



PREFAB & IN SITU BODEMBESCHERMING IN HAVENGEBIEDEN

Eindverslag

OPGESTELD DOOR

Wouter Jaspers

0841502

Bart Kwakkelstein

0831812

BEGELEID DOOR

Volker Staal en Funderingen

Hogeschool Rotterdam

DATUM

Rotterdam

16-06-2014



Documenttitel: Eindverslag

Afstudeeropdracht: Prefab & In Situ Bodembescherming in Havengebieden

Versie: Definitieve versie 1

Auteurs: B.J.H. (Bart) Kwakkelstein 0831812@hr.nl

W. (Wouter) Jaspers 0841502@hr.nl

Datum vrijgave: 16-06-2014

Begeleider VSF: Ir. G.A. (Gerard) van Zwieten

Begeleider HRO: Ir. W.J.J.M. (William) Kuppen & Ir. H.J. (Harry) Dommershuijzen



Voorwoord

Voor u ligt het afstudeeronderzoek met betrekking tot de afronding van onze bachelor opleiding Civiele Techniek aan de Hogeschool Rotterdam. Er is onderzoek gedaan in het kader van de ontwikkeling van In Situ- & Prefab bodembescherming. Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van Volker Staal en Funderingen en geïnitieerd door aannemersbedrijf van Heteren.

Dit verslag heeft als doel de lezer te informeren over de ontwikkeling van een nieuwe bodembeschermingsconstructie die een alternatief kan zijn voor de 'traditionele' steenbestorting. Het eindverslag is informatief opgesteld en bevat de hoofdlijnen van het onderzoek. Lezers die geïnteresseerd zijn in de achtergronden van dit onderzoek worden verwezen naar de bijlagen. Door het lezen van de inleiding, samenvatting, conclusie & aanbevelingen zal de uitkomst en het doel van dit onderzoek duidelijk worden.

Graag willen wij iedereen bedanken die heeft geholpen tijdens het tot stand komen van dit onderzoek. Onze afstudeerbegeleiders willen wij in het bijzonder bedanken, zij gaven ons de ruimte om onze innovatieve ideeën toe te passen op dit onderzoek. Ook willen wij graag dhr. Groenewoud bedanken voor de geboden hulp tijdens de proeven.

Naast de vak deskundigen willen wij ook onze familieleden bedanken voor het corrigeren en adviseren tijdens het schrijven van dit eindrapport.

Afstudeerbegeleiders

Ir. G.A. (Gerard) van Zwieten Volker Staal en Funderingen

Ir. W.J.J.M. (William) Kuppen Hogeschool Rotterdam

Rotterdam, juni 2014,

Wouter Jaspers & Bart Kwakkelstein



Inhoud

Voorwoord	ii
Samenvatting	vi
Summary	vii
Begrippenlijst	viii
Formulelijst	ix
Symbolenlijst	x
1. Inleiding	1
1.1 Probleemstelling	2
1.2 Hoofd- & deelvragen	2
1.3 Doelstelling	2
1.4 Opbouw van het rapport	2
2. Bodembescherming	3
2.1 Definitie bodembescherming	3
2.2 Definitie Prefab & In Situ	3
2.3 Problematiek bodembescherming	3
2.4 Praktijkvoorbeelden huidige bestaande problematiek	4
3. Huidig bestaande constructie typen	5
4. Projectgrenzen	6
4.1 Getijden & Golven	6
4.2 Bezwijkmechanismen ondergrond	6
4.3 Verontreinigde ondergrond	6
4.4 Toekomstige scheepsaandrijving	6
5. Programma van eisen	6
6. Bevindingen uit de literatuur	7
6.1 Havens en schepen	7
6.2 Aangewend vermogen van hoofd- en boegschroef	8
6.3 Toekomstperspectief	9
7. Proef schroefkrachten	10



