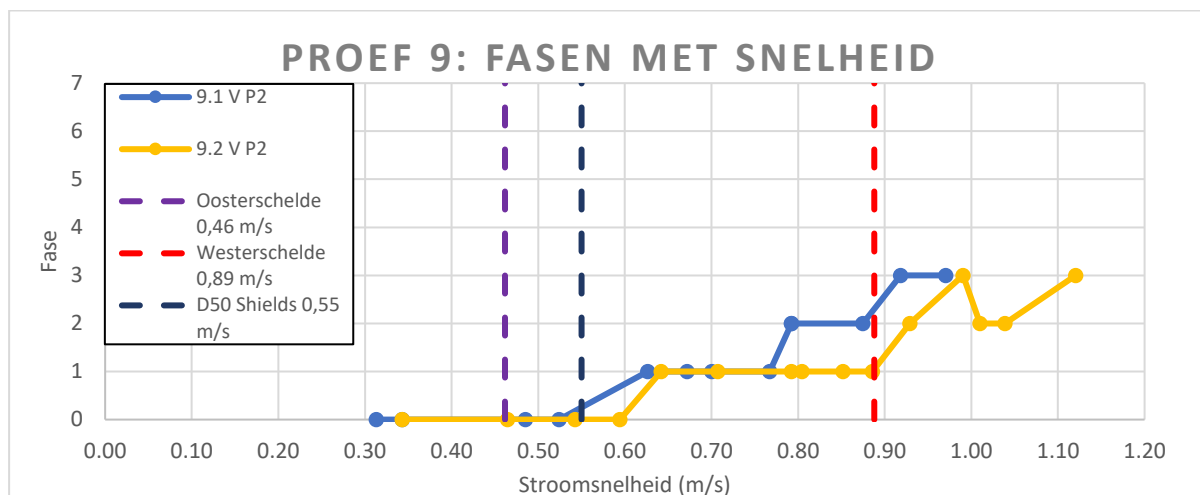
Ondanks dat proef 9.2 lange tijd duurt bij een hoge stroomsnelheid wordt geen hoge fase van bewegen bereikt en wordt ook geen teruggang in fase bereikt zoals bij zowel enkel schelpmateriaal als enkel kleine steengradatie het geval is.

De constructie zelf komt niet in beweging en lijkt versterkt te worden.

In de verkregen data is te zien dat er spreiding is tussen de twee proeven. In Tabel 26 zijn de fasen met behaalde stroomsnelheid in het model weergegeven die voortkomen uit grafiek 14 waarin de stroomsnelheid tegen de fase is uitgezet. Te zien is dat er spreiding is tussen proef 9.1 en 9.2. Hierdoor is niet eenduidig te zeggen wanneer de volgende fase is bereikt.

Tabel 26 Proef 9 Fasen – gemeten stroomsnelheid

Fase	Stroomsnelheid model (m/s)
0	0-0,59
1	0,63-0,89
2	0,79-0,93
3	0,92-1,12



Grafiek 14 Proef 9 Fasen met snelheid

4.10.2 Analyse

In de grafiek is te zien dat maximaal fase 3 van bewegen wordt bereikt. Blijkbaar komt de kleine steengradatie minder makkelijk in beweging op een ondergrond van schelpen dan op een ondergrond van dezelfde gradatie stenen, en komt het schelpmateriaal minder makkelijk in beweging wanneer het bedekt is met klein steenmateriaal. Er is geen eenduidige verklaring voor dit verschijnsel. Mogelijke oorzaken zijn dat de ruwheid van schelpmateriaal groter is dan van kleine steengradatie. Een andere mogelijke verklaring is dat de poriën worden opgevuld waardoor het aanstromend oppervlak wordt verkleind.

Het verschil tussen de proeven kan te maken hebben met het interpreteren van de situatie, de duur van de proef of hoeveel verrijkmateriaal is aangebracht. Wanneer wordt gekeken naar de duur van de proef zijn er verschillen: proef 9.1 duurt ongeveer 1 uur en proef 8.2 duurt ongeveer 2 uur. Het verschil in hoeveelheid verrijking tussen de proeven is als volgt: Proef 9.1 Schelpmateriaal: 3172 gram, kleine steengradatie: 3015 gram, totaal 6197 gram. Proef 9.2 Schelpmateriaal: 3252 gram, kleine steengradatie: 4910 gram, totaal 8162 gram.

Vergelijking met maatgevende omstandigheden

Zoals eerder is aangegeven zijn de verschaalde maatgevende omstandigheden weergegeven in de grafiek als standlijnen. Fasen bij maatgevende omstandigheden zijn:

Tabel 27 Maatgevende omstandigheden en fasen

Werkelijke stroomsnelheid	Verschaalde stroomsnelheid	Fase
1,3	0,46	0
2,5	0,89	1/2

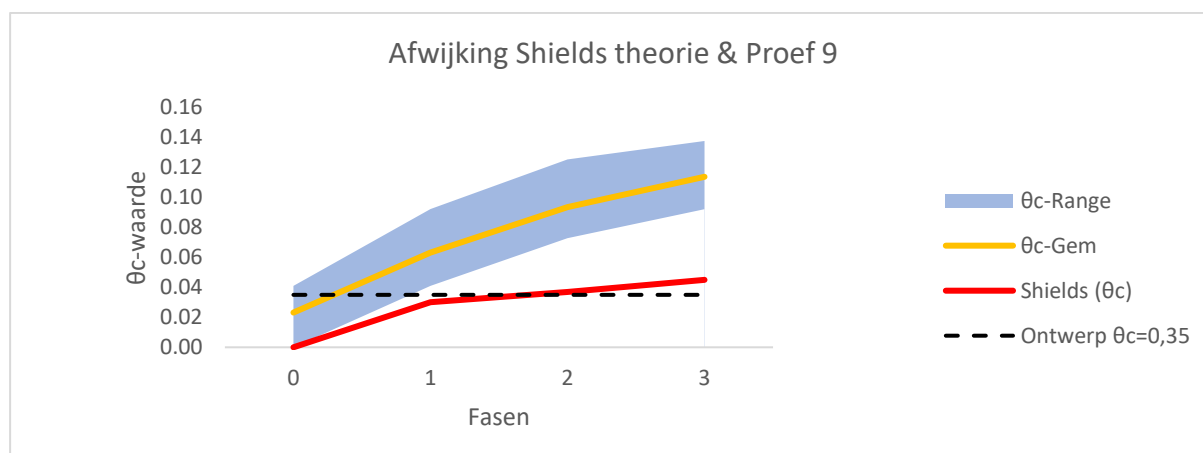
Hieruit kan worden geconcludeerd dat de verrijking van de vooroeververdediging in de Oosterschelde bij de Zeelandbrug door middel van een combinatie van schelpmateriaal en kleine steengradatie stabiel is onder maatgevende omstandigheden. Onder maatgevende omstandigheden in de Westerschelde zit de verrijking door middel van schelpmateriaal en kleine steengradatie op de overgang van stabiel naar niet stabiel. Volgens proef 9.1 treedt fase 2 van bewegen op, volgens proef 9.2 treedt nog net fase 1 op. Er zal in de tijd dus lichte verplaatsing van materiaal plaatsvinden. Dit zal echter niet snel gaan doordat maximaal fase 2 van bewegen wordt bereikt.

Shields-vergelijking

Volgens Shields komt de D50 van de kleine steengradatie bij een Shields-waarde van 0,035 (waarmee standaard wordt ontworpen) in beweging bij een stroomsnelheid van 0,55 m/s. Dit komt niet overeen met de bevindingen uit de proeven. De lijn zoals zichtbaar in de grafiek staat bij fase 0.

$$0,55 \text{ m/s} = 0$$

Dit betekent dat het begin van bewegen van de kleine steengradatie als verrijking in combinatie met schelpmateriaal in de praktijk sterker is dan volgens de ontwerpformule van Shields, zie grafiek 15.



Grafiek 15 Afwijking Shields theorie en Proef 9

Ecologische waarde

Kleine steengradatie wordt toegepast om zand in te vangen, schelpmateriaal wordt toegepast om een gunstig chemisch milieu te bieden om op te settelen. Doordat de beide verrijkingstypen tezamen beter blijven liggen is dit een verbetering ten opzichte van het enkel toepassen van een van beiden. Afhankelijk van het doel kan de combinatie worden aangebracht in verschillende verhoudingen.

4.10.3 Conclusie van deze proef

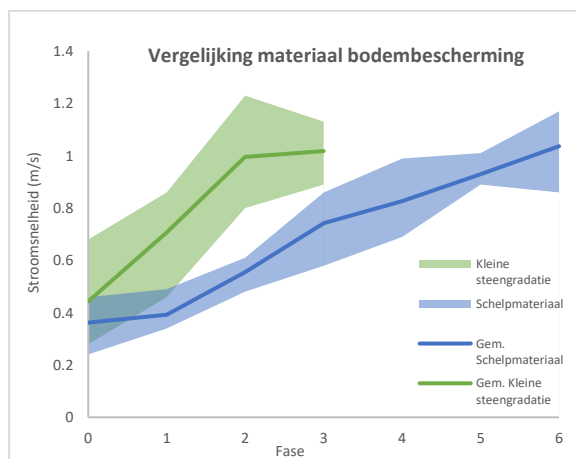
De combinatie van schelpmateriaal met kleine steengradatie heeft geen verzwakkend effect op de constructieve stabiliteit van de vooroeververdediging. De verrijking lijkt sterkte toe te voegen aan de constructie, hoeveel is echter niet te bepalen met deze proeven.

De kleine steengradatie in combinatie met schelpmateriaal faalt constructief bij het bereiken van fase 2 van bewegen. Dit treedt op bij een stroomsnelheid van 0,80 m/s. Dit is hoger dan de maatgevende omstandigheden voor de Oosterschelde casus waardoor de verrijking in deze situatie stabiel zal zijn. Voor de Westerschelde casus zal de verrijking niet stabiel zijn en zal enige verplaatsing optreden. De ecologische verandering die optreedt na constructief falen is dat een deel van de kleine steengradatie en het schelpmateriaal achterblijft, de situatie is echter niet meer stabiel.

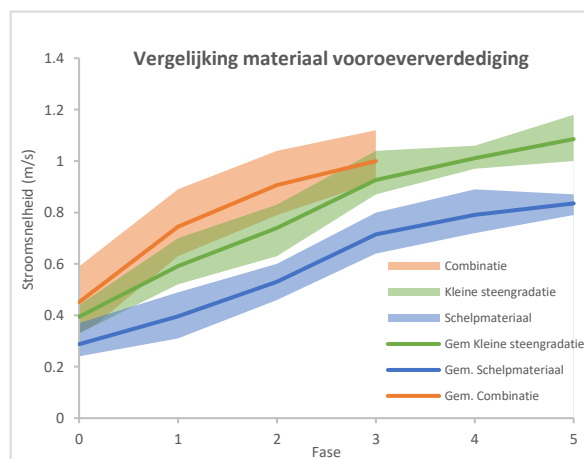
5 Interpretatie en discussie

In dit onderzoek is de stabiliteit van verschillende typen verrijking op bestaande breuksteenconstructies onderzocht. De resultaten uit voorgaand hoofdstuk moeten als volgt worden geïnterpreteerd. Het verschillend gedrag tussen de verrijkingstypen kan worden verklaard door het gewicht, de vorm van het materiaal en de onderliggende constructie waarop het materiaal is aangebracht. Wanneer de stroomsnelheid en de fasen oplopen blijkt het verrijkingsmateriaal in dit onderzoek stabiel dan verwacht op basis van de berekening volgens Shields. Hieruit kan worden afgeleid dat de opgevulde poriën van de bodembescherming en de opgevulde poriën van de vooroeververdediging een positieve invloed hebben op de stabiliteit van de verrijking.

Wanneer schelpmateriaal, kleine steengradatie en een combinatie met elkaar worden vergeleken valt op dat bij de bodembescherming de kleine steengradatie bij hogere stroomsnelheden stabiel is dan het schelpmateriaal. Dit komt waarschijnlijk door de lagere dichtheid en de karakteristieke vorm van het schelpmateriaal. Bij de vooroeververdediging blijkt een combinatie van kleine steengradatie en schelpmateriaal het meest stabiel. Een eenduidige verklaring voor de toegevoegde stabiliteit is op dit moment niet gegeven. Mogelijk heeft schelpmateriaal een hogere wrijvingsfactor waardoor de kleine steengradatie minder makkelijk in beweging komt. De vergelijking is in een grafiek weergegeven in grafiek 16 en 17.



Grafiek 16 Vergelijking materiaal bodembescherming



Grafiek 17 Vergelijking materiaal bodembescherming

Na constructief falen blijft een deel van het aangebrachte verrijkingsmateriaal liggen in de poriën van de onderliggende constructie. Dit kan worden verklaard doordat in de poriën de stroomsnelheid lokaal lager is dan de gemeten stroomsnelheid. De proeven duren niet even lang als de maatgevende omstandigheden (bodembescherming 6 uur, vooroeververdediging 3 uur) en niet dusdanig lang dat het materiaal weer volledig stabiel wordt. Hierdoor is niet met volledige zekerheid te stellen dat na maatgevende omstandigheden nog materiaal aanwezig is in de poriën.

De resultaten van het onderzoek wijzen uit dat het moment van bewegen van de oesterkooien op de bodembescherming onvoorspelbaar is. Het onvoorspelbare gedrag van de oesterkooi kan worden verklaard door het ontwerp. Doordat de onderkant dicht is en de kooi niet gegarandeerd vlak op de bodem ligt heeft de onderkant aanstromend oppervlak, wanneer dit gebeurt komt de oesterkooi snel in beweging. Voor de grote stenen op de vooroeververdediging geldt dat het moment van bewegen onvoorspelbaar is. Dat de stenen niet stabiel zijn kan worden verklaard door de helling. Blijkbaar heeft de helling dusdanig grote invloed op de stabiliteit van de stenen dat deze eerder in beweging komen dan volgens de theorie zou worden verwacht.

In dit onderzoek is niet aangetoond wanneer de constructie van de 0-meting faalt. Hierdoor kan enkel onderzocht worden of het verrijkingsmateriaal een verzwakkend effect heeft op de hoofdconstructie. Na afloop van de proeven met granulair materiaal (kleine steengradatie en schelpmateriaal) voelt de constructie stabiel aan dan de 0-meting. Dit kan mogelijk verklaard worden met het principe van krachtwerking op granulair materiaal waarop de stabiliteitsformules zijn gebaseerd.

Door de opvulling van de poriën wordt het aanstromend oppervlak verkleind, de schuifkracht verhoogd en het scharnierpunt komt hoger te liggen. Hierdoor moet de stroomsnelheid worden vergroot om dezelfde hef- en trekkracht op de steen te krijgen.

Van iedere verrijkingstype is op basis van de aanwezigheid van de habitateigenschappen voor hard substraat vastgesteld in welke mate de eigenschap aanwezig is. Dit is gedaan voor de situatie van aanbrengen, onder maatgevende omstandigheden en onder maximaal testbare omstandigheden. De exacte ecologische waarde van de verrijking is moeilijk in te schatten. Op basis van dit onderzoek kan wel de verandering in aanwezigheid van habitatkenmerken tussen de verschillende situaties worden bepaald. Dit is gedaan in overleg met ecoloog R. ter Hofstede om de betrouwbaarheid van het oordeel te verhogen. Een matrix met de vergelijking van de verschillende verrijkingstypen en habitateigenschappen onder verschillende omstandigheden is weergegeven in bijlage VI.

5.1 Discussie

Dit onderzoek is uitgevoerd door middel van proeven met schaalmodellen in een stroomgoot. De schaalmodellen zijn verschaald met behulp van Froude. Doordat het prototype verschaald wordt, treden schaaffecten op die zorgen dat de resultaten uit de proef niet één op één de prototype situatie nabootsen. De meeste punten zijn in hoofdstuk 3 genoemd met daarbij de maatregelen. De punten die het meeste invloed hebben op het verschil van moment van bewegen en bewegingsproces tussen prototype en model worden uitgelicht.

De maatgevende stroomsnelheid van de bodembescherming is bepaald door het samenvoegen van stroming en golfinvloeden. De belangrijkste factoren die hierdoor niet mee kunnen worden genomen zijn de liftende kracht en herhalende werking van de golven.

In het model is basalt gebruikt, in het prototype graniet. Om het dichtheidsverschil in de resultaten te compenseren is een factor toegepast. De factor is een aanname op basis van theorie en niet verder gevalideerd. Het schelpmateriaal is verschaald door de prototype schelpen te breken. De karakteristieke bolle vorm van de schelp gaat verloren. Hiervoor is in dit onderzoek geen compensatiefactor opgenomen. Om de effecten van een monopile op de bodembescherming in het schaalmodel mee te nemen is de stroomsnelheid vlak naast de paal berekend. In deze berekening kan de toegevoegde turbulentie niet mee worden genomen. De diameter van het materiaal in de stroomgoot moet minimaal 3 mm zijn. Hierdoor is voor de schelpengradatie enkel het grootste deel van de gradatie verschaald. Het kleinste deel van de gradatie zal naar verwachting eerder in beweging komen door de lagere massa.

Daarnaast zijn de volgende factoren van invloed op de vertaling van model naar prototype waar rekening mee moet worden gehouden.

In dit onderzoek is gekozen om te verschalen aan de hand van Froude. Door voor Froude te kiezen is het niet mogelijk om met behulp van Reynolds, Weber, Cauchy, Euler te verschalen. Doordat de stroomgoot een breedte van 0,3 meter heeft, hebben de wanden invloed op het stroomprofiel in de goot. De stroomsnelheid is in het midden gemeten, waar de minste invloed is. Achter de te testen constructie is een houten hulpconstructie aangebracht. Dit veroorzaakt inklemming van de te testen constructie. Dit voegt waarschijnlijk extra sterkte toe aan de gehele constructie. Tussen de proeven met eenzelfde proefopstelling is verschil aanwezig in hoeveelheid verrijkingsmateriaal en duur van de proef. Dit verschil veroorzaakt andere resultaten waardoor de vergelijking tussen proeven minder betrouwbaar wordt. De interpretatie van de fasen is subjectief. Om een zo eenduidig mogelijke vergelijking te maken is na afloop van de proeven al het beeldmateriaal teruggekeken en iedere stap opnieuw beoordeeld. De oesterkooien en grote stenen zijn relatief grote constructies in de stroomgoot die invloed op elkaar kunnen hebben door veranderend stroomprofiel of elkaar raken. Lagere gewichten oesterkooi is maar 1x uitgevoerd met maar 1 oesterkooi per verlaagd gewicht. Hierdoor is de kans op toeval aanwezig. De verhouding kleine steengradatie en schelpmateriaal was niet hetzelfde tijdens de twee proeven. Dit kan invloed hebben op de stabiliteit van een van beide materialen.

6 Conclusies en aanbevelingen

Voor deze afstudeerscriptie is met behulp van schaalmodel-proeven in een stroomgoot onderzoek gedaan om de onderzoeksvraag te kunnen beantwoorden. Allereerst worden de deelvragen beantwoord, tot slot volgt een antwoord op de hoofdvraag:

Deelvraag 1: Wat is de invloed van ecologische verrijking op de constructieve stabiliteit van bestaande breuksteenconstructies toegepast als bodembescherming en vooroeververdediging?

De invloed van ecologische verrijking op de constructieve stabiliteit van de bestaande constructies is onderzocht door de verkregen proefresultaten te vergelijken met de resultaten van de 0-meting. Bij zowel de bodembescherming als de vooroeververdediging is bij de 0-meting de constructie stabiel, hierdoor kan enkel onderzocht worden of het verrijkingsmateriaal een verzwakkend effect heeft op de hoofdconstructie. Uit het onderzoek blijkt dat kleine steengradatie, schelpmateriaal, en een combinatie van kleine steengradatie en schelpmateriaal de constructie niet verzwakt. De Oesterkooien en grote stenen hebben een negatief effect op de hoofdconstructie; wanneer de twee verrijkingsmaterialen in beweging komen beschadigen delen van de onderliggende hoofdconstructie. Daarnaast ontstaat bij de 2 kg stenen een stroomversnelling rondom het materiaal met lichte ontgronding tot gevolg.

Deelvraag 2: Onder welke hydraulische omstandigheden faalt ecologische verrijking constructief op bestaande breuksteenconstructies toegepast bij bodembescherming in windpark Luchterduinen en vooroeververdediging in de Oosterschelde, sectie Zuidhoek?

Uit het onderzoek is gebleken dat de ecologische verrijking bij verschillende stroomsnelheden instabiel wordt en hierdoor constructief faalt. Onder maatgevende omstandigheden op de bodembescherming is de kleine steengradatie stabiel. De oesterkooien en schelpmateriaal zijn onder maatgevende omstandigheden instabiel en falen constructief. Onder maatgevende omstandigheden van de vooroeververdediging zijn de kleine steengradatie, en de combinatie van kleine steengradatie en schelpmaterialen stabiel. Het schelpmateriaal is onder maatgevende omstandigheden op de grens van stabiel en instabiel. De grote stenen zijn onder maatgevende omstandigheden instabiel, de spreiding van het moment van bewegen is hierbij zeer groot.

Deelvraag 3: Hoe veranderen de fysieke habitat eigenschappen van ecologische verrijking na constructief falen?

De fysieke habitateigenschappen veranderen na constructief falen verschillend per verrijkingsmateriaal. Voor de bodembescherming geldt dat na falen van kleine steengradatie en schelpmateriaal nog materiaal achterblijft dat na maatgevende omstandigheden nog een ecologisch verrijkende functie heeft. De oesterkooien spoelen na constructief falen van de constructie af en hebben geen ecologische functie meer op de constructie. Voor de grote stenen op de vooroever geldt dat deze na constructief falen nog steeds een ecologisch verrijkende rol kunnen spelen. Dit zal echter wel op een andere locatie zijn. Een deel van de kleine steengradatie blijft in de poriën van de constructie achter waar het de ecologisch verrijkende rol kan vervullen. Het schelpmateriaal blijft na constructief falen voor een klein deel achter op de constructie, hier is het materiaal dat achterblijft stabiel en voegt het ecologische waarde aan de constructie toe. Bij de combinatie van kleine steengradatie en schelpmateriaal blijft de ecologisch verrijkende functie aanwezig na constructief falen.

Hoofdvraag: Wat zijn stabiliteitsproblemen bij het toepassen van ecologische verrijking op bodembescherming en vooroeververdediging?

Stabiliteitsproblemen die optreden bij het toepassen van ecologische verrijking zijn afhankelijk van het beoogde doel van de verrijking. Typen ecologische verrijking kunnen diverse functies vervullen. Wanneer ecologische verrijking constructief faalt, betekent dit niet dat de ecologische functie van de verrijking verdwijnt. Ecologische verrijking wordt instabiel onder bepaalde kritische stromingsomstandigheden en kan opgedeeld worden in granulair en niet-granulair materiaal. Problemen die bij instabiliteit van granulaire verrijkingsmaterialen (kleine steengradatie en

schelpenmateriaal) optreden zijn te veel beweging of het wegspoelen van materiaal. Te veel beweging maakt het voor organismen onmogelijk om zich te vestigen. Daarnaast kan het wegspoelen van materiaal zorgen voor te weinig vestigingsmogelijkheden. Een probleem dat bij instabiliteit van niet-granulair materiaal (oesterkooien en grote stenen) optreedt is het risico op schade aan de omliggende omgeving. Voor grote stenen geldt dat ontgronding rondom de steen ontstaat wat de onderliggende constructie aantast. Wanneer oesterkooien en grote stenen in beweging komen, nemen deze delen van de constructie mee.

6.1 Aanbevelingen

Het doel van het toepassen van ecologische verrijking is om bepaalde eigenschappen toe te voegen aan een bestaande habitat waardoor een hogere biomassa of biodiversiteit (of beiden) ontstaat. De verschillende kenmerken kunnen bereikt worden door het toevoegen van verschillende typen materiaal. Hieronder wordt een overzicht gegeven van de verschillende materialen die kunnen worden toegevoegd aan het bestaande habitat. Per type verrijking is aangegeven in hoeverre deze de gewenste toevoeging zal hebben en of deze stabiel is onder maatgevende omstandigheden. Tot slot zijn er een aantal algemene aanbevelingen gedaan en aanbevelingen voor vervolgonderzoek.

In bijlage VI is een matrix opgenomen met daarin de verschillende verrijkingsmaterialen en de habitateigenschappen. Het verschil tussen het moment van aanbrengen, maatgevende omstandigheden en einde proef is hierin aangegeven. Voor de eigenschap 'soort-specifieke habitateisen' is naar de aanwezigheid van een gunstig chemisch milieu voor de vestiging van de platte oesterlarven gekeken. Het aspect duurzaamheid is niet meegenomen (hoeveelheid zand invang) in de beoordeling omdat dit in dit onderzoek niet is onderzocht.

6.1.1 Bodembescherming

Kleine steengradatie

De kleine steengradatie werkt goed om kleine holtes en grind-achtig substraat te creëren. De verrijking blijft onder maatgevende omstandigheden stabiel (fase 1/ begin 2). Door het toevoegen van de kleine steengradatie gaan echter de grote holtes verloren. Het is van belang dat niet een te dikke laag wordt aangebracht zodat een deel van de constructie nog bloot ligt.. Om de variabiliteit en complexiteit te verhogen wordt geadviseerd om kleine steengradatie op een gedeelte van de bodembescherming aan te brengen, zodat een deel met en een deel zonder verrijking ontstaat.

Oesterkooien

Oesterkooien van het huidige ontwerp wordt niet geadviseerd toe te passen door de onvoorspelbaarheid van verplaatsing en het risico op schade wanneer de oesterkooi in beweging komt. Het ontwerp zal moeten worden verbeterd of de kooi verankerd voordat deze veilig en effectief kan worden toegepast.

Schelpmateriaal

Wanneer gestreefd wordt naar het creëren van optimale chemische omstandigheden kan schelpmateriaal worden toegevoegd. Onder maatgevende omstandigheden komt het materiaal in beweging en zal een deel wegspoelen. Na afloop van maatgevende omstandigheden blijft een deel liggen, dat beschermt in de poriën ligt, waar organismen zich op kunnen vestigen. Het schelpmateriaal komt echter bij relatief lage stroomsnelheid in beweging waardoor stress kan ontstaan. Geadviseerd wordt om schelpmateriaal aan te brengen op locaties waar specifieke chemische omstandigheden gewenst zijn en deze niet overal aan te brengen omdat de complexiteit en variabiliteit anders deels verloren gaan.

6.1.2 Vooroeververdediging

Grote stenen

Grote stenen geven diversiteit en complexiteit aan een omgeving. Door de instabiliteit en onvoorspelbaarheid van verplaatsing van grote stenen wordt niet geadviseerd deze toe te passen op het talud. De grote stenen kunnen wel direct in de teen van de constructie worden aangebracht. Door de vlakke ondergrond liggen de stenen daar stabiel en wordt lokaal diversiteit en complexiteit toegevoegd zonder risico op naar beneden rollen.

Kleine steengradatie

Kleine steengradatie is stabiel onder maatgevende omstandigheden. Geadviseerd wordt om kleine steengradatie toe te passen om zand in te vangen. De complexiteit en variabiliteit gaan wellicht verloren maar dit hoeft geen probleem te zijn wanneer hier niet naar wordt gestreefd.

Schelpmateriaal

Wanneer gestreefd wordt naar het creëren van optimale chemische omstandigheden kan schelpmateriaal worden toegevoegd. Onder maatgevende omstandigheden zit het materiaal op de grens van bewegen. Het materiaal zal niet volledig stabiel zijn voor organismen om op te vestigen. Geadviseerd wordt om schelpmateriaal aan te brengen op locaties waar specifieke chemische omstandigheden gewenst zijn en deze niet overal aan te brengen omdat de complexiteit en variabiliteit anders deels verloren gaan.

Kleine steengradatie en schelpmateriaal

De combinatie van kleine steengradatie en schelpmateriaal is stabiel dan enkel kleine steengradatie of schelpmateriaal. De combinatie is stabiel onder maatgevende omstandigheden en kan dus goed worden toegepast. Afhankelijk van welke habitateigenschappen gewenst zijn, zal de verhouding moeten worden bepaald. Hier zal verder onderzoek naar moeten worden gedaan.

6.1.3 Algemene aanbevelingen

Hieronder zijn drie aanbevelingen gegeven die voor zowel de bodembescherming als de vooroeververdediging gelden. Daarnaast is een aanbeveling voor de toepassing van ecologische verrijking in de Westerschelde gedaan.

Combineren van materialen

Omdat verschillende materialen verschillende eigenschappen aan een habitat toevoegen wordt geadviseerd om te kijken naar de eigenschappen van de bestaande habitat om te bepalen welke eigenschappen hieraan toegevoegd moeten worden. Hierbij wordt geadviseerd om materialen te combineren of een gedeelte van het bestaande habitat ecologisch te verrijken zodat de bestaande habitateigenschappen niet verloren gaan.

Laagdikte

Voor de kleine steengradatie en schelpmateriaal geldt dat in Lengkeek et al., 2017 wordt geadviseerd om een 1-3 decimeter dikke laag toe te passen bovenop de constructie. Op basis van dit onderzoek wordt geadviseerd om een laagdikte toe te passen die niet boven de constructie uitkomt omdat het materiaal hier het meest stabiel is en variabiliteit en complexiteit behouden wordt.

Locatie van materialen

Voor de bodembescherming geldt dat de maatgevende omstandigheden zich dicht bij de monopile bevinden. Hoe verder van de monopile vandaan, hoe minder de invloed van de monopile, waardoor de maatgevende stroomsnelheid zeer snel zakt. Daarom wordt geadviseerd om op een afstand van ten minste 1 meter van de monopile verrijking aan te brengen. Hier is de maatgevende stroomsnelheid van maximaal 2,3 m/s naar 1,8 m/s gezakt. Onder deze omstandigheden zijn de verschillende verrijkingstypen stabiel en is enkel het schelpmateriaal niet stabiel (fase 3). Daarnaast is het van belang dat, wanneer gestreefd wordt naar een variabele en complexe habitat, een gedeelte van de toplaag niet wordt bedekt met verrijkingsmateriaal.

Moment van aanbrengen

Schelpmateriaal is zowel op de bodembescherming als op de vooroeververdediging niet stabiel onder maatgevende omstandigheden. Na verloop van tijd wordt een evenwichtssituatie bereikt waarin het materiaal stabiel wordt. Omdat het schelpmateriaal dient als hechttingsplaats voor organismen moet het rond de juiste tijd van het jaar aanwezig en stabiel zijn. Geadviseerd wordt om het schelpmateriaal ruime tijd voor de voortplantingsperiode aan te brengen en tevens deels tijdens het stormseizoen (1 oktober – 15 april) zodat de minst stabiele schelpen weggespoeld zijn of een gunstiger plaats hebben gevonden en het substraat dus stabiel wordt.

Westerschelde

In het hoofdstuk “Resultaten” worden de resultaten van de proef vergeleken met de maatgevende omstandigheden in de Westerschelde. Hieruit komt naar voren dat geen van de verrijkingstypen stabiel is onder maatgevende omstandigheden. Er zal verder onderzoek moeten worden gedaan naar het evenwicht dat optreedt en de hoeveelheid verrijkingmateriaal dat achterblijft na maatgevende omstandigheden.

6.2 Vervolgonderzoeken

Hoeveelheid materiaal

Voor dit onderzoek is een grote hoeveelheid verrijkingmateriaal aangebracht om, ook aan het einde van de proef, het proces van bewegen goed zichtbaar te maken. Dit betekent niet dat dit de juiste hoeveelheid materiaal is die in werkelijkheid moet worden aangebracht om de habitat-verrijkende functie te vervullen. Om materiaalverspilling te voorkomen is vervolgonderzoek nodig naar de ideale hoeveelheid verrijkingmateriaal.

Lange duur bij lage stroomsnelheid

Dit onderzoek focust zich op het proces van bewegen bij verschillende stroomsnelheden waardoor iedere stroomsnelheid beperkte tijd heeft gestroomd. Hierdoor is de factor tijd niet representatief. Het is echter interessant om te weten in hoeverre het verrijkingmateriaal onder relatief lage stroomsnelheden (begin van bewegen) zich ontwikkelt in de tijd. Hiervoor zijn langere proeven nodig, denk aan enkele uren of zelfs dagen.

Golven toevoegen

In de gebruikte proefopstelling zijn geen golven meegenomen omdat dit niet mogelijk was in verband met de faciliteiten. De golven zijn omgerekend naar stroming om een zo goed mogelijk beeld te geven van maatgevende omstandigheden. Echter kan de liftende werking van golven niet mee worden genomen in deze berekening waardoor wellicht een afwijking ten opzichte van de werkelijke situatie is opgetreden. Om dit aan te tonen is onderzoek nodig in een opstelling waarbij stroming en golven kunnen worden gecombineerd.

Stabiliteit van de constructie

De invloed van de ecologische verrijking op de stabiliteit van de constructie kan in dit onderzoek niet gekwantificeerd worden omdat de constructie niet faalt onder maximaal haalbare stroomsnelheden. Zoals besproken lijkt de granulaire verrijking een versterkende invloed te hebben op de constructie. Om dit aan te tonen is onderzoek nodig in een stroomgoot die stroomsnelheden behaalt waarbij de constructie faalt. Hiermee kan een extra voordeel van ecologische verrijking worden aangetoond.

Verschillende toplaaggradaties

De grootte en hoeveelheid poriën die in de onderliggende constructie aanwezig zijn, zijn van invloed op de stabiliteit van de ecologische verrijking. In dit onderzoek zijn twee verschillende onderliggende constructies met verschillende gradaties getest. Om inzicht te krijgen in de invloed van de verschillende afmetingen van de poriën en de hoeveelheid materiaal die achter kan blijven in de poriën is verder onderzoek nodig.

7 Bronnen

- (2019). Opgehaald van Ecoshape: www.ecoshape.org
- Caires, S. (2012). *Maximale significante golfhoogte bij ondiep water en maximale golfsteilheid*. Delft: Deltares.
- Carreiras, J., Larroudé, P., Santos, F. S., & Mory, M. (2000). *Wave scour around piles*. Sydney: Balkema.
- De Rouck, J., & Troch, P. (2008). *Optimalisatie van erosiebescherming voor monopile fundering*. Gent: Universiteit Gent.
- deklinkersierbestrating.nl*. (2016). Opgehaald van deklinkersierbestrating.nl: <http://deklinkersierbestrating.nl/>
- Grintjezeker*. (2019). Opgehaald van [Grintjezeker.nl](http://www.grintjezeker.nl): www.grintjezeker.nl
- Hasselmann, K., Barnett, T., & Bouws, E. e. (1973). *Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)*. Hamburg: Deutsches Hydrographisches Institut.
- Hoan, N. (2008). *Stone Stability under non-uniform flow*. Delft: Universiteit Delft.
- Howard, A. (2015). *Substrate controls on the size composition of lobster (Homarus gammarus) population*. Burnham: Fisheries Laboratory.
- Kamermans, P., Walles, B., Kraan, M., & al., e. (2018). *Offshore Wind Farms as Potential Locations for Flat*. Wageningen: Wageningen University.
- Lamb, M., Dietrich, M., & Venditti, J. (2018). *Is the critical Shields stress for incipient sediment motion dependent on channel-bed slope?* California: American Geophysical Union.
- Lammers, J. C. (1997). *Shields in de praktijk*. Delft: TU Delft.
- Lengkeek, W., Didden, K., Teunis, M., & al., e. (2017). *Eco-friendly design of scour protection: potential enhancement of ecological functioning in offshore wind farms*. Bureau Waardenburg, Deltares, Wageningen Universiteit.
- Lindeboom, H., Witbaard, R., Bos, O., & Meesters, H. (2008). *Gebiedsbescherming Noordzee*. Wageningen: Wageningen UR.
- Luchterduinen Offshore wind farm project (5 14, 2013).
- Matthieu, J., Raaijmakers, T., & van Velzen, G. (2013). *Scour protection Luchterduinen Offshore wind farm*. Delft: Deltaris.
- Media, S. (2019, mei 17). *Shields diagram*. Opgehaald van Serc Media: <https://serc.carleton.edu/details/images/11032.html>
- Nederlands normalisatie-instituut. (2015). *NEN-EN 13383 -1 Waterbouwsteen - Deel 1: Specificatie*. Delft: Nederlands normalisatie instituut.
- (1992). *Noordzee-Atlas (Hst 18)*. Eisma.
- Nortek AS. (2019, 2 21). *New to Waves?* Opgehaald van Nortekusa: <http://www.nortekusa.com/usa/products/wave-systems/new-to-waves>
- Oceanography, M. (Regisseur). (2014). *Waves 2 Orbital waves* [Film].

- Rijkswaterstaat. (2016). *Natura 2000 Deltawateren Beheerplan 2016-2022*. Ministrie van Infrastructuur en Milieu / Rijkswaterstaat.
- Rijn, L. G. (1984). *Sediment Transport*. ASCE.
- Schiereck, G. J. (2004). *Introduction to bed, bank and shore protection*. London: Spons Press.
- Schukking, H. N., & Breusers, W. H. (1972). *Beweging van bodemmateriaal*. Delft: Waterloopkundig Laboratorium.
- Smaal, A. (2017). *Platte oesters in offshorewindparken*. Wageningen: Universiteit Wageningen.
- Soulsby, R. L. (2006). *Simplified calculation of wave orbital velocities*. HR Wallingford.
- Soulsby, R., & Smallman, J. (1986). *A Direct Method of Calculating Bottom Orbital Velocity Under Waves*. HR Wallingford.
- Sumer, B., & Fredsøe, J. (2002). The mechanics of scour in the marine environment. *Advanced series of ocean engineering*, 536.
- Sumner, D. (2004). *Journal of Visualization . A visualization study of fluid-structure interaction between a circular cylinder and a channel bed*, 187-199.
- (2007). *The Rock Manual*. London: CUR.
- Tuinsteentjes. (2018). Opgehaald van Tuinsteentjes.com.
- Umeda, S., Yuhi, M., & Ishida, H. (2003). Coastal structures. *Numerical study of three-dimensional flow around the base of a vertical cylinder*, 751 - 736.
- Van Dale. (2019). *ecologie*. Opgehaald van vandale: <https://www.vandale.nl/gratis-woordenboek/nederlands/betekenis/ecologie#.XGFsylvxKg2w>
- Van Dale. (2019). *verrijking*. Opgehaald van vandale: <https://www.vandale.nl/gratis-woordenboek/nederlands/betekenis/verrijken#.XGFtTFxKg2w>
- Van Oord. (2009, April 6). *Vooroeververdedigingen Oosterschelde en Westerschelde*. Rotterdam: Van Oord.
- Van Oord. (2013). *Technical Note Basis for an optimized scour protection design*. Rotterdam: Van Oord.
- Whitehouse, R. (1998). *Scour at marine structures*. Kent: Thomas Telford Publications.

Bijlage I

Plan van aanpak

Mei 2019



Ecologische verrijking van breuksteenconstructies

BSc Afstudeerscriptie

Plan van aanpak

Mei 2019

Jan Rigter
Jan-Willem Bekendam
Kevin van Donselaar

HOGESCHOOL VAN ARNHEM & NIJMEGEN
Faculteit Built Environment
Civiele Techniek



Inhoud

1	Introductie	1
2	Leeswijzer	1
3	Projectdefinitie	2
3.1	Aanleiding	2
3.2	Onderzoeksvragen	3
3.3	Afbakening	4
3.3.1	Definitie “Ecologische Verrijking”	4
3.3.2	Soorten verrijking	4
3.3.3	Onderzoek locatie	5
4	Projectteam	6
5	Communicatie	7
6	Begeleiding	7
7	Projectopdracht	8
7.1	Methode	8
7.1.1	Fase 1: Plan van aanpak	8
7.1.2	Fase 2: Voorbereiding onderzoek	10
7.1.3	Fase 3: Data verzamelen	11
7.1.4	Fase 4: Resultaten en conclusies	11
8	Projectactiviteiten	12
9	Producten	13
10	Kwaliteit	14
10.1	Ambitieniveau	14
10.2	Richtlijnen	14
10.3	Feedback	15
11	Risico's	16
11.1	Identificeren en beschrijven van de risico's	16
12	Bronnen	17
	Bijlage A - Risico Matrix	18
	Bijlage B – Planning	20
	Bijlage C – POP	22

1 Introductie

Breuksteen is een veelgebruikt materiaal in de waterbouw. Denk hierbij aan bodembescherming rondom windmolens, vooroeverconstructies en golfbrekers.

Van Oord heeft aangegeven geïnteresseerd te zijn in het toepassen van ecologische verrijkingen bij deze steenconstructies.

Tijdens onze afstudeerperiode zullen wij onderzoek doen naar de stabiliteit en haalbaarheid van deze ecologische verrijkingen. Daarnaast wordt ook gekeken naar de invloed van deze verrijkingen op het bestaande ecosysteem.

De verrijkingen waar in dit afstudeertraject onderzoek naar wordt gedaan zijn:

- Oesterkorven;
- Schelpmateriaal;
- Kleinere gradatie stenen;
- Grotere gradatie stenen.

Het doel van het onderzoek is om vanuit een technisch en ecologisch oogpunt te kijken naar de meerwaarde en gevolgen van deze verrijkingen op breuksteenconstructies bij bodembescherming en dijken. Tijdens dit onderzoek zal met behulp van proeven worden gekeken bij welke omstandigheden de verrijkingconstructie bezwijkt en welke verandering in fysieke habitat eigenschappen optreden.

2 Leeswijzer

Het eerste hoofdstuk 'Projectdefinitie' geeft de essentie van het project weer. Vanuit een beschrijving van de aanleiding, context en afbakening volgen een aantal onderzoeksvragen en op te leveren projectresultaten. Dit vormt de basis voor het volgende hoofdstuk.

In hoofdstuk twee 'Projectaanpak' vindt u een overzicht van de aanpak van dit afstudeeronderzoek met een planning waarin de hoofdactiviteiten worden weergegeven. Tenslotte volgt een beschrijving van eventuele risico's en afspraken die voor dit onderzoek zijn gemaakt.

3 Projectdefinitie

3.1 Aanleiding

Het op een duurzame manier uitvoeren van projecten is tegenwoordig een relevant onderwerp. Tijdens de aanbestedingsfase wordt het voor aannemers steeds belangrijker te laten zien dat zij hun ecologische voetafdruk willen verkleinen en hun steentje willen bijdragen aan een duurzamere wereld.

Het bijdragen aan een duurzamere wereld kan op verschillende manieren. In het geval van Van Oord wordt dit gedaan door het groener maken van materieel, recyclen van bouwmaterialen en door huidige natuurlijke processen te stimuleren.

In dit afstudeeronderzoek wordt de nadruk gelegd op het laatste. *‘Het stimuleren van natuurlijke processen.’*

Het doel van dit onderzoek is het stimuleren van deze natuurlijke processen bij breuksteenconstructies door deze constructies aantrekkelijker te maken voor het bestaande ecosysteem.

Op dit moment lopen er al een aantal pilots waarin Van Oord dit heeft geprobeerd. Een voorbeeld hiervan is de met schelpmateriaal verrijkte dijk bij de Oosterschelde en oesterkorven die bij windpark luchterduinen in de Noordzee zijn geplaatst. In beide gevallen wordt geprobeerd een voedselrijk gebied te creëren waardoor de diversiteit van organismen in deze gebieden gestimuleerd wordt. Onderstaand een korte toelichting van beide pilots.

Pilot Oosterschelde

Na het verbeteren van de Oosterschelde dijk heeft Van Oord op een aantal locaties schelpenbedden geplaatst met als doel het bestaande ecosysteem te stimuleren. De schelpenbedden zijn kalkhoudend wat als belangrijke voedingsbron dient voor veel waterorganismen. Op dit moment wordt gekeken door middel van monitoring en monsterns of de schelpenbedden een positief effect hebben bijgedragen aan het bestaande ecosysteem.

Pilot windpark luchterduinen

Van Oord en Eneco hebben samen met stichting De Noordzee en Natuur & Milieu een project gestart om onderwaternatuur terug te brengen in windparken: De Rijke Noordzee. Tijdens deze pilot wordt onderzocht hoe natuurversterking en het opwekken van duurzame energie elkaar kunnen verrijken. (Van Oord, 2018)

Van Oord heeft een aantal oesterkorven en betonstructuren in het windpark luchterduinen geplaatst met als doel een kunstmatig rif te creëren. Op dit moment wordt dit kunstmatige rif gemonitord om te kijken of dit in het ecosysteem aan slaat. De eerste waarnemingen zijn positief.

Bij beide pilots is vooral gekeken naar de effecten van de ecologische verrijking op het ecosysteem. Over de invloed van deze ecologische verrijkingen op de bestaande breuksteenconstructies en in hoeverre de ecologische verrijking stabiel is bij maatgevende omstandigheden is nog weinig bekend.

Om een beter beeld te krijgen van deze ecologische verrijkingen zal in dit afstudeeronderzoek worden gekeken naar de invloed van de verrijkingen op de bestaande constructies en of de verrijking na constructief falen nog steeds een bijdrage kan leveren aan het fysieke habitat.

De aanbevelingen die uit dit onderzoek komen kunnen Van Oord helpen met het onderbouwen van de waarde van ecologische verrijkingen om zo toekomstige aanbestedingen interessanter te maken.

De onderzoeksvragen die bij dit onderzoek horen zijn in het volgende hoofdstuk beschreven. Vervolgens zal verder worden ingegaan op de afbakening en randvoorwaarden van dit onderzoek.

3.2 Onderzoeksvragen

Hoofdvraag:

Wat zijn stabiliteitsproblemen bij het toepassen van ecologische verrijking op bodembescherming en vooroeververdediging?

Deelvragen:

1. *Wat is de invloed van ecologische verrijking op de constructieve stabiliteit van bestaande breuksteenconstructies toegepast als bodembescherming en vooroeververdediging?*
2. *Onder welke hydraulische omstandigheden faalt ecologische verrijking constructief op bestaande breuksteenconstructies toegepast bij bodembescherming in windpark Luchterduinen en vooroeververdediging in de Oosterschelde, sectie Zuidhoek?*
3. *Hoe veranderen de fysieke habitat eigenschappen van ecologische verrijking na constructiefalen?*

Deze hoofdvraag en deelvragen worden onderzocht door middel van literatuurstudie en proeven in het laboratorium.

3.3 Afbakening

Om het onderzoek zo concreet mogelijk te houden is het belangrijk dat er een aantal grenzen aan het onderzoek worden gesteld. Deze zullen hieronder worden beschreven.

3.3.1 Definitie “Ecologische Verrijking”

Het is belangrijk een definitie van ecologische verrijking vast te stellen omdat dit de basis is van dit afstudeeronderzoek. Het begrip is opgesplitst om vervolgens tot een eenduidige definitie te komen.

De definitie van “**ecologie**” volgens van Dale is:

- “Wetenschap die de betrekkingen tussen de organismen en hun omgeving bestudeert” (Van Dale, 2019)

De definitie van “**verrijken**” volgens van Dale is:

- “Van hoger gehalte maken” (Van Dale, 2019)

In de context van dit onderzoek wordt “**ecologische verrijking**” als volgt gedefinieerd:

“Het toevoegen van materiaal aan een bestaande breuksteenconstructie waardoor diversiteit in het fysieke habitat ontstaat met als doel de ontwikkeling van organismen te stimuleren.”

3.3.2 Soorten verrijking

In dit afstudeeronderzoek zal gekeken worden naar 4 typen ecologische verrijkingen. Zie onderstaand figuur.

	
Oesterkorven	Schelpmateriaal (Gradering 0-40mm)
	
Kleine stenen (Gradering n.t.b.)	Grote stenen (Gradering n.t.b.)

Figuur 1 Typen Ecologische Verrijkingen

3.3.3 Onderzoek locatie

Om het onderzoek niet te groot te maken zodat kwaliteit voor kwantiteit blijft staan is het belangrijk om een casus te kiezen waarop het onderzoek wordt gebaseerd. Voor dit afstudeeronderzoek is gekozen voor 2 locaties.

Windpark Luchterduinen

Luchterduinen is een offshore windmolenpark in de Noordzee en bestaat uit 43 windturbines. Het park is ontwikkeld door een samenwerking van Eneco en Van Oord en levert energie aan ruim 135.000 huishoudens.

Voor dit onderzoek is windpark luchterduinen gekozen omdat het goede omstandigheden biedt voor de ontwikkeling van organismen. Voor meer informatie zie “Platte Oester in offshore windparken”. Daarnaast is het een windpark dat deels door Van Oord is ontwikkeld waardoor er toegang is tot belangrijke documentatie. Een ander bijkomend voordeel is dat op deze locatie een pilot is uitgevoerd met het plaatsen van oesterkorven. De resultaten van deze pilot kunnen veel inzicht geven in de mogelijke ontwikkeling van de ecologische verrijkingen.

windpark	bodemschuifspanning	zwevend stof		water temperatuur		sediment	historische verspreiding	larven aanbod	som
		gem	max	gem	min	max			
Borssele	1	2	2	2	2	2	1	2	14
HK-Zuid	1	2	2	2	2	2	1	1	12
OWEZ	1	1	2	2	2	2	1	1	12
HK-noord	1	2	2	2	2	2	1	1	12
Luchterduinen	1	2	2	2	2	2	1	1	13
Prinses Amalia	1	2	2	2	2	2	1	1	12
Buitengaats	2	2	2	2	2	2	1	2	14
Zee-energie	2	2	2	2	2	2	2	2	16

Figuur 3 Overzicht geschiktheid ontwikkeling platte oester in windparken Noordzee

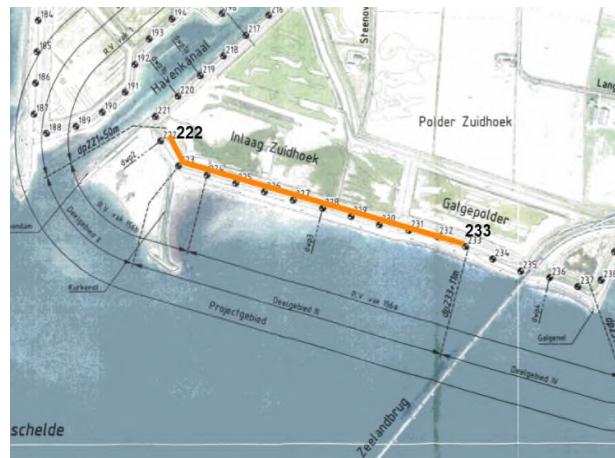


Figuur 2 Locatie Luchterduinen

Dijk Oosterschelde

De tweede onderzoek locatie is de Oosterschelde dijk. De Oosterschelde Dijk is in 2015 verbeterd omdat deze niet aan de wettelijke veiligheidseisen voldeed. Het dijktraject dat in dit onderzoek als casus wordt gebruikt bevindt zich bij de Zeelandbrug (zie figuur 4).

De Oosterschelde dijk is gekozen omdat Van Oord heeft meegewerkt aan de verbetering van deze dijk waardoor veel belangrijke informatie voor het onderzoek beschikbaar is. Daarnaast zijn na de dijkverbetering op een aantal locaties schelpenbedden geplaatst met als doel ecologische ontwikkeling. Aan de hand van de resultaten van deze pilot kan worden afgeleid in hoeverre de ecologische verrijking een positief effect zal hebben op het bestaande ecosysteem.



Figuur 4 Dijktraject onderzoek

4 Projectteam

Groepsleden

Jan-Willem Bekendam

Jan Rigter

Kevin van Donselaar

Afstudeerbegeleiding Hogeschool van Arnhem & Nijmegen

Ernst Rob

Hans uit het Broek

Afstudeerbegeleiding Van Oord

Erik van Eekelen

Jurre de Vries

5 Communicatie

De communicatie tussen de groepsleden vindt formeel plaats via vergaderingen en/of op de werkplek. Wanneer de groepsleden zich op verschillende locaties bevinden wordt er gebruik gemaakt van telefonische contact, (bellen en het medium WhatsApp). Voor het onderling delen van bestanden wordt gebruik gemaakt van een gedeelde OneDrive.

Communicatie met 3^e vindt plaats via de e-mail of telefonische contact.

Iedere week zal de projectgroep formeel samenkomen om de voortgang, planning en mogelijke problemen te bespreken. Tijdens dit overleg zullen notulen worden gemaakt.

6 Begeleiding

Vanuit de Han zijn Ernst Rob en Hans uit Het Broek aangewezen als afstudeerbegeleider. Hiervan is Ernst Rob de vakinhoudelijke docent waarmee elke ca. 2/3 weken overleg plaats vindt, tijdens het gesprek wordt de voortgang en eventuele vragen besproken. Hans uit Het Broek zal op de achtergrond voor het verifiëren en de kwaliteiten bewaking beschikbaar zijn. Beiden docenten zijn verantwoordelijk voor de examinering en de begeleiding van het plan van aanpak, het opstellen van tussenpeilingen en het afnemen van integralen toetsen.

De inhoudelijke begeleiding wordt gedaan door Van Oord. Hierbij zal Erik van Eekelen de afstudeerders ondersteunen gedurende het scriptie onderzoek.

7 Projectopdracht

Het onderwerp van dit afstudeeronderzoek is de verrijking van de steenbestorting. Verrijking van steenbestorting is een breed onderwerp waarbinnen onderzoek kan worden gedaan naar verschillende aspecten. Deze afstudeeropdracht focust op de waterbouwkundige stabiliteit van de verrijking in steenbestorting. De volgende onderzoeksvraag is bij dit onderzoek gedefinieerd:

Wat zijn stabiliteitsproblemen bij het toepassen van ecologische verrijking op bodembescherming en vooroeververdediging?

7.1 Methode

In dit gedeelte wordt de structuur aangegeven van hoe het onderzoek is opgebouwd. Om een antwoord te vinden op de onderzoeksvraag zal er een literatuurstudie plaatsvinden en zullen een aantal proeven met betrekking tot stroomsnelheid in een stroomgoot uitgevoerd worden.

De aanpak van informatie verzamelen tot conclusie is verdeeld in 4 fasen, namelijk:

- Plan van aanpak;
- Voorbereiding onderzoek;
- Data verzamelen;
- Resultaten verwerking.

7.1.1 Fase 1: Plan van aanpak

In het plan van aanpak zullen de volgende onderwerpen worden uitgewerkt/onderzocht:

Hoofdvraag en deelvragen definiëren. De hoofdvraag is een brede vraag welke wordt uitgewerkt in verschillende deelvragen die ieder een klein deel van het onderzoek ondervangen. De volgende hoofdvraag en deelvragen zijn gedefinieerd:

Hoofdvraag

Wat zijn stabiliteitsproblemen bij het toepassen van ecologische verrijking op bodembescherming en vooroeververdediging?

Deelvragen:

1. *Wat is de invloed van ecologische verrijking op de constructieve stabiliteit van bestaande breuksteenconstructies toegepast als bodembescherming en vooroeververdediging?*
2. *Onder welke hydraulische omstandigheden faalt ecologische verrijking constructief op bestaande breuksteenconstructies toegepast bij bodembescherming in windpark Luchterduinen en vooroeververdediging in de Oosterschelde, sectie Zuidhoek?*
3. *Hoe veranderen de fysieke habitat eigenschappen van ecologische verrijking na constructief falen?*

In het afstudeeronderzoek worden vier verschillende soorten verrijking onderzocht. De verschillende typen verrijking die worden onderzocht worden nu arbitrair vastgesteld om een uitgangspunt te hebben voor het onderzoek. In eerste instantie neemt ieder groepslid een van de verrijkingstypen om te onderzoeken en een gezamenlijk verrijkingstypen (grotere gradatie breuksteen). Wanneer blijkt uit onderzoek dat een van deze typen niet kan worden onderzocht om wat voor reden dan ook zal het gezamenlijke type doorschuiven naar de persoon waarvan het type verrijking is geschrapt. In de planning is een beslismoment opgenomen wanneer wordt besloten welke verrijkingstypen verder worden onderzocht (08-02-2019).

De verschillende ecologische verrijking typen zijn:

- Oesterkorven;
- Schelpmateriaal;
- Kleinere gradatie stenen;
- Grotere gradatie stenen.

De soorten hebben ieder een uniek toepassingsgebied en unieke uitdagingen.

Oesterkorven: Jan-Willem Bekendam

Onderzoek richt zich op de toepassing van oesterkorven op bodembescherming rond windmolens op zee.

Schelpmateriaal: Kevin van Donselaar

Onderzoek richt zich op de toepassing van schelpmateriaal op de vooroeververdediging en op bodembescherming rond windmolens op zee.

Kleinere gradatie stenen: Jan Rigter

Onderzoek richt zich op de toepassing van kleine gradatie stenen op de vooroeververdediging en op bodembescherming rond windmolens op zee.

Grotere gradatie stenen: Gezamenlijk

Onderzoek richt zich op de toepassing van grote gradatie stenen op de vooroeververdediging waar deze onder een hoek liggen.

De verrijkingen zullen in de literatuurstudie verder worden onderzocht om een beeld te krijgen van hoe het materiaal wordt toegepast, zich ontwikkeld, en hoe deze getest kunnen worden.

Daarnaast zullen een aantal punten vooraf aan het onderzoek vastgesteld worden.

- Om vast te kunnen stellen of de verrijking invloed heeft op de constructie moet worden gedefinieerd wanneer een constructie faalt.
- Om vast te kunnen stellen of de kritische belasting hoger of lager is dan de maatgevende omstandigheden moet worden gedefinieerd wanneer de verrijking faalt.
- Om de verrijkingen te kunnen testen moet het belasting profiel worden bepaald van zowel de bodembescherming als de vooroeververdediging. Tevens worden de constructieve eigenschappen van beide typen constructies onderzocht.

Vanuit de HAN wordt gevraagd om 5 van de 9 competenties aan te tonen op het niveau van afstuderen (niveau 3). Hiervoor dient een persoonlijk ontwikkelingsplan (POP) te worden gemaakt met daarin beschrijving van de manier hoe de verschillende competenties behaald gaan worden. Dit is voor ieder individueel en zal worden opgenomen als bijlage in het PVA.

7.1.2 Fase 2: Voorbereiding onderzoek

Nadat de verschillende materialen zijn onderzocht en het belasting profiel is vastgesteld wordt onderzoek gedaan naar hoe gegevens over de stabiliteit van de verrijking en constructie moeten worden verzameld. Hiervoor dienen de volgende zaken onderzocht te worden.

- Welke manier van testen moet worden toegepast?
- Welke modellen moeten worden toegepast en welke parameters moeten daarvoor gemeten worden?
- Hoe moet de 0-meting worden uitgevoerd?
- Hoe vaak worden de tests herhaald?
- Hoe wordt de verzamelde data vastgelegd?

Vervolgens wordt gekeken naar het schaalprobleem van zowel de verrijking als de belasting. Alle vier de typen verrijking zullen op schaal nageemaakt moeten worden op een dusdanige manier dat ze zich hetzelfde gedragen als in de werkelijkheid. Dit valt gedeeltelijk samen het onderzoek naar de materialen die gebruikt kunnen worden voor de tests, dit kan hetzelfde materiaal als de verrijking zijn of een ander materiaal met dezelfde eigenschappen. De belasting zal moeten worden verschaald naar een stroomgoot. Hieruit vormen zich de proefopstellingen.

De beschikbare faciliteiten op de HAN moeten worden onderzocht, wat zijn de beschikbare instrumenten en hoe werken deze. (Zie Figuur 5 Waterlab HAN)



Figuur 5 Waterlab HAN

7.1.3 Fase 3: Data verzamelen

De derde fase is wanneer het literatuuronderzoek is afgerond en het verzamelen van data start. Dit zal worden gedaan in het waterlaboratorium van de HAN. Hier is een stroomgoot en golfgoot ter beschikking.

Tijdens de uitvoering van de tests zijn de volgende zaken van belang:

- Een 0-meting moet worden uitgevoerd om de situatie met en zonder verrijking te kunnen vergelijken;
- De proeven met verrijking moeten voor alle drie de verrijkingen afzonderlijk worden uitgevoerd;
- De proeven zullen worden vastgelegd d.m.v. film en foto's;
- Een waarnemingen formulier wordt gemaakt om observaties in data om te kunnen zetten;
- Stapgroottes van op te voeren belasting zal moeten worden bepaald;
- Een nauwkeurig logboek met tijd moet worden bijgehouden om waarnemingen te noteren;
- Om de verplaatsing van materiaal goed waar te kunnen nemen zal een contrast met maten moeten worden toegepast.
- De test zal na constructief falen nog voor bepaalde tijd door lopen om te kijken hoe de verrijking zich ontwikkelt om de habitatverandering te kunnen observeren.

7.1.4 Fase 4: Resultaten en conclusies

In de laatste fase worden de resultaten verwerkt. De resultaten zullen worden verwerkt op de daarvoor gekozen manier zoals besloten en voorbereid in fase 2. De resultaten zullen worden gevisualiseerd om deze leesbaar te maken. Met de resultaten wordt antwoord gegeven op de hoofd en deelvragen en worden conclusies getrokken.

De observaties betreffende verplaatsing van de verrijkingsmaterialen na constructief falen van de verrijking zullen worden voorgelegd aan een bioloog.

Punten ter discussie zullen tijdens het gehele onderzoek bij worden gehouden.

8 Projectactiviteiten

Gedurende de afstudeerperiode vinden verschillende activiteiten plaats. Onderstaand is een opsomming van deze activiteiten te vinden. De activiteiten zijn ook terug te vinden in de planning, zie hiervoor bijlage I.

- **Afstudeervoorstel**
 - o Goedkeuring afstudeervoorstel
- **Plan van Aanpak**
 - o Concept Plan van Aanpak
 - o Onderzoeksvragen definiëren
 - o Onderzoek naar verrijkingen
 - o Belasting profiel maken
 - o Falen constructie definiëren
 - o Falen verrijking definiëren
 - o Rapportage Plan van Aanpak
 - o Onderzoeksmethode
 - o Verzamelen materialen
 - o Verschaling
- **Onderzoek**
 - o Proefopstelling maken
 - o Proeven uitvoeren
- **Resultaten**
 - o Conclusie
 - o Discussie
- **Persoonlijk ontwikkelingsplan**
- **Vorbereiding onderzoek**
- **Literatuuronderzoek**
- **Rapportage afstudeerrapport**
- **Afstudeerzitting**

9 Producten

Het resultaat van het onderzoek zal zich vormen in verschillende producten. De producten kunnen worden onderscheiden in hoofdproducten en deelproducten. Voorafgaande aan het onderzoek zijn niet alle deelproducten concreet, hier zal in de eerste weken van het afstudeeronderzoek meer duidelijkheid over komen.

Producten

Eindschrijft

- Introductie
- Samenvatting
- Figuren en tabellenlijst
- Begrippenlijst
- Hoofdvraag
- Deelvraag
- Literatuuronderzoek
- Onderzoeksmethodes
- Praktijkonderzoek
- Onderzoeksresultaten
- Conclusie
- Discussie
- Aanbeveling
- Reflectie

PVA

- Projectteam
- Begeleiding
- Projectopdracht
- Projectactiviteiten
- Producten
- Kwaliteit
- Risico's
- Planning

Scriptie presentatie

10 Kwaliteit

Kwaliteit is het voldoen aan verwachtingen en eisen van de opdrachtgever, in dit geval Van Oord. Het streven is dan ook het afstudeerproject te laten voldoen aan de gestelde kwaliteitseisen. Alle leden van de projectgroep zijn medeverantwoordelijk voor het borgen van de kwaliteit en bewerkstelligen van een optimaal resultaat.

Om de gewenste kwaliteit te borgen en bereiken zijn een aantal afspraken gemaakt. In dit hoofdstuk wordt hier verder op ingegaan.

10.1 Ambitieniveau

Om een afstudeeronderzoek neer te zetten is het raadzaam om eerst een ambitieniveau te bepalen. De visie en wensen van Van Oord spelen hierin een belangrijke rol. De afstudeerders streven ernaar door middel van hun onderzoek een positieve en waardevolle bijdrage te leveren aan Van Oord als afstudeerbedrijf. Daarnaast ambiëren ze een uiteindelijk beoordeling van een 8 op een schaal van 10.

Om dit ambitieniveau te behalen wordt er van elke afstudeerder volle inzet verwacht en zullen er richtlijnen zijn waaraan ieder zit moet houden.

10.2 Richtlijnen

In alle documenten dienen juiste spelling, grammatica en interpunctie gebruikt te worden.

- Figuren dienen voorzien te zijn van een onderschrift.
- Benutte bronnen dienen voorzien te zijn van bronvermelding volgens de APA-richtlijnen.
- In het verslag zal lettertype Arial worden gebruikt met een lettergrootte van 10.
- Alle hoofdstukken dienen voorzien te zijn van nummering.
- Dropbox dient gebruik te worden als opslagplaat/verzamelplaats voor alle documenten benodigd bij het afstuderen.
- Het hoofdrapport dient maximaal uit 12500 woorden te bestaan.

10.3 Feedback

Feedback tijdens het afstudeerproces is de belangrijkste manier van controle. De feedback zorgt ervoor dat de afstudeerders, de docenten en de opdrachtgever met elkaar op een lijn blijven. Hiervoor zijn verschillende momenten ingepland.

Rapporteren naar de opdrachtgever

Gedurende de afstudeerperiode zal een keer per week schriftelijk gerapporteerd worden aan de opdrachtgever. Op deze manier blijft de opdrachtgever op de hoogte van de activiteiten van de afstudeerders en kan deze hier direct feedback op geven.

Overleg met afstudeerbegeleider

Samen met de afstudeerbegeleider(docent) zal om de 3 weken een overleg plaatsvinden. Hierin wordt de stand van zaken besproken en kunnen vakinhoudelijke vragen worden gesteld. Daarnaast zal de afstudeerbegeleider(docent) de afstudeerders voorzien van feedback.

Vergaderingen

Wekelijks zullen de afstudeerders met de begeleider (als deze beschikbaar is) vergaderen over de voortgang van het afstudeeronderzoek. In deze vergadering zal aan de hand van de planning de voortgang gecontroleerd worden en eventueel bijgestuurd worden. Daarnaast is dit een moment voor de projectleden om elkaar van feedback te voorzien. Vergaderen kan zowel telefonisch als in persoon.

Tussentijdse peiling

Halverwege het afstudeertraject vindt een tussentijdse peiling van de procesvoortgang plaats. De afstudeerbegeleiders bepalen hierbij samen met de afstudeergroep of de eerstvolgende periode van mondelinge toelichtingen haalbaar is.

11 Risico's

Een risicoanalyse is gemaakt om te inventariseren wat de verschillende risico's zijn die tijdens afstuderen het onderzoek in gevaar kunnen brengen. Voor de verschillende risico's kunnen maatregelen worden getroffen zodat deze een kleinere kans van voorkomen hebben of een kleiner gevolg wanneer deze toch optreedt. Om de grote van een risico in te schatten is gebruik gemaakt van de formule "kans*gevolg = risico". De risicoanalyse is gemaakt volgens de volgende stappen:

11.1 Identificeren en beschrijven van de risico's

Bepalen van het risico. Hiervoor wordt gekeken naar de kans van optreden van het risico en het gevolg wanneer dit risico optreedt. Hiervoor is een matrix gemaakt waarin voor beide factoren een cijfer 1-5 kan worden gegeven (zie figuur 1). Wanneer deze met elkaar vermenigvuldigd worden komt hier een risico uit welke is opgenomen in de risicomatrix. Wanneer het risico in het groene deel valt is het een laag risico, geel is middel risico en rood is hoog risico. De cijfers zijn gegeven op basis van persoonlijke inschatting.

Voor ieder risico zijn maatregelen genoemd om ofwel de kans van optreden te verkleinen of de gevolgen van het optreden te verlagen.

Tot slot worden de risico's opnieuw beoordeeld op kans van optreden en gevolg wanneer de maatregelen zijn toegepast om te zien hoeveel effect deze hebben en of het risico genoeg is verminderd.

			Kans van optreden				
			Zeet kleine kans	Kleine kans	Mogelijk	Waarschijnlijk	Zeet Waarschijnlijk
			1	2	3	4	5
Gevolgen	Vervaarloosbaar	1	L	L	L	L	L
	Klein	2	L	L	L	M	M
	Gemiddeld	3	L	L	M	M	H
	Groot	4	L	M	M	H	H
	Zeet groot	5	M	M	H	H	H

Figuur 6 Risico Beoordelings Matrix

12 Bronnen

Aad Smaal, Pauline Kamermans, Frank Kleissen, Luca van Duren & Tom van der Have. 2017. *Platte Oester in Offshorwindparken*. Wageningen : Universiteit Wageningen, 2017.

Van Dale. 2019. vandale.nl/betekenis/ecologie. *vandale*. [Online] 2019. <https://www.vandale.nl/gratis-woordenboek/nederlands/betekenis/ecologie#.XGFsylvKg2w>.

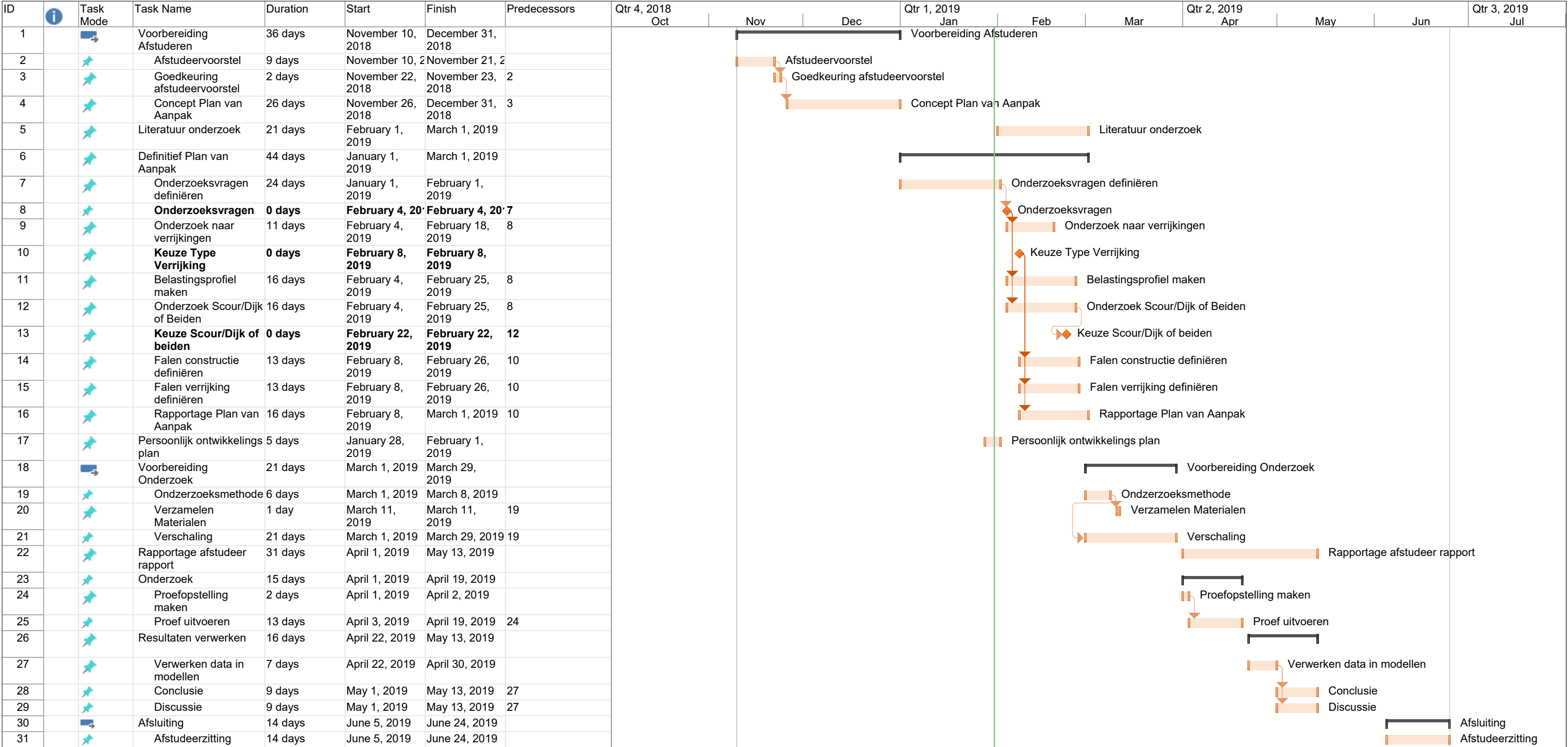
Van Dale. 2019. vandale.nl/betekenis/verrijking. *vandale*. [Online] 2019. <https://www.vandale.nl/gratis-woordenboek/nederlands/betekenis/verrijken#.XGFtTFxKg2w>.

Van Oord. 2018. *Van Oord in proef oesterherstel in de Noordzee*. Van Oord, 2018.

Bijlage A - Risico Matrix

Nummer	Beschrijving Risico	Kans van optreden	Gevolgen	Risico	Maatregelen	Kans van optreden na maatregelen	Gevolgen na maatregelen	Risico
1	Slechte communicatie tussen Van Oord en afstudeergroep	3	4	12	Er is een duidelijk aanspreekpunt binnen Van Oord (Dhr. Van Eekelen) Wekelijkse korte vergadering over stand van zaken	2	3	6
2	Onderzoeksopdracht niet duidelijk	1	4	4	Terugkoppeling op de formulering van de onderzoeksvraag via het plan van aanpak	1	4	4
3	Verschil in verwachting tussen Van Oord en afstudeerders	3	2	6	Wekelijkse korte vergadering over stand van zaken In het plan van aanpak verwachtingen formuleren	2	2	4
4	Onvoldoende ondersteuning vanuit Van Oord	2	4	8	Afspraken maken over begeleiding, wekelijkse korte vergadering, aanspreekpunt	1	4	4
5	Bereikbaarheid begeleider Van Oord	2	3	6	Contactgegevens uitwisselen, wie is wanneer aanspreekpunt afspreken	1	3	3
6	Bereikbaarheid kantoor Van Oord	1	2	2	Online werk opslaan zodat tevens van een andere locatie gewerkt kan worden	1	1	1
7	Beschikbaarheid werkplek	1	3	3	Afspraken maken waar gewerkt gaat worden	1	3	3
8	Bereikbaarheid begeleider HAN	2	2	4	Contact gegevens uitwisselen, elkaar op de hoogte houden van ontwikkelingen welke betrekking hebben op de communicatie	1	2	2
9	Onvoldoende ondersteuning vanuit de HAN	2	4	8	Op een 2 wekelijkse basis korte vergadering over de stand van zaken	2	3	6
10	Procedures HAN niet correct opgevolgd	1	4	4	Contact met afstudeerbegeleider vanuit de HAN en op tijd inleveren van gevraagde producten of formulieren	1	4	4
11	Beschikbaarheid faciliteiten voor proeven	2	4	8	Zo vroeg mogelijk inplannen van de proeven	2	4	8
12	Afwezigheid van groepsleden	2	3	6	Goede onderlinge communicatie en uitwisseling van waar men op dat moment mee bezig is zodat dit eventueel overgenomen kan worden	2	2	4
13	Ziekte bij leden afstudeergroep	2	3	6	Goede onderlinge communicatie en uitwisseling van waar men op dat moment mee bezig is zodat dit eventueel overgenomen kan worden	2	2	4
14	Deadline kan niet worden gehaald door tijdgebrek	2	4	8	Tussendeadlines opstellen, wanneer blijkt dat deze niet gehaald worden zal ingegrepen moeten worden en verdere planning gemaakt	2	3	6
15	Planningsfout	3	4	12	Planning laten controleren en tijdig bijstellen	2	4	8
16	Plan van Aanpak niet op tijd afgerond	2	3	6	Snelle terugkoppeling en snelle verwerking van feedback	1	3	3
17	Onvoldoende voorkennis over het onderwerp	3	3	9	Inlezen in het onderwerp en verder onderzoek doen waar nodig	3	2	6
18	Onvoldoende voorkennis over onderzoekstechnieken	4	3	12	Literatuur over onderzoekstechnieken raadplegen Onderzoek doen naar hoe onderzoek wordt gedaan Vragen stellen aan begeleiding	4	2	8
19	Te weinig diepgang in het onderzoek	2	4	8	Terugkoppeling vragen tijdens wekelijkse vergadering op inhoud en voortgang	1	4	4
20	Te veel diepgang	2	2	4	Terugkoppeling vragen tijdens wekelijkse vergadering op inhoud en voortgang	1	2	2
21	Onvoldoende kwaliteit	2	4	8	Terugkoppeling vragen tijdens wekelijkse vergadering op inhoud en voortgang	1	4	4

Bijlage B – Planning



Project: Planning Afstuderen
Date: January 31, 2019

Task		Project Summary		Manual Task		Start-only		Deadline	
Split		Inactive Task		Duration-only		Finish-only		Progress	
Milestone		Inactive Milestone		Manual Summary Rollup		External Tasks		Manual Progress	
Summary		Inactive Summary		Manual Summary		External Milestone			

Bijlage C – POP

Ecologische verrijking van breuksteenconstructies

BSc Afstudeerscriptie

Persoonlijk ontwikkelingsplan

Mei 2019

Jan Rigter

Jan-Willem Bekendam

Kevin van Donselaar

HOGESCHOOL VAN ARNHEM & NIJMGEGEN



Faculteit Built Environment

Civiele Techniek



1 Competenties opleiding Civiele Techniek

1. Initiëren en sturen

Je kunt maatschappelijk belangrijke infrastructurele (project)opgaven signaleren en inventariseren. Je kunt in een projectdefinitie doelstellingen, randvoorwaarden, eisen en wensen formuleren. Je kunt technische opgaven in een bredere maatschappelijke context en marktoriëntatie plaatsen. Je kunt het proces beschrijven, bewaken en bijsturen.

2. Ontwerpen

Vanuit een projectdefinitie kun je een infrastructurele opgave gefaseerd conceptualiseren, afwegen, dimensioneren, visualiseren, detailleren en verifiëren. Je kunt een doelmatige organisatie met aspecten kosten planning, kwaliteit, informatie, en ontwikkelen.

3. Specificeren

Voor gedefinieerde infrastructurele opgaven kun je de doelstelling vertalen en uitwerken in vergunnings-, aanbestedings- en contractstukken. Je doet dit vanuit het perspectief van de belanghebbenden. Dit veronderstelt inzicht in de problematiek, kennis van een procesmatige benadering en financiële aspecten van mogelijke oplossingen en een visie op oplossingsrichtingen en haalbaarheid.

4. Realiseren

Je kunt op basis van ontwerp en specificatie van een infrastructurele opgave de uitvoering voorbereiden, handhaven, bewaken en bijsturen. Je bent in staat belangen van betrokken partijen goed af te stemmen en te leiden.

5. Beheren

Je maakt een infrastructureel beheer- en onderhoudsplan voor het behouden van de gerealiseerde kwaliteit.

6. Monitoren, toetsen en evalueren

Monitoren, toetsen en bewaken van projectresultaten aan b.v. beoogde functionele doelen, duurzaamheid, veiligheid en ethisch handelen. Je bent in staat de gekozen oplossingen en bereikte resultaten zo objectief mogelijk te evalueren, waar mogelijk onderbouwd met kwantitatieve en kwalitatieve gegevens. Je kunt de effectiviteit en efficiëntie van de gekozen oplossingen aangeven. Aansluitend hierop kun je aanpassingen en verbetervoorstellen maken en deze inbrengen.

7. Onderzoeken

Je bent in staat tot het analyseren van een vraagstuk en het identificeren van de vraag. Je kunt praktijkgericht onderzoek opzetten, uitvoeren en beoordelen als een iteratief proces. Je maakt gebruik van geschikte methoden en technieken en hanteert daarbij een kritische, onderzoekende en ondernemende houding.

8. Communiceren en samenwerken

Je brengt beroepsgerichte informatie over naar het beroepenveld, collega's en de vast te stellen doelgroepen (klanten, opdrachtgevers, betrokkenen). Je bent in staat zowel intern als extern te communiceren op een, voor de doelgroep, passende wijze. Communiceren bevat het gehele spectrum waarop informatie ontvangen, gegeven en gedeeld wordt. Je bent gericht op samenwerken en constructief afstemmen met betrokkenen en de doelgroepen.

9. Managen en innoveren

Je geeft richting en sturing aan processen, teneinde de doelen te realiseren. Je bent zelfsturend en reflectief op het eigen functioneren. Je bent proactief, neemt initiatief en kan buiten kaders denken en werken.

1.1 POP – Kevin van Donselaar

Competenties om af te sluiten op niveau 3

Minimaal 5 van de 9 competenties dienen op niveau 3 afgerond te worden, waarvan minimaal 2 van de laatste drie competenties (7,8,9) op niveau 3 moeten worden behaald. Niveau 3 wordt beschreven als:

- **Aard van de taak:** complex, ongestructureerd, hanteert methoden bij nieuwe situaties.
- **Aard van de context:** onbekend, complex, multidisciplinair, in de praktijk.
- **Mate van zelfstandigheid:** Zelfstandig, begeleiding indien nodig.

Op basis van het onderwerp van dit afstudeeronderzoek heb ik de volgende competenties gekozen om op niveau 3 af te ronden:

2. Ontwerpen

5. Beheren

6. Monitoren, toetsen en evalueren

7. Onderzoeken

9. Managen en innoveren

Hier onder de beschrijving hoe ik deze competenties zal behalen.

2. Ontwerpen

Voor het doen van proeven in de stroomgoot moet een breuksteenconstructie worden ontworpen die volgens de schaalregels correct is ten opzichte van de echte situatie. De beschrijving en berekening van dit ontwerp dient als bewijs voor deze competentie.

5. Beheren

Dit afstudeeronderzoek is gericht op het onderzoek naar de stabiliteit van materiaal dat wordt aangebracht op breuksteenconstructies om de ecologische ontwikkeling te stimuleren. Dit onderzoek zal worden gebruikt in toekomstige projecten om te beoordelen waar verschillende materialen kunnen worden toegepast betreffende stabiliteit zodat dit niet direct verloren zal gaan. Hiermee wordt dit onderzoek gebruikt om toekomstig gecreëerde waarde te behouden.

6. Monitoren, toetsen en evalueren

De breuksteenconstructies zullen worden getoetst in de stroomgoot. Hier zullen resultaten uit komen die moeten worden geëvalueerd en een verband moet worden gelegd met de echte situatie op ware grootte. Dit zal worden opgenomen in de evaluatie van de resultaten en conclusies met aanbevelingen.

7. Onderzoeken

Om tot de juiste verschaling van de breuksteenconstructies te komen waarmee proeven kunnen worden gedaan in de stroomgoot is veel onderzoek nodig naar verschalingsregels. De resultaten van dit onderzoek zullen worden opgenomen in het eindrapport.

9. Managen en innoveren

Dit onderzoek wordt grotendeels zelfstandig uitgevoerd (met projectgroep van in totaal 3 personen). Omdat er verschillende aspecten van dit onderzoek niet direct kunnen worden uitgevoerd op basis van literatuur (verschalen, stroomgoot, toepassing materialen etc.) is het nodig om inzichten uit verschillende bronnen te combineren en buiten de kaders te denken om tot oplossingen voor deze problemen te komen.

1.2 POP – Jan-Willem Bekendam

Competenties om af te sluiten op niveau 3

Minimaal 5 van de 9 competenties dienen op niveau 3 afgerond te worden, waarvan minimaal 2 van de laatste drie competenties (7,8,9) op niveau 3 moeten worden behaald. Niveau 3 wordt beschreven als:

- **Aard van de taak:** complex, ongestructureerd, hanteert methoden bij nieuwe situaties.
- **Aard van de context:** onbekend, complex, multidisciplinair, in de praktijk.
- **Mate van zelfstandigheid:** Zelfstandig, begeleiding indien nodig.

Op basis van het onderwerp van dit afstudeeronderzoek heb ik de volgende competenties gekozen om op niveau 3 af te ronden:

2. Ontwerpen

4. Realiseren

6. Monitoren, toetsen en evalueren

7. Onderzoeken

8. Communiceren en samenwerken

Hier onder de beschrijving hoe ik deze competenties zal behalen.

2. Ontwerpen

Om te onderzoeken hoe ecologische verrijking zich in praktijk gedraagt wordt een schaalmodel gemaakt van een bestaande casus. Dit schaalmodel moet ontworpen worden zodat het in de stroomgoot van de HAN gebouwd kan worden. De beschrijving en berekening van dit schaal model dient als bewijs voor de competentie ontwerpen.

4. Realiseren

In dit afstudeeronderzoek wordt op basis van een bestaande casus een model in stroomgoot ontworpen met behulp van schaalmodellen. Dit model moet uiteindelijk in praktijk gerealiseerd worden. Hierbij komen een aantal zaken kijken zoals de beschikbaarheid van het lab, materialen ect. Dit moet op elkaar worden afgestemd om een voorspoedig verloop van de proef te realiseren. De beschrijving in het afstudeerrapport en resultaten dienen als bewijs voor deze competentie.

6. Monitoren, toetsen en evalueren

De breuksteenconstructies met verrijking worden in de stroomgoot van de HAN getoetst. Dit dient op een nauwkeurige manier uitgevoerd te worden om onnauwkeurigheden te voorkomen. Daarnaast zullen de resultaten worden geëvalueerd waaruit een verband komt dat gekoppeld kan worden aan de echte situatie. Deze onderdelen zullen opgenomen worden in het eindrapport wat dient als bewijs voor deze competentie.

7. Onderzoeken

Om onderzoeksmethode op te zetten en tot een juiste verscaling van de echte situatie te komen zal veel literatuur onderzoek gedaan moeten worden. Bij dit literatuuronderzoek moet worden gelet op de betrouwbaarheid van de bronnen en relevantie van informatie. De uitkomsten van het literatuuronderzoek zullen in de eindrapportage opgenomen worden.

8. Communiceren en samenwerken

Gedurende de afstudeerperiode moet veel worden samengewerkt tussen de projectleden maar ook andere partijen zoals Van Oord. Communicatie is hierbij erg belangrijk voor een soepel verloop van het onderzoek. De documentatie van het afstudeerproces dient als bewijs voor deze competentie.

1.3 POP – Jan Rigter

Competenties om af te sluiten op niveau 3

Minimaal 5 van de 9 competenties dienen op niveau 3 afgerond te worden, waarvan minimaal 2 van de laatste drie competenties (7,8,9) op niveau 3 moeten worden behaald. Niveau 3 wordt beschreven als:

- **Aard van de taak:** complex, ongestructureerd, hanteert methoden bij nieuwe situaties.
- **Aard van de context:** onbekend, complex, multidisciplinair, in de praktijk.
- **Mate van zelfstandigheid:** Zelfstandig, begeleiding indien nodig.

Op basis van het onderwerp van dit afstudeeronderzoek heb ik de volgende competenties gekozen om op niveau 3 af te ronden:

2. Ontwerpen

Tijdens het onderzoek is het van belang om een verschaald ontwerp te maken t.b.v. de stroomgoot proef volgens de verschalingregels. De beschrijving, tussenresultaten en uiteindelijk ontwerp dienen als bewijsmateriaal.

4. Realiseren

Aan de hand van het verschaalde ontwerp wordt een uitvoeringsplan geschreven, hierin zal worden toegelicht hoe de stroomgoottest wordt uitgevoerd. Hierbij is van belang: het toe te passen materiaal, de stroomgoot eigenschappen, het verschaling ontwerp en de beschikbaarheid. De beschrijving en eindresultaat dienen als bewijs.

6. Monitoren, toetsen en evalueren

De uiteindelijke resultaten van het onderzoek zijn gebaseerd op de stroomgootproef. Om de resultaten goed te verwerken wordt van te voren een meetplan gemaakt en tijdens de proef doormiddel van verschillende methodes de proef vastgelegd. Achteraf worden de resultaten onderzocht. Het bewijsmateriaal zal zijn: meetplan, resultaten en verwerking van de resultaten.

7. Onderzoeken

Het onderzoek wordt onderbouw door verschillend literatuur, hierbij moet de betrouwbaarheid van de documenten onderzocht worden. Ook wordt onderzocht welke documenten relevant zijn voor de stroomgoot proef. Het bewijsmateriaal zal het uiteindelijke verslag zijn wat onderbouwd is doormiddel van literatuur.

9. Managen en innoveren

Dit onderzoek wordt grotendeels zelfstandig uitgevoerd (met projectgroep van in totaal 3 personen). Het onderzoek bestaat grotendeel uit het voorbereiden van de proef wat gebaseerd is op literatuur. Vanwege het unieke verschaling probleem is het van belang dat er meerderen bronnen worden gecombineerd. Het bewijsmateriaal zal de voorbereiding van de proef zijn.

Bijlage II

Literatuur

Mei 2019

Van Oord 
Marine ingenuity

Hogeschool  **van Arnhem en Nijmegen**

Inhoud

Lijst met symbolen	5
1 Inleiding	7
2 Stabiliteit	8
2.1 Krachten	8
2.2 Shields Parameter	9
2.3 Reynolds getal in combinatie met Shields	9
2.4 Izbash-formule	11
3 Fasen van bewegen	12
4 Armouring	14
5 Verschalingsmethodes	15
5.1 Dimensieloze verschalingsmethodes	16
6 Reynolds-getal	17
7 Stromingsprofiel	18
7.1 Stroming rond een Monopile	18
7.1.1 Downflow	18
7.1.2 Kritische stroomsnelheid	18
7.1.3 Horse shoe vortex	19
7.1.4 Lee-wake vortex shedding	20
7.2 Orbitaalstroming	22
7.2.1 Monochrome golf	22
7.2.2 Random wave spectrum	23
7.2.3 Combineren getijdestroming en orbitaalstroming	26
8 Filterformules	27
9 Habitattypen Noordzee	28
10 Bibliography	29

Lijst met symbolen

A	Scharnierpunt	[-]
C	Coëfficiënt van Chezy	[m ^{1/2} /s]
C	Cauchy-getal	[-]
D	Diameter granulair materiaal	[m]
D_*	Dimensie loze korreldiameter	[m]
D_{15a}	Diameter toplaag stenen waarbij 15% < D	[m]
D_{15f}	Diameter toplaag filter waarbij 15% < D	[m]
D_{50}	Gemiddelde diameter granulair materiaal	[m]
D_{50a}	Gemiddelde diameter toplaag stenen	[m]
D_{50f}	Gemiddelde diameter toplaag filter	[m]
D_{85f}	Diameter toplaag filter waarbij 85% < D	[m]
D_n	Nominale diameter	[m]
E	Euler-getal	[-]
f_v	Frequentie vortex-shedding	[s ⁻¹]
Fr	Froude-getal	[-]
F_D	Trekkracht	[kN]
F_F	Wrijvingskracht	[kN]
F_L	Heftkracht	[kN]
F_S	Schuifkracht	[kN]
F_z	Zwaartekracht	[kN]
g	Gravitatie constante	[m/s ²]
$\sum H$	Som horizontale krachten	[kN]
h_s	Ontgrondingsdiepte	[m]
h_0	Bodemdiepte	[m]
K_s	Vormfactor	[-]
K_a	Stroming hoek	[°]
K_u	Stroomsnelheid factor	[-]
L	Golflengte	[m]
L_p	Lengte Prototype	[m]
L_m	Lengte Model	[m]

Bijlage II - Literatuurstudie

λ	Verschalingsfactor	[-]
ΣM_A	Som momenten	[kNm]
M	Massa	[kg]
θ	Shields parameter	[-]
θ_c	Kritische Shields waarde	[-]
φ	Hoek tussenstroming en golf	[°]
P_p	Druk Prototype	[kPa]
P_m	Druk Model	[kPa]
ρ_m	Dichtheid materiaal	[kg/m ³]
ρ_w	Dichtheid water	[kg/m ³]
r	Straal	[m]
Re	Reynolds-getal	[-]
Re_D	Reynolds-getal voor cilinders	[-]
St	Strouhal-getal	[-]
T	Golfperiode	[s]
T_n	Natuurlijke schaalperiode	[s]
T_n	Zero crossing period	[s]
τ	Schuifspanning	[N/m ²]
τ_c	Kritische schuifspanning	[N/m ²]
U	Stroomsnelheid	[m/s]
U_{*c}	Kritische stroomsnelheid	[m/s]
U_r	Radiale stroomsnelheid	[m/s]
U_θ	Tagential stroomsnelheid	[m/s]
U_θ	Orbitaalstroming	[m/s]
u	Stroomsnelheid voor de cilinder	[m/s]
ν	Kinematische viscositeit	[m ² /s]
V	Stroomsnelheid	[m/s]
V_p	Stroomsnelheid Prototype	[m/s]
V_m	Stroomsnelheid Model	[m/s]
ΣV	Som verticale krachten	[kN]
W	Weber-getal	[-]
Δ	Relatieve dichtheid	[-]

1 Inleiding

Deze literatuurstudie is opgesteld ten behoeve van het afstudeeronderzoek "Ecologische verrijking op breuksteenconstructies". In dit rapport is achtergrond informatie te vinden benodigd voor het lezen van de hoofdschrijft.

Stabiliteit

In deze literatuurstudie zijn de volgende onderwerpen opgenomen:

- Stabiliteit
- Fasen van bewegen
- Armouring
- Verschalingsmethodes
- Reynolds getal
- Stromingsprofiel
- Filterformules
- Habitattypen Noordzee

2 Stabiliteit

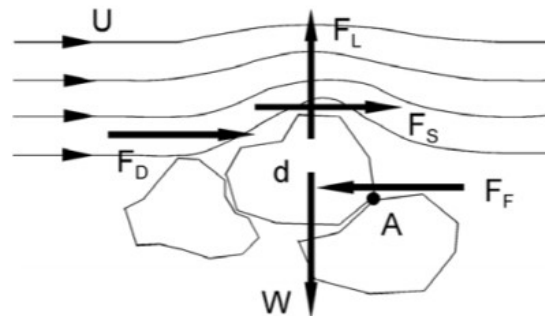
Bij het dimensioneren van breuksteenconstructies speelt de stabiliteit een grote, al niet leidende rol. In dit onderzoek is de stabiliteit van bodembescherming, vooroeververdediging en ecologische verrijking van belang. Om deze stabiliteit beter in beeld te krijgen wordt in dit hoofdstuk het principe van stabiliteit beschreven. In de tekst wordt gesproken over granulair materiaal. Dit heeft betrekking op zowel de breuksteen in de constructies als de verrijkingstypen: schelpmateriaal, kleine steengradatie en grote stenen.

2.1 Krachten

Op granulair materiaal in stroming werken mobiliserende en stabiliserende krachten. Wanneer dit granulair materiaal niet beweegt zijn deze krachten met elkaar in evenwicht. Zodra dit evenwicht wordt verstoort zal het granulair materiaal in beweging komen.

Om dit evenwicht, ook wel stabiliteit genoemd beter te kunnen begrijpen is het noodzakelijk om de krachten die op granulair materiaal werken te definiëren. In onderstaand voorbeeld (Figuur 1) is uitgegaan van een turbulente stroming met een horizontale ondergrond.

U	[m/s]	<i>Stroomsnelheid</i>
D	[m]	<i>Diameter granulair materiaal</i>
A	[-]	<i>Scharnierpunt</i>
W	[kN]	<i>Zwaartekracht</i>
F_l	[kN]	<i>Hefkracht</i>
F_s	[kN]	<i>Schuifspanning</i>
F_F	[kN]	<i>Wrijving-kracht</i>
F_D	[kN]	<i>Trek-kracht</i>



Figuur 1 Krachten op een granulair materiaal in stroming (Schierreck, 2004, p.50)

De drie krachten die het belangrijkst zijn voor de stabiliteit kunnen als volgt worden uitgedrukt (Schierreck, 2004):

Hefkracht (Lift force):
$$F_l = \frac{1}{2} C_L \rho_w U^2 A_l \quad [1]$$

Trekkracht (Drag force):
$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_w U^2 A_D \quad [2]$$

Schuifkracht (Shear force):
$$F_S = \frac{1}{2} C_S \rho_w U^2 A_S \quad [3]$$

Waarin $C_{L,D,S}$ voor de trek-, hef- en schuifkracht-coëfficiënt staat. Deze coëfficiënt is afhankelijk van het stromingsprofiel en stroming U ter plaatse van het granulair materiaal (Hoan, 2008). $A_{L,D,S}$ staat voor het aanstromend oppervlak wat afhankelijk is van de positie van het granulair materiaal in het stromingsprofiel.

Aangezien de krachten evenredig zijn met elkaar kunnen de vergelijkingen [1, 2, 3] als volgt worden geschreven:

$$F \propto \rho_w U^2 d \quad [4]$$

Hierin is d de diameter van het granulair materiaal.

Zowel de horizontale als de verticale krachten worden in evenwicht gehouden door een moment om scharnierpunt A. Dit evenwicht is als volgt gedefinieerd:

$$\sum H = 0 \quad : \quad F_{D,S} = \int W = F_F \quad [5]$$

$$\sum V = 0 \quad : \quad F_L = W \quad [6]$$

$$\sum M_A = 0 \quad : \quad F_{D,S} O(d) = W O(d) \quad [7]$$

Zwaartekracht van het granulair materiaal in water:

$$W \propto \rho_w U_c^2 d^2 \propto (\rho_m - \rho_w) g d^3 \quad [8]$$

De snelheid U_c die in formule [8] wordt gebruikt is de snelheid waarbij het granulair materiaal in beweging komt (kritische snelheid). Deze is te bepalen door middel van de onderstaande formule:

$$U_c^2 \propto \left(\frac{\rho_m - \rho_w}{\rho_w} \right) g d = \Delta g d \quad \rightarrow \quad U_c = \sqrt{\Delta g d} \quad [9]$$

Waarin:

ρ_m	[Kg/m ³]	Dichtheid granulair materiaal
ρ_w	[Kg/m ³]	Dichtheid water
d	[m]	Diameter granulair materiaal
g	[m/s ²]	Zwaartekracht constante
Δ	[-]	Relatieve dichtheid

Alle formules met betrekking tot steenstabiliteit zijn terug te lijden naar formule [9]. De bijbehorende constante van deze vergelijking is te definiëren met behulp van de formule van Shields. Hier wordt in de volgende paragraaf verder op in gegaan.