8. Maatgevende belastingen	11
8.1 Stabiliteitsfactor	11
8.2 Werkende belastingen	13
8.3 Vergelijking verschillende belastingen	14
9. Trade off Matrix	15
10. Prefab ontwerpen	16
10.1 Schetsontwerpen	16
10.1.1 Laagst scorende schetsontwerpen	16
10.1.2 Hoogst scorende schetsontwerpen	17
10.2 Definitieve varianten	18
10.3 Materiaaloptimalisatie Prefab	20
11. Definitief Prefab ontwerp	21
11.1 Jellyfish bodembescherming	21
11.2 Uitzettend & klemmend vermogen S.A.P.	22
11.3 Levensduur	22
11.4 Duurzaamheid	22
12. Proef Jellyfish	23
12.1 Proefopstellingen	23
12.2 Stellingen	23
13. Uitvoeringsplan Jellyfish	25
14. In Situ	26
14.1 In Situ methodieken	26
14.2 Trade off Matrix methodieken	27
14.3 In Situ Materialen	29
14.4 Trade off Matrix In Situ materialen	29
15. Uitvoeringsplan CSM + Jetgrout	30
15.1 Basis constructie	30
15.2 Aansluiting met de damwand	31
15.3 Volledige constructie	31



16. Kosten	32
16.1 Algemene kosten Jellyfish	33
16.2 Algemene kosten Cutter Soil Mixing + Jetgrouting	35
16.3 Traditionele steenbestorting	35
16.4 Overzichtstabellen totale kostprijs	36
17. Trade off Matrix Prefab versus In Situ	37
18. Conclusie	38
19. Aanbevelingen	41
Figurenlijst	A
Tabellenlijst	B
Bibliography	C
Appendix A Prefab schetsontwerpen	E
Appendix B Definitieve varianten	F
Appendix C Prefab materiaal	G
Appendix D In Situ uitvoeringsmethodiek	H
Appendix E In Situ materialen	I
Appendix F Programma van Eisen	J



Samenvatting

Aan de voet van een kademuur waar schepen aan- en afmeren kunnen ontgrondingskuilen ontstaan door schroefstraalbelasting. Deze ontgrondingskuilen kunnen leiden tot instabiliteit, verzakkingen en uiteindelijk het bezwijken van kademuren. De faalmechanismen rondom kademuren kunnen voorkomen worden door het aanbrengen van een bodembescherming. De steenbestortingsconstructie wordt momenteel het meest toegepast.

De steenbestortingsconstructie is economisch voordelig en snel uit te voeren. De breukstenen worden met behulp van een kraan op een drijflichaam gestort en vervolgens afgezonken naar de bodem. Om tussen de kademuur en de bodembescherming een dichte aansluiting te creëren wordt er vanaf de eerste vijf meter van de kademuur colloïdaal beton gestort. Het gebruik van colloïdaal beton is niet economisch voordelig.

De afmetingen van de steenbestorting staat in relatie tot de ondervonden stroomsnelheid veroorzaakt door schepen. Naarmate deze stroomsnelheid verhoogt zullen de stenen zwaarder gedimensioneerd moeten worden.

Schepen kunnen op meerdere manieren stroomsnelheden op de bodem veroorzaken. Door middel van een boegschroef en hoofdschroef kan de schroefstraalbelasting direct of via de kademuur op de bodem worden afgewend. Uit onderzoek blijkt dat cruiseschepen (roll on roll off schepen) het grootste percentage vermogen gebruiken tijdens het aan- en afmeren. Dit komt doordat deze schepen weinig tot geen sleepbootassistentie gebruiken. Als cruiseschepen tijdens het manoeuvreren de hoofdschroefstraal tegen een kademuur projecteren ontstaan de grootste stroomsnelheden op de bodem.

De verwachting is dat in de toekomst schepen anders worden aangedreven dan met de gebruikelijke schroefaandrijving. Bij het ontwerpen van nieuwe schepen richten rederijen zich voornamelijk op het verkrijgen van meer snelheid zonder toename van het benodigde vermogen. De hogere snelheid kan worden bereikt door het gebruik van pumpjets. Deze pumpjets werken met hetzelfde vermogen als schroef aangedreven schepen. Echter ontstaat er bij het gebruik van pumpjets een meer gerichte en compactere aandrijvingsstraal dan bij het gebruik van schroeven. Deze compactere straal kan hogere bodemsnelheden veroorzaken, zeker bij het achteruit manoeuvreren van een schip (hierbij wordt de straal omgebogen naar de bodem).

Om ook bij hogere bodemsnelheden te zorgen voor een stabiele bodembescherming zullen de breukstenen groter moeten worden gedimensioneerd. Deze grote afmetingen leiden tot hoge kosten. Hier ligt ruimte voor verbetering.