2.2 Shields Parameter

De meest bekende en gebruikte vergelijking voor het bewegen van een granulair materiaal in een vloeistof is de formule van Shields uit 1936. Deze vergelijking is gebaseerd op de verhouding tussen het gewicht van granulair materiaal en de krachten op granulair materiaal. De kritische waarde die uit deze verhouding volgt geeft het moment van bewegen aan. Deze kritische waarde wordt de Shields parameter θ_c genoemd. Bij θ -waarden onder de θ_c blijft granulair materiaal liggen en voor waarden boven de θ_c zal granulair materiaal gaan bewegen.

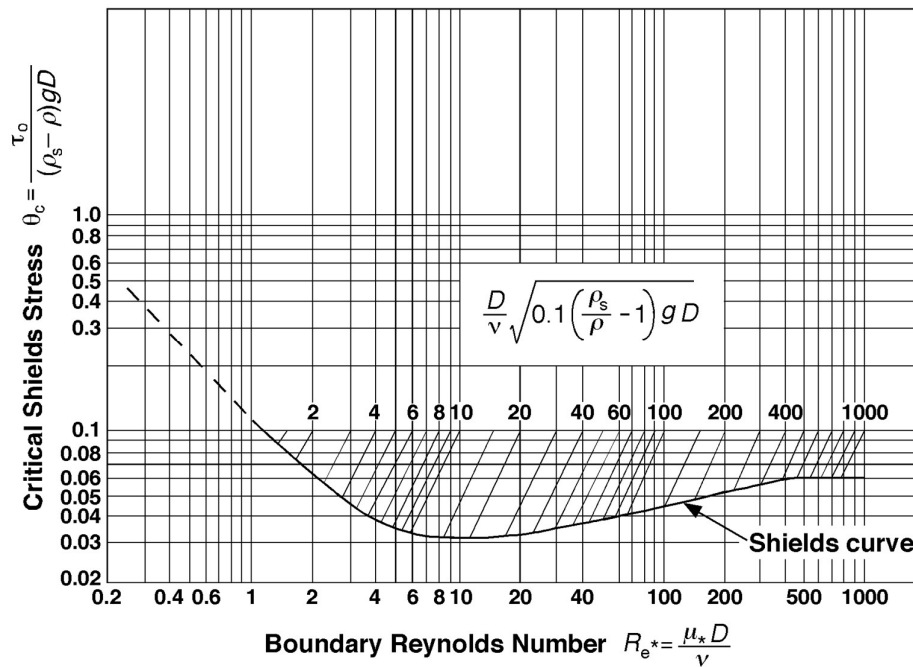
$$\theta_c = \frac{\tau_c}{(\rho_m - \rho_w) g d} = \frac{U_{*c}^2}{\Delta g d} \quad [10]$$

2.3 Reynolds getal in combinatie met Shields

Over het algemeen wordt het Reynolds-getal (Re) gebruikt om te bepalen of een stroming laminair of turbulent is en om overeenkomsten tussen deze twee verschillende typen stromingen weer te geven. In dit geval wordt het Reynolds-getal gebruikt om te bepalen wanneer granulair materiaal zich in een turbulente grenslaag bevindt of in een kleverige sublaag zit en zegt het Reynolds-getal niks over stromingskarakteristieken.

$$Re_* = \frac{U_{*c} d}{\nu} \quad [11]$$

De verhouding tussen het Reynolds-getal en de Shields parameter zijn door Shields uitgewerkt in een diagram, ook wel de Shields curve genoemd (Figuur 2). Met deze diagram wordt het begin van bewegen in granulair materiaal aangegeven.



Figuur 2 Shields curve (Swimmer, 2007)

De Shields curve is op te delen in 3 gebieden. (Lammers, 1997)

Gebied 1: $Re_* < 2$ (hydraulisch gladde bodem)

In dit gebied is de curve bijna lineair en heeft het granulaire materiaal een grote stabiliteit omdat de diameter van het materiaal kleiner is dan de dikte van de laminaire sublaag.

Gebied 2: $2 < Re_* < 500$ (overgang hydraulisch gladde bodem naar ruw wand)

De dikte van de laminaire sublaag is hier ongeveer gelijk aan de dikte van het granulair materiaal waardoor het materiaal in dit gebied het meest beweeglijk is.

Gebied 3: $Re_* > 500$ (onafhankelijk van stromingscondities bij bodem)

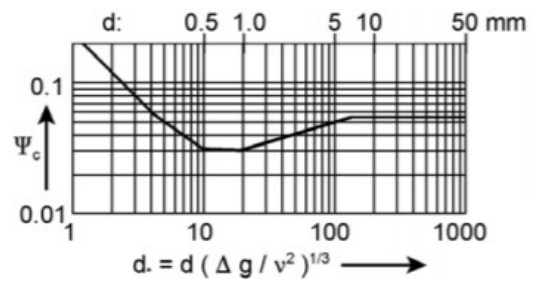
Deze situatie geldt voor een diameter groter dan 6-7 mm. Bij deze diameter of groter blijft de Shields parameter constant.

In Figuur 3 is te zien dat de curve bij een Reynolds-getal > 500 horizontaal wordt. In Figuur 2 is te zien dat de curve bij een Reynolds-getal > 500 horizontaal wordt. Dit betekent dat de Shields parameter bij groot granulair materiaal niet meer afhankelijk is van het Reynolds-nummer en een vaste waarde van 0,055 aanneemt.

In Figuur 2 is dezelfde stabiliteit relatie te zien als in Figuur 3. Echter is hier het Reynolds-getal vervangen door de dimensie loze diameter d_* . Het voordeel hiervan is dat de U_{*c} uit de vergelijking verdwijnt waardoor de vergelijking eenvoudiger wordt. De eliminatie van de U_{*c} waarde in de Reynolds vergelijking is mogelijk omdat elke diameter d_* een corresponderende waarde van U_{*c} heeft.

Uit de grafiek in Figuur 3 kan worden afgeleid dat de θ_c net als in Figuur 2 een constante waarde aanneemt. De waarde is afhankelijk van de dichtheid en viscositeit en is in dit geval bij $d = 6-7$ mm. Dit betekent dat voor normale breuksteenconstructies ($d > 6-7$ mm) een vaste waarde van θ_c kan worden gebruikt. Hierdoor wordt het rekenen met stabiliteit een stuk eenvoudiger.

Een andere conclusie die hieruit te trekken valt is dat bij granulair materiaal met een diameter groter dan 6-7 mm geen schaafeffecten zullen optreden omdat met een vaste θ_c waarde itereren wordt voorkomen. (Rijn, 1984)



Figuur 3 Shields curve met diameter (van Rijn, 1984)

2.4 Izbash-formule

De Izbash-formule is naast Shields een veelgebruikte methode om de stabiliteit van korrelig materiaal te bepalen. De Shields-formule is vooral geschikt voor granulair materiaal (zoals zand en grind), terwijl de Izbash-formule meer gebruikt wordt voor het bepalen van de stabiliteit bij grotere stenen.

De Izbash-formule is als volgt gedefinieerd:

$$U_c = 1,7 * \sqrt{\Delta g d}$$

[11]

3 Fasen van bewegen

De Shields parameter geeft een grens aan tussen rust en beweging van granulair materiaal. Waarbij θ_c de kritieke waarde is die deze grens aangeeft.

In praktijk is deze grens onduidelijk en bestaan er verschillende stadia van bewegen. Er zijn verschillende manieren gebruikt door onderzoekers om het begin van beweging te definiëren. Bij veel methoden is een persoonlijk oordeel van de omstandigheden ingesloten waardoor spreiding van resultaten tussen verschillende onderzoeken wordt veroorzaakt. De meest gebruikte manieren van definiëren zijn hieronder besproken.

Kramer (1932) definieerde 4 verschillende stadia van bewegen namelijk:

- | | | | |
|----|------------------------------|---|---|
| 1. | Keine Geschiebebewegung | - | Volkomen rust |
| 2. | Schwache Geschiebebewegung | - | Kleine, telbare aantallen korrels zijn in beweging, meest plaatselijk. |
| 3. | Mittlere Geschiebebewegung | - | Aantal bewegende korrels niet meer te tellen geen merkbaar materiaaltransport |
| 4. | Allgemeine Geschiebebewegung | - | Alle korrels in beweging, merkbaar transport |

Casey (1935) specificeerde stap 2 nog verder tot:

2a. Einzelne: Enkele korrels in beweging in een vierkant vlak met zijde $a \approx 500 D$

2b. Schwache: Enkele korrels in beweging in een vierkant vlak met zijde $a \approx 100 D$

In het waterloopkundig laboratorium (Deltares) wordt gebruik gemaakt van een vergelijkbare verdeling in 7 stappen welke op voorgaande is gebaseerd. (Schukking, 1972)

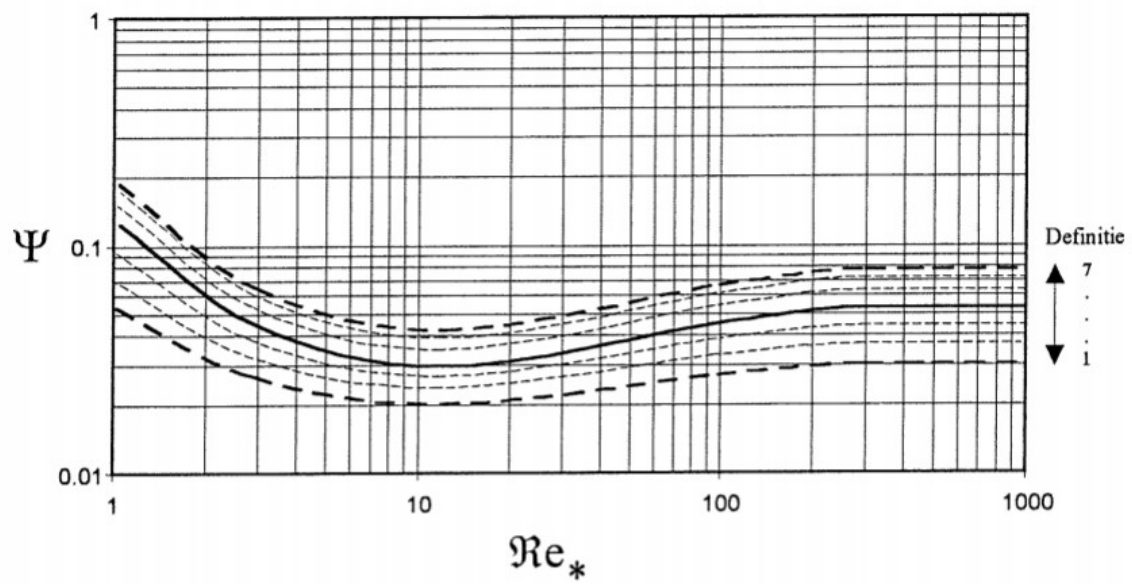
1. Verplaatsing van de korrels, af en toe;
2. Korrels aan de wandel, hier en daar
3. Korrels aan de wandel, op vrij veel plaatsen
4. Korrels aan de wandel, bijna overal
5. Korrels aan de wandel, overal doch niet permanent
6. Korrels aan de wandel, overal en permanent
7. Begin opmars van de korrels.

In figuur 4 zijn de 7 stappen weergegeven in de Shields curve. Meestal is een bepaalde mate van granulair transport toelaatbaar bij constructies. Wanneer het echter over het dimensioneren van bodembescherming gaat is het toelaatbare transport aanzienlijk kleiner. De reden hiervoor is dat bij bodembescherming de bodemverdediging vaak maar 2 keer de steendiameter van de steengradering is, waardoor bij het verdwijnen van een paar stenen de hele constructie kan falen. Om deze reden wordt bij het dimensioneren van bodembescherming een waarde θ_c van 0,035 aangehouden. Dit komt overeen met fase 2, korrels aan de wandel, hier en daar. (CUR, 2007).

Bovengenoemde criteria zijn kwalitatief. Dit zorgt voor problemen bij het overdragen en vergelijken van onderzoeken. Een kwantitatieve manier om begin van bewegen te definiëren is opgesteld door Yalin en Neill (1969). Zij kwamen tot de volgende formule:

$$N = \frac{n D^3}{u_*} \quad [12]$$

Waarin de grootte N de mate van beweging op de bodem is. Elk stadium van beweging kan door een bepaalde waarde van N worden gedefinieerd. Volledige onderbouwing is te vinden in (Schukking, 1972) blz. 10 en 11.



Figuur 4 Definitie begin van bewegen (Lammers, 1997)

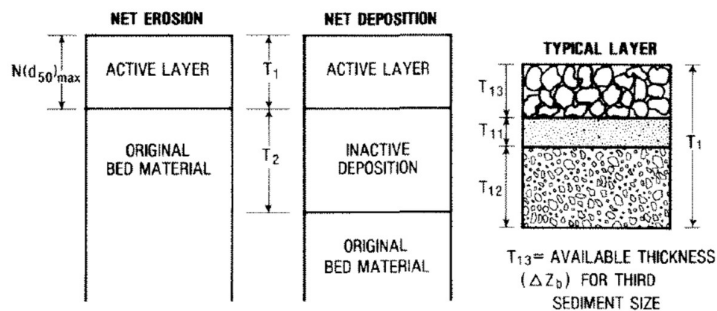
4 Armouring

Naar verwachting zal tijdens sommige proeven “armouring” plaatsvinden. Armouring is een proces waarbij een bestaande toplaag (active layer) kleiner granulair materiaal beschermt tegen de stroming. In het geval van dit onderzoek is dit kleiner materiaal de ecologische verrijking.

De ecologische verrijking op de toplaag bevindt zich bij lage stroomsnelheden in een rust fase. Naarmate de stroomsnelheid toeneemt begint de ecologische verrijking te bewegen waardoor een deel van de verrijking tussen de poriën van de toplaag valt. Het fijne deel van de verrijking zal sneller bewegen dan het grove deel van de verrijking. Dit grove deel zal voor een deel stabiel blijven liggen tussen en bovenop de toplaag terwijl het fijne materiaal wegspoelt. .

Na enige tijd zal het fijnere deel van de verrijking geheel weggespoeld zijn waardoor alleen het grove deel achterblijft. Dit resulteert in een toplaag zich stabiel gedraagt dan voorheen door opvulling van de poriën.

In de onderstaande figuur is het principe van armouring weergegeven.



Figuur 5 Principe armouring (Bennet van Nordin 1997)

5 Verschalingsmethodes

Verschalen kan door middel van verschillende methodes, de meest gebruikte methodes zijn het Froude getal en Reynolds. Froude wordt vaak gebruikt voor het schalen waarbij de viscositeit een minder belangrijke rol speelt. Reynolds is van toepassing wanneer viscositeit een grotere rol speelt dan de geometrische afmetingen. Wanneer verscaling wordt toegepast moet altijd rekening gehouden worden met verschalingsfouten omdat niet alle aspecten gelijktijdig verschaald kunnen worden. Om de verschalingsfouten te minimaliseren is het belangrijk om de verschalingsfactor (λ) zo laag mogelijk te houden. Wanneer verschaald wordt is het belangrijk om dezelfde verschalingsfactor te gebruiken voor alle geometrische, alle kinetische en alle dynamische verschalings. Hierbij kunnen ze onderling wel van elkaar verschillen.

Onderstaand staan de verschalingsregels t.b.v. de verschalingsfactor:

Tabel 1 Verschalingsregels

	Geometrisch gelijk	Kinetisch gelijk	Dynamisch gelijk
Omschrijving	De afmetingen in allen richtingen zijn gelijk geschaald tegen een factor (λ).	De tijd, snelheid, versnelling en debiet zijn gelijk geschaald tegen een factor (λ).	De kracht ratio's tussen geometrische en kinetische schaal moeten gelijk zijn
Kenmerken	• Diepte (m) • Golfhoogte (m) • Afmetingen object (m)	• Stroomsnelheid (m/s) • Golfsnelheid (m/s) • Golfhoogte (m)	• Traagheidskracht • Zwaartekracht • Vloeibaarheid • Oppervlakte krachten • Druk
Voorbeeld	$\lambda = \frac{L_p}{L_m}$ λ Verschalingsfactor (geometrische) L_p Prototype lengte (geometrische) L_m Model lengte (geometrische)	$\lambda = \frac{V_p}{V_m}$ λ Verschalingsfactor (kinetisch) V_p Prototype stroomsnelheid (kinetisch) V_m Model stroomsnelheid (kinetisch)	$\lambda = \frac{P_p}{P_m}$ λ Verschalingsfactor (dynamisch) P_p Prototype druk (dynamisch) P_m Model druk (dynamisch)

5.1 Dimensieloze verschalingsmethodes

Onderstaand bevindt zich een overzicht tabel met daarin de verschillende verschalingsformules. De initiële snelheid is over het algemeen het meest relevant in de vloeistofmechanica en wordt daarom in alle veelvoorkomende krachtratio combinaties toegepast.

Tabel 2 Dimensieloze verschalingsmethodes

Methode	symbool	Principe	Formule
Froude	F	(Inertial force/ gravity force) ^{1/2}	$F = \frac{V}{(gL)^{1/2}}$
	Het Froude getal is een dimensieloos getal wat bepaald wordt door de versnelling, de geometrische lengte en de zwaartekracht. Wanneer dit wordt toegepast worden vaak de versnelling en de geometrische lengte apart verschaald. De zwaartekracht wordt hierbij buiten beschouwing gehouden. Het criterium $F_m = F_p$ is geschikt voor modellen waar wrijving kan worden verwaarloosd zoals bij zee modellen het geval is. Wanneer D_{50} breuksteen in het model kleiner is dan 2mm kan het Froude getal niet worden toegepast, er zal dan gebruik gemaakt moeten worden van de Shields vergelijking. Verrijking op bodembescherming proef: Geschikt		
Reynolds	R	Intertial force / viscous force	$R = lV/\nu$
	Het Reynolds getal is een verhoudingsgetal voor de verhouding tussen initiële snelheid en viscositeit van de vloeistof. De viscositeit van de vloeistof kan niet worden aangepast tussen prototype en model waardoor hier een schaalfout optreedt. Dit zou leiden tot het toepassen van een andere vloeistof met een lagere viscositeit of het verhogen van de zwaartekracht in een centrifuge. Verrijking op bodembescherming proef: Ongeschikt		
Weber	W	Intertial force / viscous force	$W = \frac{\rho V^2 L}{\sigma}$
	Het Weber getal geeft een verhoudingsgetal tussen de initiële snelheid en de oppervlakte spanning van een vloeistof. Dit getal is relevant bij prototypen waarbij een dun wateroppervlak voorkomt. In modelonderzoek is dit getal van belang bij de vorming van luchtbellens, kleine waterdieptes en kleine golven. Volgens Le Mehaute, (1976) is nog nooit een model met een gelijk Weber getal tussen prototype en model gemaakt. Verrijking op bodembescherming proef: Ongeschikt		
Cauchy	C	Intertial force / elastic force	$C = \frac{\rho V^2}{E}$
	Het Cauchy getal geeft een verhoudingsgetal tussen de initiële snelheid en de samendrukbaarheid van de vloeistof. Dit is relevant voor onderzoeken waarin water met obstakel interacties worden onderzocht, hierin moet de stijfheid van het obstakel worden meegenomen. In dit onderzoek wordt water gebruikt en wordt het obstakel (monopile) zelf niet onderzocht op stabiliteit. Verrijking op bodembescherming proef: Ongeschikt		
Euler	E	Pressure force / inertial force	$E = \frac{p}{\rho V^2}$
	Het Euler getal geeft een verhoudingsgetal tussen de waterdruk en de initiële snelheid. Dit is van belang bij hoge drukken in pijpen of cavitatie in bijvoorbeeld pompen. Verrijking op bodembescherming proef: Ongeschikt		

6 Reynolds-getal

Reynolds-getal

Het Reynolds-getal is een dimensie loze grootheid waarmee de verhouding tussen de initiële snelheid en de viscositeit van een vloeistof wordt aangegeven. Door middel van deze verhouding kan worden bepaald of een stroming laminair of turbulent is.

Laminaire stroming ($Re < 2000$) ontstaat bij een laag Reynolds-getal. Deze stroming wordt gekenmerkt door een constante en rechte stroomlijnen. De viscositeit is hier dominant.

Turbulente stroming ($Re > 4000$) ontstaat bij een hoog Reynolds getal. Dit wordt gekenmerkt door chaotische stroomlijnen.

Het Reynolds-getal wordt als volgt gedefinieerd:

$$Re = \frac{UL}{\nu} \quad [13]$$

Waarin:

ν [m²/s] Kinematische viscositeit

U [m/s] Karakteristieke snelheid

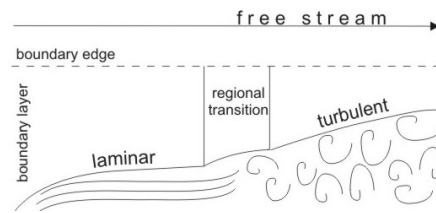
L [m] Karakteristieke lengte

Invloed Reynolds-getal bij monopiles

Het Reynolds-getal is een belangrijke factor bij stromingen rondom monopiles. Voor palen wordt deze gedefinieerd als:

$$Re_D = \frac{UD}{\nu} \quad [14]$$

Met D voor de paal diameter.



Figuur 6 Soorten stroming

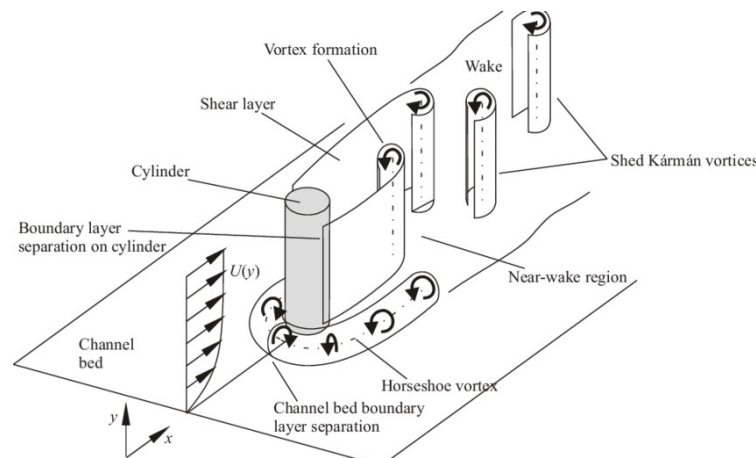
7 Stromingsprofiel

7.1 Stroming rond een Monopile

In het verleden zijn verschillende onderzoeken uitgevoerd naar de invloeden van een cilinder in een constante stroming. Ook zijn enkele onderzoeken uitgevoerd ten behoeven van de stroming om een cilinder ten gevolgen van golven. Echter is er nog niet veel onderzoek uitgevoerd met betrekking tot de combinatie van stroming en golven op een cilinder. Een basis waarbij golven en stroming worden gecombineerd is genoemd in het onderzoek van (Sumer, 2002). Onderstaand een korte toelichting op de verschillende effecten

Wanneer een monopile in een zeebodem wordt geïnstalleerd heeft dit de volgende gevolgen:

- Aan de stroomrichting kant van de monopile ontstaat een stroming naar beneden (downflow);
- Aan de zijkant van de monopile ontstaat een kritische stroomsnelheid;
- Bij de voet ontstaat hoefijzer stroming (horseshoe vortex)
- Aan de achterzijde ontstaat vortex shedding



Figuur 7 Monopile effecten (Sumer, 2004)

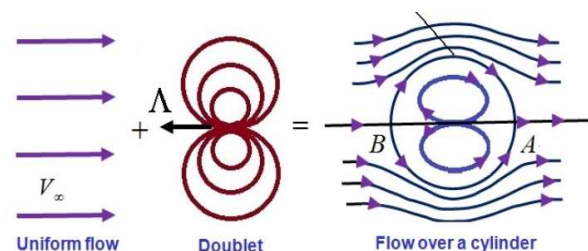
7.1.1 Downflow

In het midden van de monopile (symmetrische begin punt) komt de stroomsnelheid tot een snelheid van 0 m/s. Ten gevolgen van de waterdiepte neemt de horizontale stroomsnelheid ten opzichte van de oppervlakte stroming af. Ook neemt de stagnatie druk af ten opzichten van het oppervlakte. Hierdoor ontstaat een verticale langs-stroom langs de monopile. (Breusers, 2000)

In het onderzoek is dit niet relevant, de invloed van de downflow is minder dan de invloed van de langstroming. Ook is het niet mogelijk om de downflow in het fysieke model te verwerken.

7.1.2 Kritische stroomsnelheid

Een monopile in een gelijke stroming geeft als gevolg een kritische stroomversnelling en opstuwing rond het monopile oppervlakte. De kritische stroomsnelheid is van belang voor het bepalen van het transport en erosiesnelheid. De kritische stroomsnelheid wordt bepaald door middel van de uniforme stroming en doublet te combineren.



Figuur 8 Cilinder stroming (nptel.ac.in/courses/101103004/16)

Allereerst is de radiaal stroomsnelheid formule [16] en tangentieel stroomsnelheid formule [17] afgeleid van de basis formule [15]. De benodigde parameters voor beide formules zijn: meetpunt ten opzichten van het hart van de monopile, de kritische hoek (θ) bevindt zich bij een cylinder op $\pi/2$ (90°), $\pi/3$ (270°).

$$\Psi = \Psi_{uniform} + \Psi_{doublet} = V r \sin \theta \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) \quad [15]$$

$$U_r = u \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) \cos \theta \quad [16]$$

$$U_\theta = -u \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) \sin \theta \quad [17]$$

U_r	[m/s]	Radiaal stroomsnelheid
U_θ	[m/s]	tangential stroomsnelheid
R	[M]	Straal cilinder
r	[m]	Meetafstand ten opzichten van hart cilinder
θ	[°]	Kritische hoek
U	[m/s]	Kritische stroomsnelheid op punt: θ, r

Door middel van radiaal stroomsnelheid (U_r) en tangential stroomsnelheid (U_θ) wordt de kritische stroomsnelheid (U) berekent [18], hierbij is de afstand (r) ten opzichten van het hart maatgevend of de kritische hoek (θ).

$$U = (U_r^2 + U_\theta^2)^{1/2} \quad [18]$$

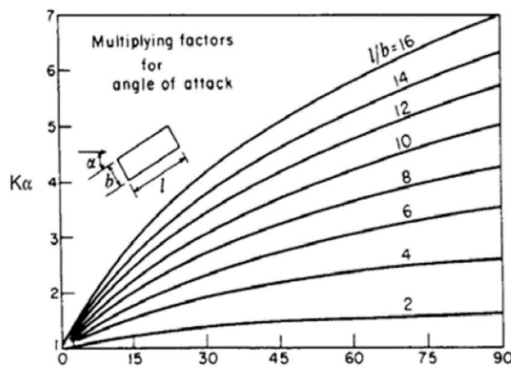
In het onderzoek zal de kritische stroomsnelheid van belang zijn voor het vervangen van de monopile in het schaalmodel.

7.1.3 Horse shoe vortex

De horse shoe vortex rond een monopile heeft invloed op het sediment transport (ontgronding). Volgens (Breusers, 2000) ontstaat het effect ten gevolgen van ontgrondingsholte aan de voorzijden van de monopile, ook wordt aangegeven dat de horse shoe vortex het sediment transport versneld uit de ontgrondingsholte. De effecten ondersteunen elkaar. De invloeden op de ontgrondingsdiepte zijn: Diameter monopile, de vorm (dit geval cilinder), stroming hoek, de stroming factor en de bodemdiepte. De indicatie vergelijking voor het bereken van ontgrondingsdiepte ten gevolgen van horseshoe vortex (Schierack, Introduction to bed, bank and shore protection, 2005):

$$\left(\frac{h_s}{D} \right) = 2K_s K_\alpha K_u \tanh \left(\frac{h_0}{D} \right) \quad [19]$$

h_s	Ontgrondingsdiepte
D	Diameter monopile
K_s	vorm factor (bij cilinders 1 (Schierack, 2005))
K_α	Stroming hoek
K_u	Stroomsnelheid factor ($K_u = 0$ for $u/U_c < 0.5$, $K_u = 1$ for $u/U_c > 1$ and $K_u = (2u/U_c - 1)$)
h_0	Bodemdiepte
U_c	Kritische stroomsnelheid



Figuur 9 stroming hoek (Schiereck, 2005)

De toplaag en filterlaag zijn eerder bepaald bij het caseontwerp die van toepassing zijn. Hierdoor is de ontgrondingsdiepte ten gevolgen van horse shoe vortex niet relevant voor het onderzoek. Wel relevant is het effect van de vortex op het verrijking materiaal, helaas is het niet mogelijk om het effect na te bootsen zonder het gebruik van een cilindervormig object. Wel kan geconcludeerd worden dat de vortex snelheden lager zijn dan de kritische stroomsnelheid die wordt aangehouden.

7.1.4 Lee-wake vortex shedding

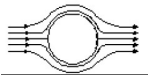
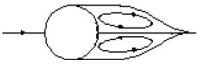
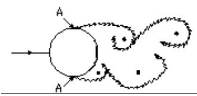
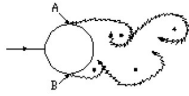
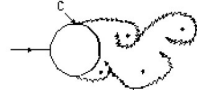
Summer, 2002 heeft een uitgebreid onderzoek gedaan naar de vortex achter een monopile aan de lijzijde. Onderstaand een korte samenvatting hierover.

De vortex is afhankelijk van de stroming en de golf eigenschappen. Voor het bepalen van de vortex ten gevolgen van de stroming wordt het Reynolds (Re_d) getal gebruikt van de monopile. Wanneer het Re_d toeneemt verandert de vortex aanzienlijk. In tabel 3 zijn de verschillende stromingseigenschappen zichtbaar in vergelijking met het Reynolds getal. (Sumer, 2002). Wanneer golven van toepassing zijn wordt er ook gebruik gemaakt van het KC getal.

De vortex shedding (f_v) frequentie kan bepaald worden door middel van: dimensie loze (St) Strouhal getal wat bepaald kan worden met het Reynolds getal, monopile diameter (D) en de kritische stroomsnelheid (U_c). Aan de hand hiervan hiervan kan de frequentie en periode bepaald worden van de vortex.

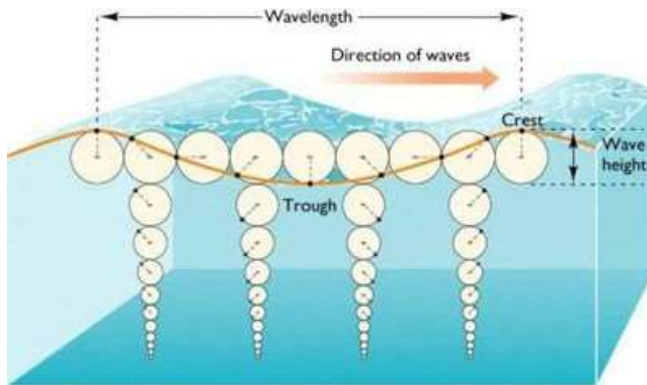
Het maximale vortex effect stroomsnelheid ligt lager dan de kritische stroomsnelheid, hierdoor is het niet relevant voor het onderzoek. Wel zijn de vormen en het liftende effect van de vortex relevant alleen kan dit niet nagebootst worden in de stroomgoot.

Tabel 3 Vortex effecten

	No separation. Creeping flow	$Re_d > 5$
	A fixed pair of symmetric vortices	$5 < Re_d < 40$
	Laminar vortex street	$40 < Re_d < 200$
	Transition to turbulence in the wake	$200 < Re_d < 300$
	Wake completely turbulent A: Laminar boundary layer separation	$300 < Re_d < 300000$
	A: Laminar boundary layer separation B: Turbulent boundary layer separation: but boundary layer turbulent	$300000 < Re_d < 350000$
	B: Turbulent boundary layer separation: boundary layer partly laminar partly turbulent	$350000 < Re_d < 1500000$
	C: boundary layer completely turbulent at one side	$1500000 < Re_d < 4000000$
	C: boundary layer completely turbulent at two sides	$4000000 < Re_d <$

7.2 Orbitaalstroming

Orbitaalstroming is de stroming op de bodem veroorzaakt door windgolven. Golven hebben tot op bepaalde diepte invloed op de stroming. Wanneer de waterdiepte kleiner is dan de diepte waarop de golf invloed heeft is een horizontale stroming aanwezig. De orbitaalstroming is van belang omdat deze de maatgevende stroming ter hoogte van de bodem sterk kan verhogen ten opzichte van de langs stroming. In figuur 10 is het principe van de orbitale stroming weer gegeven.



Figuur 10 Invloed van golven

De orbitaalstroming kan worden berekend waarbij uitgegaan wordt van een monochromatisch golfspectrum (sinus) of een natuurlijk random golfspectrum. Om te bepalen of orbitaalstroming van invloed is op de bodembescherming wordt de volgende vuistregel gehanteerd:

Orbitaal stroming treedt op tot een waterdiepte van $0,5 \cdot \text{golflengte}$.

De golflengte is afhankelijk van de golfperiode en waterdiepte, hiervoor geldt:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \quad [20]$$

Met:

L	[m]	Golflengte op diep water
g	[9,81 m/s ²]	Versnelling van de zwaartekracht
T	[s]	Golfperiode

7.2.1 Monochrome golf

De orbitale stroomsnelheid ter hoogte van de bodem kan op twee manieren worden bepaald. Met behulp van grafiek 11 en tabel 4 en met behulp van een vergelijking (Nielsen's method) wanneer $T_n/T < 0,20$. Beide manieren worden verder toegelicht.

Grafiek

Voor het gebruik van de grafiek zijn de volgende gegevens nodig.

Natuurlijke schaalperiode:

$$T_n = \left(\frac{h}{g}\right)^{\frac{1}{2}} \quad [21]$$

Met:

T_n	[s]	Natuurlijke schaalperiode
h	[m]	Waterdiepte
g	[9,81 m/s ²]	Versnelling van de zwaartekracht

De benodigde dimensieloze getallen zijn:

$$\frac{T_n}{T} \quad [22]$$

Met:

T_n	[s]	Natuurlijke schaalperiode
T	[s]	Periode

$$\frac{U_m T_n}{2H} \quad [23]$$

Met:

U_m	[m/s]	Orbitale stroomsnelheid bij de bodem
T_n	[s]	Natuurlijke schaalperiode
H	[m]	Golfhoogte

Vergelijking 2 is in grafiek 11 uitgezet tegen vergelijking 3 hieruit kan direct worden afgeleid wat U_m de orbitale stroomsnelheid ter hoogte van de bodem is.

Nielsen's Method

Verschillende manieren zijn beschikbaar om de orbitaalstroming met behulp van formules te berekenen. De meest nauwkeurige formule in het geval van dit onderzoek is de formule opgesteld door Nielsen (1985). Deze formule is tot 1% nauwkeurig wanneer $T_n/T < 0,20$ geldt. Wanneer deze waarde wordt overschreden neemt de nauwkeurigheid sterk af en moet dus streng worden gehandhaafd. In dit onderzoek geldt $T_n/T = 0,11$, waardoor dit een goede formule is om te gebruiken. De orbitaalstroming is gegeven door:

$$U_m = 0,5H \left(\frac{g}{h}\right)^{0,5} \left[1 - \frac{1}{3} \left(\frac{2\pi T_n}{T}\right)^2\right] \quad [24]$$

U_m	[m/s]	Orbitaalstroming
H	[m]	Golfhoogte
h	[m]	Waterdiepte
g	[9,81 m/s ²]	Versnelling van de zwaartekracht
T_n	[s]	Natuurlijke schaalperiode
T	[s]	Periode

7.2.2 Random wave spectrum

Onder natuurlijke omstandigheden heerst een golfspectrum bestaande uit verschillende golven met verschillende frequenties, hoogtes en richtingen. Een van de meest geaccepteerde golfspectra om deze omstandigheden op de Noordzee te kwantificeren is het JONSWAP spectrum (Joint North Sea Wave Project) (K. Hasselmann, 1973). De orbitale stroomsnelheid met een random wave spectrum kan op twee verschillende manieren worden berekend. Ten eerste met behulp van een grafiek en tabel en ten tweede met behulp van een exponentiele benadering. Beiden manieren worden uitgewerkt.

Grafiek

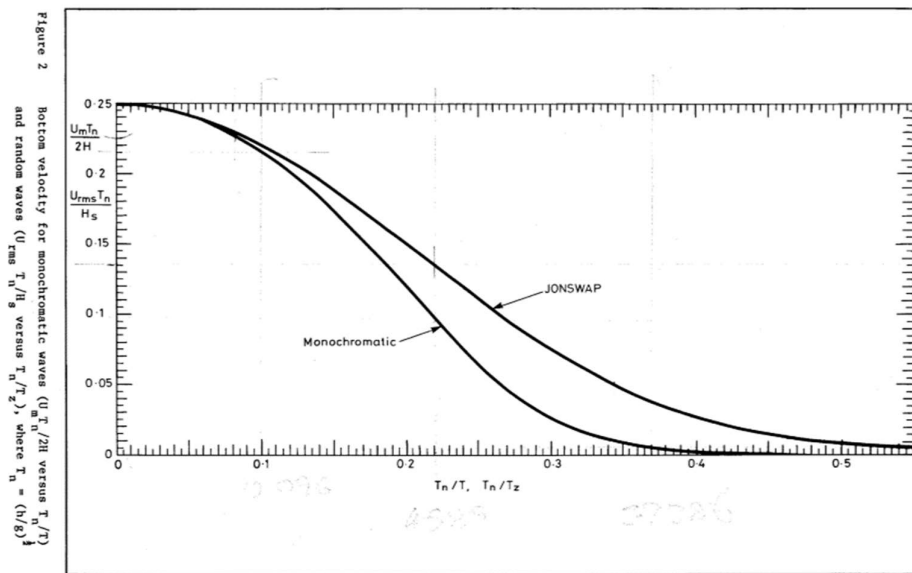
De orbitale stroomsnelheid (u_{mrs}) in het JONSWAP spectrum kan worden bepaald met behulp van tabel 4 Hiervoor zijn de volgende dimensie loze getallen nodig:

$$\frac{T_n}{T_z} \quad [25]$$

Met:

T_n	[s]	Natuurlijke schaalperiode
T_z	[s]	Zero crossing periode

$$T_z = T_m = 0,777 \cdot T_p \quad (\text{Leur, Stam, \& Glas, 2013})$$



Figuur 11 Bepalen U_m en U_{rms} (Soulsby, 1986)

$$\frac{U_{rms} T_n}{H_s}$$

[26]

Met:

U_{rms}	[m/s]	Orbitale stroomsnelheid bij de bodem
T_n	[s]	Natuurlijke schaalperiode
H_s	[m]	Significante golfhoogte

Vergelijking 4 is in grafiek 1 uitgezet tegen vergelijking 5 hieruit kan direct worden afgeleid wat U_{rms} de orbitale stroomsnelheid ter hoogte van de bodem is.

Soulsby exponentiele benadering

De Soulsby exponentiele benadering is iets minder nauwkeurig dan de bepaling met behulp van de grafiek maar een praktische methode om in een spreadsheet te gebruiken. De vergelijking geeft een nauwkeurigheid van <1,2% voor $0 \leq T_n/T_z \leq 0,14$ en <1% voor $0,14 \leq T_n/T_z \leq 0,34$. In dit onderzoek geldt $T_n/T_z = 0,14$. De orbitaalstroming is gegeven door:

$$U_{rms} = \left(\frac{H_s}{4}\right) \left(\frac{g}{h}\right)^{\frac{1}{2}} \exp \left\{ - \left[\frac{3,65}{T_z} \left(\frac{h}{g}\right)^{\frac{1}{2}} \right]^{2,1} \right\} \quad [27]$$

Met:

U_{rms}	[m/s]	Orbitale stroomsnelheid bij de bodem
H_s	[m]	Significante golfhoogte
h	[m]	Waterdiepte
g	[9,81 m/s ²]	Versnelling van de zwaartekracht
T_z	[s]	Zero crossing periode

$$T_z = T_m = 0,777 \cdot T_p \quad (\text{Leur, Stam, \& Glas, 2013})$$

Tabel 4 Exacte waarden voor monochroom en JONSWAP spectrum (Soulsby, 1986)

MONOCHROMATIC		JONSWAP SPECTRUM		
T_n/T	$U_{mn}^2/2H$	T_n/T_z	$U_{rms}^2 T_n/H_s$	T_{pu}/T_z
0.00	0.250	0.00	0.250	1.281
0.02	0.248	0.02	0.248	1.281
0.04	0.244	0.04	0.245	1.282
0.06	0.237	0.06	0.238	1.283
0.08	0.228	0.08	0.230	1.284
0.10	0.216	0.10	0.219	1.285
0.12	0.202	0.12	0.208	1.286
0.14	0.185	0.14	0.196	1.288
0.16	0.165	0.16	0.172	1.290
0.18	0.143	0.18	0.167	1.292
0.20	0.120	0.20	0.150	1.296
0.22	0.097	0.22	0.134	1.299
0.24	0.075	0.24	0.118	1.304
0.26	0.055	0.26	0.103	1.311
0.28	0.039	0.28	0.088	1.319
0.30	0.027	0.30	0.075	1.328
0.32	0.018	0.32	0.063	1.339
0.34	0.012	0.34	0.052	1.353
0.36	0.007	0.36	0.042	1.372
0.38	0.005	0.38	0.033	1.398
0.40	0.003	0.40	0.027	1.448
0.42	0.002	0.42	0.022	1.570
0.44	0.001	0.44	0.017	1.620
0.46	0.000	0.46	0.013	1.653
0.48	0.000	0.48	0.010	1.682
0.50	0.000	0.50	0.008	1.708
0.52	0.000	0.52	0.007	1.731
0.54	0.000	0.54	0.006	1.753

7.2.3 Combineren getijdestroming en orbitaalstroming

De orbitaal en langs stroming hebben invloed op elkaar omdat deze tegelijk optreden. De orbitaal en langs stroming kunnen voor het monochroom golfspectrum gecombineerd worden. Dit wordt gedaan met behulp van figuur 12. In figuur 12 is het Froude getal met een range van -0,5 – 0,5 uitgezet in de grafiek waarin vergelijking 28 tegen vergelijking 29 is uitgezet. Het Froude-getal wordt berekend met de volgende vergelijking:

$$Fr = \frac{U_p}{(gh)^{\frac{1}{2}}} \quad [28]$$

Met:

h [m] Waterdiepte
g [9,81 m/s²] Versnelling van de zwaartekracht

Waarbij:

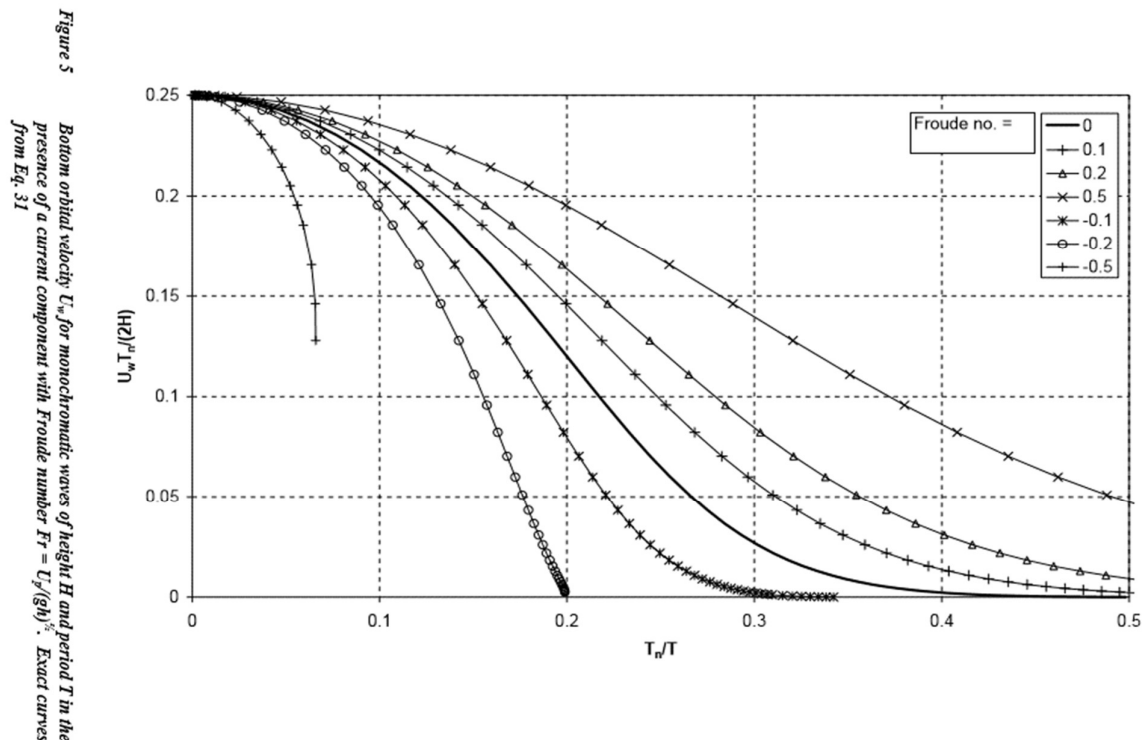
$$U_p = U \cos \varphi \quad [29]$$

Met:

U_p [-] Stroomsnelheid inclusief hoek
U [m/s] Orbitale stroomsnelheid zonder stroming
 φ [°] Hoek tussen stroming en golf

Voor φ geldt dat wanneer $\varphi = 0$ de stroming dezelfde richting op stroomt als de golf en bij $\varphi = 180$ de stroming in tegenovergestelde richting van de golf stroomt. Het Froude getal kan negatief zijn. Wanneer het Froude getal en T_n/T zijn bepaald kan gemakkelijk met behulp van figuur 12 U_w worden bepaald

Het samenvoegen van een langs stroming en een orbitale stroomsnelheid van het JONSWAP spectrum zou op eenzelfde manier moeten worden opgelost zoals hierboven beschreven. Hiervoor dient iedere golffrequentie los berekend te worden en moeten de stroomsnelheden die hieruit voortkomen worden samengevoegd. Dit is niet gedaan voor dit onderzoek.



Figuur 12 Bepalen U_w inclusief stroming

8 Filterformules

De filterformule is een vergelijking tussen Shields en Bijker, door middel van het toepassen van de formule kan de minimale D_{50} bepaald worden. In het huidige onderzoek wordt de filterlaag eigenschappen gebruikt van de luchterduinen case.

Voor het bepalen van de kleine steen gradatie verrijking wordt gebruik gemaakt van de formule voor het bepalen van de minimale steendiameter.

$$\frac{D_{15a}}{D_{85f}} < 5 \quad [30]$$

$$\frac{D_{50a}}{D_{50f}} < 25 \quad [31]$$

$$\frac{D_{15a}}{D_{15f}} < 5 \quad [32]$$

D_{15a}	=	Zeef diameter waar 85% (kg) van het top laag materiaal gaat.
D_{15f}	=	Zeef diameter waar 15% (mm) van het filter materiaal gaat.
D_{50a}	=	Zeef diameter waar 50% (mm) van het top laag materiaal gaat.
D_{50f}	=	Zeef diameter waar 50% (mm) van het filter materiaal gaat.
D_{15a}	=	Zeef diameter waar 15% (kg) van het top laag materiaal gaat.
D_{85f}	=	Zeef diameter waar 85% (kg) van het filter materiaal gaat.

9 Habitattypen Noordzee

De verschillende habitattypen die in de Noordzee voorkomen zijn:

Fronten

Fronten ontstaan waar twee watermassa's samenkomen met verschillende fysische eigenschappen zoals temperatuur of dichtheid. Wanneer deze watermassa's mengen ontstaan gunstige omstandigheden voor primaire productie wat organismen uit hogere trofische niveaus aantrekt. Fronten bevinden zich in de waterkolom waardoor de plaats over het algemeen niet vastligt. Een voorbeeld van een front dat wel redelijk vast ligt qua plaats is het Friese Front.

Zand

Een groot deel van de Noordzee bestaat uit een zandige bodem. Hier zijn "zandgolven/zandduinen" aanwezig van enkele meters hoog. Er is hier een redelijk egale verspreiding van bodem- en visfauna aanwezig die lokaal tot hoger biomassa kan leiden.

Zandbanken

Zandbanken zijn te onderscheiden zandige gronden op basis van de structuur van het gebied. Een zandbank wordt gedefinieerd in de habitatrichtlijn als een aan weerskanten aflopende zandrug waarvan het ondiepste punt minder dan 20 meter onder het wateroppervlak ligt. Door de ondiepte bereikt relatief veel golfenergie de bodem waardoor habitat voor unieke fauna ontstaat. Vaak vormen fronten zich langs de randen van de zandbank waar lokaal hoge biomassa voor kan komen.

Slib

Het slibgebied herbergde vroeger zeer grote oestergronden waar de oesterbanken met de aangehechte organismen een uniek habitat vormden. De oesterbanken zijn volledig verdwenen, de slibgronden onderscheiden zich nu door de hoge biodiversiteit.

Grind

Het enige grindgebied in het Nederlandse deel van de Noordzee bevindt zich bij de Klaverbank. Hier is een verhoogde biodiversiteit aanwezig met soorten die hard substraat nodig hebben om te kunnen vestigen. Dit levert een uniek gebied op, dat tevens hogere concentraties vogels en walvisachtigen aantrekt. Door de lage concentratie materiaal in de waterkolom kan licht tot op de bodem doordringen.

Schelpenbanken

Vroeger vormden de oesterbanken met aangehecht materiaal waarschijnlijk een uniek habitat. Nu dit volledig verdwenen is, is dit type habitat niet meer aanwezig. De schelpen die nu aanwezig zijn zitten grotendeels in het sediment waardoor dit geen aanhechtingsplaats voor organismen biedt. Wel is het een belangrijke voedselbron voor vogels.

Windmolenpark

Windmolenparken bevinden zich op zandige bodem. De monopile en de breuksteen rondom de windmolen biedt hard substraat voor organismen om zich te kunnen vestigen. Tevens kenmerkt het gebied zich door het uitsluiten van overig menselijk handelen zoals visserij in het gebied. Dit tezamen zorgt voor een uniek habitat. De harde structuren bieden plaat aan organismen die zich enkel op hard substraat kunnen vestigen zoals mossels, oesters, anemonen, algen etc. Wanneer er een hoge biodiversiteit en biomassa op de harde substraten is ontwikkeld trekt dit ook weer andere soorten aan zoals vissen en vogels. (Lindeboom, Witbaard, Bos, & Meesters, 2008)

10 Bronnen

- Breusers, H. a. (2000). *wave scour around piles*. Sydney: Balkema.
- CUR. (2007). *The Rock Manual*. London: CUR.
- Hoan, N. T. (2008). *Stone Stability under non-uniform flow*. Delft: Universiteit Delft.
- K. Hasselmann, T. B. (1973). *Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)*. Hamburg: Deutsches Hydrographisches Institut .
- Lammers, J. C. (1997). *Shields in de praktijk*. Delft: TU Delft.
- Leur, K. v., Stam, C., & Glas, J. (2013). *Design Report Scour Protection (Luchterduinen)*. Rotterdam: Van Oord.
- Lindeboom, H., Witbaard, R., Bos, O., & Meesters, H. (2008). *Gebiedsbescherming Noordzee*. Wageningen: Wageningen UR.
- Rijn, L. G. (1984). *Sediment Transport*. ASCE.
- Schiereck, G. J. (2004). *Introduction to bed, bank and shore protection*. London: Spons Press.
- Schiereck, G. J. (2005). *Introduction to bed, bank and shore protection*. Delft : Delf University Press.
- Schukking, H. N. (1972). *Beweging van bodemmateriaal*. Delft: Waterloopkundig Laboratorium.
- Soulsby, R. S. (1986). *A Direct Method of Calculating Bottom Orbital Velocity Under Waves*. HR Wallingford.
- Sumer, B. a. (2002). The mechanics of scour in the marine environment. *Advanced series of ocean engineering* , 536.
- Sumner, D. (2004). Journal of Visualization . *A visualization study of fluid-structure interaction between a circular cylinder and a channel bed*, 187-199.
- Van Oord. (2013). *Technical Note Basis for an optimized scour protection design*. Rotterdam: Van Oord.

Bijlage III

Prototype Ontwerp

Mei 2019

Van Oord 
Marine ingenuity

Hogeschool  van Arnhem en Nijmegen

Inhoud

1	Parameters luchterduinen bodembescherming	3
2	Parameters Oosterschelde vooroever	5
3	Ontwerp Bodembescherming luchterduinen	6
4	Ontwerp vooroever verdediging Oosterschelde	7

1 Parameters luchterduinen bodembescherming

Tabel 1 Bodembescherming Luchterduinen Parameters

Bodembescherming	Top laag	Filter
Gradering top laag:	10/200 kg	1-3 inch
D50:	355 mm	45 mm
Materiaal:	Graniet	Graniet
Hoogte tolerantie	$\pm 0,4$ m	$\pm 0,2$ m
Laag dikte	1,2 m (gemiddelde)	0,5 m (gemiddelde)
Diameter (m):	3Dpile +2 m = 18,2 m	4,7Dpile +2 m = 27,4 m
Talud	1:2,5	1:2,5

Tabel 2 Eigenschappen monopile

Eigenschappen monopile	
Maatgevende diameter	5,4 m

Tabel 3 Hydraulische eigenschappen bodembescherming

Hydraulische eigenschappen	
Maatgevende stroomsnelheid:	0,9 m/s
Waterkolom:	19-24 m

Tabel 4 Golfeigenschappen bodembescherming

sp	H	T _p	H _{m0}	H _{2%}	H _{1%}	H _{max}
	[m]	[s]	[m]	[m]	[m]	[m]
50 jaar RP	19.5	13.3	8.2	9.7	10.2	11.7
	19.7	13.3	7.9	9.8	10.5	13.3
	22.3	13.0	7.9	9.8	10.3	11.5
	22.3	13.9	7.9	10.3	11.0	12.7
	22.3	13.3	7.9	9.8	10.2	11.7
	25.7	13.3	8.2	10.8	11.4	13.8

Tabel 5 Golfhoogte verschillende waterdieptes

Golfhoogte bij verschillende waterdieptes		
Description	Abbreviation	Tidal level (m)
Highest Astronomical Tide	HAT	2,1
Mean High Water Spring	MHWS	1,9
Mean High Water Neap	MHWN	1,5
Mean Sea Level	MSL	0,9
Mean Low Water Neap	MLWN	0,3
Mean Low Water Spring	MLWS	0,3
Lowest Astronomical Tide	LAT	0,0

Tabel 6 Stormduur

Condition	Return Period	Water Depth	Significant Wave Height	Spectral Peak wave period	Current Velocity ¹	Duration
	RP (Years)	h (m)	Hs (m)	Tp (s)	Uc (m/s)	T(hours)
Tidal		19,5			0,55	32
Storm	1		5,7	11,4	0,84	6
	10		7,0	12,7	0,90	6
	50		7,8	13,4	0,93	6

2 Parameters Oosterschelde vooroever

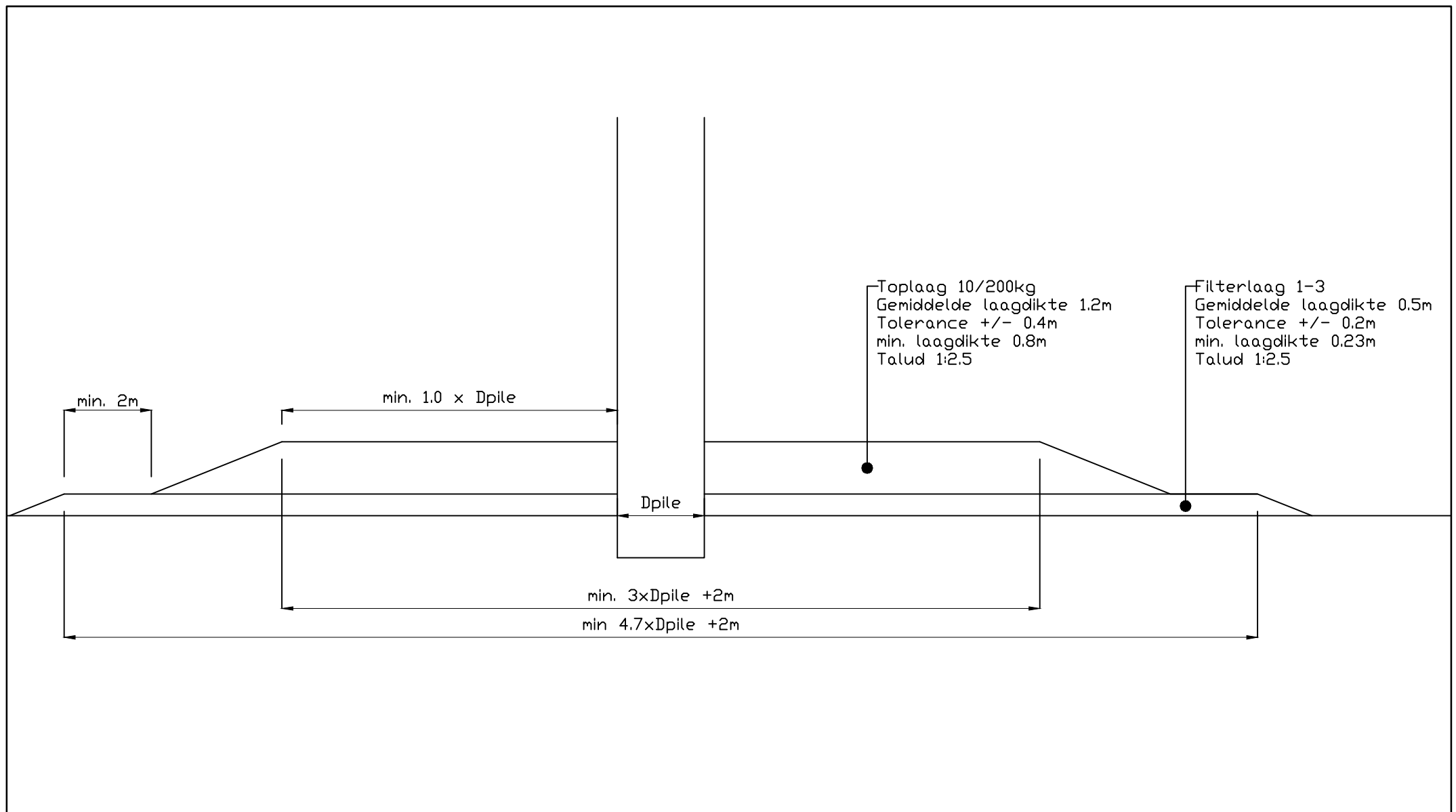
Tabel 7 Vooroever Eigenschappen

Vooroever Eigenschappen	Top laag
Grading toplaag:	40-200 mm
D50:	96 mm
Materiaal:	Graniet
Laag dikte	10 kn/m ²
Talud	1:2,5

Tabel 8 Hydraulische eigenschappen

Hydraulische eigenschappen	
Maatgevende stroomsnelheid Oosterschelde:	1,3 m/s
Maatgevende stroomsnelheid Westerschelde:	2,5 m/s
Waterkolom:	1,73-20,21m
Duur maatgevende omstandigheden	3 uur

3 Ontwerp Bodembescherming luchterduinen



Schaal	1:40	Datum	Opmerkingen		
Getekend	JR	12-05-2019			
Gecontroleerd					
Gezien					
Benaming					
Bodembescherming Luchterduinen Prototype					
 Faculteit Techniek Hogeschool van Arnhem en Nijmegen	Afdeling	Formaat	Eenheid	Tek. Nr.	
	B/CT	A4	mm		
	Naam: Jan Rigter				

4 Ontwerp vooroever verdediging Oosterschelde

Toplaag staalslakken 40-200mm
min. laagdikte 10 kn/m²
max. talud 1:2.5

Schaal	1:40	Datum	Opmerkingen			
Getekend	JR	12-05-2019				
Gecontroleerd						
Gezien						
Benaming						
Vooroeverbescherming De Oosterschelde Prototype						
 <i>Faculteit Techniek</i> Hogeschool van Arnhem en Nijmegen			Afdeling	Formaat	Eenheid	Tek. Nr.
			B/CT	A4	mm	
			Naam: Jan Rigter			

Bijlage IV

Graderingen

Mei 2019

Van Oord 
Marine ingenuity

Hogeschool  **van Arnhem en Nijmegen**

Inhoud

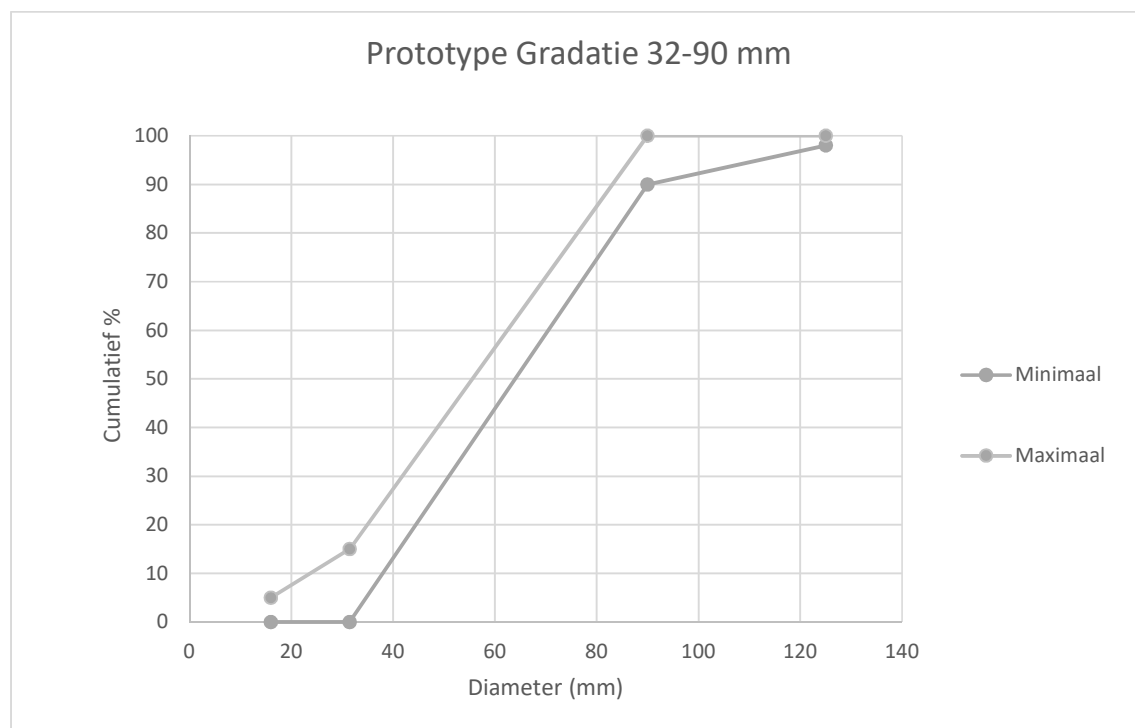
1	Filterlaag Bodembescherming/Kleine steentjes verrijking	3
1.1	Prototype 32-90 mm	3
1.2	Model 3,2-9,0 mm	4
1.3	Toegepast 3,2-9,0 mm	5
2	Toplaag bodembescherming	6
2.1	Prototype 10-200kg	6
2.2	Model 19-50 mm	7
2.3	Toegepast 19-50 mm	8
3	Vooroever bescherming	9
3.1	Prototype 63-180 mm (basalt)	9
3.2	Prototype 6,3-18 mm	10
3.3	Toegepast 6,3-18 mm	11
4	Schelpmateriaal 0-40 mm	12
4.1	Geleverd (model)	12
4.2	Toegepast 3-4 mm	13
5	500kg,1000kg en 2000kg stenen	14
5.1	500 kg Model en prototype	14
5.2	1000 kg model en prototype	14
5.3	2000 kg model en prototype	14

1 Filterlaag Bodembescherming/Kleine steentjes verrijking

1.1 Prototype 32-90 mm

Tabel 1 Prototype gradering 32-90 mm

	mm	Minimaal		Maximaal	
		%	mm	%	mm
ELL (0-5%)	16	0	16	5	16
NLL (0-15%)	31,5	0	31,5	15	31,5
0,5	45	90	90	100	90
NUL (90-100%)	90	98	125	100	125
EUL (98-100%)	125				



Grafiek 1 Prototype gradering 32-90 mm

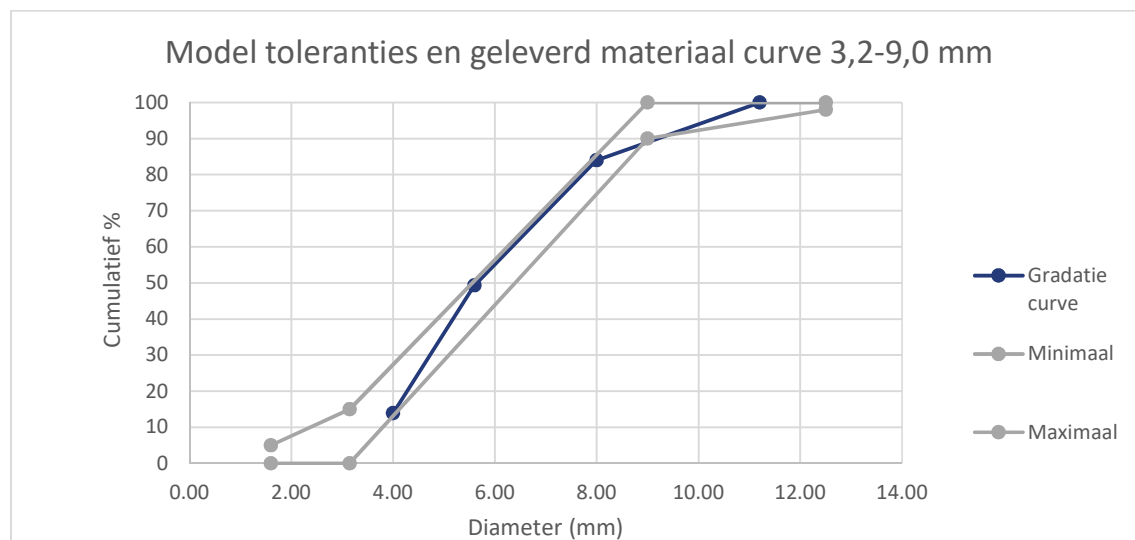
1.2 Schaalmodel 3,2-9,0 mm

Tabel 2 Schaalmodel gradering 3,2-9,0 mm

Model		Model			
	mm	Minimaal		Maximaal	
ELL (0-5%)	1,6	%	mm	%	mm
NLL (0-15%)	3,15	0	1,6	5	1,6
0,5	4,5	0	3,15	15	3,15
NUL (90-100%)	9	90	9	100	9
EUL (98-100%)	12,5	98	12,5	100	12,5

Tabel 3 Steekproef gradering 3,2-9,0 mm

Geleverd	(steekproef)		
mm	Kg	%	% cumulatief
4,00	4	14	14
5,60	10,2	35	49
8,00	10	35	84
11,20	4,6	16	100
Totaal	28,8	100,00	



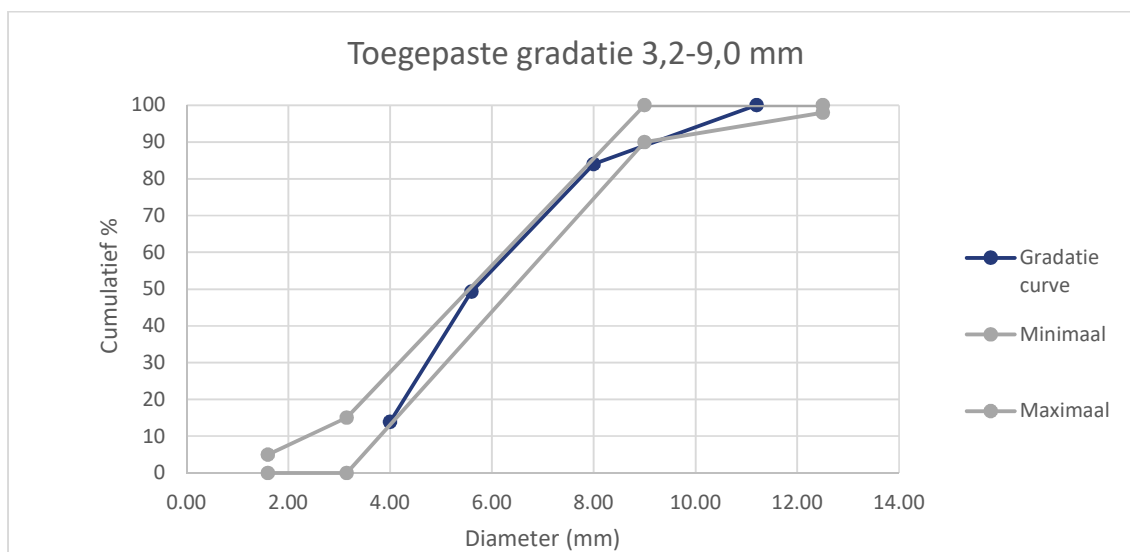
Grafiek 2 Schaalmodel gradering 3,2-9,0 mm

1.3 Toegepast 3,2-9,0 mm

Tabel 4 Toegepast 3,2 - 9,0 mm

Model Toleranties			
Minimaal		Maximaal	
%	mm	%	mm
0	1,6	5	1,6
0	3,15	15	3,15
90	9	100	9
98	12,5	100	12,5

Toegepast		
mm	%	% cumulatief
4,00	14	14
5,60	35	49
8,00	35	84
11,20	16	100
Totaal	100,00	



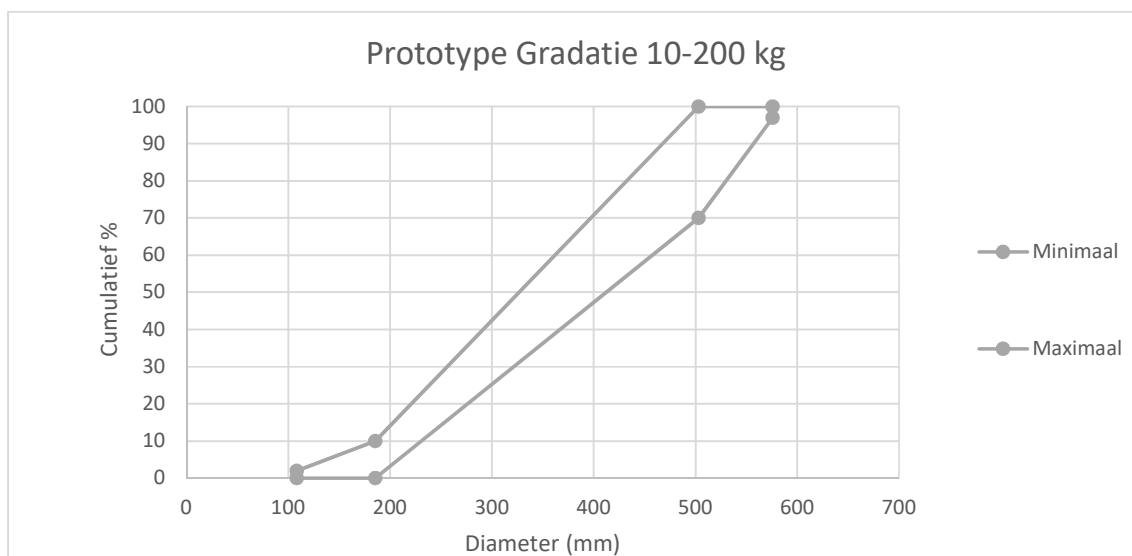
Grafiek 3 Toegepast 3,2 - 9,0 mm

2 Toplaag bodembescherming

2.1 Prototype 10-200 kg

Tabel 5 Prototype gradering 10-200 kg

	mm	Minimaal		Maximaal	
		%	mm	%	mm
ELL (0-5%)	108,4	0	108	2	108
NLL (0-15%)	185,3	0	185	10	185
0,5	355,0	70	503	100	503
NUL (70-100%)	503,1	97	576	100	576
EUL (97-100%)	575,9				



Grafiek 4 Prototype gradering

2.2 Schaalmodel 19-50 mm

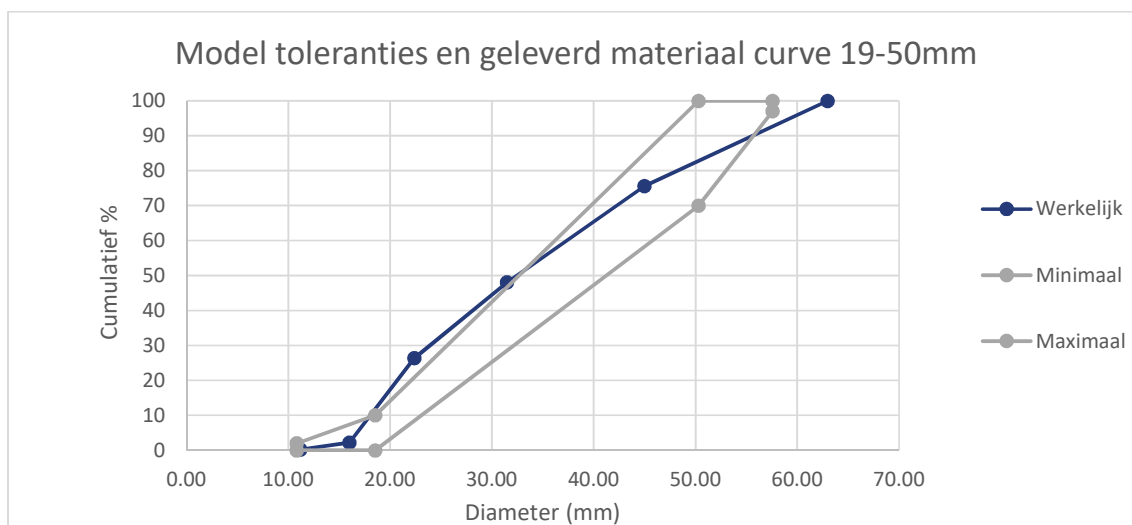
Tabel 6 Schaalmodel gradering 19-50 mm

Model	
	mm
ELL (0-5%)	10,8
NLL (0-15%)	18,5
0,5	35,5
NUL (70-100%)	50,3
EUL (97-100%)	57,6

Model			
Minimaal		Maximaal	
%	mm	%	mm
0	10,8	2	10,8
0	18,5	10	18,5
70	50,3	100	50,3
97	57,6	100	57,6

Tabel 7 Steekproef gradering

Geleverd	(steekproef)		
mm	Kg	%	% cumulatieve
11,20	0,3	0,2	0
16,00	2,5	2,0	2
22,40	30,7	24,2	26
31,50	27,5	21,7	48
45	34,9	27,5	76
63	31	24,4	100
Totaal	126,9	100,0	



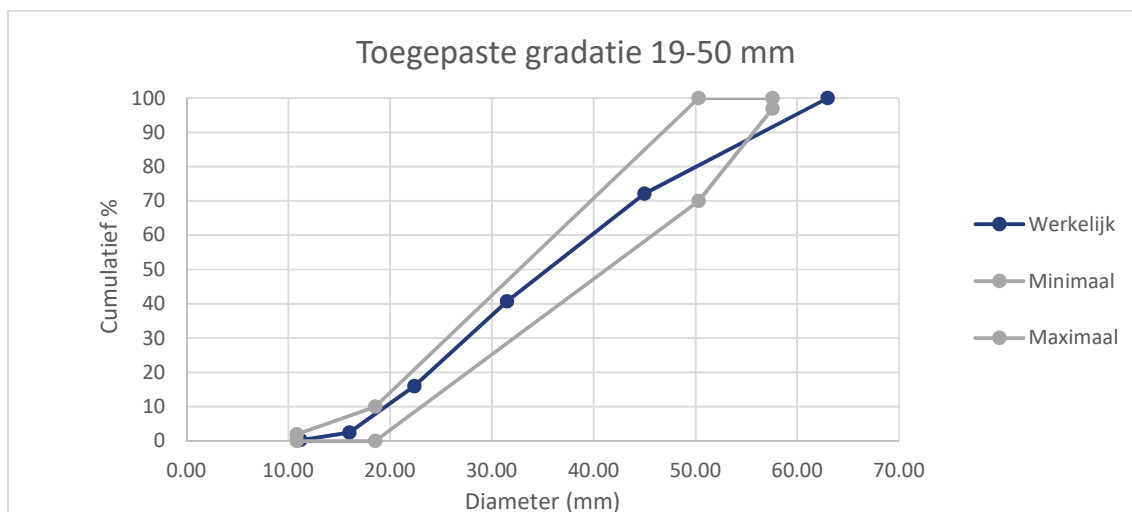
Grafiek 5 Schaalmodel gradering

2.3 Toegepast 19-50 mm

Tabel 8 Toegepast 19-50 mm

Model Toleranties			
Minimaal		Maximaal	
%	mm	%	mm
0	10,8	2	10,8
0	18,5	10	18,5
70	50,3	100	50,3
97	57,6	100	57,6

Toegepast		
mm	%	% cumulatief
11,20	0,3	0
16,00	2,2	3
22,40	13,5	16
31,50	24,7	41
45	31,4	72
63	27,9	100
Totaal	100,0	



Grafiek 6 Toegepast 19-50 mm

3 Vooroever bescherming

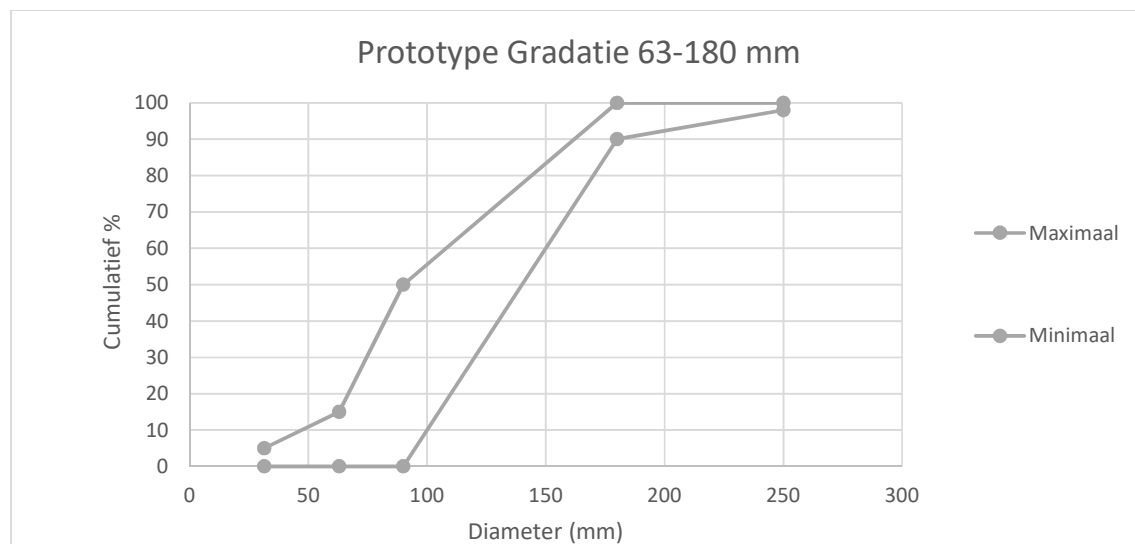
3.1 Prototype 63-180 mm (basalt)

Tabel 9 Staalslakken basalt

Staalslakken (40-200 mm)			Formule	Steen (vervanging staalslakken)		
ρ_m	3100	kg/m3	$\tau_{cr} = (\rho_m - \rho_w) g D_{50} \psi_{cr}$	ρ_m	2650	kg/m3
ρ_w	1025	kg/m3		ρ_w	1025	kg/m3
g	9,81	m/s2	with: τ_{cr} = critical shear stress (N/m ²) ρ_r = specific density rock (kg/m ³) ρ_w = specific density water (kg/m ³) g = gravitational acceleration (m/s ²) D_{50} = median grain size (m) ψ_{cr} = Shields parameter (-)	g	9,81	m/s2
D_{50}	0,075	m		D_{50}	0,095769	m
ψ_{cr}	0,03	-		ψ_{cr}	0,03	-
t_{cr}	45,80044	N/m ²		t_{cr}	45,80044	N/m ²
ψ_{cr}	Gegeven in ontwerprapport Oosterschelde (0,03)			Bijbehorende gradering		
				63 -180		mm
Rock Manual Hst. 3 blz. 116				D_{50}	122	

Tabel 10 Prototype gradering 63-180 mm

	mm	Minimaal		Maximaal	
		%	mm	%	mm
(0-5%)	31,5	0	32	5	32
(0-15%)	63,0	0	63	15	63
(0-50%)	90,0	0	90	50	90
(90-100%)	180,0	90	180	100	180
(98-100%)	250,0	98	250	100	250



Grafiek 7 Prototype gradering

3.2 Schaalmodel 6,3-18 mm

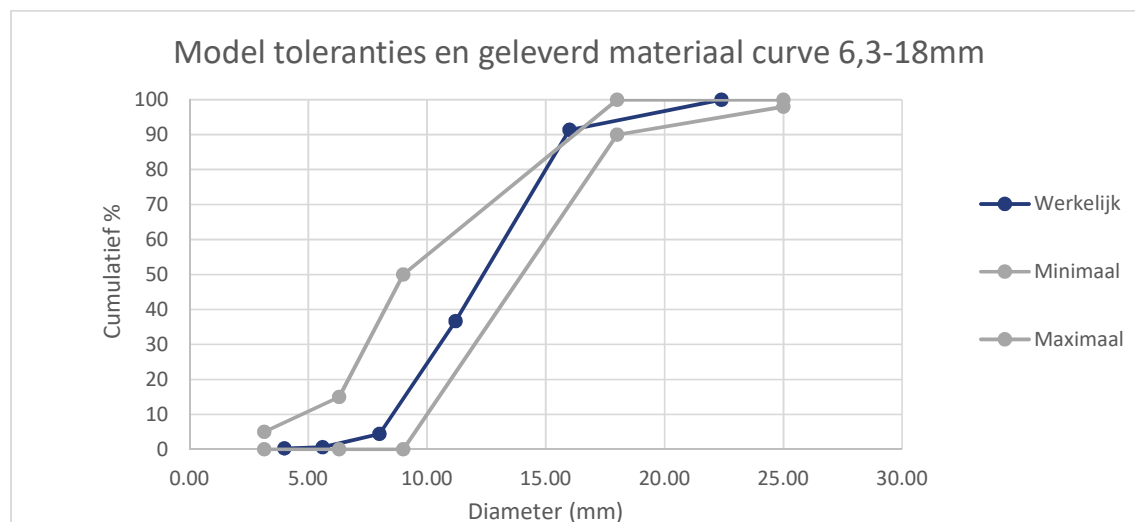
Tabel 11 Schaalmodel gradering 6,3-18 mm

Model	
	mm
(0-5%)	3,2
(0-15%)	6,3
(0-50%)	9,0
(90-100%)	18,0
(98-100%)	25,0

Model			
Minimaal		Maximaal	
%	mm	%	mm
0	3,2	5	3,2
0	6,3	15	6,3
0	9,0	50	9,0
90	18,0	100	18,0
98	25,0	100	25,0

Tabel 12 Steekproef gradering

Geleverd	(steekproef)		
mm	Kg	%	% cumulatief
4,00	0,1	0,2	0
5,60	0,2	2,0	1
8,00	1,8	24,2	4
11,20	15,4	21,7	37
16	26,2	27,5	91
22,4	4,1	24,4	100
Totaal	47,8	100,0	



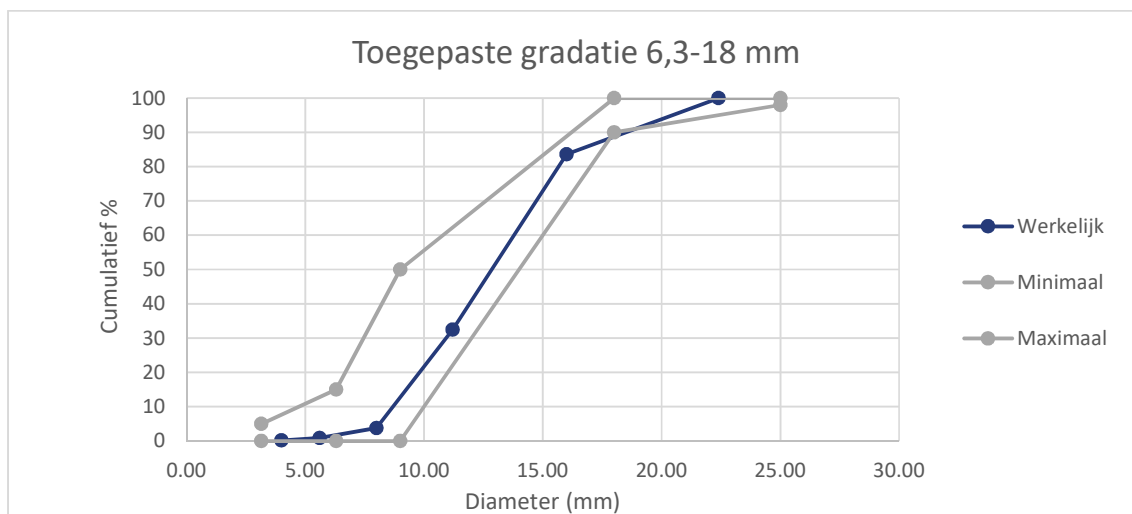
Grafiek 8 Schaalmodel gradering

3.3 Toegepast 6,3-18 mm

Tabel 13 Toegepast 6,3-18 mm

Model Toleranties			
Minimaal		Maximaal	
%	mm	%	mm
0	3,2	5	3,2
0	6,3	15	6,3
0	9,0	50	9,0
90	18,0	100	18,0
98	25,0	100	25,0

Toegepast		
mm	%	% cumulatief
4,00	0,2	0
5,60	0,7	1
8,00	2,9	4
11,20	28,7	33
16	51,1	84
22,4	16,4	100
Totaal	100,0	



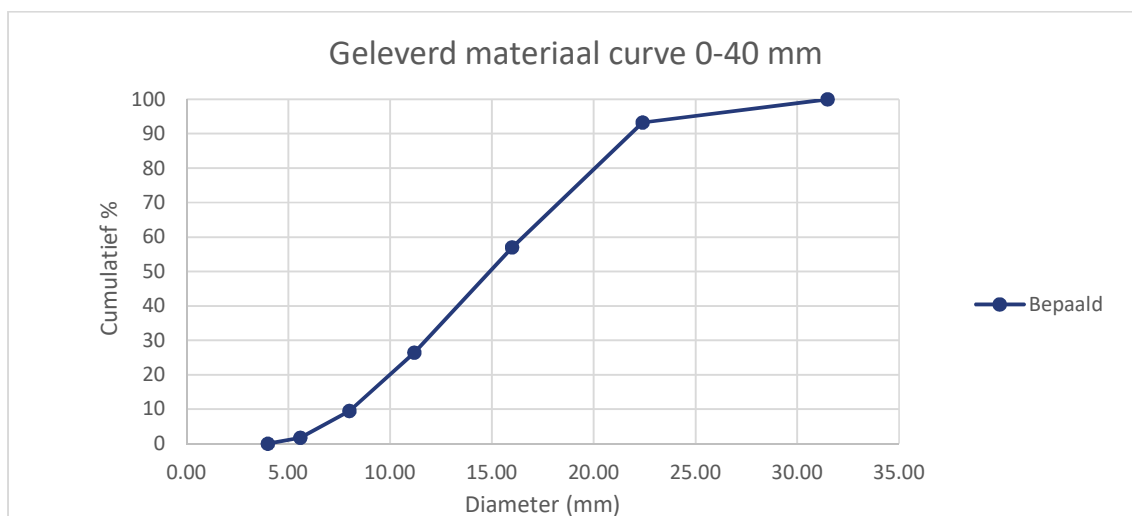
Grafiek 9 Toegepast 6,3-18 mm

4 Schelpmateriaal 0-40 mm

4.1 Geleverd (prototype)

Tabel 14 Geleverd schelpmateriaal

Geleverd	(steekproef)		
mm	Kg	%	% cumulatief
4,00	0,0	0,0	0
5,60	0,9	1,8	2
8,00	2,6	7,7	10
11,20	5,5	16,9	26
16	9,4	30,6	57
22,4	11,0	36,3	93
31,5	2,6	6,7	100
Totaal	32	100,0	

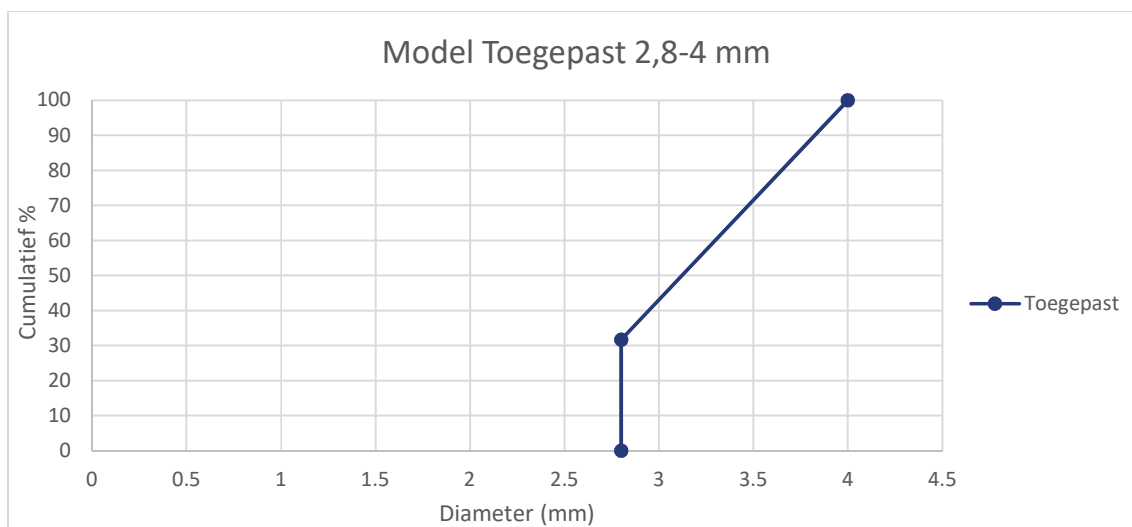


Grafiek 10 Geleverd schelpmateriaal

4.2 Toegepast 2,8-4 mm

Tabel 15 Toegepast schelpmateriaal

Geleverd	(steekproef)		
mm	Kg	%	% cumulatief
2,80	0	0	0
2,80	4,3	32	32
4,00	9,3	68	100
Totaal	13,6	100,0	



Grafiek 11 Toegepast schelpmateriaal

5 500kg,1000kg en 2000kg stenen

5.1 500 kg Model en prototype

Tabel 16 Grote stenen 500kg

Verrijking grote steen				
Gradering	500	Kg		
Dichtheid	3000	kg/m3		
Gewicht geschaald	0,5	kg	Prototype	
Dn	55,0	mm	0,6	m
D	65,5	mm	0,7	m
Gradering	50	mm		
Benodigd aantal	10	stuks		

5.2 1000 kg model en prototype

Tabel 17 Grote stenen 1000kg

Verrijking grote steen				
Gradering	1000	Kg		
Dichtheid	3000	kg/m3		
Gewicht geschaald	1	kg	Prototype	
Dn	69,3	mm	0,7	m
D	82,5	mm	0,8	m
Gradering	83	mm		
Benodigd aantal	10	stuks		

5.3 2000 kg model en prototype

Tabel 18 Grote stenen 2000kg

Verrijking grote steen				
Gradering	2000	Kg		
Dichtheid	3000	kg/m3		
Gewicht	2	kg	Prototype	
Dn	87,4	mm	0,9	m
D	104	mm	1,0	m
Gradering	104	mm		
Benodigd aantal	10	stuks		

Bijlage V

Berekeningen

Mei 2019

Van Oord 
Marine ingenuity

Hogeschool  van Arnhem en Nijmegen

Inhoud

1	Filterformule/Stabiliteitseis	3
2	Orbitaalstroming	4
3	Froude verschaling	6
4	Stroming rond monopile	7
5	Zoetwater en basalt factor	8
6	Staalslakken naar Basalt	9

1 Filterformule/Stabiliteitseis

Tabel 1 Filterformules bodembescherming

Bodembescherming		
$\frac{D_{15a}}{D_{85f}} < 5$	1,73	<5
$\frac{D_{50a}}{D_{50f}} < 25$	6,618174	<25
$\frac{D_{15a}}{D_{15f}} < 5$	4,942433	<5

Tabel 2 Filterformules Vooroeerverdediging

Vooroever		
$\frac{D_{15a}}{D_{85f}} < 5$	0,70	<5
$\frac{D_{50a}}{D_{50f}} < 25$	2,128205	<25
$\frac{D_{15a}}{D_{15f}} < 5$	2	<5

D_{15a} = zeef diameter waar 85% (kg) van het top laag materiaal gaat.

D_{15f} = zeef diameter waar 15% (mm) van het filter materiaal gaat.

D_{50a} = zeef diameter waar 50% (mm) van het top laag materiaal gaat.

D_{50f} = zeef diameter waar 50% (mm) van het filter materiaal gaat.

D_{15a} = zeef diameter waar 15% (kg) van het top laag materiaal gaat.

D_{85f} = zeef diameter waar 85% (kg) van het filter materiaal gaat.

Tabel 3 gradaties bodembescherming en vooroeerverdediging ten opzichte verrijking

Bodembescherming		
Toplaag		
ELL (0-2%)	91	mm
NLL (0-10%)	156	mm
NUL (70-100%)	423	mm
EUL (97-100%)	484	mm
D50 min	298	mm
D50 max	366	mm
Verrijking laag		
D50	45	mm
ELL (0-5%)	16	mm
NLL (0-15%)	31,5	mm
0,5	45	mm
NUL (90-100%)	90	mm
EUL (98-100%)	125	mm

Vooroeerverdediging		
Toplaag		
(0-5%)	32	mm
(0-15%)	63	mm
(0-50%)	90	mm
(90-100%)	180	mm
(98-100%)	250	mm
D50	96	mm
Verrijking laag		
D50	45	mm
(0-5%)	16	mm
(0-15%)	31,5	mm
(0-50%)	45	mm
(90-100%)	90	mm
(98-100%)	125	mm

2 Orbitaalstroming

De stromingsinvloeden op de bodembescherming bestaan uit twee verschillende factoren, getijdestroming en orbitaalstroming. In tabel 4 is enkel de getijdestroming weergegeven.

Om de maatgevende stroomsnelheid te berekenen is de orbitaalstroming die wordt veroorzaakt door golven van belang, omdat deze de stroomsnelheid sterk kan verhogen. De orbitaalstroming kan worden berekend voor een monochroom en een random golfspectrum. Als golfspectrum wordt het JONSWAP spectrum gebruikt, dit is een algemeen geaccepteerd spectrum om de golfsituatie op de Noordzee weer te geven (K. Hasselmann, 1973). Tot slot zal de getijdestroming met de orbitaalstroming worden gecombineerd. De stroomsnelheden zijn voor de situatie van een storm eens in de 50 jaar berekend omdat dit maatgevende omstandigheden zijn waarmee de proefresultaten worden vergeleken. Voor de volledige theoretische onderbouwing zie bijlage 2.

Monochrome golf

Er zijn twee manieren om de orbitale stroomsnelheid te bepalen, met behulp van een grafiek en met een formule. In de grafiek zijn formules 1 en 2 tegen elkaar uitgezet waaruit U_m kan worden afgeleid. (Soulsby R. S., 1986)

$$\frac{T_n}{T} \quad [1]$$

$$\frac{U_m T_n}{2H} \quad [2]$$

$$U_m = 2,31 \text{ m/s}$$

Met de Nielsen's methode kan de orbitale stroomsnelheid met de volgende formule nauwkeurig worden benaderd.

$$U_m = 0,5H \left(\frac{g}{h}\right)^{0,5} \left[1 - \frac{1}{3} \left(\frac{2\pi T_n}{T}\right)^2\right] \quad [3]$$

$$U_m = 2,36 \text{ m/s}$$

JONSWAP spectrum

Met behulp van het JONSWAP spectrum kan de orbitale stroomsnelheid bepaald worden met de formules 3 en 4. (Soulsby R. S., 1986)

$$\frac{T_n}{T_z} \quad [4]$$

$$\frac{U_{rms} T_n}{H_s} \quad [5]$$

Tabel 4 Maatgevende omstandigheden

Conditie op verschillende H	H	T _p	H _{m0}	H _{2%}	H _{1%}	H _{max}
	[m]	[s]	[m]	[m]	[m]	[m]
50 jaar RP	19.5	13.3	8.2	9.7	10.2	11.7
	19.7	13.3	7.9	9.8	10.5	13.3
	22.3	13.0	7.9	9.8	10.3	11.5
	22.3	13.9	7.9	10.3	11.0	12.7
	22.3	13.3	7.9	9.8	10.2	11.7
	25.7	13.3	8.2	10.8	11.4	13.8

$$U_{rms} = 1,11 \text{ m/s}$$

Met de exponentiele benadering van Soulsby kan de orbitale stroomsnelheid met de volgende formule nauwkeurig worden benaderd.

$$U_{rms} = \left(\frac{H_s}{4}\right) \left(\frac{g}{h}\right)^{\frac{1}{2}} \exp \left\{ - \left[\frac{3,65}{T_z} \left(\frac{h}{g}\right)^{\frac{1}{2}} \right]^{2,1} \right\} \quad [6]$$

$$U_{rms} = 1,10 \text{ m/s}$$

Combineren monochrome golf met getijdestroming

De orbitaal en langs stroming treden tegelijk op en beïnvloeden elkaar. De orbitaal en langs stroming kunnen voor het monochroom golfspectrum gecombineerd worden door gebruik te maken van het Froude getal waarbij de hoek tussen golf en stroming wordt meegenomen. Hiervoor geldt:

$$Fr = \frac{U_p}{(gh)^{\frac{1}{2}}} \quad [7]$$

Waarbij:

$$U_p = U \cos \varphi \quad [8]$$

φ = Hoek tussen getijdestroming en golf (°)

Voor φ geldt dat wanneer $\varphi = 0^\circ$ de stroming dezelfde richting op stroomt als de golf en bij $\varphi = 180^\circ$ de stroming in tegenovergestelde richting van de golf stroomt. Volgens (Van Oord, 2013) blz. 2 komt de grootste golfinvloed vanaf 330° N en de grootste stroomsnelheid van 30° N. Dit betekend bij mee stromen een hoek van 60° en bij tegen stromen een hoek van 120° . Na invullen volgen de volgende Froude getallen:

Tegenstromen -0,09

Mee stromen 0,09

Wanneer met deze getallen de grafiek wordt afgelezen volgen na invullen van formule 2 de volgende stroomsnelheden:

Tegenstromen $U_m = 2,21 \text{ m/s}$

Mee stromen $U_m = 2,41 \text{ m/s}$

Dit betekend dat de stroomsnelheid met $0,05 \text{ m/s}$ wordt verhoogd en met $0,15 \text{ m/s}$ wordt verlaagd ten opzichte van enkel orbitaalstroming zoals berekend met de Nielsen's methode.