Dit afstudeeronderzoek richt zich op het optimaliseren van een nieuwe bodembeschermingsconstructie die voldoet aan alle eisen van een dergelijke constructie. De nieuwe bodembescherming moet toepasbaar zijn bij alle te ondervinden stroomsnelheden en moet economisch kunnen concurreren met de traditionele steenbestorting.

Tijdens het onderzoek is er een oplossing gevonden voor een geprefabriceerde constructie en een in situatie vervaardigde constructie.



Summary

When vessels harbor near quay walls they create a flow velocity towards the bottom. This flow force blows away the existing ground, which results into scour holes near the foot of the quay wall. These scour holes can cause instability, subsidence and finally collapsing of the quay wall structure. To prevent fail mechanisms, a bottom protection construction can be applied. Constructing a rock bed is momentarily the most common solution for protecting quay walls against collapsing.

Creating this stone layer protection is the cheapest and fastest way of constructing a bottom protection. After creating a floating structure, stones are lifted and dropped on this structure with cranes. The entire bottom protection sinks towards its desired location. After the construction is sunk to the bottom a connection between the structure and the quay wall needs to be guaranteed. Applying colloidal concrete over the first 5 meters of the constructed bottom protection ensures this. Colloidal concrete is an expensive material.

The stones used for the bottom protection need to have a certain weight to avoid being blown away by the maneuvering ships. The bigger the projected flow velocity, the greater the weight needs to be.

Ships can cause bottom flow velocities with their main propeller and/or their bow propeller. These velocities can be projected directly to the bottom or are reflected downwards after being projected straight on to the quay wall. Research dictates that roll on roll of ships (cruise ships) use the largest percentage of their power capacity while maneuvering in harbors. This high percentage is needed because tugboats do not assist roll on roll of ships. The largest bottom flow velocities occur when cruise ships project their main propulsion system directly against a quay wall (the flow force is bent down towards the bottom).

Expectations dictate that ships will be using different propulsion systems in the future. Ships are already being designed to gain more speed while using the same amount of power (and fuel). These higher velocities can become reality when using a pump jet propulsion system. Pump jets use the same amount of power, but create a more combined and compacted propulsion beam. This centered beam results in higher flow velocities and a greater top speed. When a pump jet propelled ship navigates backwards the beam will be bent onto the bottom, this causes the highest bottom flow forces.

To contain a stabile bottom protection, even while projected with high bottom flow velocities, the rock bed needs to be designed with heavy and big rocks. These big dimensions result in high costs and a high construction height. These problems leave room for improvement.

This bachelor thesis focuses on optimizing a new bottom protection that covers all demands needed for such a construction. The new construction type needs to be applicable against all possible bottom flow forces and has to compete on an economical level with a stone bed protection.

A prefabricated solution and an in situ solution have been designed during this thesis.



Begrippenlijst

Op deze pagina staat een korte uitleg van veelgebruikte begrippen in dit afstudeerrapport.

<u>Aangewend Motorvermogen</u>	Het aangewend motorvermogen is het gebruikte percentage van het totale motorvermogen van een schip bij het manoeuvreren in een haven.
<u>Bezwijkmechanisme</u>	De wijze waarop een constructie bezwijkt.
<u>Bodembescherming</u>	Bodembescherming is een beschermende constructie die op bodems wordt toegepast in bijvoorbeeld havens of rivieren. Bodembescherming biedt een beschermende functie voor de onderliggende grondlagen, deze kunnen wegspoelen door verschillende krachten van buitenaf.
<u>Haventypen</u>	Bij het verwijzen naar havens kan er onderscheidt worden gemaakt in verschillende typen havens met bijbehorende eigenschappen.
<u>In Situ</u>	In dit onderzoeksrapport wordt onder In Situ verstaan: Het ter plekke vervaardigen van een constructie.
<u>Prefab</u>	In dit onderzoeksrapport wordt onder Prefab verstaan: Bodembescherming opgebouwd uit één (of meerdere) kant-en-klare constructie element(en).
<u>Pumpjetbelasting</u>	De term pumpjetbelasting verwijst naar de stroming die wordt veroorzaakt door een pumpjet aangedreven schip. De pumpjetbelasting van schepen veroorzaakt een maatgevende belasting bij het ontwerpen van bodembescherming.
<u>Roll on Roll off</u>	In dit onderzoeksrapport wordt met Roll on Roll off, schepen bedoeld die op eigen kracht en zonder sleepbootassistentie, kunnen aan- en afmeren. Dit type schip gebruikt het grootste aangewend motorvermogen.
<u>Schroefstraalbelasting</u>	De term schroefstraalbelasting verwijst naar de stroming die wordt veroorzaakt door de roterende schroeven van een schip. De schroefstraalbelasting van schepen veroorzaakt een maatgevende belasting bij het ontwerpen van bodembescherming.