De combinatie van orbitaalstroming volgens het JONSWAP spectrum en getijdestroming is niet berekend omdat de hoek tussen stroming en golfinvloed voor iedere situatie apart zou moeten worden berekend en vervolgens gecombineerd. Uit de berekening voor de monochrome golf blijkt dat deze stromingen een relatief kleine invloed op elkaar uitoefenen. Het JONSWAP spectrum biedt het meest betrouwbare beeld van de situatie zoals deze geldt in het prototype. De verwachting is dat voor het JONSWAP spectrum de invloed van getijdestroming op orbitaalstroming ongeveer even groot is. Tevens is het JONSWAP spectrum een benadering van de werkelijkheid. Om deze redenen is gekozen om met een range te werken voor het vergelijken van de resultaten uit de proeven. De range waarmee zal worden vergeleken ligt tussen $0,95 \text{ m/s}$ en $1,15 \text{ m/s}$.

3 Froude verschaling

Tabel 5 Froude verschaling bodembescherming minimaal

Froude Bodembescherming Min			
$U_m = \frac{\sqrt{L_m}}{\sqrt{L_p}} * U_p$			
Up	Stroomsnelheid Prototype (m/s)		
Um	Stroomsnelheid Model (m/s)		
Lp	Scour lengte Prototype (m)		
Lm	Scour lengte Model (m)		
Factor	10x		
Parameters			
Um	0,600833	m/s	$U_p = \frac{\sqrt{0.30}}{\sqrt{25}} * 0.92$
Up	1,9	m/s	
Lp	10	m	
Lm	1	m	

Tabel 6 Froude verschaling bodembescherming maximaal

Froude Bodembescherming Max		
$U_m = \frac{\sqrt{L_m}}{\sqrt{L_p}} * U_p$		
Up	Stroomsnelheid Prototype (m/s)	
Um	Stroomsnelheid Model (m/s)	
Lp	Scour lengte Prototype (m)	
Lm	Scour lengte Model (m)	
Factor	10x	
Parameters		
Um	0,727324 m/s	$U_p = \frac{\sqrt{0.30}}{\sqrt{25}} * 0.92$
Up	2,3 m/s	
Lp	10 m	
Lm	1 m	

Tabel 7 Froude verschaling Westerschelde

Froude Vooroever Westerschelde			
$U_m = \frac{\sqrt{L_m}}{\sqrt{L_p}} * U_p$			
Up	Stroomsnelheid Prototype (m/s)		
Um	Stroomsnelheid Model (m/s)		
Lp	Scour lengte Prototype (m)		
Lm	Scour lengte Model (m)		
Factor	10x		
Parameters			
Um	0,790569	m/s	$U_p = \frac{\sqrt{0.30}}{\sqrt{25}} * 0.92$
Up	2,5	m/s	
Lp	30	m	
Lm	3	m	

Tabel 8 Froude verschaling Oosterschelde

Froude Vooroeffer Oosterschelde		
$U_m = \frac{\sqrt{L_m}}{\sqrt{L_p}} * U_p$		
Up	Stroomsnelheid Prototype (m/s)	
Um	Stroomsnelheid Model (m/s)	
Lp	Scour lengte Prototype (m)	
Lm	Scour lengte Model (m)	
Factor	10x	
Parameters		
Um	0,411096 m/s	$U_p = \frac{\sqrt{0.30}}{\sqrt{25}} * 0.92$
Up	1,3 m/s	
Lp	30 m	
Lm	3 m	

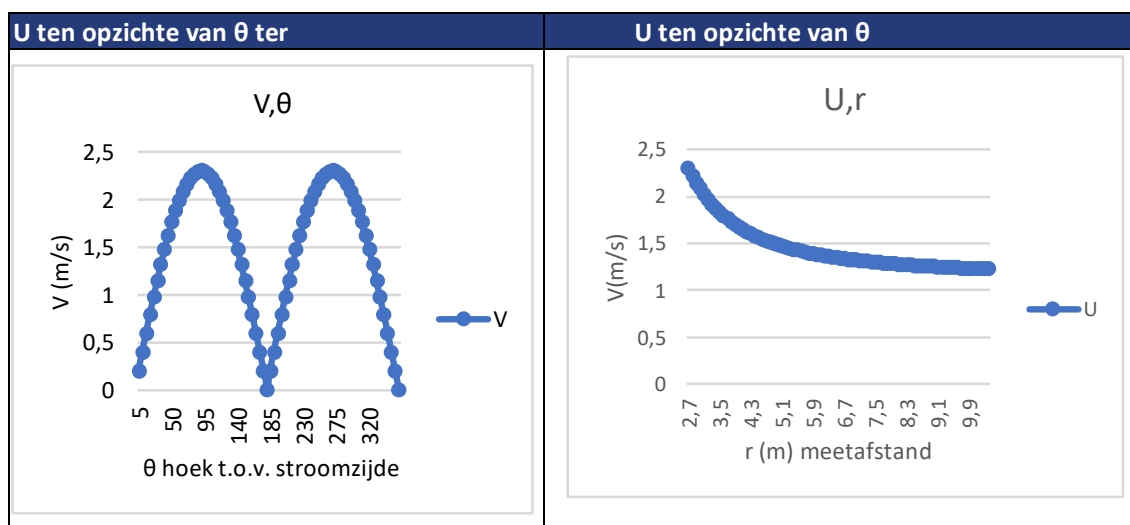
4 Stroming rond monopile

Tabel 9 Formules stroming rond monopile

Formules	Eenheden		
$U_r = u(1 - \frac{R^2}{r^2})\cos\theta$	Ur	m/s	Radial stroomsnelheid
	U θ	m/s	Tangential stroomsnelheid
$U_\theta = -u(1 + \frac{R^2}{r^2})\sin\theta$	u	m/s	Stroming voor cylinder
	R	m	Straal cylinder
$U = (U_r^2 + U_\theta^2)^{1/2}$	r	m	Meetafstand tenopzichten van hart cylinder
	θ	°	Kritische hoek
	U	m/s	Stroomsnelheid op punt: θ, r

Tabel 10 Parameters

Parameter(s)		
u	1,15	m/s
R	2,7	m
θ	90	°



Grafiek 1 Stroomsnelheid t.o.v. hoek

Grafiek 2 Stroomsnelheid t.o.v. afstand monopile

5 Zoetwater en basalt factor

Tabel 11 Factor zoet/zout en graniet/basalt

Verschil zoet/zout en graniet/basalt					
Zoet/graniet water			Zout/basalt water		
Chezy	28,0134	-	Chezy	28,0134	-
k	0,1	-	k	0,1	-
h	0,3	m	h	0,3	m
p _w	1000	kg/m ³ (water)	p _w	1025	kg/m ³ (water)
p _m	3000	kg/m ³ (basalt)	p _m	2650	kg/m ³ (graniet)
Δ	2	-	Δ	1,585366	-
d-kl. Steen	0,0056	m	d-kl. Steen	0,0056	m
θ _c	0,03	-	θ _c	0,03	-
$\theta_c = \frac{u_c^2}{C^2 * \Delta * d}$					
Zoet/graniet water			Zout/basalt water		
U _c	0,513495		U _c	0,457179	
Factor			1,1231823		

6 Staalslakken naar Basalt

Tabel 12 Staalslakken naar graniet omgerekend

Staalslakken (40-200 mm)			Formule	Steen (vervanging staalslakken)		
ρ_m	3100	kg/m3	$\tau_{cr} = (\rho_m - \rho_w) g D_{50} \psi_{cr}$	ρ_m	2650	kg/m3
ρ_w	1025	kg/m3		ρ_w	1025	kg/m3
g	9,81	m/s2	with: τ_{cr} = critical shear stress (N/m ²) ρ_r = specific density rock (kg/m ³) ρ_w = specific density water (kg/m ³) g = gravitational acceleration (m/s ²) D_{50} = median grain size (m) ψ_{cr} = Shields parameter (-)	g	9,81	m/s2
D ₅₀	0,075	m		D ₅₀	0,095769	m
ψ_{cr}	0,03	-		ψ_{cr}	0,03	-
t _{cr}	45,80044	N/m ²		t _{cr}	45,80044	N/m ²
ψ_{cr}	Gegeven in ontwerprapport Oosterschelde (0,03)			Bijbehorende gradering		
				63 -180		mm
Rock Manual Hst. 3 blz. 116				D ₅₀	122	

Bijlage VI

Keuzenmatrix ecologie

Mei 2019

Van Oord 
Marine ingenuity

Hogeschool  **van Arnhem en Nijmegen**

Aanbrengen	Type verrijking	Soort specifieke habitateisen	Habitat complexiteit	Habitat variabiliteit	Stabiliteit	Duurzaamheid	Bronpopulaties
Bodembescherming	0-meting	0	1	1	2	2	0
	Kleine steengradatie	0	1	1	2	1	0
	Oesterkooien	1	2	1	2	2	2
	Schelpmateriaal	2	1	1	1	1	0
Vooroeververdediging	0-meting	0	1	0	2	2	0
	Grote stenen	0	2	2	2	2	0
	Kleine steengradatie	0	1	1	2	2	0
	Schelpmateriaal	2	1	1	1	1	0
	Kleine steengradatie en schelpmateriaal	2	1	1	2	1	0

Maatgevende omstandigheden	Type verrijking	Soort specifieke habitateisen	Habitat complexiteit	Habitat variabiliteit	Stabiliteit	Duurzaamheid	Bronpopulaties
Bodembescherming	0-meting	0	1	1	2	2	0
	Kleine steengradatie	0	1	2	1	1	0
	Oesterkooien	1	2	1	?	2	2
	Schelpmateriaal	2	1	2	0	1	0
Vooroeververdediging (Oosterschelde)	0-meting	0	1	0	2	2	0
	Grote stenen	0	2	2	?	2	0
	Kleine steengradatie	0	1	1	2	2	0
	Schelpmateriaal	2	2	2	1	1	0
	Kleine steengradatie en schelpmateriaal	2	1	1	2	1	0

Einde proef situatie	Type verrijking	Soort specifieke habitateisen	Habitat complexiteit	Habitat variabiliteit	Stabiliteit	Duurzaamheid	Bronpopulaties
Bodembescherming	0-meting	0	1	1	2	2	0
	Kleine steengradatie	0	1	2	0	1	0
	Oesterkooien	0	0	0	0	0	0
	Schelpmateriaal	2	1	2	0	1	0
Vooroeververdediging	0-meting	0	1	0	2	2	0
	Grote stenen	0	1	2	0	2	0
	Kleine steengradatie	0	2	1	0	2	0
	Schelpmateriaal	1	1	1	0	1	0
	Kleine steengradatie en schelpmateriaal	2	2	1	1	1	0

0	Afwezig
1	Gedeeltelijk aanwezig
2	Volledig aanwezig
?	Onbekend

Bijlage VII

Verschalingskeuzenmatrix

Mei 2019

Van Oord 
Marine ingenuity

Hogeschool  **van Arnhem en Nijmegen**

1 Verschalingskeuzenmatrix Bodembescherming Luchterduinen

			Geometrische factor		5	10	20	30	40	50	60
Constructie			Prototype								
Filterlaag Bodembescherming											
ELL (0-5%)	> 3	mm	16	mm	3,20	1,60	0,80	0,53	0,40	0,32	0,27
NLL (0-15%)	> 3	mm	31,5	mm	6,30	3,15	1,58	1,05	0,79	0,63	0,53
D50	> 3	mm	45	mm	9,00	4,50	2,25	1,50	1,13	0,90	0,75
NUL (90-100%)	> 3	mm	90	mm	18,00	9,00	4,50	3,00	2,25	1,80	1,50
EUL (98-100%)	> 3	mm	125	mm	25,00	12,50	6,25	4,17	3,13	2,50	2,08
Toplaag Bodembescherming											
ELL (0-2%)	> 3	mm	108	mm	21,68	10,84	5,42	3,61	2,71	2,17	1,81
NLL (0-10%)	> 3	mm	185	mm	37,07	18,53	9,27	6,18	4,63	3,71	3,09
NUL (70-100%)	> 3	mm	503	mm	100,62	50,31	25,15	16,77	12,58	10,06	8,38
EUL (97-100%)	> 3	mm	576	mm	115,18	57,59	28,79	19,20	14,40	11,52	9,60
M ₅₀ min	> 3	mm	355	mm	70,91	35,45	17,73	11,82	8,86	7,09	5,91
M ₅₀ max	> 3	mm	436	mm	87,16	43,58	21,79	14,53	10,89	8,72	7,26
Monopile	< 10	cm	540	cm	108	54	27	18	13,5	10,8	9
Bodembescherming diameter	< 30	cm	30000	cm	6000	3000	1500	1000	750	600	500
Verrijking											
Schelpmateriaal											
max	> 3	mm	40	mm	8,00	4,00	2,00	1,33	1,00	0,80	0,67
min	> 3	mm	1	mm	0,20	0,10	0,05	0,03	0,03	0,02	0,02
Kleineren stenen (zie Filter)											
Oesterkorven											
L	< 15	cm	137	cm	27,40	13,70	6,85	4,57	3,43	2,74	2,28
B	< 15	cm	102,5	cm	20,50	10,25	5,13	3,42	2,56	2,05	1,71
H	< 15	cm	55	cm	11,00	5,50	2,75	1,83	1,38	1,10	0,92
Hydraulische randvoorwaarden											
Waterdiepte	< 0,3	m	19,5	m	3,9	1,95	0,975	0,65	0,4875	0,39	0,325
Stroomsnelheid	< 1,5	m/s	2,4	m/s	1,073313	0,758947	0,536656	0,438178	0,379473	0,339411	0,309839

2 Verschalingskeuzenmatrix Vooroever Oosterschelde

			Geometrische factor		5	10	20	30	40	50	60
Constructie			Prototype								
Breuksteenconstructie											
(0-2%)	> 3	mm	32	mm	6,30	3,15	1,58	1,05	0,79	0,63	0,53
(0-2%)	> 3	mm	63	mm	12,60	6,30	3,15	2,10	1,58	1,26	1,05
(0-10%)	> 3	mm	90	mm	18,00	9,00	4,50	3,00	2,25	1,80	1,50
(70-100%)	> 3	mm	180	mm	36,00	18,00	9,00	6,00	4,50	3,60	3,00
(97-100%)	> 3	mm	250	mm	50,00	25,00	12,50	8,33	6,25	5,00	4,17
Verrijking											
Schelpmateriaal											
max	> 3	mm	40	mm	8,00	4,00	2,00	1,33	1,00	0,80	0,67
min	> 3	mm	1	mm	0,20	0,10	0,05	0,03	0,03	0,02	0,02
Groteren stenen	> 3	mm	500	mm	100,00	50,00	25,00	16,67	12,50	10,00	8,33
	> 3	mm	860	mm	172,00	86,00	43,00	28,67	21,50	17,20	14,33
	> 3	mm	1080	mm	216,00	108,00	54,00	36,00	27,00	21,60	18,00
Kleine steengradatie											
ELL (0-5%)	> 3	mm	16	mm	3,2	1,6	0,8	0,533333	0,4	0,32	0,266667
NLL (0-15%)	> 3	mm	31,5	mm	6,3	3,15	1,575	1,05	0,7875	0,63	0,525
0,5	> 3	mm	45	mm	9	4,5	2,25	1,5	1,125	0,9	0,75
NUL (90-100%)	> 3	mm	90	mm	18	9	4,5	3	2,25	1,8	1,5
EUL (98-100%)	> 3	mm	125	mm	25	12,5	6,25	4,166667	3,125	2,5	2,083333
Hydraulische randvoorwaarden											
Breedte vooroever	< 0,3	m	50	m	10	5	2,5	1,666667	1,25	1	0,833333
Waterdiepte	< 0,3	m	20	m	4	2	1	0,666667	0,5	0,4	0,333333
Stroomsnelheid	< 1,5	m/s	2,5	m/s	1,118034	0,790569	0,559017	0,456435	0,395285	0,353553	0,322749

Bijlage VIII

Onderzoeksmethode

Mei 2019



Ecologische verrijking van breuksteenconstructies

BSc Afstudeerscriptie

Onderzoeksmethode

Mei 2019

Jan Rigter

Jan-Willem Bekendam

Kevin van Donselaar

Van Oord 
Marine ingenuity

Hogeschool  van Arnhem en Nijmegen

HOGESCHOOL VAN ARNHEM & NIJMGEGEN

Faculteit Built Environment
Civiele Techniek

Onderzoeksmethode

Ecologische verrijking van breuksteenconstructies

Rotterdam, Mei 2019

Inhoud

Inhoud	4
1 Introductie	4
1.1 Onderzoeksdoel	4
2 Proefopstelling	5
2.1 Stroomgoot	5
2.2 Modelopstelling	6
2.2.1 Verschaling	6
2.2.2 Modelopstelling 1 – Bodembescherming	7
2.2.3 Modelopstelling 2 - Vooroeverbescherming	7
2.3 Meetinstrumenten	8
2.3.1 Pitotbuis	8
2.4 Moment van bewegen	9
2.5 Aandachtspunten	10
2.6 Materiaaleigenschappen	11
2.6.1 Dichtheid	13
2.6.2 Graderingen (zeven)	13
2.7 Plaatsing model en verrijking	16
2.7.1 Bodembescherming	16
2.7.2 Vooroeververdediging	16
3 Methode proeven	17
3.1 Metingen	17
3.2 Opbouw proefopstellingen	17
3.3 Planning	19
4 Data	20
4.1 Data analyseren	20
5 Bronnen	21
6 Bijlagen	
6.1 Bijlage A – Model Bodembescherming	
6.2 Bijlage B – Model Vooroever	
6.3 Bijlage C – Meetformulier	
6.4 Bijlage D – Stroomprofiel	

1 Introductie

In dit rapport wordt stapsgewijs de methode behandeld die ten dienste van het onderzoek naar ecologische verrijking op breuksteenconstructies gebruikt is. Gedurende dit onderzoek wordt de stabiliteit van ecologische verrijking getest met behulp van schaalmodellen in een stroomgoot.

Voor het onderzoeken van de stabiliteit wordt alleen de stroming als variabele gebruikt. De stroomgoot die voor dit onderzoek wordt gebruikt bevindt zich in het waterbouwlaboratorium van de Hogeschool van Arnhem & Nijmegen, hierna HAN te noemen.

Om de proeven zo reëel mogelijk te maken is de opbouw van het model afgeleid van een bestaande (prototype) situatie. Op dit prototype wordt verder ingegaan in hoofdstuk 2 (Theoretisch kader) van het hoofdrapport.

Twee model situaties worden getest waarvan één bodembescherming rond een windmolen en één vooroeververdediging. Beide model situaties worden getest met daarop 3 typen verrijkingen. Daarnaast wordt bij beide situaties een 0-meting gedaan en bij het vooroevermodel een extra proef met een gecombineerde verrijkingsvariant wat een totaal van 9 proefopstellingen maakt.

In dit document wordt onder andere de aanpak, het te gebruiken materieel en materiaal beschreven. Deze onderzoeksmethode dient als een rode draad voor het uitvoeren van de proeven. Aan de hand hiervan wordt structuur aan de proeven gegeven en wordt dit onderzoek reproduceerbaar gemaakt.

1.1 Onderzoeksdoel

In het kader van het onderzoek naar de stabiliteit van ecologische verrijking op breuksteenconstructies worden een aantal proeven in de stroomgoot van de HAN uitgevoerd. Door middel van deze proeven wordt data verzameld over het gedrag van typen verrijking bij diverse stroomsnelheden.

Het doel van deze proef is te achterhalen bij welke stromingsomstandigheden ecologische verrijking instabiel wordt. Het moment dat de verrijking instabiel wordt (moment van falen) is gedefinieerd door een moment van bewegen. Dit is in paragraaf 2.4 van dit rapport beschreven.

Het moment waarbij een type verrijking in beweging komt heeft een bijbehorende kritieke stroomsnelheid. Deze kritieke stroomsnelheid wordt teruggekoppeld naar de prototype situaties (bodembescherming windmolen en vooroeververdediging) waarna een aanbeveling voor het aanbrengen van ecologische verrijking in de prototype situatie volgt.

Met de resultaten van de proeven wordt een antwoord geformuleerd op de hoofdvraag.

“Wat zijn de stabiliteitsproblemen bij het toepassen van ecologische verrijking op bodembescherming en vooroeververdediging?”

2 Proefopstelling

Dit hoofdstuk behandelt de proefopstelling zoals deze wordt gebruikt tijdens de uitvoering van de proeven. Allereerst wordt de stroomgoot met bijbehorend materiaal beschreven. Vervolgens volgt een beschrijving van de proefopstellingen.

2.1 Stroomgoot

De proeven worden uitgevoerd in de stroomgoot van het waterlaboratorium van de Hogeschool van Arnhem & Nijmegen, gevestigd op Ruitenberglaan 26 te Arnhem. De stroomgoot heeft een effectieve lengte van 6 meter, een breedte van 30 cm en kan een maximale waterhoogte van 30 cm genereren. Overige gegevens zijn in Tabel 1 te vinden.

Tabel 1 Stroomgoot gegevens

Beschrijving	Waarde
Lengte stroomgoot	8,00 m
Breedte stroomgoot	0,30 m
Hoogte stroomgoot	0,40 m
Maximale waterhoogte	0,30 m
Maximale stroomsnelheid (schietend water)	2,00 m/s



Figuur 1 Stroomgoot HAN

Om de gewenste stroomsnelheid en waterhoogte in de stroomgoot te bereiken dient met een aantal factoren rekeningen te worden gehouden.

Objecten in het stroomprofiel

In de stroomgoot worden proefopstellingen geplaatst. Afhankelijk van de grootte van deze opstellingen heeft dit veel of weinig invloed op de stroomsnelheid en waterdiepte. Een groot object zorgt bijvoorbeeld voor opstuwing waardoor de stromingssnelheid en waterhoogte veranderen.

Debiet pomp

Het debiet van de stroomgoot wordt geregeld met een afsluiter op een pomp. Een hoger debiet wordt mogelijk gemaakt door het opendraaien van de afsluiter. Het dichtdraaien van de afsluiter zorgt vanzelfsprekend voor tegenovergesteld effect, een afnemend debiet. Het maximale debiet dat met de beschikbare pomp bereikt kan worden is 90 l/s. Vooraf aan de proef wordt bepaald hoe de afsluiter zo nauwkeurig mogelijk bedient kan worden. Indien een groter debiet bereikt dient te worden kan een extra pomp worden aangesloten.

Wrijving

De vloeistof die door de stroomgoot vloeit, in dit geval zoet water, ondervindt wrijving. Deze wrijving wordt veroorzaakt door de wanden en bodem van de stroomgoot. De invloed van deze wrijving op de stroomsnelheid is klein maar wel aanwezig. Deze wrijving zal door middel van een correctiefactor bij het analyseren van de data meegenomen worden.

Schuiven

Bij zowel de instroom- als de uitstroomopening in de stroomgoot bevindt zich een verticale schuif. Door middel van deze schuif kan de in- en uitstroom van water gereguleerd worden. Door de instroomschuif zo goed als dicht te zetten zal de stroming sneller worden en zich uiteindelijk als schietend water gedragen. De waterhoogte zal hierdoor dalen. Het dichtzetten van de schuif bij de uitstroom heeft een tegenovergesteld effect. De waterhoogte zal hierdoor stijgen.

Tijdens het uitvoeren van de proeven is het belangrijk een juiste verhouding tussen het debiet en plaatsing van de schuiven te vinden om het juiste stromingsprofiel te creëren. Vooraf aan de proeven wordt getest hoe met deze 2 factoren het juiste stroomprofiel gecreëerd kan worden.

2.2 Modelopstelling

In de proeven worden 2 modelopstellingen getest. Op beide modelopstellingen worden 3 verschillende typen verrijkingen geplaatst. De modelopstellingen zijn gebaseerd op bestaande prototypes uit windpark luchterduinen en uit de voeroever van de Oosterscheldekering. De uitgebreide omschrijving van deze prototypes is te vinden in paragraaf 3.2 (Proefopstelling) van het hoofdrapport. De proeven worden minimaal drie maal herhaald om de betrouwbaarheid van de resultaten te verhogen. Wanneer de resultaten erg van elkaar afwijken wordt de proef vaker herhaald.

De opstellingen zijn in Tabel 2 beschreven.

Tabel 2 Proefopstellingen

No.	Prototype situatie	Type verrijking	Min. Aantal Proeven (herhaling)
01	Bodembescherming	N.v.t. (0-meting)	3
02	Bodembescherming	Kleine steengradatie (3 - 9 mm)	3
03	Bodembescherming	Oesterkooien	3
04	Bodembescherming	Schelpmateriaal (2 – 4 mm)	3
05	Vooroever bescherming	N.v.t. (0-meting)	3
06	Vooroever bescherming	Kleine steengradatie (3 - 9 mm)	3
07	Vooroever bescherming	Grote steengradatie (50, 86 & 108 mm)	3
08	Vooroever bescherming	Schelpmateriaal (2 – 4 mm)	3
09	Vooroever bescherming	Schelpmateriaal & Kleine steengradatie	2

2.2.1 Verschaling

De prototypes hebben grote afmetingen ten opzichte van de beschikbare stroomgoot op de HAN. De stroomgoot van de HAN heeft een breedte van 0,30 meter. Dit zou betekenen dat de prototypes minimaal 100 maal verschaald worden. In praktijk is dit niet haalbaar omdat karakteristieke eigenschappen van de materialen hierbij verloren gaan. Om deze reden is besloten een geometrische schaal van 1:10 voor de materialen te handteren. In hoofdstuk 3 (Schaalmodel) van de hoofdreport wordt dieper op deze verschaling ingegaan.

Bij een schaal van 1:10 zou de waterhoogte in de stroomgoot 1,95 meter worden. Dit is in praktijk niet mogelijk. Om deze reden is besloten alleen de onderste 3,0 meter van de prototype doorsnede op schaal na te maken. Het verschil in stromingsprofiel wat hierdoor optreedt wordt als schaalfout gezien in hoofdstuk 3 (Schaalmodel) van de hoofdreport wordt hier verder op ingegaan.

2.2.2 Modelopstelling 1 – Bodembescherming

Tabel 3 Gegevens opstelling bodembescherming

Omschrijving	Diameter Prototype (Schaal 1:1)	Afmeting Model (Schaal 1:10)
Breedte filter & top laag	2,00 m	0,20 m
Lengte filter laag	27,40 m	2,74 m
Lengte top laag	18,20 m	1,82 m
Dikte filter laag	0,23 m	0,023 m
Dikte top laag	0,80 m	0,08 m
Totale dikte constructie	1,03 m	0,103 m
Waterdiepte	3,0 m (totaal 19,5 m)	0,30 m

De opstelling uit Tabel 3 wordt aan de achterzijde voorzien van een rode bak om het ontstaan van schietend water tegen te gaan. Daarnaast wordt de opstelling versmalt om een hoger debiet te creëren. Zie tekening bijlage A.

Een uitgebreide weergave met tekening van deze opstelling is in bijlage A te vinden.

2.2.3 Modelopstelling 2 - Vooroeverbescherming

Tabel 4 Gegevens opstelling vooroeverbescherming

Omschrijving	Diameter Prototype (Schaal 1:1)	Afmeting Model (Schaal 1:10)
Breedte filter & top laag	3,00 m	0,30 m
Lengte top laag	30,00 m	3,00 m
Dikte top laag	13,00 m	0,13 m
Waterdiepte	3,00 m	0,30 m

De opstelling uit Tabel 4 wordt net als de eerste opstelling voorzien van een rode bak aan de achterzijde om schietend water te voorkomen.

Een uitgebreide weergave met tekening van deze opstelling is in bijlage B te vinden.

2.3 Meetinstrumenten

Het verzamelen van data wordt gedaan met behulp van een aantal meetinstrumenten. In dit onderzoek wordt alleen de stroomsnelheid en de waterdiepte gemeten. Om de stroomsnelheid zo nauwkeurig mogelijk in beeld te brengen wordt gebruik gemaakt van 2 meetinstrumenten voor stroming. Tabel 5 toont de benodigde meetinstrumenten.

Tabel 5 Meetinstrumenten

Meetinstrument	Beschrijving
Pitotbuis (type Prandt)	De pitotbuis brengt de stijghoogte van een vloeistof in beeld. Aan de hand van deze stijghoogte kan de stroomsnelheid worden bepaald. Zie paragraaf 0
Nivus-meter PCM4	Een Nivus-meter is een elektronische sensor waarmee de waterhoogte, stroomsnelheid en het debiet van een stromingsprofiel wordt gemeten.
Meetlat	De meetlat dient net als de pitotbuis en Nivus-meter voor het bepalen van de waterhoogte.
Zeven	Zeven met een rastergrootte van 2,8 tot 63,0 mm worden gebruikt om de gradatie van granulair materiaal te bepalen.
Camera('s)	Camera('s) dienen voor het vastleggen van de proeven voor latere verificatie indien nodig.

2.3.1 Pitotbuis

In open en gesloten leidingen kan de stijghoogte worden bepaald met behulp van een pitotbuis. De wet van Bernoulli wordt vervolgens gebruikt om de stroomsnelheid op de locatie van de pitotbuis te bepalen. Dit wordt gedaan met de volgende formule:

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad [1]$$

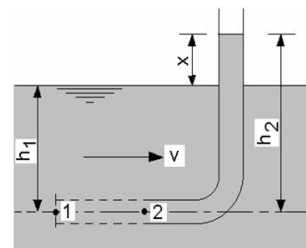
Indien $v_1 = v$ en $v_2 = 0$ geldt;

$$v = \sqrt{2g(h_2 - h_1)} \quad [2]$$

Een nadeel van de pitotbuis is dat de metingen worden beïnvloed door wrijving in het been van de pitotbuis. De invloed van deze wrijving kan vertaald worden naar een correctiefactor c . De formule voor de berekening van de werkelijke stroomsnelheid wordt dan:

$$v = c\sqrt{2g(h_2 - h_1)} \quad [3]$$

In de proeven is de correctiefactor c zo klein dat deze verwaarloosd wordt. (Nortier & de Koning, 1994)



Figuur 2 Stijghoogte pitotbuis

2.4 Moment van bewegen

Zoals beschreven in paragraaf 2.4 (Stabiliteit) van het hoofdrapport zijn verschillende manieren om het moment van bewegen te bepalen. Voor dit onderzoek is gebruik gemaakt van de 7 stadia van bewegen volgens Schukking, 1972.

Tijdens het uitvoeren van de proeven zal de stroomsnelheid stapsgewijs opgevoerd worden. Bij iedere stap zullen waarnemingen genoteerd worden. Door middel van deze waarnemingen kan het bewegingsproces van het materiaal geanalyseerd worden. Om dit bewegingsproces overzichtelijk te maken wordt gebruik gemaakt van de 7 stadia van bewegen. Aan de 7 stadia wordt een '0' stadia toegevoegd om een stabiele situatie van materiaal aan te geven. Tijdens de proeven kan 0-7 worden genoteerd, dit resulteert in de volgende stappen:

0. Stabiel;
1. Verplaatsing van de korrels, af en toe;
2. Korrels aan de wandel, hier en daar;
3. Korrels aan de wandel, op vrij veel plaatsen;
4. Korrels aan de wandel, bijna overal;
5. Korrels aan de wandel, overal doch niet permanent;
6. Korrels aan de wandel, overal en permanent;
7. Begin opmars van de korrels.

Omdat de definities op verschillende wijzen kunnen worden geïnterpreteerd zijn deze verder gespecificeerd tot de volgende definities:

0. Stabiel

Het materiaal verplaatst niet ten gevolge van de stroming.

1. Verplaatsen van de korrels, af en toe

Het materiaal begint te trillen en komt een klein beetje omhoog maar blijft op de originele plek, dit proces wordt ook wel "rocking" genoemd.

2. Korrels aan de wandel, hier en daar

Het verplaatsen van een deeltje naar een andere locatie op 3 tot 10 verschillende plekken over een oppervlak van 0,30 m². Met verplaatsen wordt hier het veranderen van locatie bedoeld, denk hierbij aan het omklappen of enkele centimeters verder spoelen van het materiaal.

3. Korrels aan de wandel, op vrij veel plaatsen

Het verplaatsen van een deeltje naar een andere locatie op 10 tot 15 verschillende plekken over een oppervlak van 0,30 m². Met verplaatsen wordt hier het veranderen van locatie bedoeld, denk hierbij aan het omklappen of enkele centimeters verder spoelen van het materiaal.

4. Korrels aan de wandel, bijna overal

Het verplaatsen van een deeltje naar een andere locatie op meer dan 15 verschillende plekken over een oppervlak van 0,30 m². Met verplaatsen wordt hier het veranderen van locatie bedoeld, denk hierbij aan het omklappen of enkele centimeters verder spoelen van het materiaal.

5. Korrels aan de wandel, overal doch niet permanent

Het verplaatsen van een deeltje per 0,001 m² over de bodem van het model. Met verplaatsen wordt hier het veranderen van locatie bedoeld, denk hierbij aan het omklappen of enkele centimeters verder spoelen van het materiaal.

6. Korrels aan de wandel, overal en permanent

Over de gehele lengte van het model komt materiaal in beweging maar blijft nog wel bij de bodem.

7. Begin opmars van de korrels

Het materiaal wordt constant verplaatst en settelt niet meer. Constante stroom van materiaal vindt plaats, tevens in de waterkolom.

Voor de oesterkooien en grote stenen wordt een ander moment van falen gehanteerd. Wanneer oesterkooien of grote stenen in beweging komen bestaat het risico dat deze bestaande constructie beschadigen. Daarom is het van belang dat deze altijd stabiel zijn. De oesterkooien en grote stenen falen wanneer deze van zijn originele plek zijn verplaatst op wat voor manier dan ook.

2.5 Aandachtspunten

Een aantal aannames worden gedaan voor de uitvoering van de proeven. Deze aannames zijn gebaseerd op aanbevelingen voor het uitvoeren van experimenten volgens Whitehouse et al. 1998.

- Tijdens de proeven zal een turbulente stroming worden nagebootst. Dit wordt gecontroleerd door het Reynolds getal uit te rekenen. Als deze boven de 4000 ligt is de stroming turbulent.

$$Re = \frac{vL}{\nu} \quad Re \geq 4000$$

Waarin:

ν	=	Kinematische viscositeit [m ² /s]
V	=	Stroomsnelheid [m/s]
L	=	Waterdiepte

- Om onnatuurlijke effecten van de waterdiepte te voorkomen dient de waterhoogte minimaal vier maal de hoogte van constructie te hebben ($h_w \geq 4D$). In het geval van deze proef is dit niet mogelijk omdat de stroomgoot een maximale waterhoogte van 30 cm heeft. Dit wordt gezien als een schaalfout. Over deze en andere schaalfouten is in hoofdstuk 3 (Schaalmodel) van het hoofdrapport meer te lezen.
- De pomp in de stroomgoot dient genoeg vermogen te hebben om bij elke benodigde stroomsnelheid een waterstand van 30 cm te garanderen. Indien de bestaande pomp te weinig vermogen blijkt te hebben zal een extra pomp aangesloten worden.
- Tijdens het uitvoeren van de proeven dient de stroomsnelheid zo nauwkeurig mogelijk opgevoerd te worden. Dit moet vooraf aan de proeven getest zijn in het waterlaboratorium.
- In het model wordt gebruikt gemaakt van zoet water in plaats van zout water. Hiervoor wordt in de berekeningen een correctiefactor gehanteerd.
- De wanden van de stroomgoot zorgen voor extra wrijving. Hierdoor zal het stroomprofiel aan de buitenste randen van de waterkolom beïnvloed worden. Om dit effect in kaart te brengen wordt voor beide modelopstellingen het stroomprofiel in kaart gebracht. Deze is te vinden in bijlage D. Voor de extra wrijving zal in de resultaten een correctiefactor gehanteerd worden.
- De modelopstellingen zullen inklemmingkrachten ondervinden van de wanden in de stroomgoot. Dit wordt meegenomen als schaalfout.

2.6 Materiaaleigenschappen

De materialen uit de proefopstellingen zijn gebaseerd op het ontwerp van de prototype situatie. Om deze reden is het noodzakelijk dat de dichtheid en graderingseigenschappen van het model en prototype overeenkomen. In onderstaande tabel is de prototype gradering verschaald tot de benodigde gradering van het model.

Tabel 6 Verschaling graderingen

Type	Gradering (Schaal 1:1) Bodembescherming	Gradering (Schaal 1:10)
Filter laag (basalt)	1-3 Inch	3,0 – 9,0 mm
		
Top laag (basalt)	10 - 200 kg	19 – 50 mm
		
Vooroever		
Top laag (vervanging staalslakken)	40 – 200 mm	6 – 18 mm (breuksteen)
		

Ecologische verrijkingen

Tabel 7 Verschaling ecologische verrijking

Type verrijking	Afmeting (Schaal 1:1)	Afmeting (Schaal 1:10)
Oesterkooi	1370 x 1025 x 550 mm	137,0 x 102,5 x 55,0 mm
Grote steen diameter (basalt)	0,50 m	0,05 m
	0,86 m	0,086 m
	1,08 m	0,108 m
Kleine gradering steen (basalt)	1-3 Inch	3,0 -9,0 mm
Gradering schelpmateriaal	0 – 40 mm	2 – 4 mm

Tabel 8 Typen ecologische verrijking (schaal 1:10)

	
Oesterkooi (schaal 1:10)	Grote steen (schaal 1:10)
	
Kleine steengradering (schaal 1:10)	Schelmateriaal (schaal 1:10)

2.6.1 Dichtheid

Om schaalfouten zo klein mogelijk te houden is het belangrijk dat de dichtheid van het materiaal in de proeven overeenkomt met de dichtheid van het materiaal in prototype situatie. Voor de gebruikte steengraderingen in de prototypen geldt een gemiddelde dichtheid van 2650 kg/m^3 waar tevens mee gerekend wordt. Idealiter zou het model ook met een breuksteensoort met dichtheid 2650 kg/m^3 worden gemaakt, echter is het niet mogelijk om de gewenste gradaties van graniet te verkrijgen. Er is gekozen om basalt breuksteen te nemen, dit heeft qua hoekigheid dezelfde eigenschappen als graniet, echter is dit materiaal over het algemeen zwaarder, 3000 kg/m^3 . Om de schaalfout die hierdoor optreedt in kaart te brengen wordt de exacte dichtheid van het gebruikte materiaal (basalt) bepaald. Dit wordt bepaald door het materiaal te drogen en te wegen en vervolgens in water onder te dompelen om het volume te bepalen. Hieruit komt de dichtheid zoals gegeven in tabel 9. Dezelfde procedure voor het bepalen van de dichtheid wordt gedaan voor het schelpmateriaal. Het gewicht van de oesterkooi is direct 100x verschaald. Door de verschillende onderdelen en vorm van de oesterkooi is een eenduidige dichtheid niet goed te bepalen.

In onderstaande tabel is een overzicht van de materiaaldichtheden afgebeeld.

Tabel 9 Dichtheid ecologische verrijking (schaal 1:10)

Materiaal	Dichtheid
Steengraderingen (basalt)	3000 kg/m^3
Schelpmateriaal	2750 kg/m^3
Oesterkooi (berekent als een volume)	715 kg/m^3
Water (zoet)	1000 kg/m^3

Oesterkooien

De oesterkooien worden gemaakt door middel van 3D printen. Het frame wordt geprint waarna zakjes gevuld met schelpmateriaal hierin worden gehangen. Het gewenste gewicht (525 gram) wordt bereikt door stalen plaatjes toe te voegen.

Om het gedrag van de oesterkooien met oesters erin goed in kaart te brengen wordt tijdens de proeven het gewicht van de kooien aangepast. Dit zal in proef 3.4 gebeuren. Hier zal oesterkooi 1 over 2 gewichten beschikken en oesterkooi 2 zal geen gewichten bevatten. In proef 3.1-3.3 beschikken de oesterkooien over 4 stalen plaatjes. Een stalen plaatje heeft een massa van 90 gram.

2.6.2 Graderingen (zeven)

De verschillende steengradaties en het schelpmateriaal zijn geleverd door De Beijer Group. De materialen zoals deze geleverd worden vanuit de leverancier komen niet 1 op 1 overeen met de graderingen benodigd in de proeven. Om deze te verkrijgen moeten de verschillende gradaties gezeefd worden en van de verschillende graderingen een nieuwe gradering gemaakt worden die overeenkomt met de benodigde gradering voor de proeven. De graderingen zoals geleverd zijn als volgt:

Tabel 10 Graderingen

Gradering zoals geleverd	Gradering zoals benodigd
2-8 mm	3-9 mm
8-16 mm	6-18 mm
16-32 mm	19-50 mm
32-55 mm	

De volgende stappen worden genomen om tot de juiste gradering te komen

Tabel 11 Zeefmethode

Stap	Activiteit
1. Wassen	Wassen van het materiaal dient te gebeuren voordat dit gezeefd kan worden. Dit wordt gedaan om onzuiverheden te verwijderen die de stroomgoot en andere instrumenten aangesloten op hetzelfde bassin zouden kunnen beschadigen of vervuilen. Wanneer geen onzuiverheden meer van het materiaal af komen wordt dit schoon geacht. Dit dient te gebeuren met al het materiaal.
2. Gradering 3-9 mm	Om de 3-9 mm gradering te verkrijgen wordt het materiaal van 2 mm en kleiner uit de 2-8 mm gradering gezeefd. De zeef die hiervoor wordt gebruikt is: - 2,8 mm - 4,0 mm - 5,6 mm - 8,0 mm - 11,2 mm Om tot de 9 mm te komen wordt extra materiaal toegevoegd uit de gradering van 8-16 mm.
3. Gradering 6-18 mm	Om de 6-18 mm gradering te verkrijgen wordt de 8-16 mm gradering gezeefd om de exacte curve te verkrijgen. De volgende zeven worden hiervoor gebruikt: - 2,8 mm - 4,0 mm - 5,6 mm - 8,0 mm - 11,2 mm - 16,0 mm - 22,4 mm Het onderste deel van de gradatie (6-8 mm) wordt toegevoegd door het bovenste deel van de 3-9 mm gradering te gebruiken. Het bovenste deel (16-18 mm) van de gradatie wordt toegevoegd door het onderste deel van de 16-32 mm gradering toe te voegen.
4. Gradering 19-50	Om de 19-50 mm gradering te verkrijgen worden de graderingen 16-32 en 32-55 samengevoegd. De graderingen worden gezeefd met de volgende zeven: - 5,6 mm - 8,0 mm - 11,2 mm - 22,4 mm - 31,5 mm - 45,0 mm - 63,0 mm Het onderste deel van de 16-32 mm en het bovenste deel van de 32-55 mm worden niet voor deze gradering gebruikt.

5. Schelpen	Van het schelpmateriaal wordt een gradatiecurve gemaakt om te bepalen hoe de opbouw van de schelpgrootte eruitziet. Dit is de gradatiecurve zoals deze in het prototype zou worden toegepast. Hiervoor worden de volgende zeven gebruikt: - 2,8 mm - 4,0 mm - 5,6 mm - 8,0 mm - 11,2 mm - 22,4 mm - 31,5 mm - 45,0 mm - 63,0 mm Om dit te verschalen wordt de geometrische factor van 10x verschalen gebruikt zoals beschreven in hoofdstuk 3 (Schaalmodel). De schelpen worden gebroken door deze in een doek te wikkelen en er op te slaan met een baksteen. Een van de randvoorwaarden voor het gebruik van de stroomgoot is dat de deeltjes schelp niet kleiner worden dan 3 mm. Om hieraan te voldoen worden de schelpdeeltjes kleiner dan 3 mm niet toegepast in de proef. Het gebroken materiaal wordt opnieuw gezeefd met de volgende zeven om tot de gewenste gradatie te komen: - 2,8 mm - 4,0 mm - 5,6 mm
6. Stenen 0,5/1/2 Kg	De stenen met het gewicht van 0,5 Kg worden uit de gradering van 32-55/19-50 mm gehaald. Deze gradering is enkel nodig bij de bodembescherming en niet bij de vooroeverbescherming waar de grote stenen worden getest. De 1 en 2 Kg stenen zijn geleverd door De Beijer Group.

2.7 Plaatsing model en verrijking

Het materiaal op de bodembescherming en op de vooroeververdediging wordt op een verschillende manier geplaatst. Om de plaatsing zo realistisch mogelijk na te bootsen zal het materiaal op eenzelfde manier worden geplaatst op kleinere schaal. In beide situaties is het van groot belang dat het materiaal los gestort wordt en dus niet optimaal wordt neergelegd of wordt aangedrukt. Om het gewenste profiel te verkrijgen met de juiste laagdikte wordt op de wand van de stroomgoot het theoretisch profiel getekend met stift zodat dit als referentie kan dienen. Dit wordt zo nauwkeurig mogelijk benaderd.

2.7.1 Bodembescherming

De bodembescherming wordt in de prototype situatie geplaatst door middel van een valpijpschip of een zij/schuiftortor of een combinatie van beiden. In het geval van de valpijp wordt het materiaal redelijk dicht bij de bodem gebracht door middel van een lange pijp waarna het materiaal vrij in het water valt. Bij zij/schuiftortors wordt het materiaal vanaf de waterlijn in het water gedumpt waarna het een vrije val naar de bodem maakt. De valpijp is een stuk nauwkeuriger maar is gelimiteerd door de diameter van de pijp. De grotere graderingen worden door middel van de zij/schuiftortors geïnstalleerd. In het geval van het Luchterduinen windpark is de filter laag door middel van een valpijpschip geïnstalleerd en de toplaag door middel van een zij/schuiftortor.

In het model zal eenzelfde manier van aanbrengen worden gehanteerd. De stroomgoot wordt gevuld tot een hoogte van 30 cm waarna het water wordt stilgezet. De filter laag wordt aangebracht door middel van een pvc buisje met diameter 50 mm en een trechter die hier bovenop staat. Het pvc buisje wordt tot ongeveer 5-10 cm van de bodem gehouden. De toplaag wordt aangebracht met gebruik van een schepje. Op deze manier wordt getracht een zo realistisch mogelijke situatie na te bootsen.

2.7.2 Vooroeververdediging

Het materiaal bij de vooroever wordt geplaatst door middel van een kraanschip met daarop een grote graafmachine. Het materiaal wordt opgepakt met de graafmachine en wordt dicht bij de bodem losgelaten. Het materiaal kan tot op een nauwkeurigheid van ongeveer 0,2 m worden aangebracht. In het geval van de vooroeververdediging bij de Zeelandbrug is het materiaal ook op deze manier aangebracht.

In het model zal eenzelfde manier van aanbrengen worden gehanteerd. De stroomgoot wordt gevuld tot een hoogte van 30 cm waarna het water wordt stilgezet. Met een schepje wordt het materiaal tot vlak bij de bodem gebracht en wordt het geplaatst. Op deze manier wordt getracht een zo realistisch mogelijke situatie na te bootsen.

3 Methode proeven

In dit hoofdstuk is de wijze van uitvoeren van de proeven beschreven aan de hand van een stappenplan. Het is belangrijk om dit stappenplan bij elke proefopstelling te volgen met als doel de externe omstandigheden bij elke proef gelijk te houden zodat alleen de stroomsnelheid wordt gemanipuleerd.

3.1 Metingen

Na de proef is het belangrijk om voldoende waarnemingen en data beschikbaar te hebben om conclusies te trekken. De onderstaande parameters zullen tijdens de proef worden gemeten.

- **Waterhoogte:** Dit wordt m.b.v. een meetlint gemeten.
- **Stijghoogte:** De stijghoogte wordt gemeten door middel van een pitotbuis
- **Stroomsnelheid:** Middels de Nivus-meter en Pitotbuis kan de stroomsnelheid bepaald worden.
- **Debiet:** Het debiet wordt bepaald aan de hand van de Nivus-meter

3.2 Opbouw proefopstellingen

Het opbouwen van de proefopstellingen wordt volgens een stappenplan uitgevoerd. De scour protectie en vooroever worden beiden in een apart stappenplan toegelicht. In Tabel 12 is het stappenplan voor de bodembescherming opstelling te vinden en in Tabel 13 is het stappenplan voor de vooroeverbescherming opstelling te vinden.

Tabel 12 Opbouw bodembescherming activiteiten

Opbouw model Bodembescherming		
Stap Nr.	Activiteit	Beschrijving
01	Aanbrengen filter laag	• Start constructie 3,00 m na instroom. • Lengte constructie 2,74 m • 0,023 m dik in het midden • Helling van 2:5 • Zie bijlage A voor opbouw.
02	Aanbrengen top laag	• Start constructie 3,46 m na instroom • Lengte constructie 1,82 m • 0,08 m dik in het midden • Helling van 2:5
03	Stroomgoot vullen	• Pomp aanzetten • Waterpeil langzaam verhogen tot een waterdiepte van 0,30 m
04	Aanbrengen ecologische verrijking	• Verrijking aanbrengen volgens paragraaf 2.7
05	Plaatsen pitotbuis	• Pitotbuis ontluchten • Pitotbuis langzaam laten zakken • Pitotbuis plaatsen volgens bijlage A (boven constructie)

06	Plaatsen Nivus-meter	• Bevestig Nivus-meter 1,00 m na model.
07	Plaatsen camera's	• Camera's positioneren volgens bijlage A
08	Controleren opstelling	• Controleren of de modelsituatie overeenkomt met de situatie beschreven in de onderzoeksmethode.
09	Stroomsnelheid ophogen	• Stroomsnelheid stapsgewijs verhogen. (stapgrootte 0,05 m/s) • Waterstand dient constant te blijven.
10	Waarnemingen noteren	Zodra het begin van bewegen (gedefinieerd in paragraaf 2.4) wordt waargenomen: • Stroomsnelheid en debiet aflezen en noteren Nivus-meter • Stijghoogte en waterhoogte aflezen pitotbuis
11	Stroomsnelheid ophogen	• Nogmaals de stroomsnelheid stapsgewijs verhogen tot meer beweging zichtbaar is.
12	Waarnemingen noteren	• Nogmaals waarnemingen noteren volgens stap 3
13	Verlengen van de proef	• Op kritische stroomsnelheid door laten lopen van de proef om de ontwikkeling van spreiding te observeren. Waarnemingen noteren.
14	Einde proef	• Indien nodig constructie opnieuw opbouwen volgens bijlage A.

Tabel 13 Opbouw vooroverbescherming activiteiten

Opbouw model Voorover		
Stap Nr.	Activiteit	Beschrijving
01	Aanbrengen breuksteen gradering	• Start constructie 3,00 m na instroom. • Lengte constructie 3,00 m • Zie bijlage B voor opbouw • Helling van 1:2,5
02	Stroomgoot vullen	• Pomp aanzetten • Waterpeil langzaam verhogen tot een waterdiepte van 0,30 m.
03	Aanbrengen ecologische verrijking	• Verrijking aanbrengen volgens paragraaf 2.7
04	Plaatsen pitotbuis	• Pitotbuis ontluchten • Pitotbuis langzaam laten zakken
05	Plaatsen Nivus-meter	• Bevestig Nivus-meter 1,0 m na model
06	Plaatsen camera's	• Camera's positioneren volgens bijlage B
07	Controleren opstelling	• Controleren of de modelsituatie overeenkomt met de situatie beschreven in de onderzoeksmethode.

08	Stroomsnelheid ophogen	- Stroomsnelheid stapsgewijs verhogen (stapgrootte 0,05 m/s) - Waterstand dient constant te blijven.
09	Waarnemingen noteren	Zodra het begin van bewegen (gedefinieerd in paragraaf 2.4) wordt waargenomen: - Stroomsnelheid en debiet aflezen en noteren Nivus-meter - Stijghoogte en waterhoogte aflezen pitotbuis - Afstand verplaatsing meten
10	Stroomsnelheid ophogen	Nogmaals de stroomsnelheid stapsgewijs verhogen tot meer beweging zichtbaar is.
11	Waarnemingen noteren	Nogmaals waarnemingen noteren volgens stap 3
12	Verlengen van de proef	Op kritische stroomsnelheid door laten lopen van de proef om de ontwikkeling van spreiding te observeren. Waarnemingen noteren.
13	Einde proef	Indien nodig constructie opnieuw opbouwen volgens bijlage B.

3.3 Planning

De proeven zullen volgens de planning in Tabel 14 worden uitgevoerd. In bijlage C is een uitgebreide planning hiervan te vinden. De 0-meting en kleine steengradatie verrijking wordt in twee delen uitgevoerd i.v.m. met het bepalen van de verschillen bij de start van de proefweek en de eind van de proefweek.

Tabel 14 Planning proeven

Dag	Datum	Activiteit
Do	28-03-2019	Bodembescherming opbouwen & 0-metingen (2/4 proeven)
Vrij	29-03-2019	Bodembescherming met verrijking oesterkooi & kleine steengradatie (2/4 proeven)
Za	30-03-2019	Bodembescherming met verrijking oesterkooi
Ma	01-04-2019	Bodembescherming met verrijking schelpmateriaal & 0-meting (4/4 proeven)
Di	02-04-2019	Bodembescherming met verrijking kleine steengradatie (4/4 proeven) Vooroever opbouwen & 0-meting vooroever (2/4 proeven)
Wo	03-04-2019	Vooroever met verrijking kleine stenen (2/4 proeven) & grote stenen
Do	04-04-2019	Vooroever met verrijking schelpmateriaal & 0-meting (4/4 proeven)
Vrij	05-04-2019	Vooroever met verrijking kleine stenen (4/4 proeven) Uitloop

4 Data

Het is van belang om de data en waarnemingen die uit de proef komen op de juiste manier op te slaan. Tijdens de proeven wordt gebruik gemaakt van een meetformulier. Deze is in bijlage C te vinden.

De gegevens die tijdens de proeven worden genoteerd zijn:

- Begin van bewegen volgens stap 1 en 5, gedefinieerd in paragraaf 2.4 .
- Stijghoogtes en waterhoogtes in meetvak. Met deze waarde kan naderhand de stroomsnelheid en het debiet worden berekend.
- Stroomsnelheid en debiet in meetvak
- Camerabeelden. Deze beelden kunnen naderhand gebruikt worden bij onduidelijkheden. De beelden krijgen de volgende bestandsnaam: [ProefNr.]_[TrialNr.]_[Datum]. Aan het einde van elke dag wordt een back-up van deze beelden gemaakt.

4.1 Data analyseren

Wanneer alle data verzameld zijn kan deze data geanalyseerd worden. Bij het analyseren van data is het belangrijk om naar de volgende zaken te kijken, namelijk:

- Afwijkingen en onnauwkeurigheden die niet overeenkomen met de overige data moeten worden geanalyseerd en verklaard. Op basis hiervan wordt gekeken of deze data mee wordt genomen of niet.
- Van alle data dient een duidelijk overzicht gemaakt te worden waarna dit teruggekoppeld kan worden aan de prototype situatie. Uiteindelijk zullen hier aanbevelingen uit voortvloeien.

Het analyseren en verwerken van data wordt gedaan met het programma Excel. Dit programma biedt een overzichtelijke werkomgeving voor het analyseren van data. Vervolgens wordt aan de hand van deze data een conclusie getrokken die in het hoofdrapport wordt verwerkt.

5 Bronnen

Nortier, I., & de Koning, P. (1994). *Toegepaste vloeistofmechanica*. Noordhof Uitgevers.

CUR. (2007). *The Rock Manual*. London: CUR.

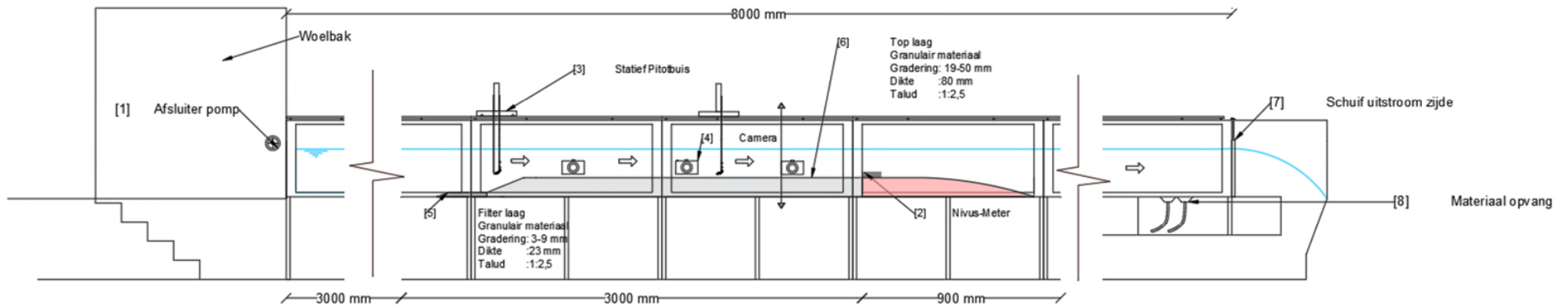
Schukking, H. N. (1972). *Beweging van bodemmateriaal*. Delft: Waterloopkundig Laboratorium.

Van Oord. (2013). *Design Rapport Scour Protection*. Rotterdam: Van Oord.

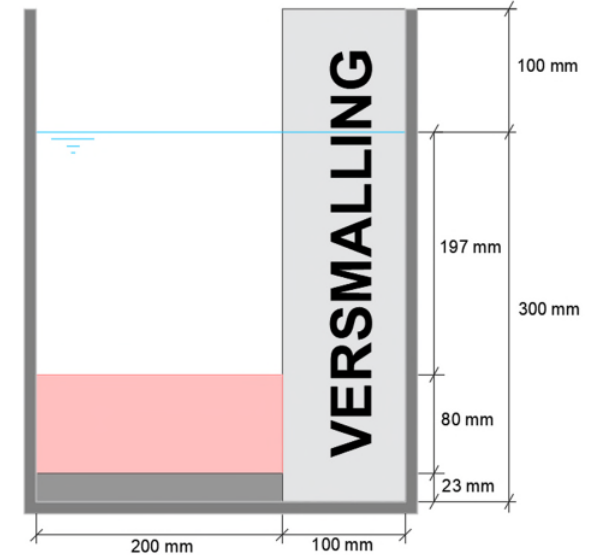
Whitehouse, R. (1998). *Scour at marine structures*. Kent: Thomas Telford Publications.

6 Bijlagen

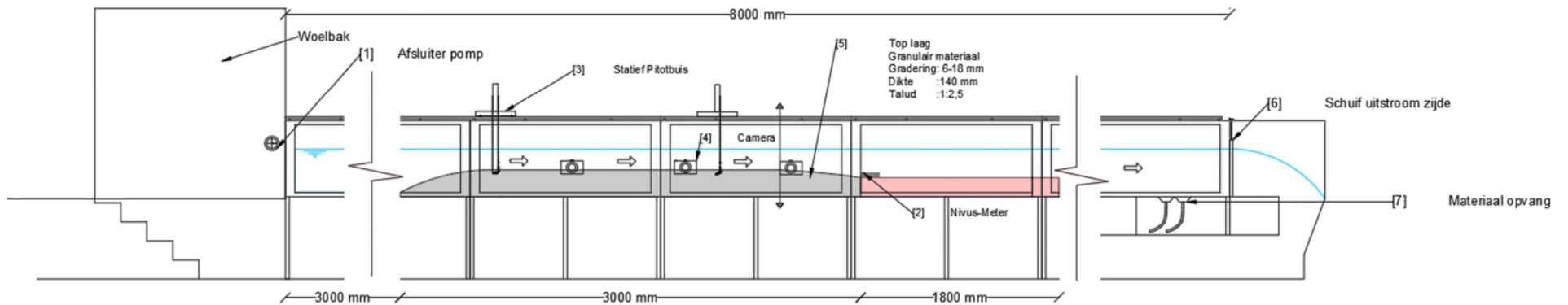
6.1 Bijlage A – Model Bodembescherming



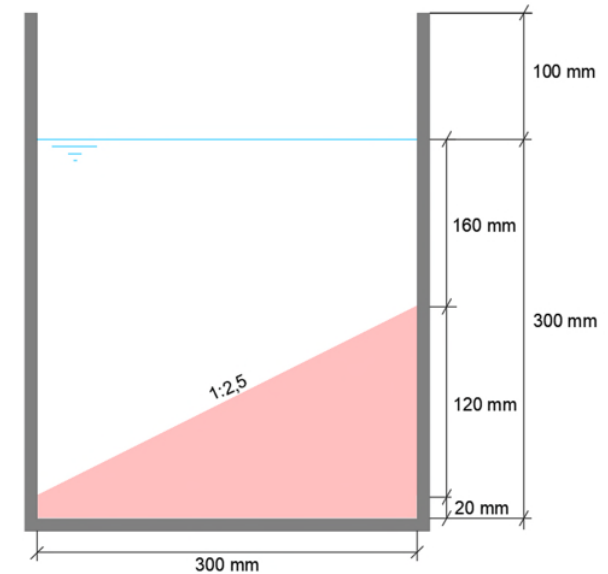
- [1] **Afsluiter pomp**
Door aan de afsluiter te draaien kan het debiet en de stroomsnelheid in de stroomgoot beïnvloed worden
- [2] **Nivus-Meter**
Met de Nivus-meter kan de stroomsnelheid, waterhoogte en het debiet worden gemeten
- [3] **Pitotbuis**
Met de pitotbuis kan de stijg- en waterhoogte gemeten worden. Dit kan later omgezet worden in de stroomsnelheid. Zie hoofdstuk
- [4] **Camera**
Met behulp van camera's worden de proeven vastgelegd om later als referentiemateriaal te gebruiken.
- [5] **Filter laag**
De filter laag is de onderste laag van de constructie. Deze heeft een dichtheid van 3000 kg/m³ en een gradering van 3 – 9 mm.
- [6] **Top laag**
De top laag is de bovenste laag van de constructie. Deze heeft net als de filter laag een dichtheid van 3000 kg/m³ en een gradering van 19 – 50 mm.
- [7] **Schuiven**
In de stroomgoot bevinden zich aan de achterzijde een aantal schuiven. Deze schuiven worden gebruikt om de waterstand te beïnvloeden.
- [8] **Materiaal opvang**
Bij de uitstroming van de goot bevinden zich 2 trechters in de bodem. Deze trechters vangen materiaal op om te voorkomen dat dit in het pompsysteem belandt.



6.2 Bijlage B – Model Vooroever



- [1] **Afsluiter pomp**
Door aan de afsluiter te draaien kan het debiet en de stroomsnelheid in de stroomgoot beïnvloed worden
- [2] **Nivus-Meter**
Met de Nivus-meter kan de stroomsnelheid, waterhoogte en het debiet worden gemeten
- [3] **Pitotbuis**
Met de pitotbuis kan de stijg- en waterhoogte gemeten worden. Dit kan later omgezet worden in de stroomsnelheid. Zie hoofdstuk
- [4] **Camera**
Met behulp van camera's worden de proeven vastgelegd om later als referentiemateriaal te gebruiken.
- [5] **Top laag**
De constructie in de stroomgoot is opgebouwd uit deze laag. De top laag heeft een dichtheid van 3000 kg/m^3 en bestaat uit een gradering van 6 – 18 mm.
- [6] **Schuiven**
In de stroomgoot bevinden zich aan de achterzijde een aantal schuiven. Deze schuiven worden gebruikt om de waterstand te beïnvloeden.
- [7] **Materiaal opvang**
Bij de uitstroming van de goot bevinden zich 2 trechters in de bodem. Deze trechters vangen materiaal op om te voorkomen dat dit in het pompsysteem belandt.



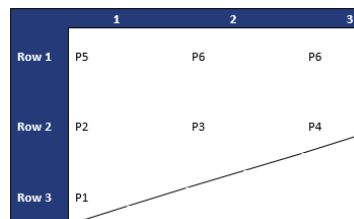
Datum

[illegible]

6.4 Bijlage D – Stroomprofiel

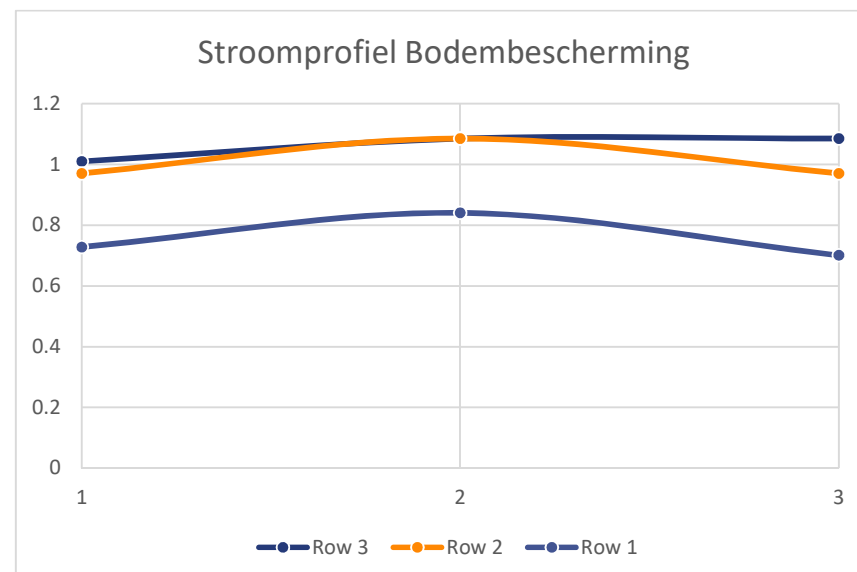
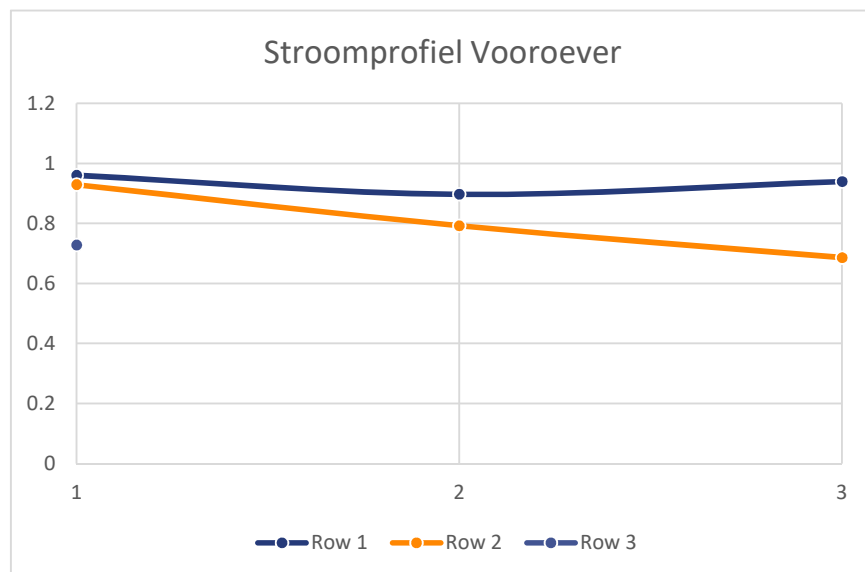
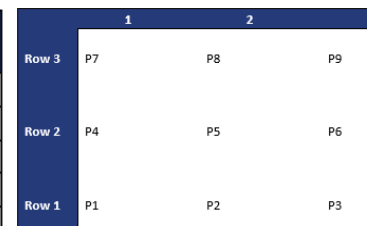
Vooroever model

Pitot No.	Row No.	ΔP	m/s
P1	Row 3	27	0,727832
P2	Row 2	44	0,929129
P3	Row 2	32	0,792364
P4	Row 2	24	0,686207
P5	Row 1	47	0,960281
P6	Row 1	41	0,896895
P7	Row 1	45	0,939628



Bodembescherming model

Pitot No.	Row No.	ΔP	m/s
P1	Row 1	27	0,727832
P2	Row 1	36	0,840428
P3	Row 1	25	0,700357
P4	Row 2	48	0,970443
P5	Row 2	60	1,084988
P6	Row 2	48	0,970443
P7	Row 3	52	1,010069
P8	Row 3	60	1,084988
P9	Row 3	60	1,084988



Bijlage IX

Resultaten

Mei 2019



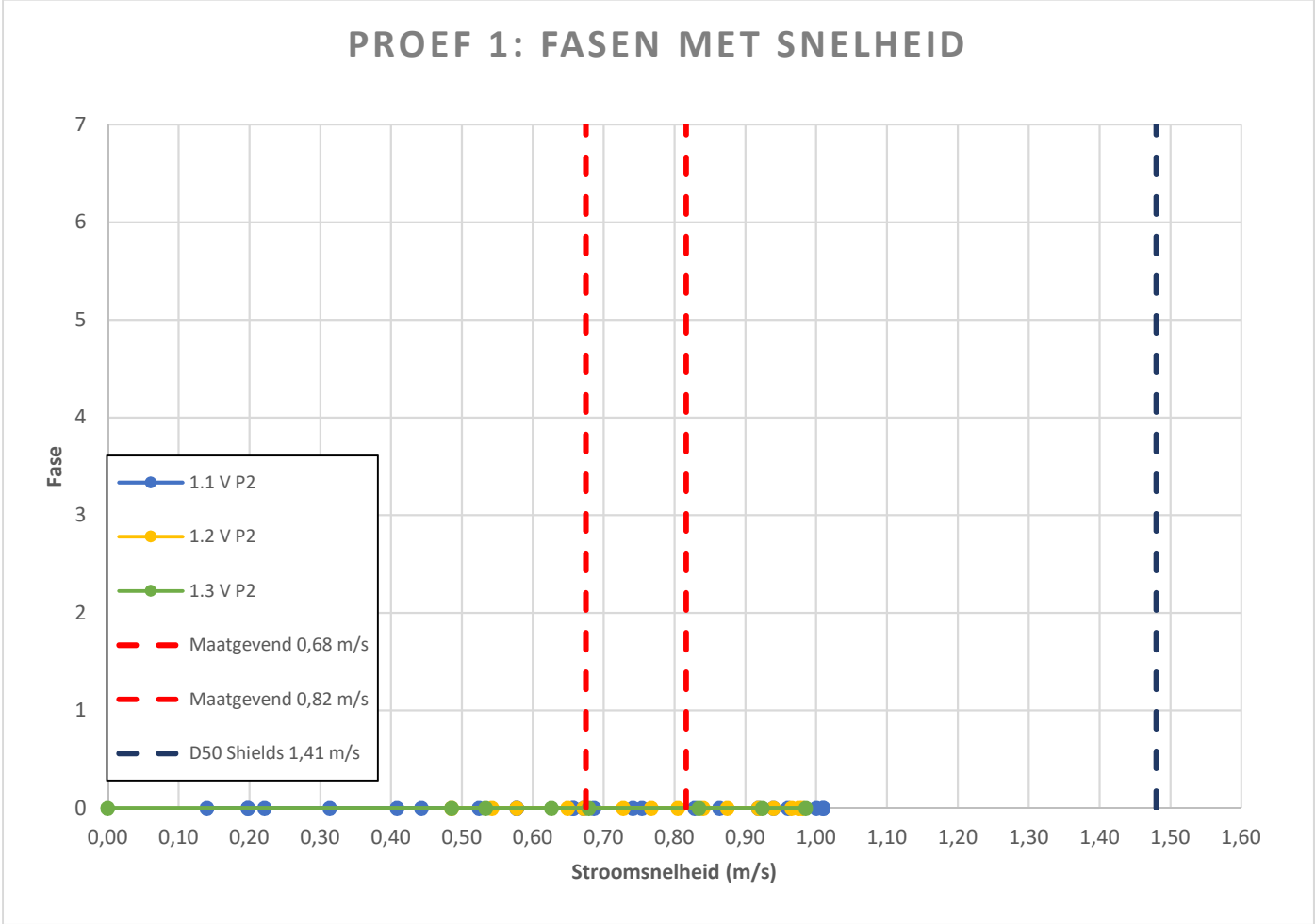
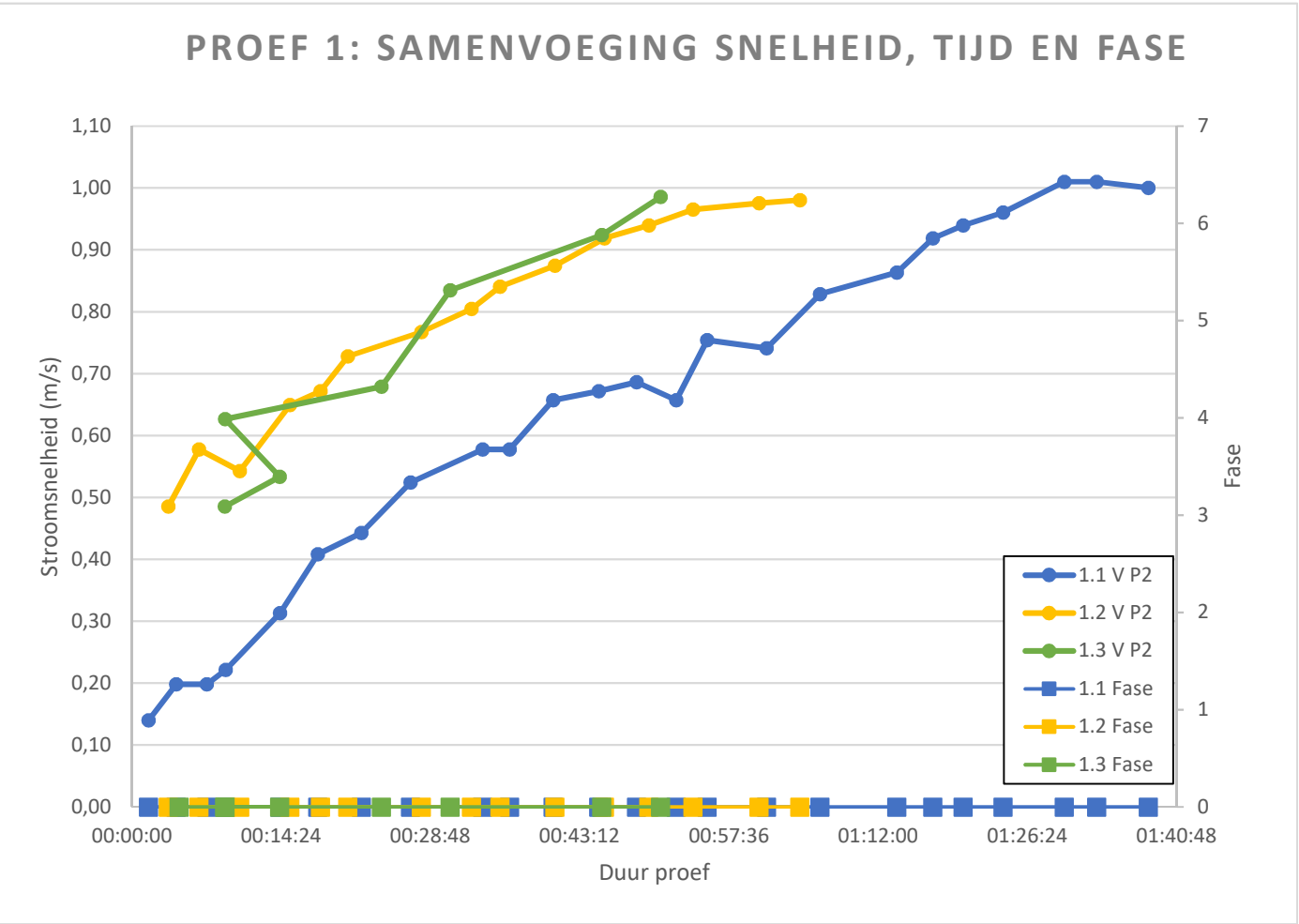
1 Resultaten proeven

Verzameltabel Proef 1 0-meting bodembescherming

Proef	1.1		
Stap	Tijd	V P2	Fase
1	00:01:35	0,14	0
2	00:04:15	0,20	0
3	00:07:13	0,20	0
4	00:09:03	0,22	0
5	00:14:17	0,31	0
6	00:17:55	0,41	0
7	00:22:08	0,44	0
8	00:26:53	0,52	0
9	00:33:49	0,58	0
10	00:36:27	0,58	0
11	00:40:39	0,66	0
12	00:45:03	0,67	0
13	00:48:42	0,69	0
14	00:52:31	0,66	0
15	00:55:29	0,75	0
16	01:01:13	0,74	0
17	01:06:23	0,83	0
18	01:13:48	0,86	0
19	01:17:17	0,92	0
20	01:20:13	0,94	0
21	01:24:03	0,96	0
22	01:29:57	1,01	0
23	01:33:05	1,01	0
24	01:38:04	1,00	0

Proef	1.2		
Stap	Tijd	V P2	Fase
1	00:03:30	0,49	0
2	00:06:27	0,58	0
3	00:10:24	0,54	0
4	00:15:14	0,65	0
5	00:18:11	0,67	0
6	00:20:49	0,73	0
7	00:27:55	0,77	0
8	00:32:45	0,80	0
9	00:35:30	0,84	0
10	00:40:48	0,87	0
11	00:45:36	0,92	0
12	00:49:52	0,94	0
13	00:54:08	0,97	0
14	01:00:30	0,98	0
15	01:04:27	0,98	0

Proef	1.3		
Stap	Tijd	V P2	Fase
1	00:04:32	0,00	0
2	00:08:57	0,49	0
3	00:14:15	0,53	0
4	00:08:58	0,63	0
5	00:24:04	0,68	0
6	00:30:42	0,83	0
7	00:45:20	0,92	0
8	00:51:00	0,99	0



Verzameltablel Proef 2 Kleine steengradatie op bodembescherming

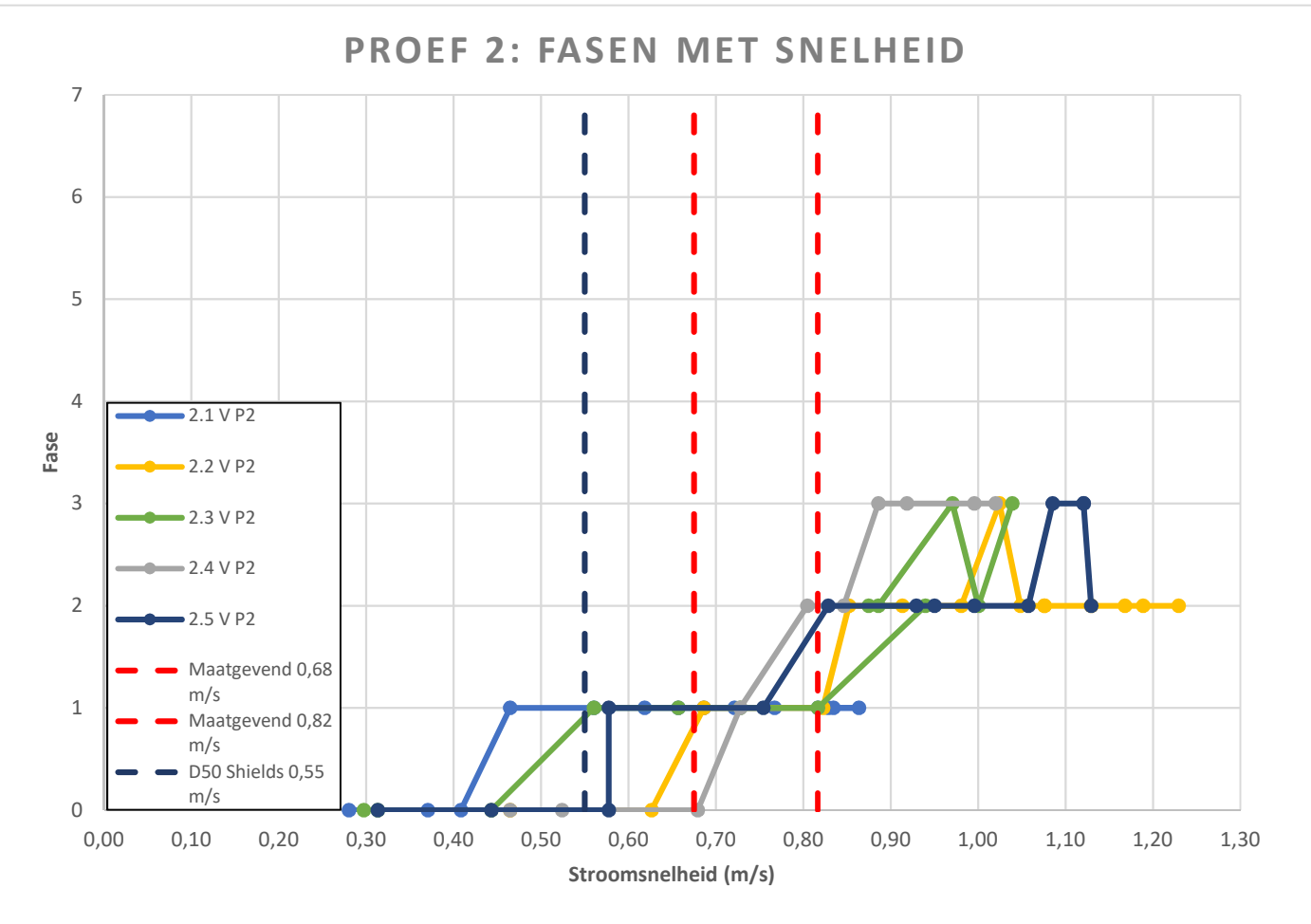
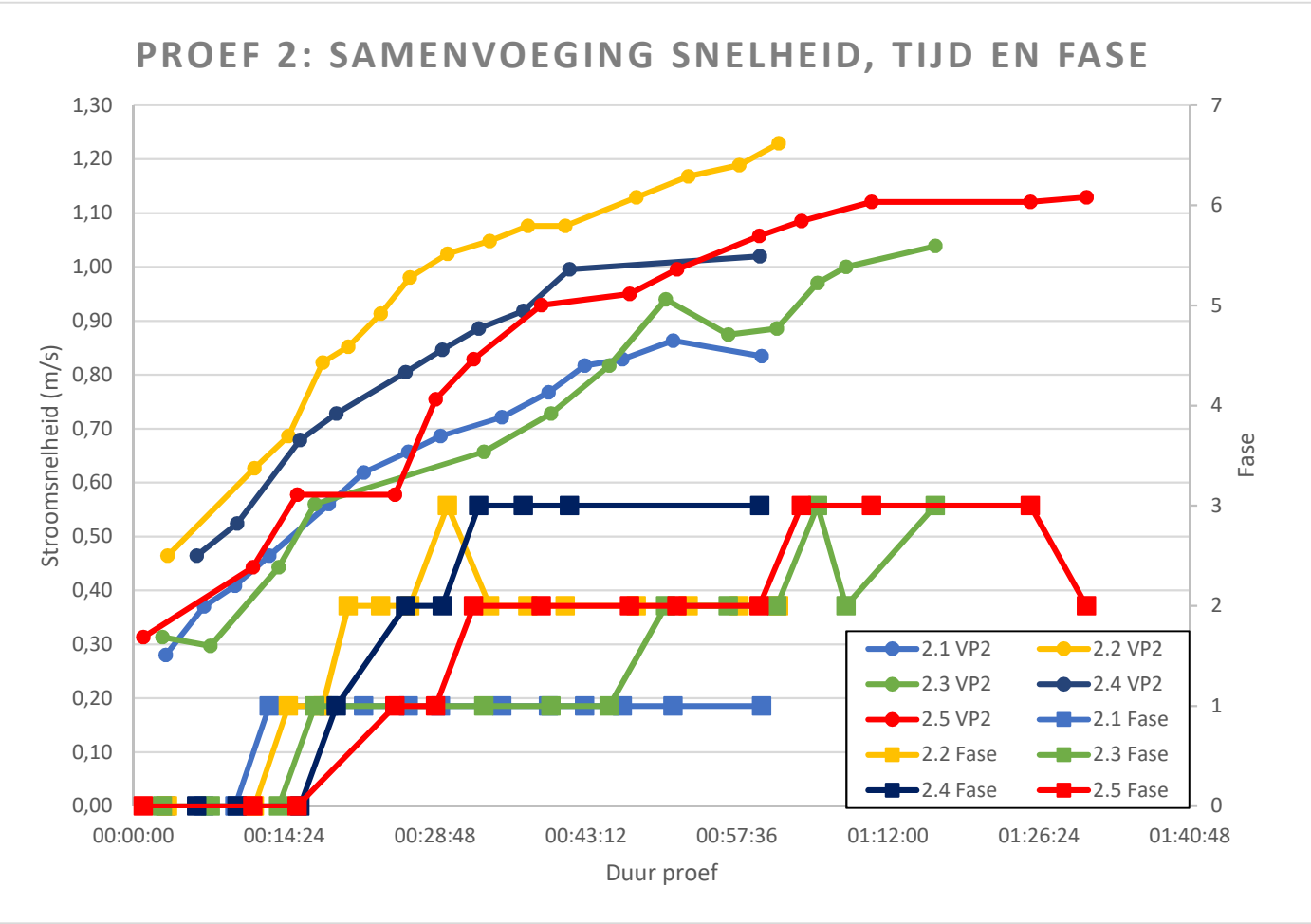
Proet	2.1			
Stap	Tijd	V P2	Fase	
1	00:03:04	0,28	0	
2	00:06:43	0,37	0	
3	00:09:41	0,41	0	
4	00:12:57	0,46	1	
5	00:18:38	0,56	1	
6	00:21:58	0,62	1	
7	00:26:13	0,66	1	
8	00:29:18	0,69	1	
9	00:35:08	0,72	1	
10	00:39:36	0,77	1	
11	00:43:03	0,82	1	
12	00:46:38	0,83	1	
13	00:51:28	0,86	1	
14	00:59:56	0,83	1	

Proet	2.2			
Stap	Tijd	V P2	Fase	
1	00:03:15	0,46	0	
2	00:11:31	0,63	0	
3	00:14:47	0,69	1	
4	00:18:03	0,82	1	
5	00:20:28	0,85	2	
6	00:23:34	0,91	2	
7	00:26:22	0,98	2	
8	00:29:58	1,02	3	
9	00:33:59	1,05	2	
10	00:37:38	1,08	2	
11	00:41:11	1,08	2	
12	00:47:58	1,13	2	
13	00:52:56	1,17	2	
14	00:57:48	1,19	2	
15	01:01:33	1,23	2	

Proet	2.3			
Stap	Tijd	V P2	Fase	
1	00:02:45	0,31	0	
2	00:07:19	0,30	0	
3	00:13:50	0,44	0	
4	00:17:18	0,56	1	
5	00:33:26	0,66	1	
6	00:39:50	0,73	1	
7	00:45:24	0,82	1	
8	00:50:46	0,94	2	
9	00:56:44	0,87	2	
10	01:01:23	0,89	2	
11	01:05:15	0,97	3	
12	01:07:59	1,00	2	
13	01:16:30	1,04	3	

Proet	2.4			
Stap	Tijd	V P2	Fase	
1	00:06:01	0,46	0	
2	00:09:53	0,52	0	
3	00:15:53	0,68	0	
4	00:19:21	0,73	1	
5	00:25:58	0,80	2	
6	00:29:28	0,85	2	
7	00:32:56	0,89	3	
8	00:37:11	0,92	3	
9	00:41:36	1,00	3	
10	00:59:46	1,02	3	

Proet	2.5			
Stap	Tijd	V P2	Fase	
1	00:00:55	0,31	0	
2	00:11:23	0,44	0	
3	00:15:36	0,58	0	
4	00:24:57	0,58	1	
5	00:28:50	0,75	1	
6	00:32:26	0,83	2	
7	00:38:54	0,93	2	
8	00:47:20	0,95	2	
9	00:51:51	1,00	2	
10	00:59:42	1,06	2	
11	01:03:44	1,08	3	
12	01:10:26	1,12	3	
13	01:25:34	1,12	3	
14	01:30:55	1,13	2	



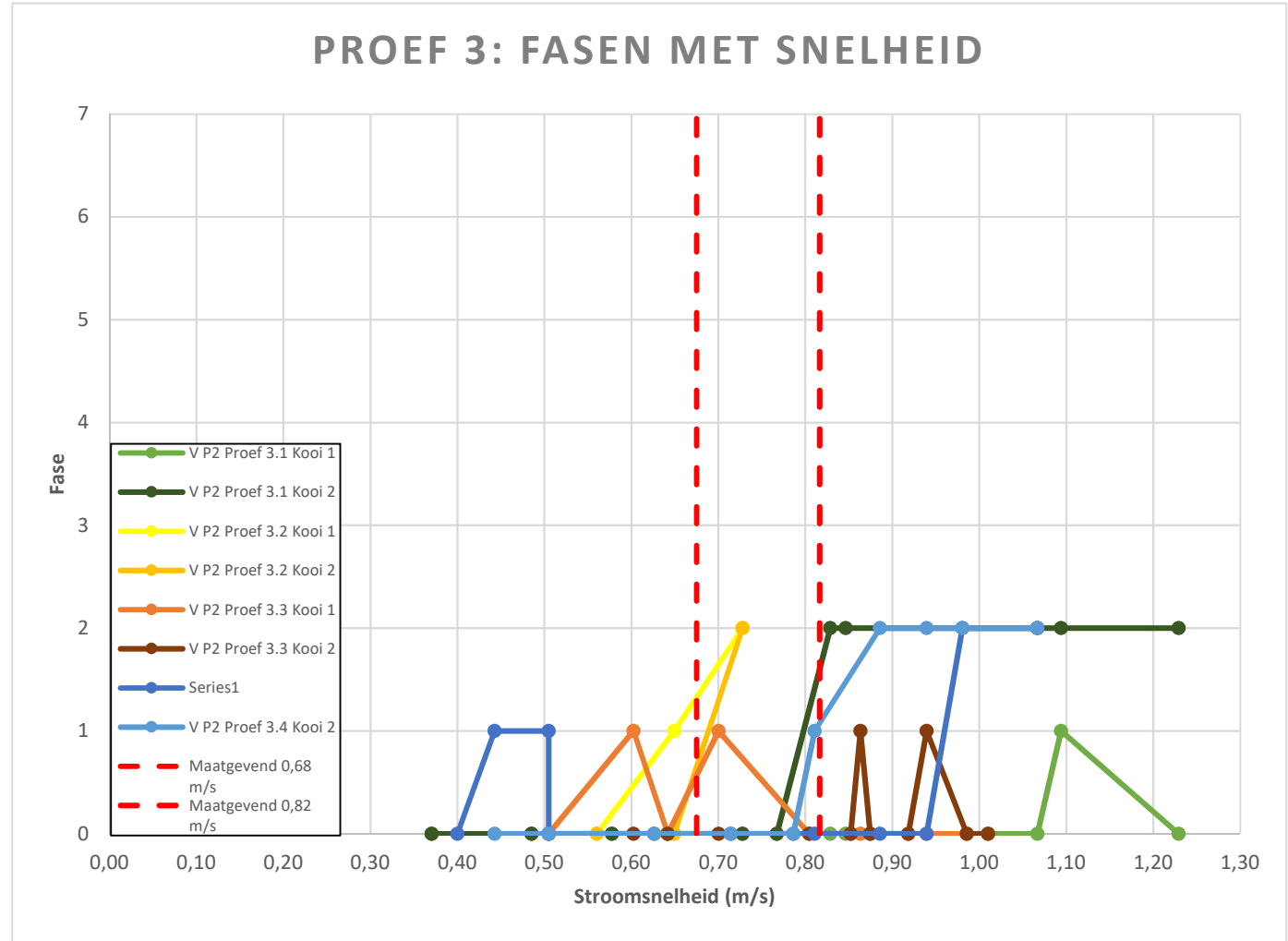
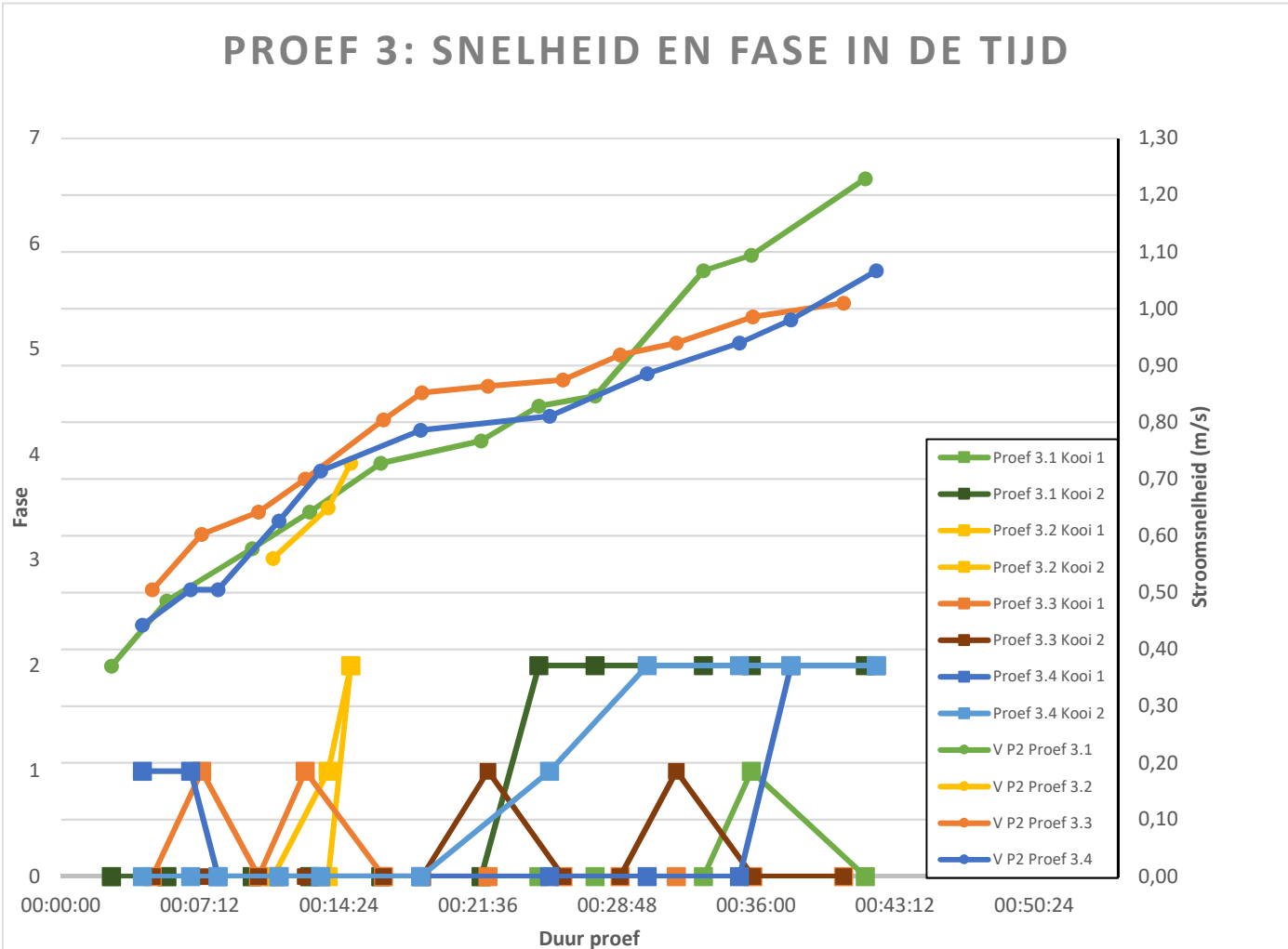
Verzameltabel Proef 3 Oesterkooi bodembescherming

Proef	3.1 Oesterkooi			
Stap	Tijd	V P2	Fase Kooi 1	Fase Kooi 2
1	00:02:37	0,37	0	0
2	00:05:29	0,49	0	0
3	00:09:54	0,58	0	0
4	00:12:53	0,64	0	0
5	00:16:34	0,73	0	0
6	00:21:45	0,77	0	0
7	00:24:45	0,83	0	2
8	00:27:40	0,85	0	2
9	00:33:16	1,09	1	2
10	00:35:45	1,07	1	2
11	00:41:39	1,23	2	2

Proef	3.3 Oesterkooi			
Stap	Tijd	V P2	Fase Kooi 1	Fase Kooi 2
1	00:04:44	0,51	0	0
2	00:07:17	0,60	1	0
3	00:10:14	0,64	0	0
4	00:12:39	0,70	1	0
5	00:16:42	0,80	0	0
6	00:18:41	0,85	0	0
7	00:22:07	0,86	0	1
8	00:26:00	0,87	0	0
9	00:28:57	0,92	0	0
10	00:31:52	0,94	0	1
11	00:35:50	0,99	0	0
12	00:40:32	1,01	0	0