Formulelijst

[1] Uitstroomsnelheid direct achter de hoofdschroef, Römisch

$$U_0 = C_{13} \sqrt{\frac{P}{\rho_w \cdot D_0^2}} \quad \text{met} \quad D_0 = D_s / \sqrt{2}$$

[2] Bodemsnelheid, veroorzaakt door hoofdschroef evenwijdig aan kade (enkele schroef), Römisch

$$U_{b,max} = U_{b,max, enkel} = f \cdot C_2 \cdot \frac{U_0 \cdot D_0}{h_{pb}} \quad \text{met} \quad D_0 = D_s / \sqrt{2}$$

[3] Bodemsnelheid, veroorzaakt door hoofdschroef evenwijdig aan kade (twee schroeven), Römisch

$$U_{b,max, enkel} \quad \text{als} \quad \frac{h_{pb}}{y_p} \leq 0,578$$

$$U_{b,max} = f \cdot 0,612 \cdot \frac{U_0 \cdot D_0}{r_{pb}} \quad \text{als} \quad \frac{h_{pb}}{y_p} \geq 1$$

$$\sqrt{2} \cdot U_{b,max, enkel} \quad \text{als} \quad 0,578 < \frac{h_{pb}}{y_p} < 1$$

[4] Bodemsnelheid, veroorzaakt door hoofdschroef evenwijdig aan kade (drie schroeven), Römisch

$$U_{b,max} = 2 \cdot U_{b,max, enkel}$$

[5] Afstand tot maximale bodemsnelheid achter de hoofdschroef, Römisch

$$x_{u0, bodem} = 5,55 \cdot h_{pb}$$

[6] Uitstroomsnelheid direct achter de boegschroef (achter de tunnelbuis), Römisch

$$U_0 = C_{13} \sqrt{\frac{P}{\rho_w \cdot D_0^2}} \quad \text{met} \quad D_0 = D_s$$

[7] Bodemsnelheid aan de voet van de kademuur (veroorzaakt door boegschroef), Römisch

$$U_{b,max} = C_3 \frac{U_0 \cdot D_0}{x_{pk} + h_{pb}} \quad \text{als} \quad \frac{x_{pk}}{h_{pb}} \geq 1,8$$

[8] Minimaal benodigd gewicht van een stortsteen bij schroefstraalbelasting, Izbash

$$D_{50} \geq \beta l s \text{ of } \frac{U_{b,max}^2}{2 \cdot g \cdot \Delta}$$

[9] Minimaal benodigd gewicht van een stortsteen bij pompjetbelasting, WL Tu Delft