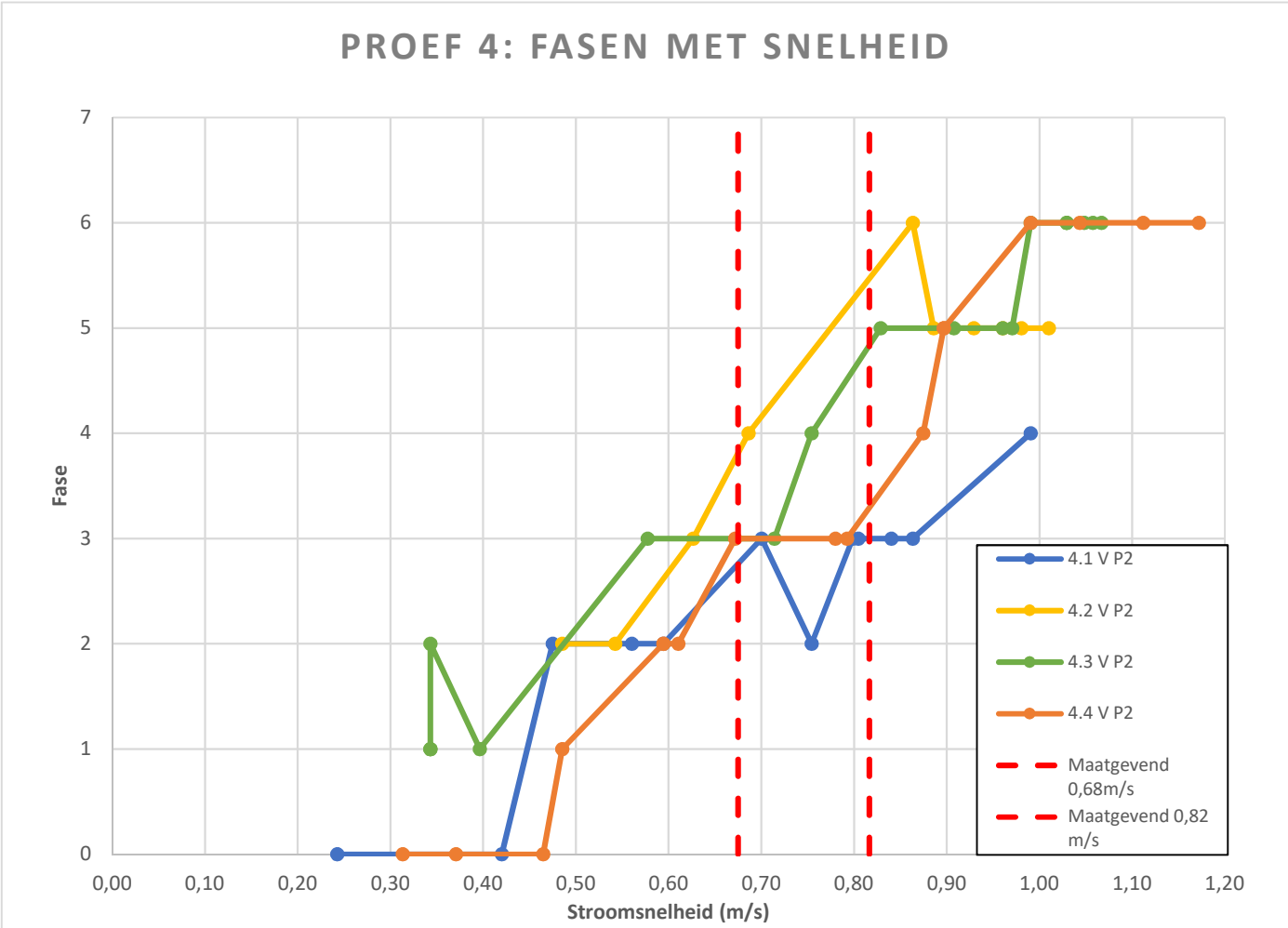
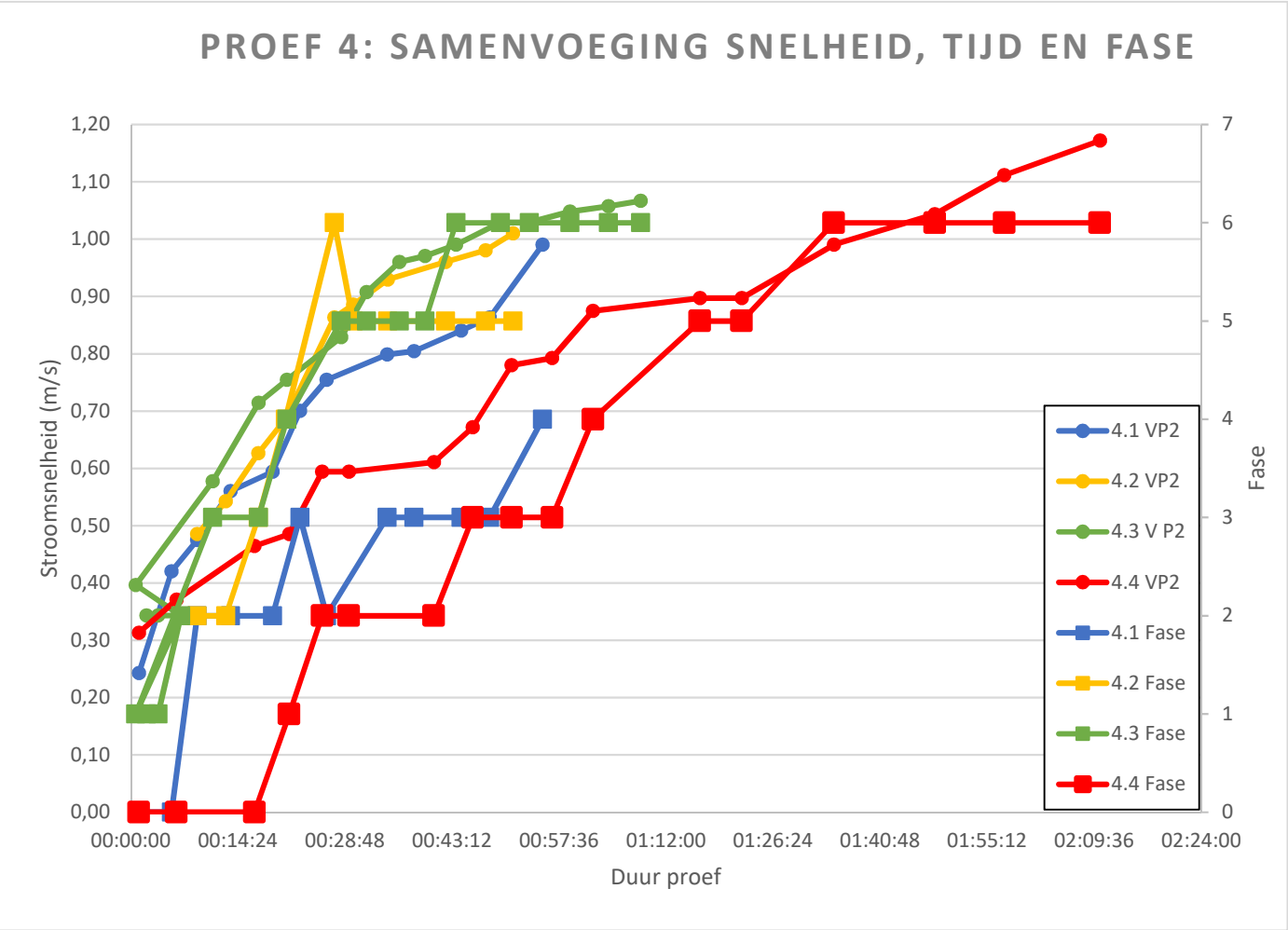
Proef	3.4 Oesterkooi			
Stap	Tijd	V P2	Fase Kooi	Fase Kooi 2
0	0,00	0,40	0,00	
1	00:04:13	0,44	1	0
2	00:06:43	0,51	1	0
3	00:08:08	0,51	0	0
4	00:11:18	0,63	0	0
5	00:13:27	0,71	0	0
6	00:18:38	0,79	0	0
7	00:25:18	0,81	0	1
8	00:30:21	0,89	0	2
9	00:35:08	0,94	0	2
10	00:37:48	0,98	2	2
11	00:42:13	1,07	2	2

Proef		3.2 Oesterkooi		
Stap	Tijd	V P2	Fase Kooi 1	Fase Kooi 2
1	00:10:59	0,56	0	0
2	00:13:50	0,65	1	0
3	00:15:00	0,73	2	2



Verzameltabel Proef 4 Schelpmateriaal op bodembescherming

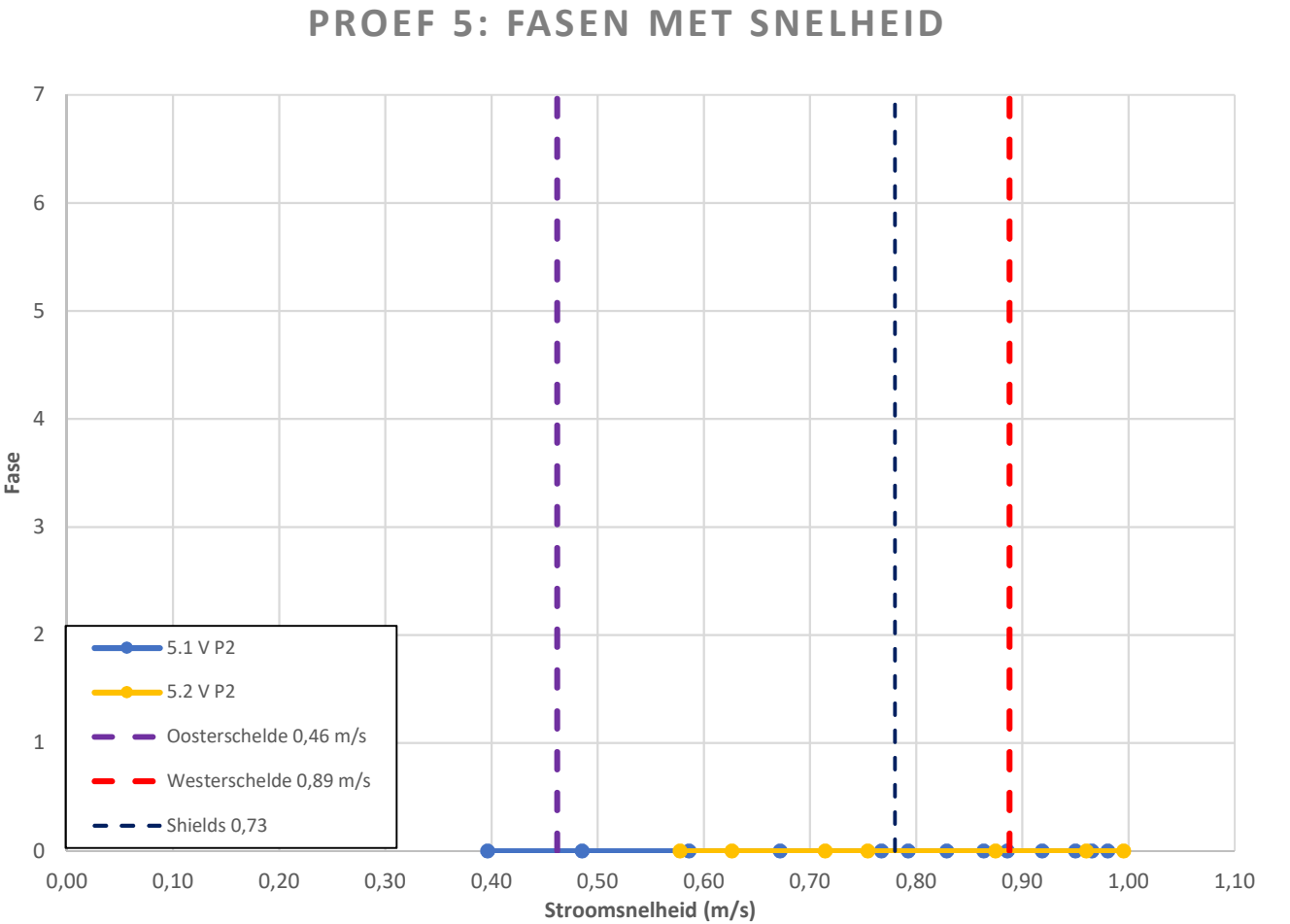
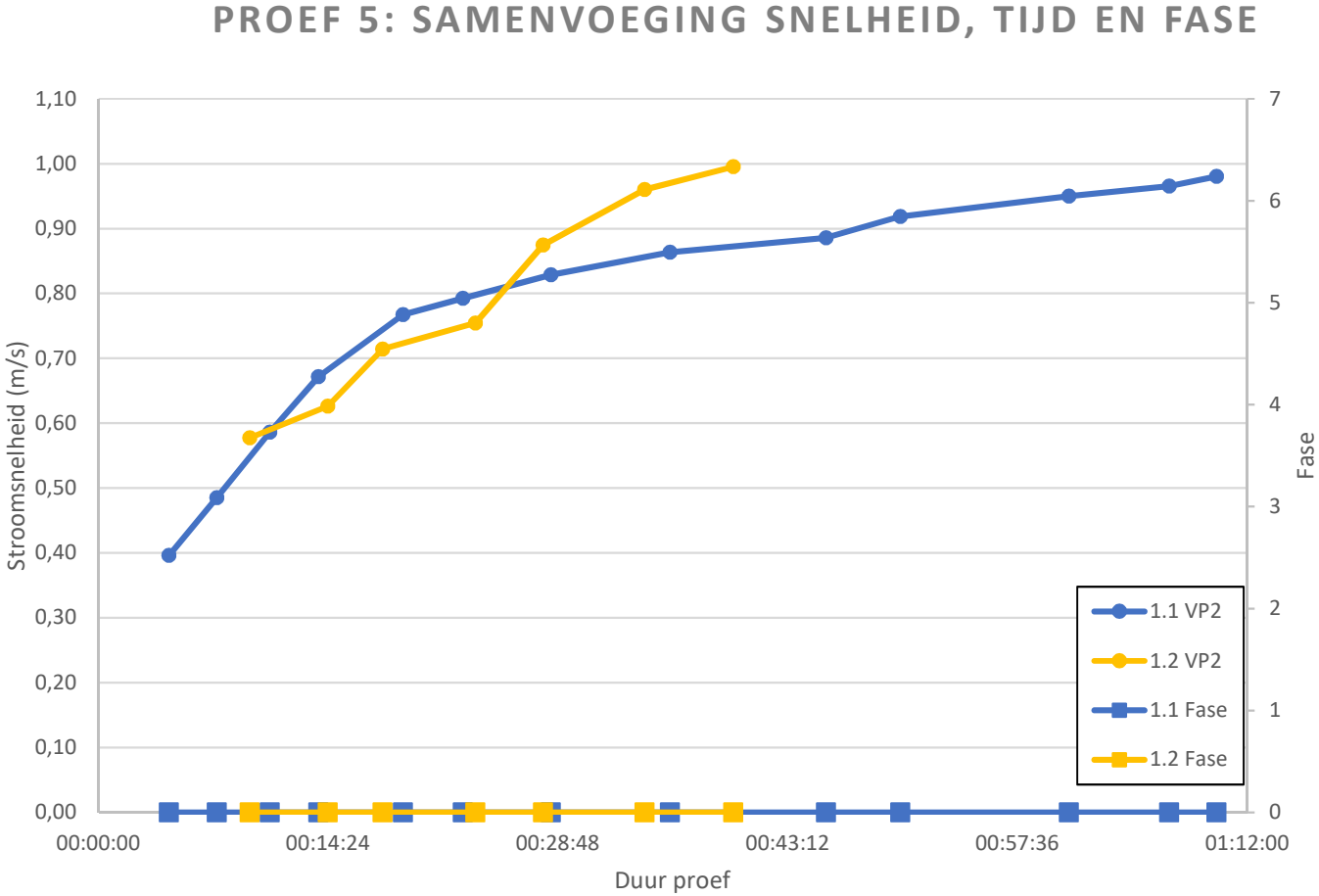
Proet 4.1				Proet 4.2				Proet 4.3				Proet 4.4			
Stap	Tijd	V P2	Fase	Stap	Tijd	V P2	Fase	Stap	Tijd	V P2	Fase	Stap	Tijd	V P2	Fase
1	00:01:03	0,24	0	1	00:08:54	0,49	2	1	00:02:03	0,34	1	1	00:01:03	0,31	0
2	00:05:26	0,42	0	2	00:12:45	0,54	2	2	00:03:37	0,34	1	2	00:06:07	0,37	0
3	00:08:54	0,48	2	3	00:17:08	0,63	3	3	00:06:40	0,34	2	3	00:16:36	0,46	0
4	00:13:23	0,56	2	4	00:20:47	0,69	4	4	00:00:38	0,40	1	4	00:21:17	0,49	1
5	00:19:03	0,59	2	5	00:27:22	0,86	6	5	00:10:58	0,58	3	5	00:25:43	0,59	2
6	00:22:43	0,70	3	6	00:29:52	0,89	5	6	00:17:09	0,71	3	6	00:29:18	0,59	2
7	00:26:18	0,75	2	7	00:34:32	0,93	5	7	00:20:57	0,75	4	7	00:40:45	0,61	2
8	00:34:28	0,80	3	8	00:42:19	0,96	5	8	00:28:17	0,83	5	8	00:45:58	0,67	3
9	00:38:03	0,80	3	9	00:47:42	0,98	5	9	00:31:42	0,91	5	9	00:51:12	0,78	3
10	00:44:25	0,84	3	10	00:51:24	1,01	5	10	00:36:05	0,96	5	10	00:56:39	0,79	3
11	00:48:15	0,86	3					11	00:39:34	0,97	5	11	01:02:09	0,87	4
12	00:55:22	0,99	4					12	00:43:43	0,99	6	12	01:16:32	0,90	5
								13	00:49:42	1,03	6	13	01:22:09	0,90	5
								14	00:53:36	1,03	6	14	01:34:34	0,99	6
								15	00:59:03	1,05	6	15	01:48:09	1,04	6
								16	01:04:14	1,06	6	16	01:57:30	1,11	6
								17	01:08:34	1,07	6	17	02:10:22	1,17	6



Verzameltabel Proef 5 0-meting Vooroever

Proet	5.1			
Stap	Tijd	V P2	Fase	
1	00:04:25	0,40	0	
2	00:07:25	0,49	0	
3	00:10:45	0,59	0	
4	00:13:47	0,67	0	
5	00:19:05	0,77	0	
6	00:22:50	0,79	0	
7	00:28:21	0,83	0	
8	00:35:49	0,86	0	
9	00:45:36	0,89	0	
10	00:50:15	0,92	0	
11	01:00:50	0,95	0	
12	01:07:07	0,97	0	
13	01:10:05	0,98	0	

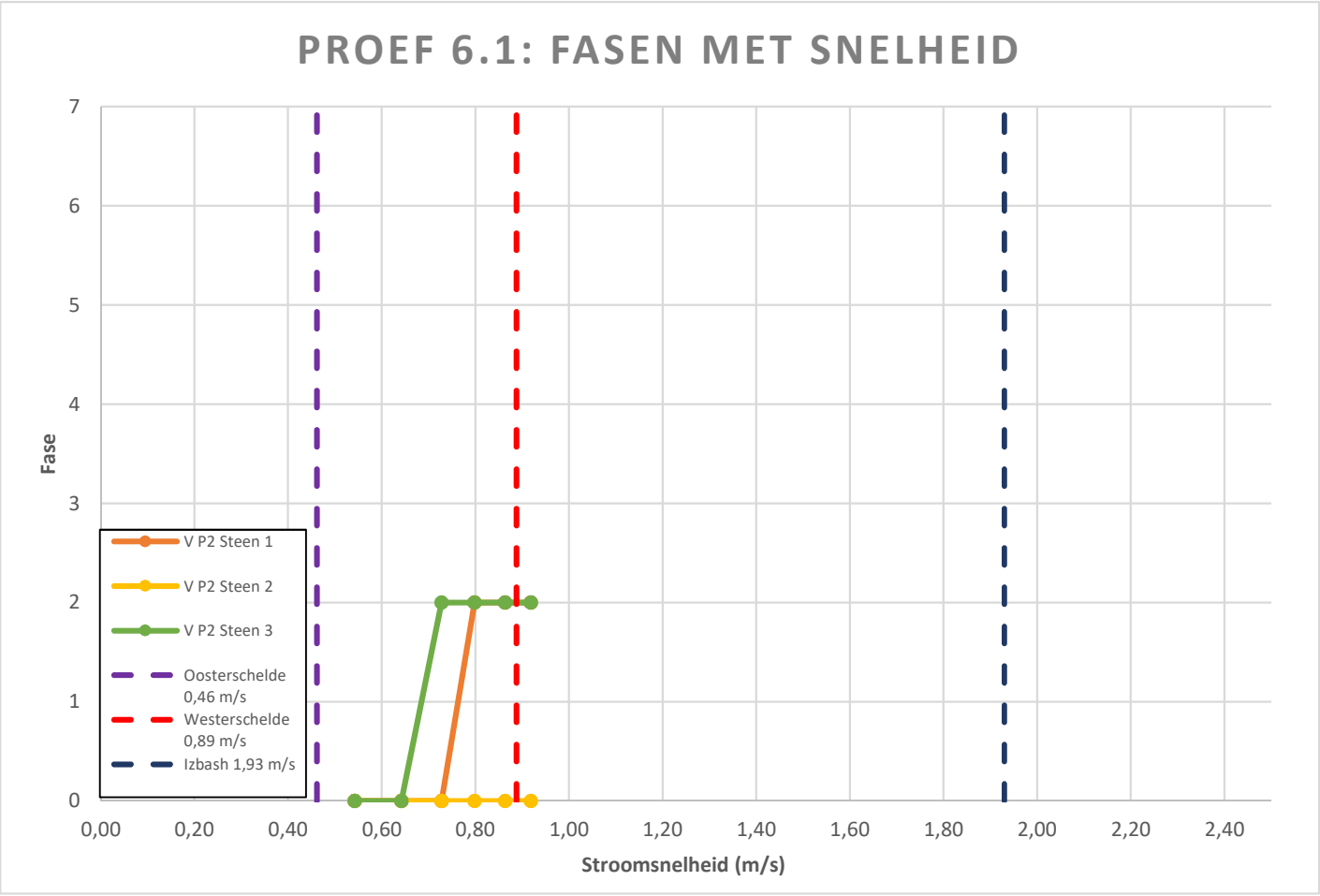
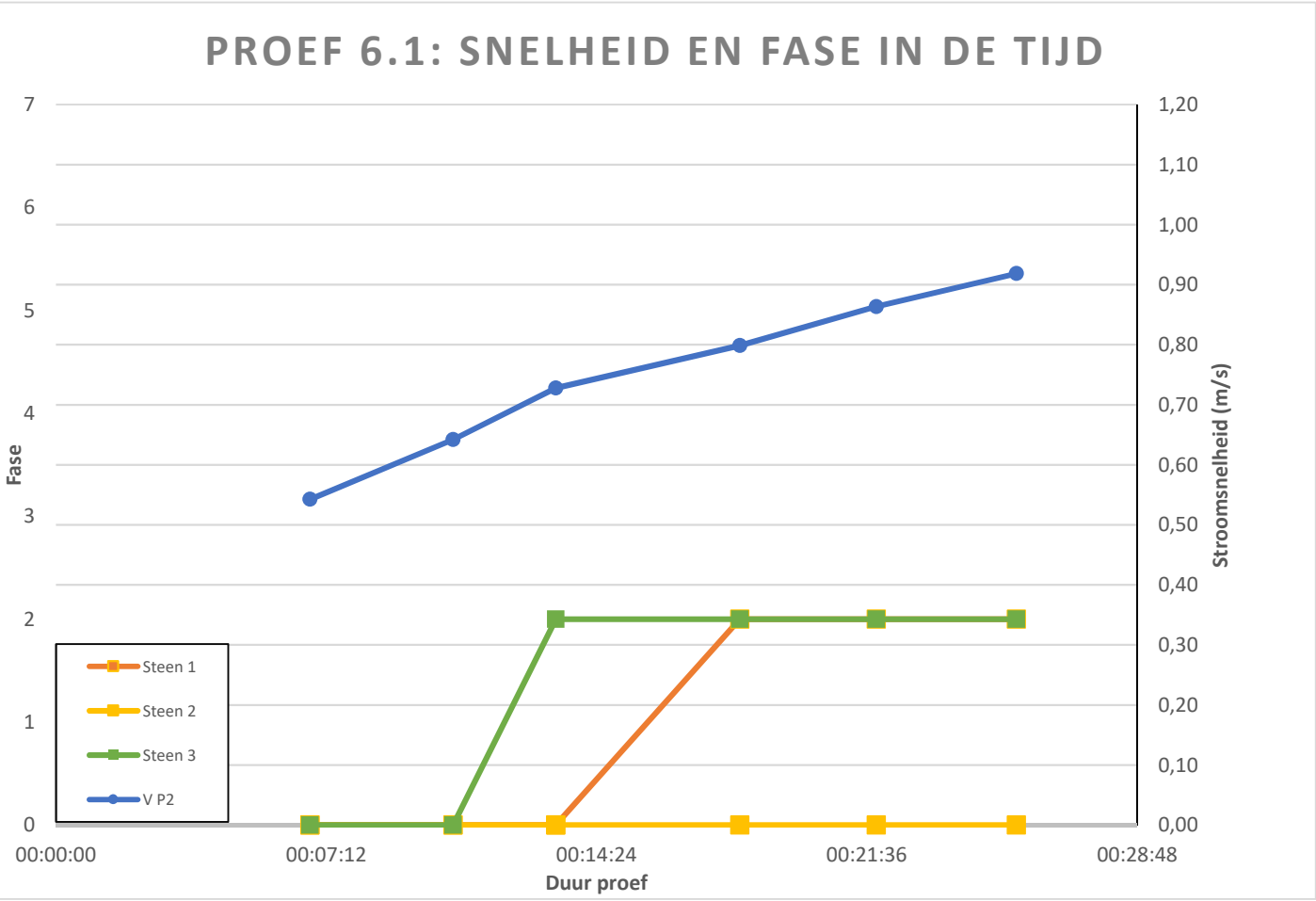
Proet	5.2			
Stap	Tijd	V P2	Fase	
1	00:09:29	0,58	0	
2	00:14:22	0,63	0	
3	00:17:49	0,71	0	
4	00:23:37	0,75	0	
5	00:27:52	0,87	0	
6	00:34:14	0,96	0	
7	00:39:47	1,00	0	



Verzameltabel Proef 6 Grote stenen vooroever

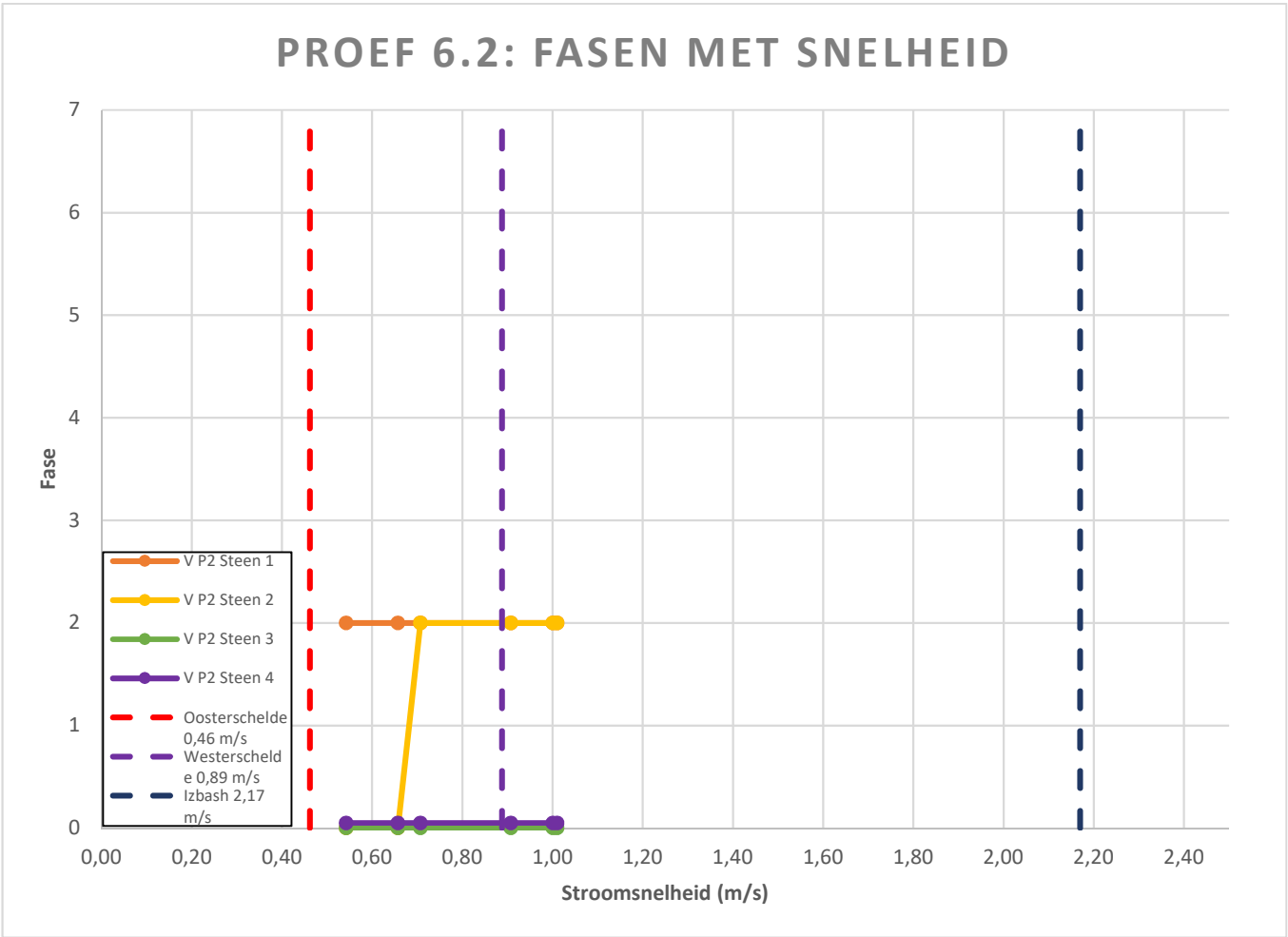
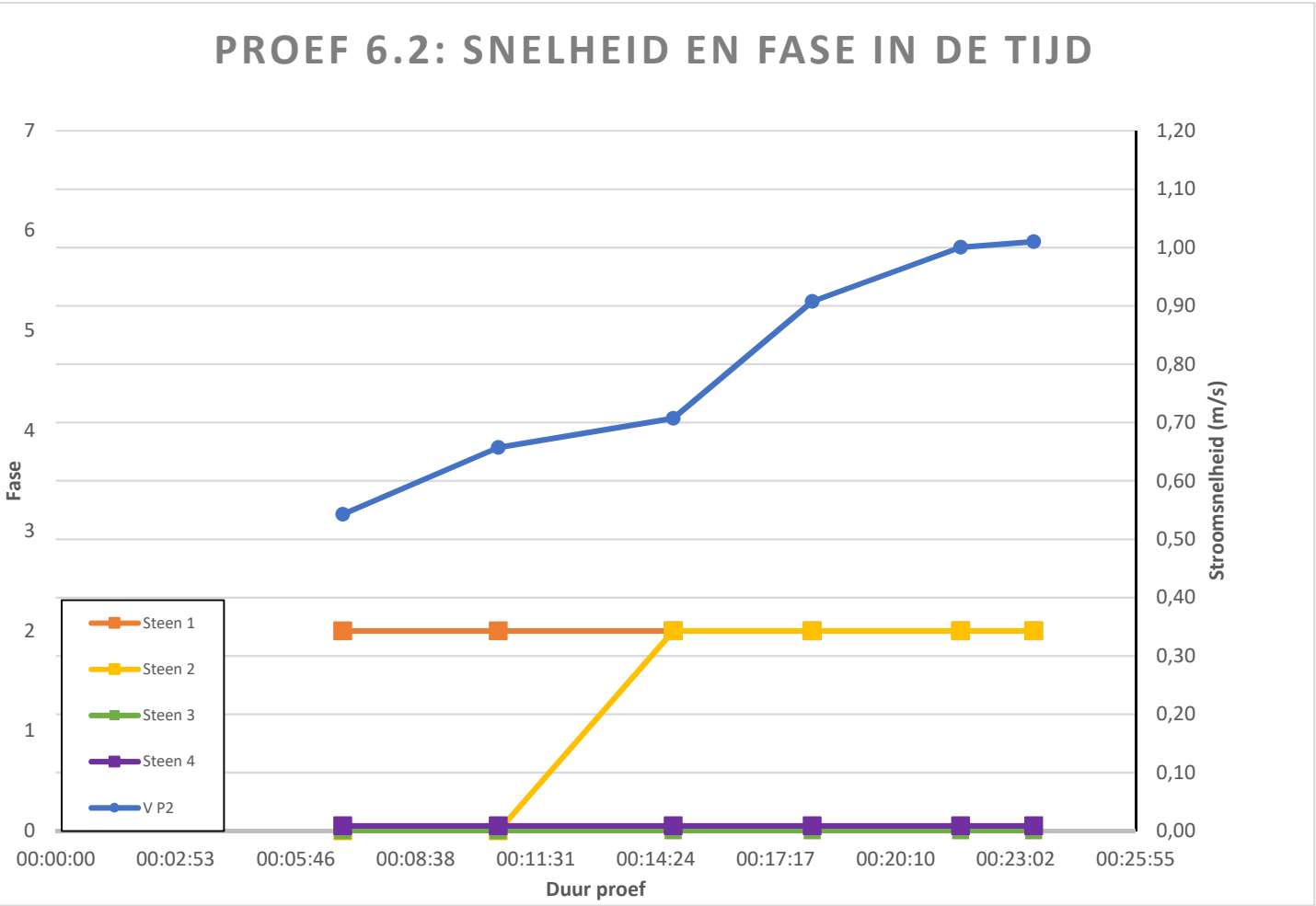
Proef 6.1 (0,5 Kg)

Stap	Tijd	V P2	Fase Steen 1	Fase Steen 2	Fase Steen 3
1	00:06:46	0,54	0	0	0
2	00:10:35	0,64	0	0	0
3	00:13:19	0,73	0	0	2
4	00:18:13	0,80	2	0	2
5	00:21:51	0,86	2	0	2
6	00:25:35	0,92	2	0	2



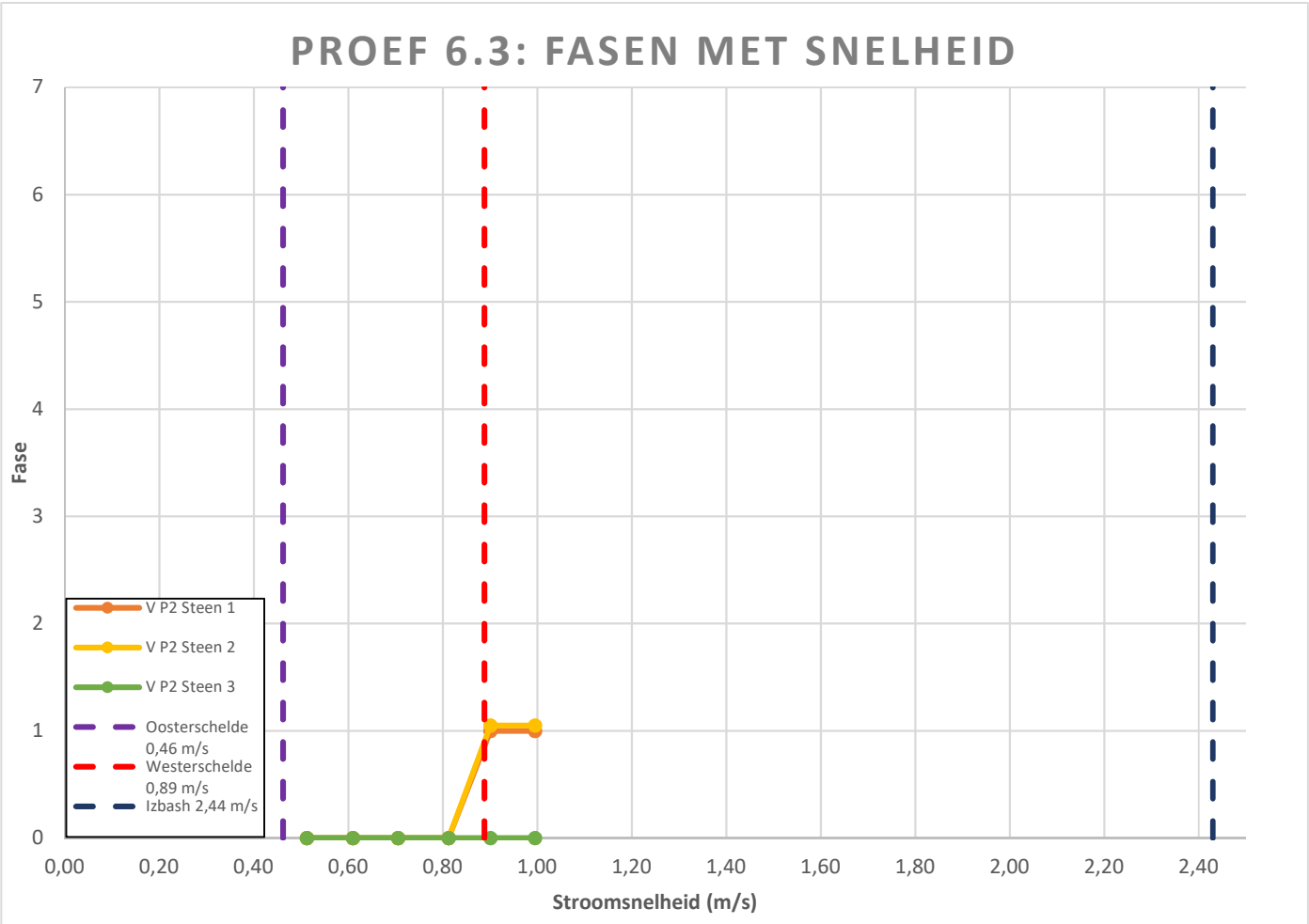
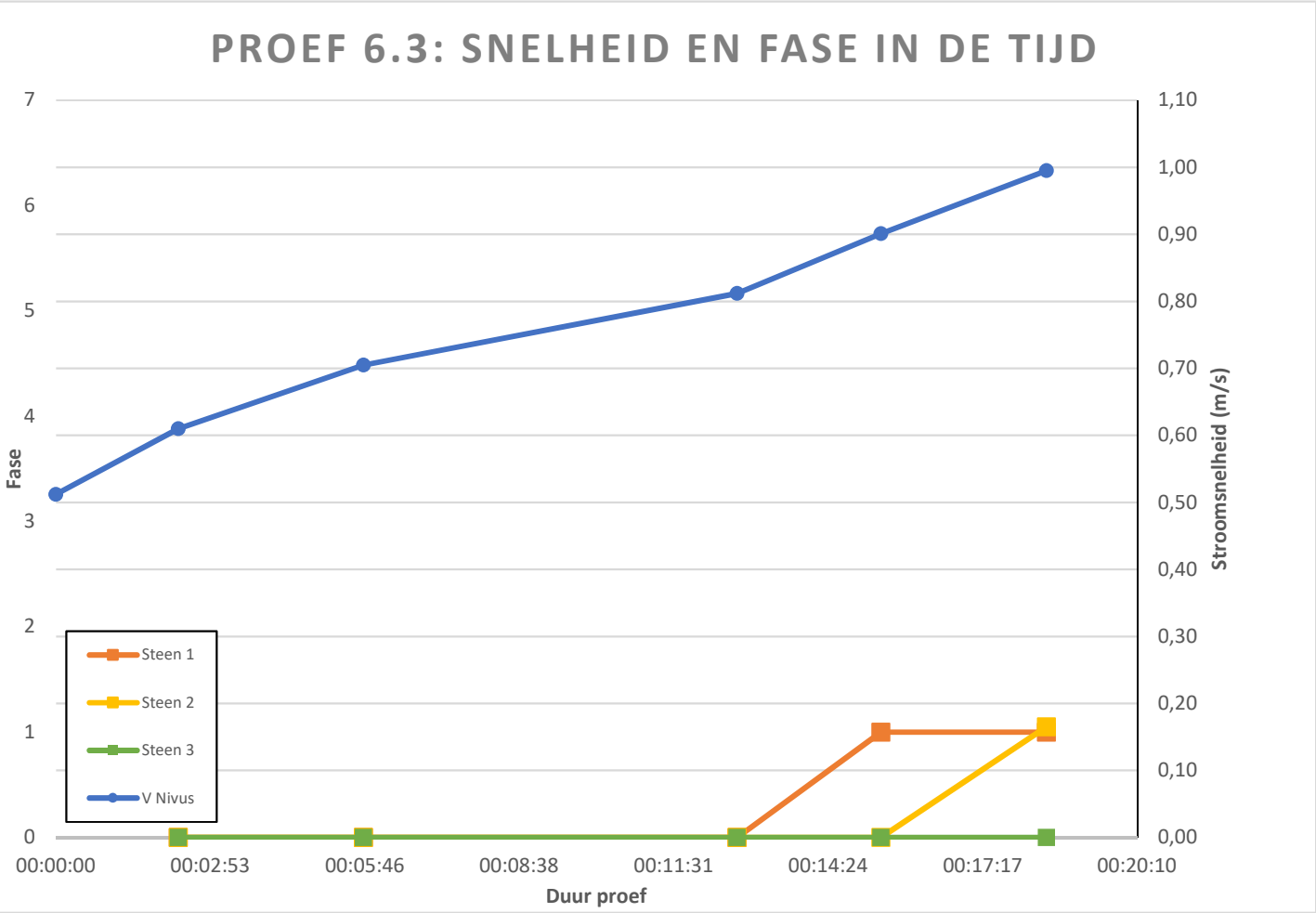
Verzameltabel Proef 6 Grote stenen vooroever

Proef	6.2 (1 Kg)					
Stap	Tijd	V P2	Fase Steen 1	Fase Steen 2	Fase Steen 3	Fase Steen 4
1	00:06:53	0,54	2	0	0	0
2	00:10:37	0,66	2	0	0	0
3	00:14:49	0,71	2	2	0	0
4	00:18:09	0,91	2	2	0	0
5	00:21:43	1,00	2	2	0	0
6	00:23:28	1,01	2	2	0	0



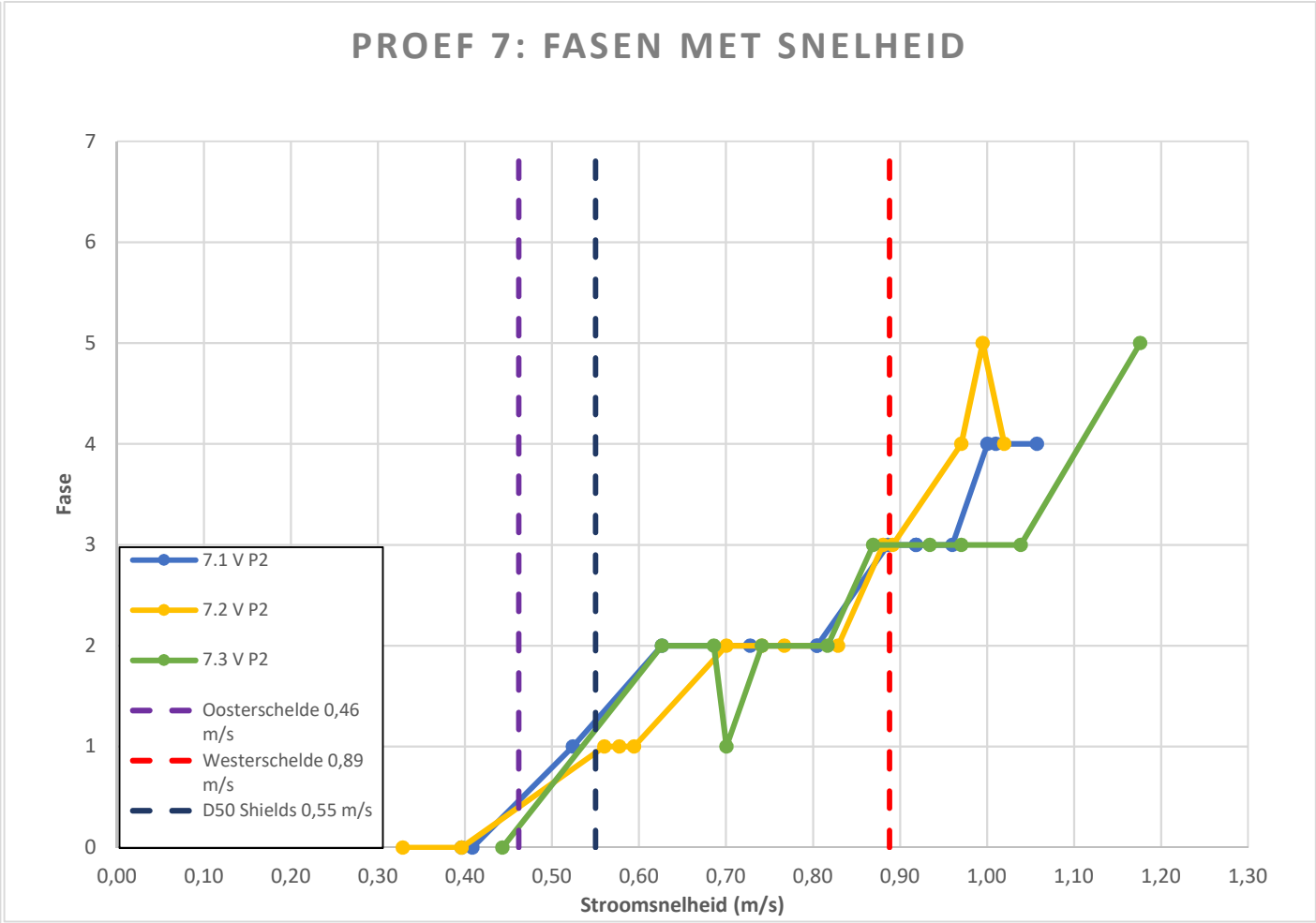
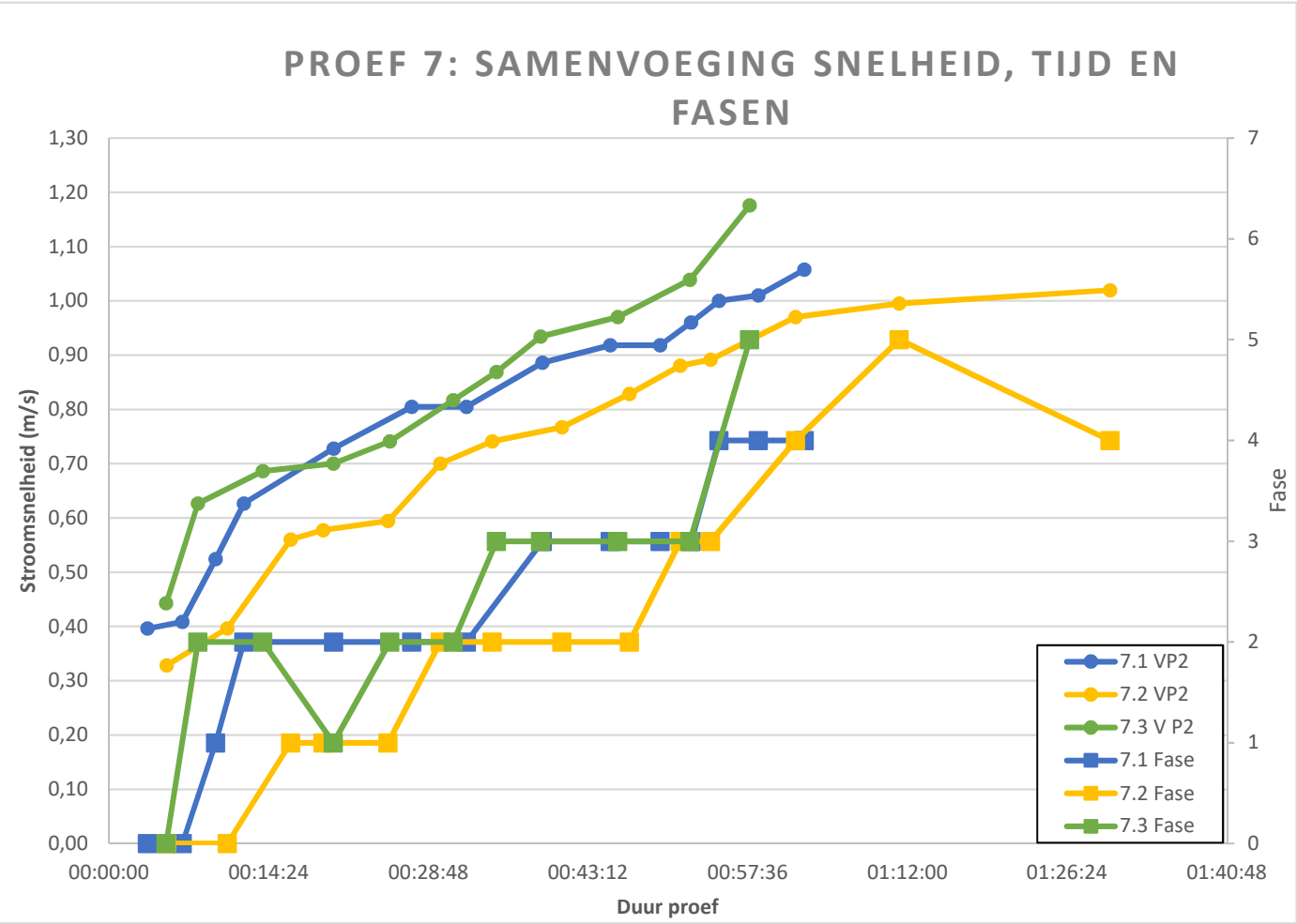
Verzameltabel Proef 6 Grote stenen vooroever

Proef	6.3(2 Kg)				
Stap	Tijd	V Nivus	Fase Steen 1	Fase Steen 2	Fase Steen 3
1	00:00:00	0,543	0	0	0
2	00:02:17	0,616	0	0	0
3	00:05:44	0,710	0	0	0
4	00:12:42	0,806	0	0	0
5	00:15:23	0,896	1	1	0
6	00:18:28	1,010	1	1	0



Verzameltabel Proef 7 Kleine steengradatie op vooroever

Proet 7.1				Proet 7.2				Proet 7.3			
Stap	Tijd	V P2	Fase	Stap	Tijd	V P2	Fase	Stap	Tijd	V P2	Fase
1	00:03:28	0,40	0	1	00:05:12	0,33	0	1	00:05:09	0,44	0
2	00:06:36	0,41	0	2	00:10:39	0,40	0	2	00:08:00	0,63	2
3	00:09:36	0,52	1	3	00:16:23	0,56	1	3	00:13:52	0,69	2
4	00:12:09	0,63	2	4	00:19:18	0,58	1	4	00:20:14	0,70	1
5	00:20:15	0,73	2	5	00:25:09	0,59	1	5	00:25:19	0,74	2
6	00:27:18	0,80	2	6	00:29:52	0,70	2	6	00:31:02	0,82	2
7	00:32:13	0,80	2	7	00:34:33	0,74	2	7	00:34:55	0,87	3
8	00:39:04	0,89	3	8	00:40:50	0,77	2	8	00:38:55	0,93	3
9	00:45:12	0,92	3	9	00:46:55	0,83	2	9	00:45:52	0,97	3
10	00:49:42	0,92	3	10	00:51:30	0,88	3	10	00:52:22	1,04	3
11	00:52:28	0,96	3	11	00:54:15	0,89	3	11	00:57:46	1,18	5
12	00:54:59	1,00	4	12	01:01:54	0,97	4				
13	00:58:32	1,01	4	13	01:11:15	1,00	5				
14	01:02:41	1,06	4	14	01:30:15	1,02	4				



Verzameltabel Proef 8 Schelpmateriaal op vooroeverbescherming

Proet 8.1

Stap	Tijd	V P2	Fase
1	00:00:00		0
2	00:02:30	0,24	0
3	00:10:21	0,34	0
4	00:15:06	0,40	1
5	00:18:58	0,48	2
6	00:22:50	0,50	2
7	00:29:16	0,54	2
8	00:35:20	0,60	2
9	00:42:15	0,64	3
10	00:51:37	0,67	3
11	00:57:41	0,72	4
12	01:10:10	0,79	5
13	01:23:09	0,82	5
14	01:26:50	0,84	5

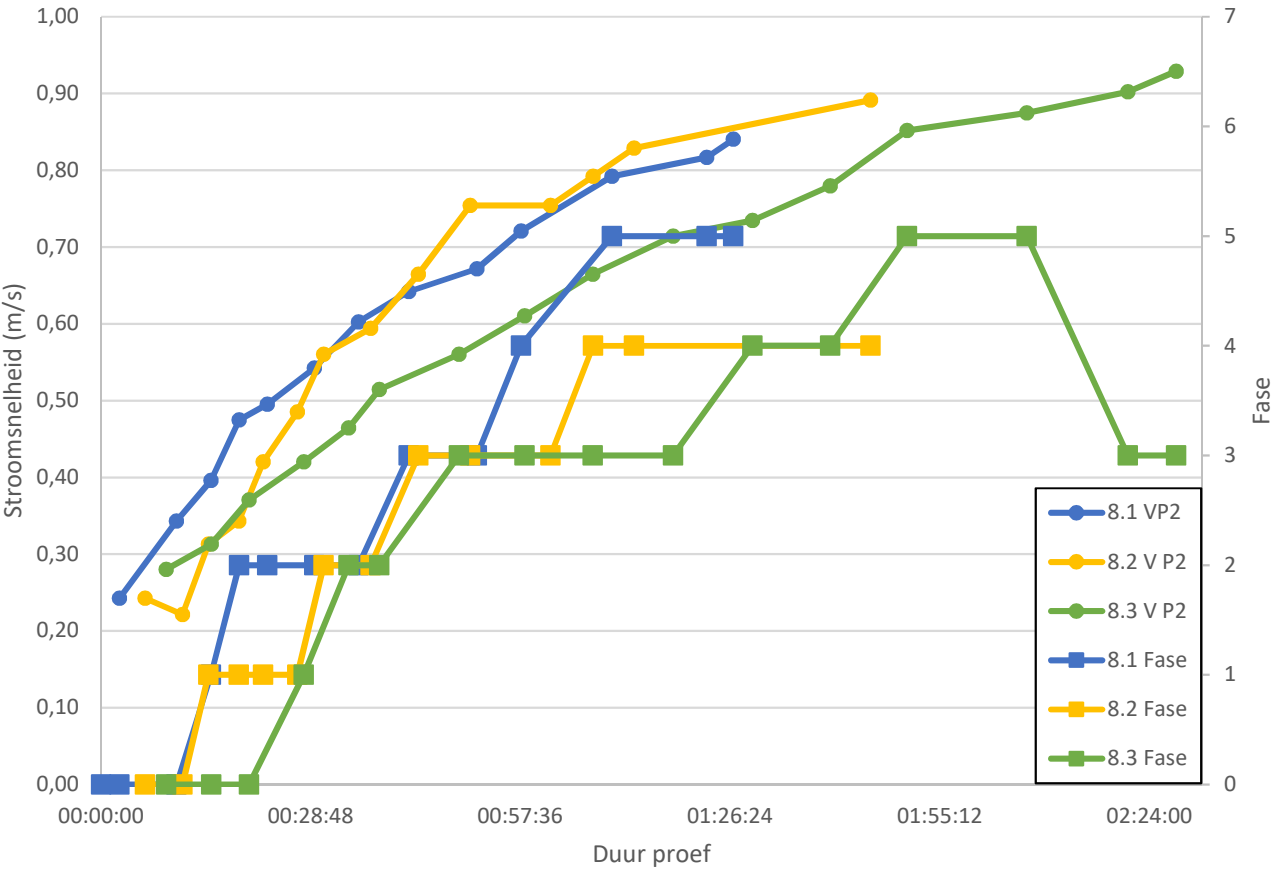
Proet 8.2

Stap	Tijd	V P2	Fase
1	00:06:02	0,24	0
2	00:11:11	0,22	0
3	00:14:45	0,31	1
4	00:18:55	0,34	1
5	00:22:15	0,42	1
6	00:26:57	0,49	1
7	00:30:34	0,56	2
8	00:37:02	0,59	2
9	00:43:33	0,66	3
10	00:50:41	0,75	3
11	01:01:43	0,75	3
12	01:07:34	0,79	4
13	01:13:11	0,83	4
14	01:45:40	0,89	4

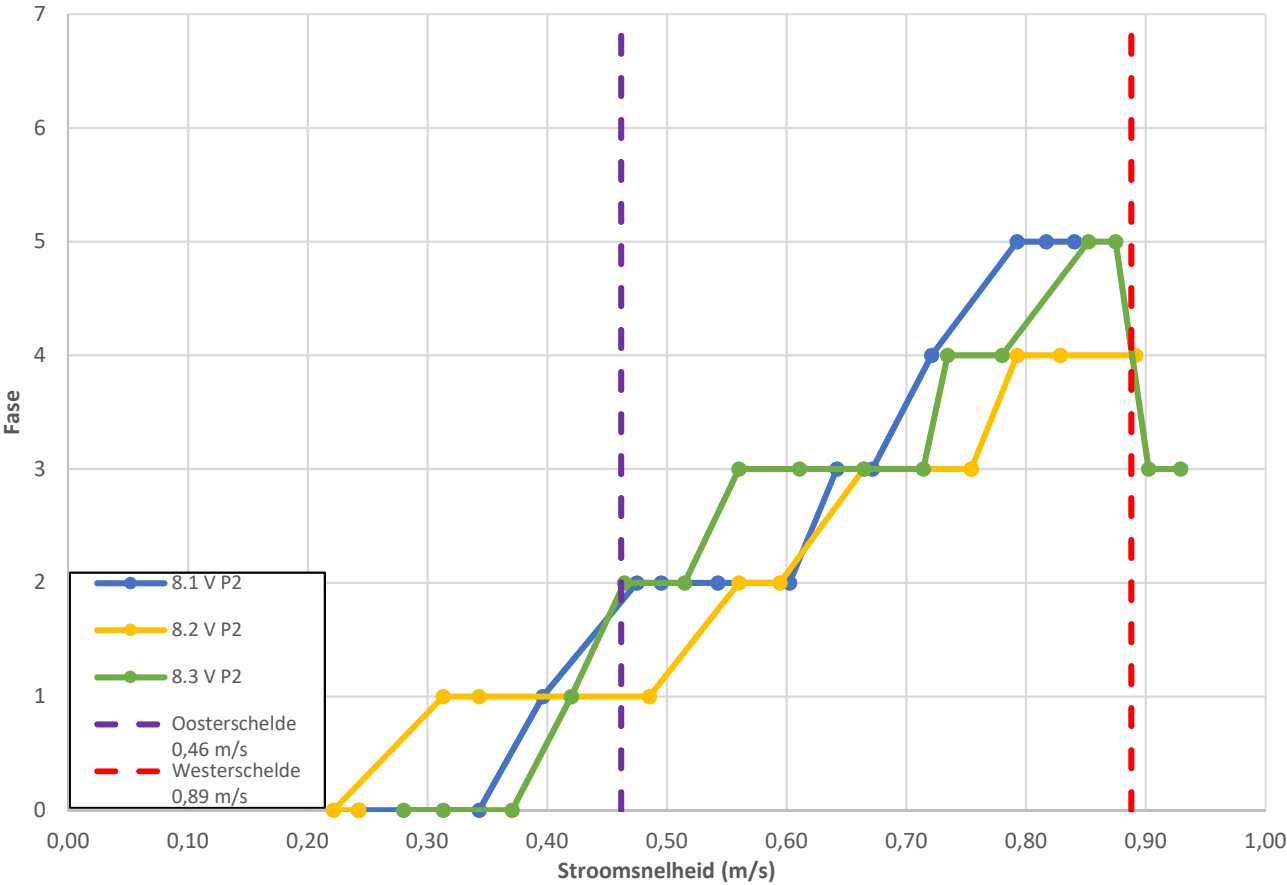
Proet 8.3

Stap	Tijd	V P2	Fase
1	00:08:56	0,28	0
2	00:15:08	0,31	0
3	00:20:19	0,37	0
4	00:27:49	0,42	1
5	00:33:59	0,46	2
6	00:38:12	0,51	2
7	00:49:09	0,56	3
8	00:58:09	0,61	3
9	01:07:30	0,66	3
10	01:18:32	0,71	3
11	01:29:26	0,73	4
12	01:40:07	0,78	4
13	01:50:41	0,85	5
14	02:07:08	0,87	5
15	02:21:01	0,90	3
16	02:27:40	0,93	3

PROEF 8: SAMENVOEGING SNELHEID, TIJD EN FASE

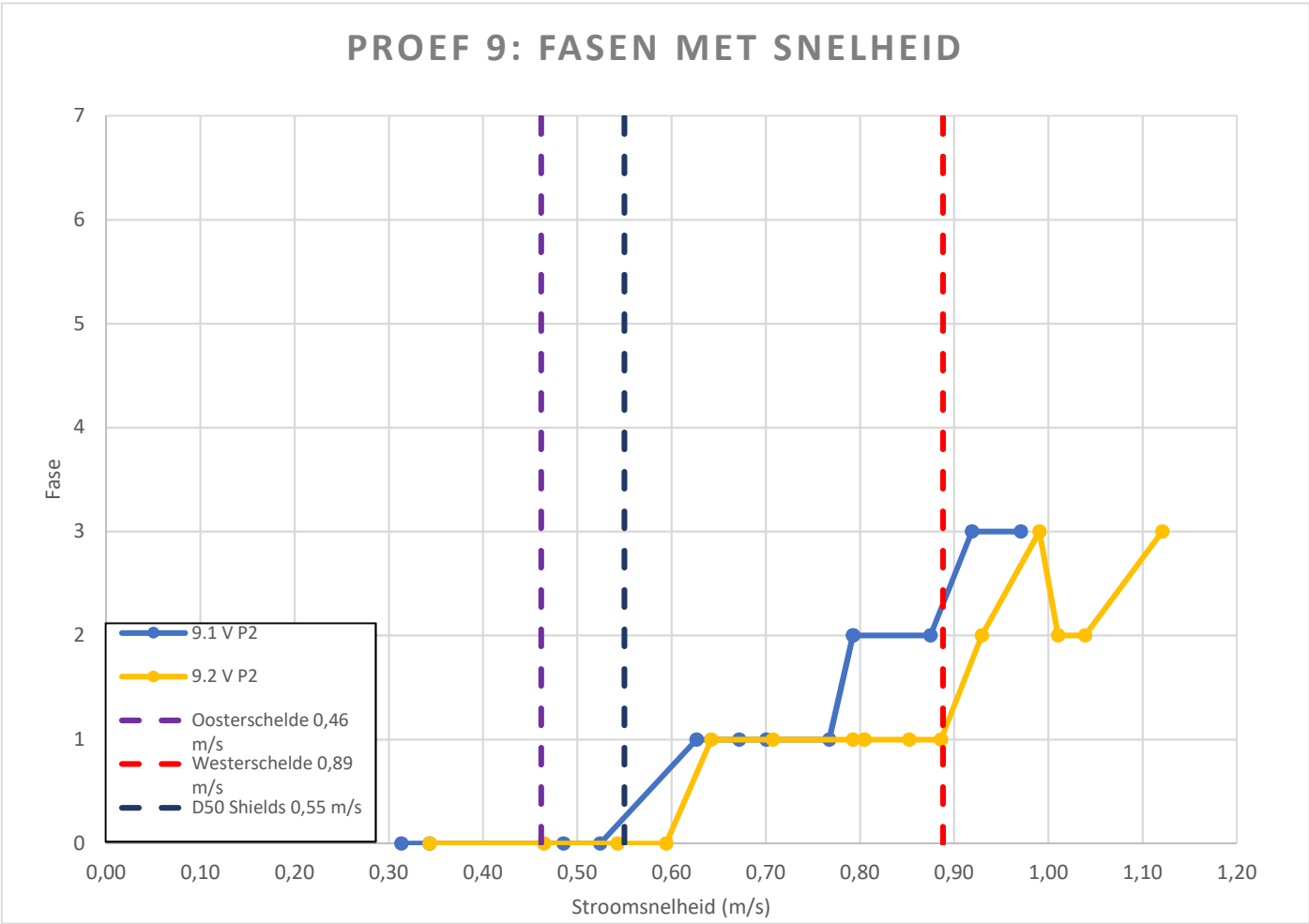
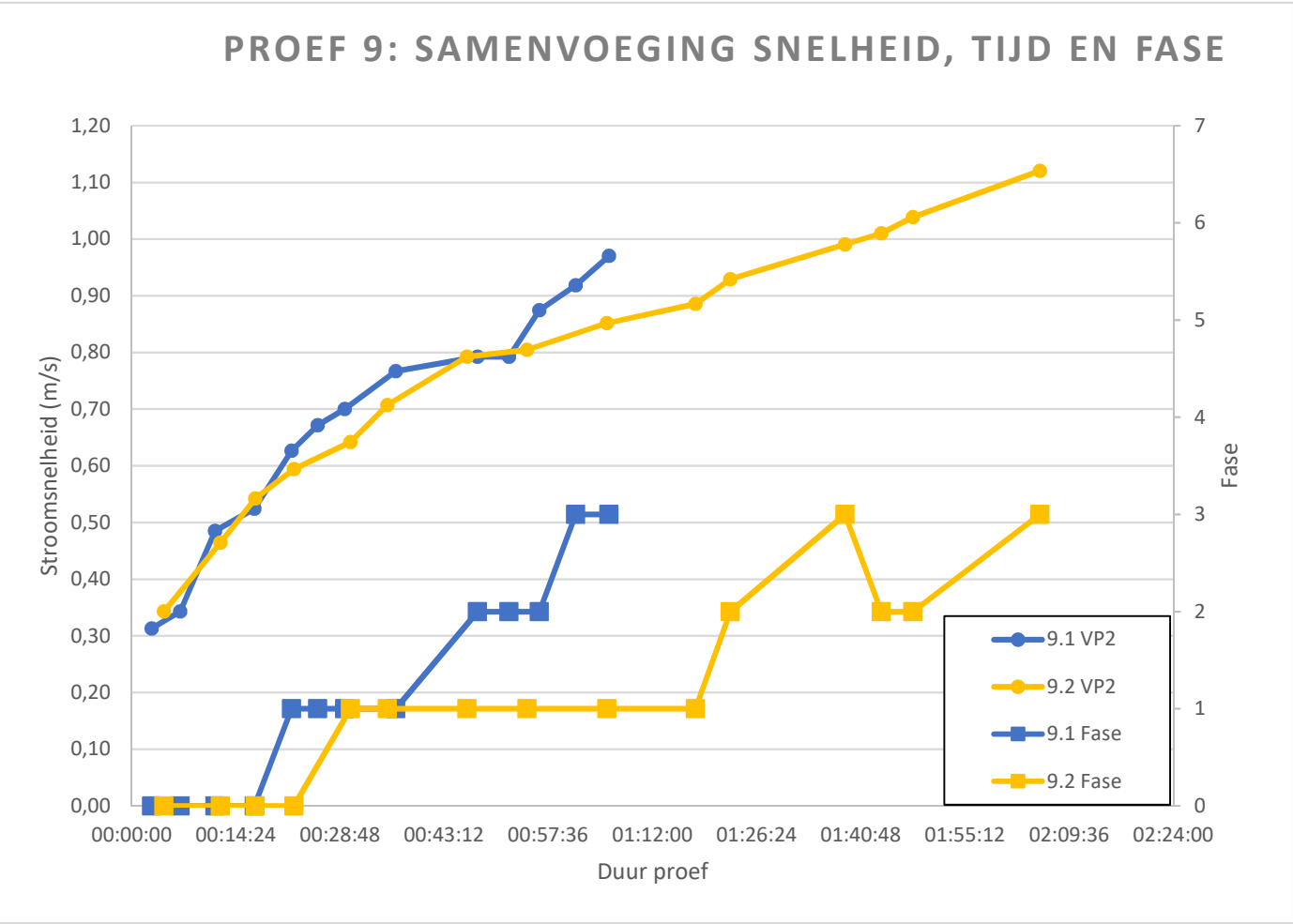


PROEF 8: FASEN MET SNELHEID



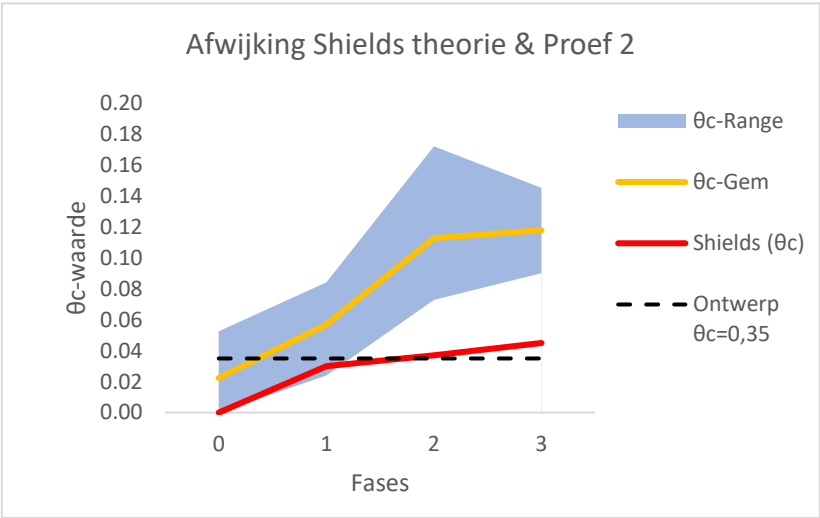
Verzameltabel Proef 9 Kleine steengradatie en schelpmateriaal op vooroeverbescherming

Proef 9.1				Proef 9.2			
Stap	Tijd	V P2	Fase	Stap	Tijd	V P2	Fase
1	00:02:45	0,31	0	1	00:04:27	0,34	0
2	00:06:41	0,34	0	2	00:12:16	0,46	0
3	00:11:30	0,49	0	3	00:17:04	0,54	0
4	00:16:56	0,52	0	4	00:22:25	0,59	0
5	00:22:06	0,63	1	5	00:30:15	0,64	1
6	00:25:42	0,67	1	6	00:35:19	0,71	1
7	00:29:27	0,70	1	7	00:46:19	0,79	1
8	00:36:30	0,77	1	8	00:54:37	0,80	1
9	00:47:48	0,79	2	9	01:05:40	0,85	1
10	00:52:08	0,79	2	10	01:17:56	0,89	1
11	00:56:20	0,87	2	11	01:22:44	0,93	2
12	01:01:22	0,92	3	12	01:38:36	0,99	3
13	01:05:59	0,97	3	13	01:43:36	1,01	2
				14	01:47:59	1,04	2
				15	02:05:32	1,12	3

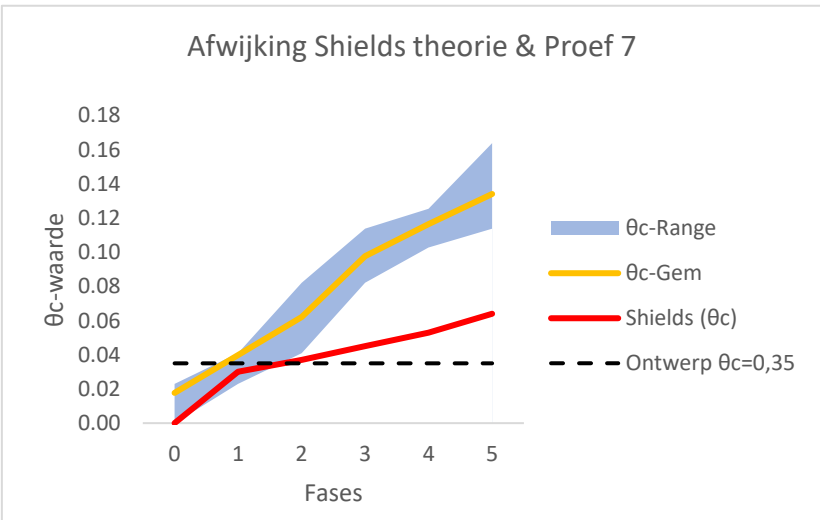


2 Shields vergelijking met resultaten

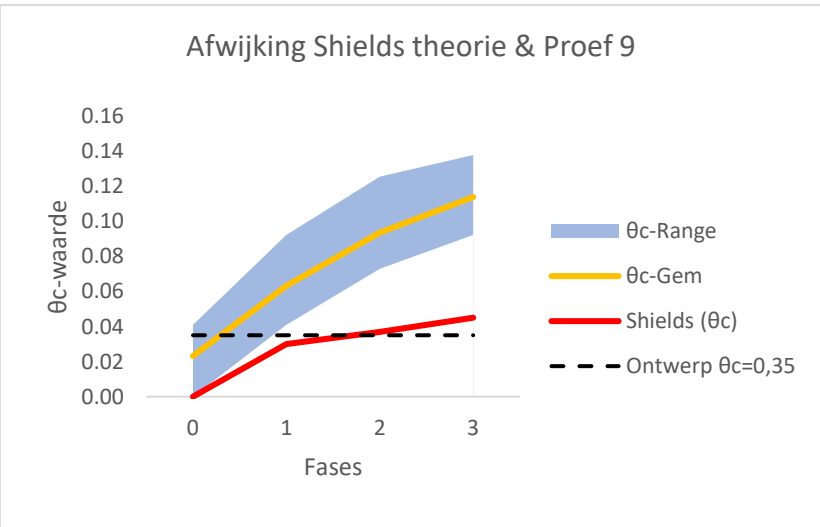
Kleine steengradatie (3-9 mm)												
Fase	θ_c -waarde	Shields Stroomsnelheid (m/s)	Resultaten - Proef 2									
			$U_{\min}$ (m/s)	$U_{\max}$ max (m/s)	U_{gem} (m/s)	θ_c -min	θ_c -max	θ_c -gem				
0	0,00	0,46	0,00	0,68	0,44	0,00	0,05	0,02				
1	0,03	0,46	0,46	0,86	0,71	0,02	0,08	0,06				
2	0,04	0,51	0,80	1,23	1,00	0,07	0,17	0,11				
3	0,05	0,56	0,89	1,13	1,02	0,09	0,15	0,12				
4	0,05	0,61	-	-	-	-	-	-				
5	0,06	0,67	-	-	-	-	-	-				
6	0,07	0,71	-	-	-	-	-	-				
7	0,08	0,74	-	-	-	-	-	-				
Fase	θ_c -waarde	Shields Stroomsnelheid (m/s)	Resultaten - Proef 7									
			$U_{\min}$ (m/s)	$U_{\max}$ max (m/s)	U_{gem} (m/s)	θ_c -min	θ_c -max	θ_c -gem				
0	0,00	0,46	0,00	0,45	0,39	0,00	0,02	0,02				
1	0,03	0,46	0,45	0,60	0,59	0,02	0,04	0,04				
2	0,04	0,51	0,60	0,85	0,74	0,04	0,08	0,06				
3	0,05	0,56	0,85	1,00	0,93	0,08	0,11	0,10				
4	0,05	0,61	0,95	1,05	1,01	0,10	0,13	0,12				
5	0,06	0,67	1,00	1,20	1,09	0,11	0,16	0,13				
6	0,07	0,71	-	-	-	-	-	-				
7	0,08	0,74	-	-	-	-	-	-				
Fase	θ_c -waarde	Shields Stroomsnelheid (m/s)	Resultaten - Proef 9									
			$U_{\min}$ (m/s)	$U_{\max}$ max (m/s)	U_{gem} (m/s)	θ_c -min	θ_c -max	θ_c -gem				
0	0,00	0,46	0,00	0,60	0,45	0,00	0,04	0,02				
1	0,03	0,46	0,60	0,90	0,74	0,04	0,09	0,06				
2	0,04	0,51	0,80	1,05	0,91	0,07	0,13	0,09				
3	0,05	0,56	0,90	1,10	1,00	0,09	0,14	0,11				
4	0,05	0,61	-	-	-	-	-	-				
5	0,06	0,67	-	-	-	-	-	-				
6	0,07	0,71	-	-	-	-	-	-				
7	0,08	0,74	-	-	-	-	-	-				
Vaste Waarden			Formules		Opmerking							
Chezy	28,013445	-	$Re_* = \frac{U_* d}{\nu}$	$C = 18 * \log \frac{12 * h}{k}$	Shields waarden zijn bepaald aan de hand van de grafiek. (Alle proeven hebben een Re^* -waarde boven de 200)							
k	0,1	-										
h	0,3	m	$\theta_c = \frac{u_c^2}{C^2 * \Delta * d}$	$u_{*c} = u_c * \frac{\sqrt{g}}{C}$								
Δ	2	-										
d-kl. Steen	0,0056	m										



Grafiek 2 Afwijking Shields theorie & Proef 2



Grafiek 3 Afwijking Shields theorie & Proef 7

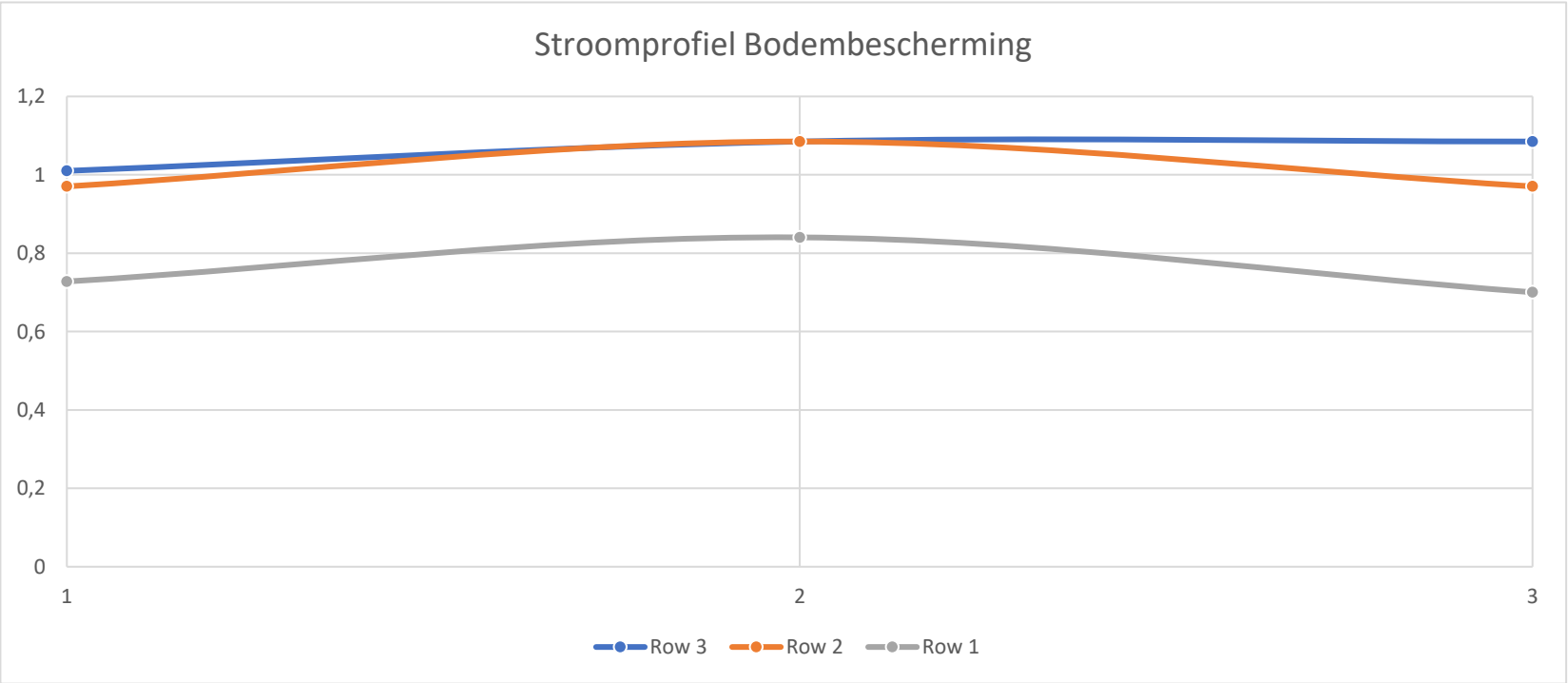
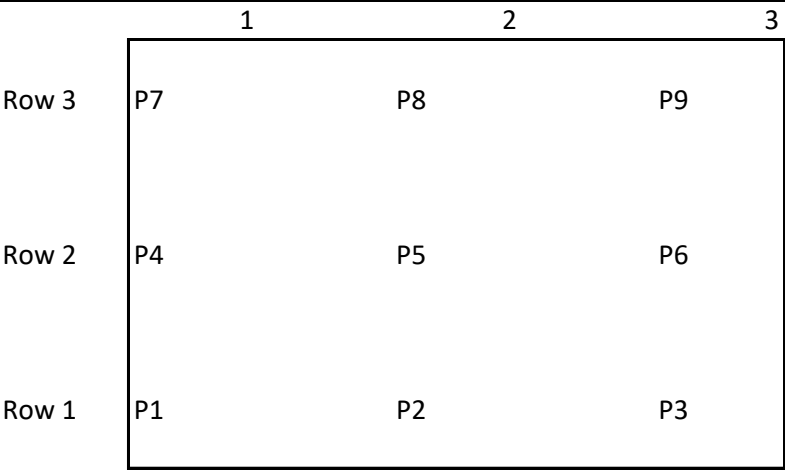


Grafiek 1 Afwijking Shields theorie & Proef 9

3 Stroomprofiel

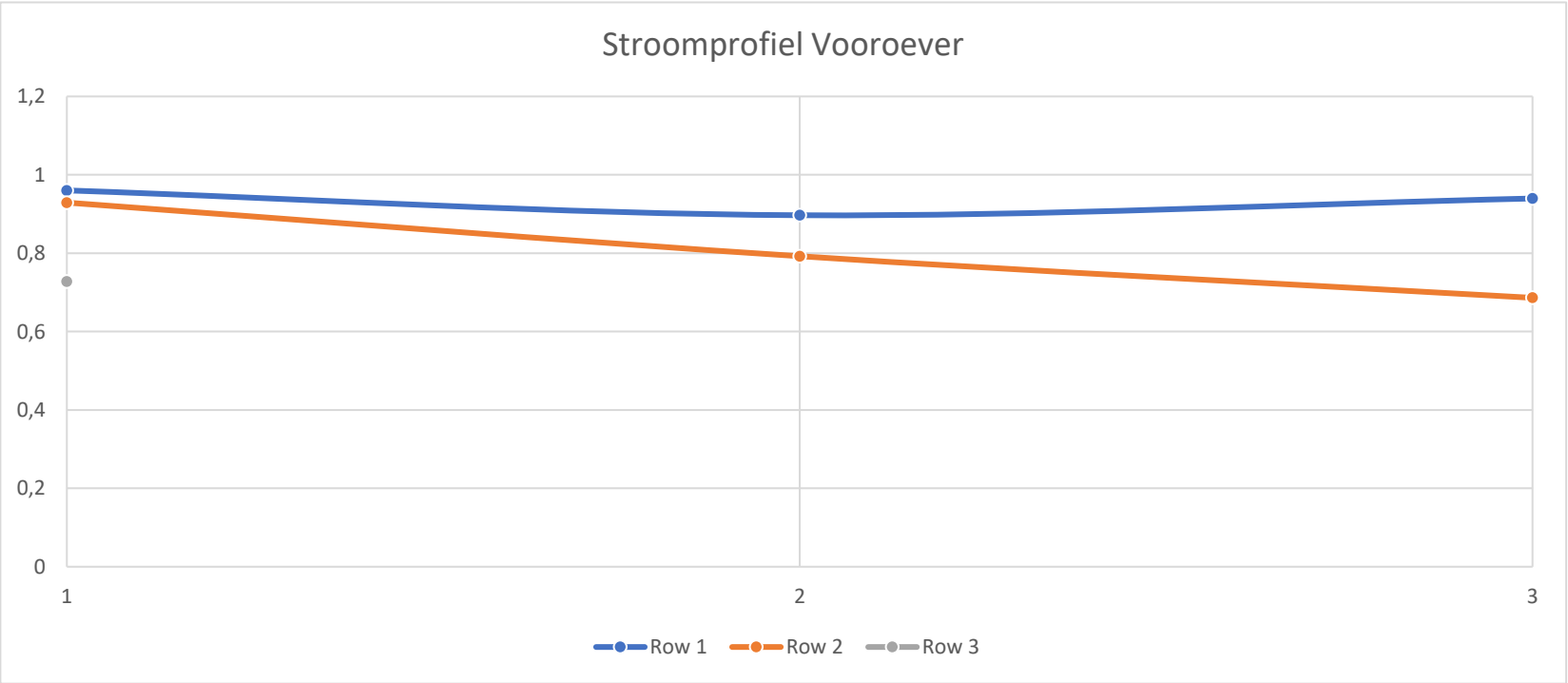
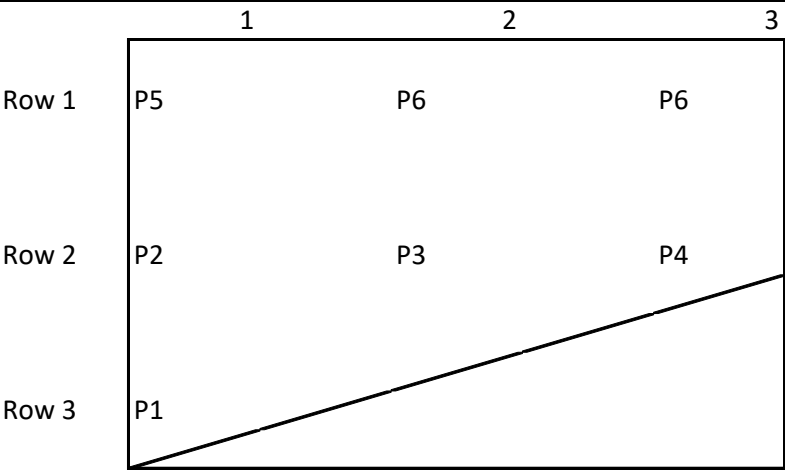
verticaal stroomprofiel bodembescherming

		Δ	m/s
P1	Row 1	27	0,727832
P2	Row 1	36	0,840428
P3	Row 1	25	0,700357
P4	Row 2	48	0,970443
P5	Row 2	60	1,084988
P6	Row 2	48	0,970443
P7	Row 3	52	1,010069
P8	Row 3	60	1,084988
P9	Row 3	60	1,084988



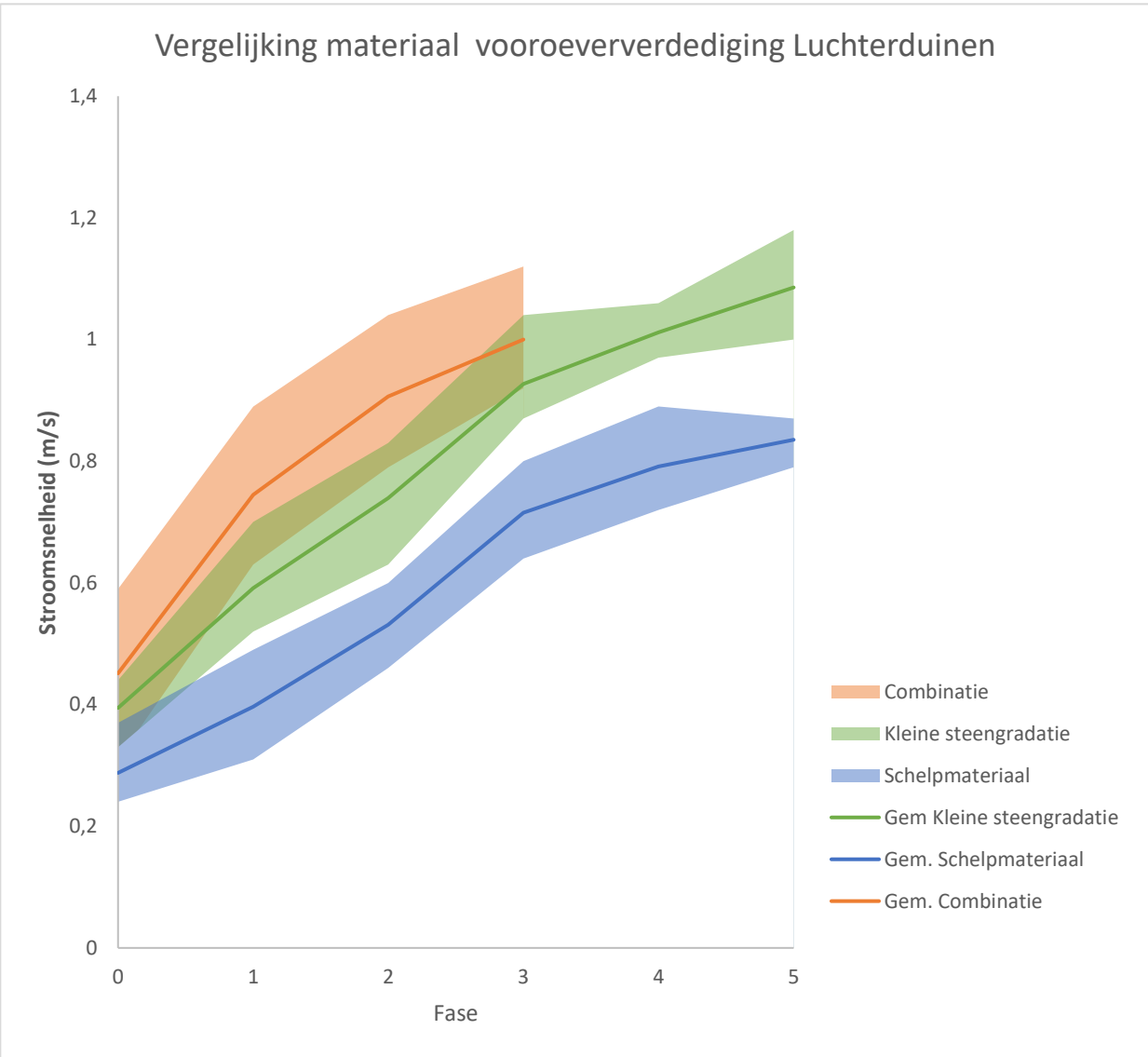
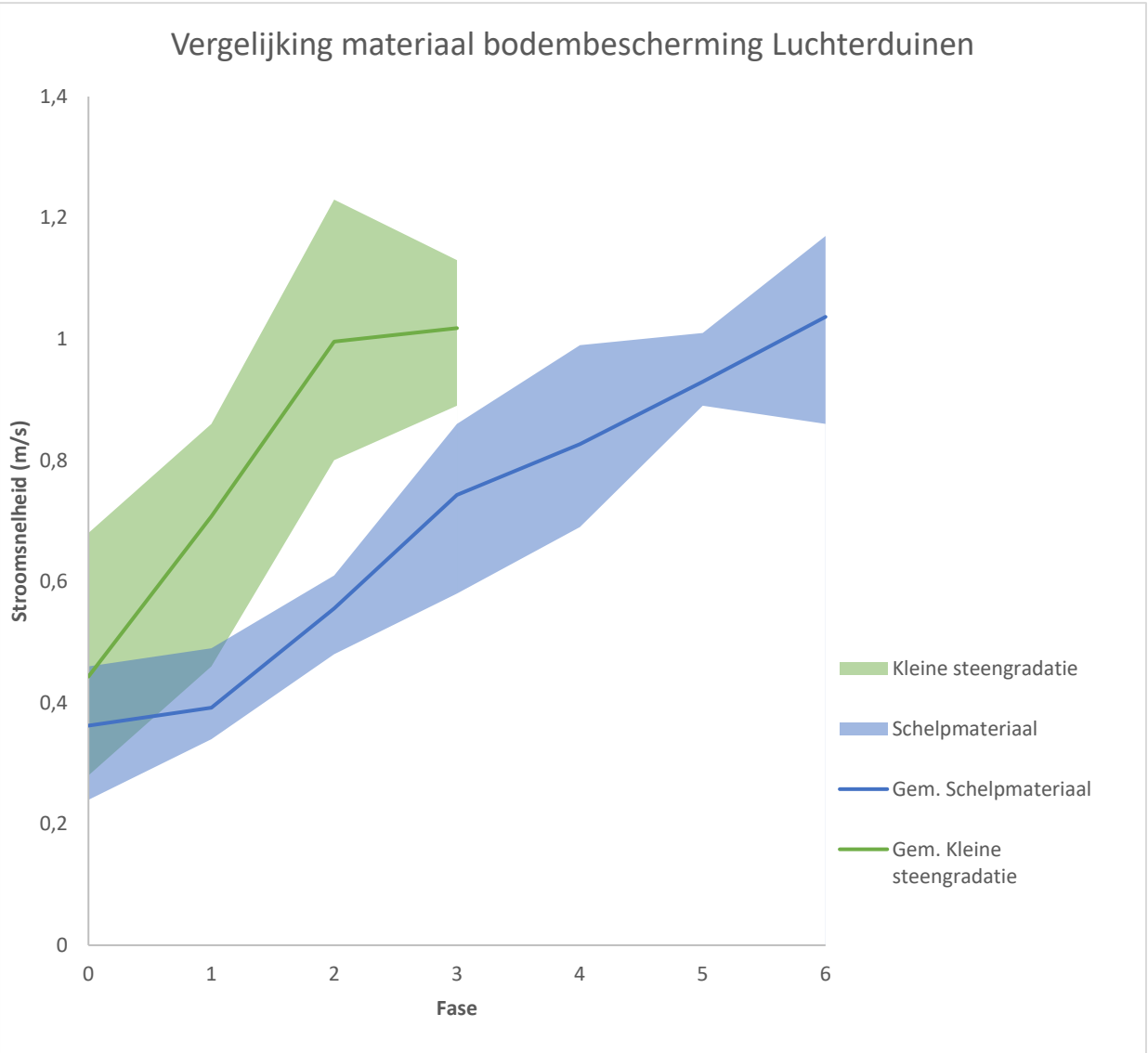
Verticaal stroomprofiel vooroever verdediging

		Δ	m/s
P1	Row 3	27	0,727832
P2	Row 2	44	0,929129
P3	Row 2	32	0,792364
P4	Row 2	24	0,686207
P5	Row 1	47	0,960281
P6	Row 1	41	0,896895
P7	Row 1	45	0,939628



4 Vergelijking verrijkingmaterialen

Vergelijking verrijgings materialen bodembescherming en vooroeververdediging



Bijlage X

Foto's

Mei 2019

Van Oord 
Marine ingenuity

Hogeschool  van Arnhem en Nijmegen

1 Fotos model materialen

- | | |
|-------------------------|-----------------------------|
| 1. 19-50 mm | Toplaag Bodembescherming |
| 2. 3,2-9 mm | Filterlaag Bodembescherming |
| 3. 6,3-18 mm | Toplaag Vooroever |
| 4. 3,2-9 mm | Verrijking kleine steentjes |
| 5. 3-4 mm | Verrijking schelpmateriaal |
| 6. 500 gram | Verrijking Grote steen |
| 7. 1000 gram | Verrijking Grote steen |
| 8. 1500 Gram | Verrijking Grote steen |
| 9. 1370 x 1025 x 550 mm | Verrijking Oesterkooi |
| 10. | Oesterkooi zakje |

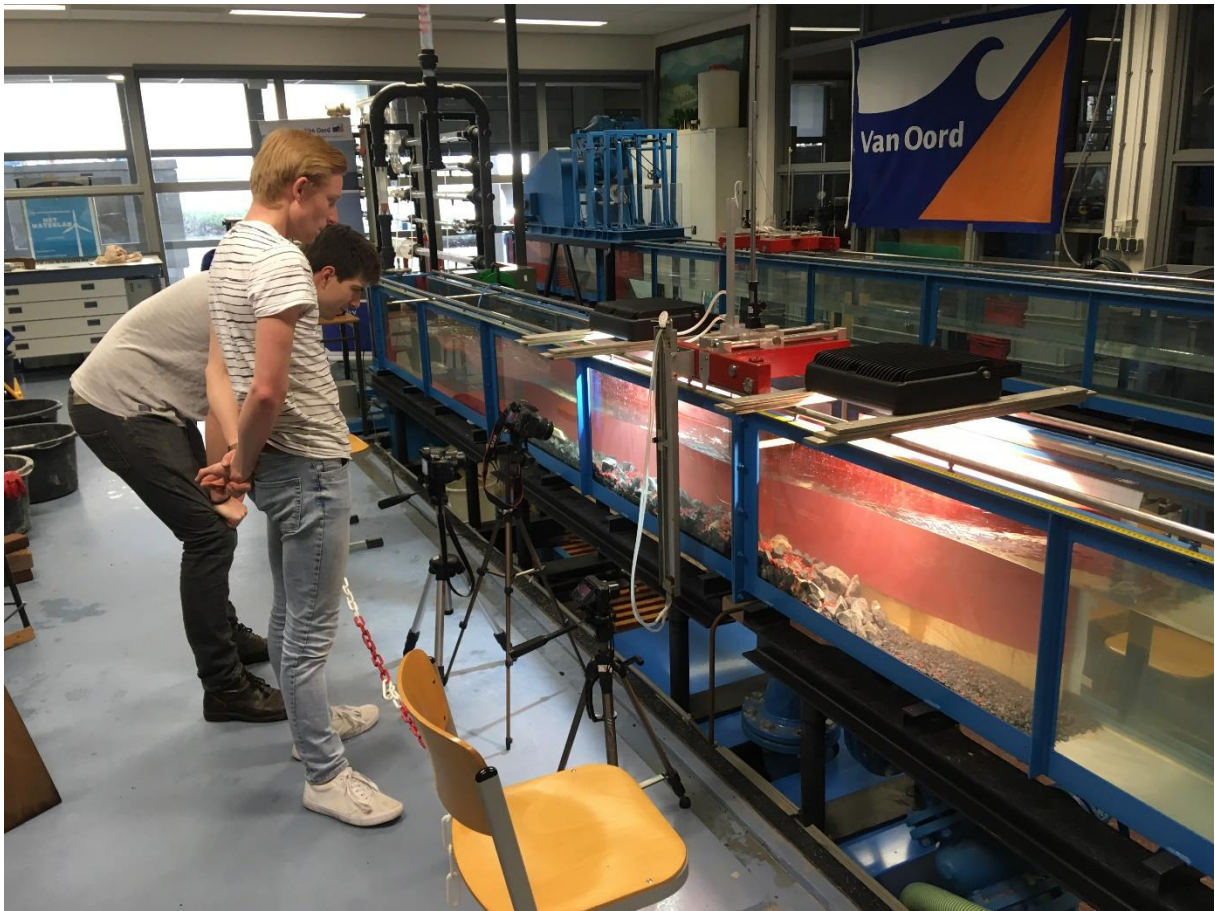


Bijlage X - Foto's



2 Foto's Opstelling





3 Proeven

3.1 Proef 1 0-meting

Proef 1	0-meting (bodembescherming)
<i>Begin proef</i>	<i>Eind proef</i>
	
Proef 2	Kleine steengradatie (bodembescherming)
<i>Begin proef</i>	<i>Eind proef</i>
	
Proef 3	Oesterkooien (bodembescherming)
<i>Begin proef</i>	<i>Eind proef</i>
	

Proef 4	Schelpmateriaal (bodembescherming)
<i>Begin proef</i>	<i>Eind proef</i>
	
Proef 5	0-meting (vooroeerverdediging)
<i>Begin proef</i>	<i>Eind proef</i>
	
Proef 6	Grote stenen (vooroeerverdediging)
<i>Begin proef</i>	<i>Eind proef</i>
	

Proef 7		Kleine steengradatie (vooroeververdediging)	
<i>Begin proef</i>		<i>Eind proef</i>	
			
Proef 8		Schelpmateriaal (vooroeververdediging)	
<i>Begin proef</i>		<i>Eind proef</i>	
			
Proef 9		Schelpmateriaal & kleine steengradatie (vooroeververdediging)	
<i>Begin proef</i>		<i>Eind proef</i>	
			