$$D_{50} \geq \frac{U^2}{\beta \cdot g \cdot \Delta}$$

[10] Schaalfactor snelheid, schaalwet van Froude

$$n_v = \sqrt{n_L}$$

[11] Schaalfactor massa, schaalwet van Froude

$$n_m = n_p \cdot n_L^3$$



Symbolenlijst

U_0	= stroomsnelheid achter de schroef [m/s]
D_0	= diameter van de straal achter de schroef [m]
D_s	= diameter van de schroef [m]
P	= aangewend motorvermogen per schroef [W]
ρ_w	= dichtheid van water [kg/m ³]
ρ_s	= dichtheid van breuksteen [kg/m ³]
C_1	= constante (t.b.v. uitstroomsnelheid achter de hoofd- en boegschroef), 1.17 [-]
$U_{b,max}$	= maximale snelheid boven de bodem [m/s]
$U_{b,max, enkel}$	= $U_{b,max}$ in de situatie van één enkele schroef [m/s]
h_{pb}	= hoogte van de schroefas boven de bodem [m]
f	= correctiefactor die de toename van de stroomsnelheid in rekening brengt als oorzaak van begrenzingen van de radiale begrenzingen van de straal [-]
C_2	= constante (t.b.v. bodemsnelheid veroorzaakt door hoofdschroef), 0.306 [-]
y_p	= horizontale afstand tussen de schroefas en de scheepas [m]
r_{pb}	= $\sqrt{h_{pb}^2 + y_p^2}$ [m]
x_{pk}	= afstand van de schroef tot de kademuur [m]
C_3	= constante (t.b.v. bodemsnelheid veroorzaakt door boegschroef), 2.8 [-]
D_{50}	= mediane steendiameter (m)
β_{IS}, C_R	= kritische stabiliteitsfactor [-]
Δ	= relatieve dichtheid stortsteen $((\rho_{breuksteen} - \rho_{water}) / \rho_{water})$ [-]
η_m	= schaalfactor massa (t.b.v. verscalen van waarden gevonden tijdens proeven) [-]
η_p	= schaalfactor dichtheid (t.b.v. verscalen van waarden gevonden tijdens proeven) [-]
η_L	= schaalfactor lengte (t.b.v. verscalen van waarden gevonden tijdens proeven) [-]
η_v	= schaalfactor snelheid (t.b.v. verscalen van waarden gevonden tijdens proeven) [-]



1. Inleiding

Het beschermen van de bodem in havengebieden is noodzakelijk om faalmechanismen van kadeconstructies te voorkomen. Doordat schepen een schroefstraalbelasting op de bodem veroorzaken kunnen er ontgrondingskuilen ontstaan. Deze ontgrondingen zijn nadelig voor de stabiliteit van kadeconstructies (zie onderstaand figuur).

De explosieve groei van scheepstransport brengt grote veranderingen in de scheepvaart met zich mee. Schepen worden steeds groter, er wordt meer motorvermogen aangewend, schepen meren steeds vaker zelfstandig af en er zijn ontwikkelingen te zien in de aandrijving van schepen. De traditionele bodembeschermingsconstructies zullen met dit toekomstperspectief mee moeten groeien. Het verwachtingspatroon van de scheepvaart biedt kansen voor nieuwe vormen van bodembescherming.



Figuur 1: Bezwijken kademuur door ontgrondingskuilen, Montrose Ports UK, ^[18]

Momenteel is voor het beschermen van de bodem, de traditionele steenbestortingsmethodiek economisch gezien het meest voordelig. Echter, door de toenemende schroefstraalbelasting zullen de breukstenen zo groot gedimensioneerd moeten worden, dat dit constructietype niet meer rendabel is. Ook is het moeilijk om aan de contractdieptes van havens te blijven voldoen. Dit zijn de belangrijkste aanleidingen om de mogelijkheden van een alternatieve bodembescherming te onderzoeken.

Om vorm te geven aan een representatief toepassingsgebied van de nieuw te ontwerpen bodembescherming is gekozen voor de Rotterdamse haven; deze bevat een grote verscheidenheid aan haventypes. Zowel de grootste zeeschepen als de kleinere binnenvaartschepen meren in Rotterdam aan. Aan elk haventype is de grootst mogelijke scheepvaartklasse gekoppeld. Deze situaties leveren parameters op waarmee de stroomsnelheden op de bodem zijn bepaald.

Voor het berekenen van de stroomsnelheden op de bodem veroorzaakt door schroefstraalbelasting zijn er een aantal relaties te vinden in de literatuur. Een schip veroorzaakt op verschillende manieren belastingen op de bodem. Zo creëert de boegschroef een andere stroming op de bodem dan de hoofdschroef. Voor de verschillende haventypes is er gekeken naar de maatgevende stroomsnelheid op de bodem.

Door middel van een literatuurstudie zijn de voor- en nadelen van de bestaande constructies die de bodem beschermen in kaart gebracht.

Aan de hand van bovenstaande input zijn er randvoorwaarden opgesteld voor de nieuw te ontwerpen bodembescherming.

Er zijn tijdens het onderzoek twee proeven uitgewerkt: één om schroefkrachten te analyseren en één om het nieuwe constructietype te testen.



1.1 Probleemstelling

Om de bodem nabij kademuren te beschermen tegen ontgrondingskuilen veroorzaakt door schroefstraalbelasting, wordt er vaak gekozen voor traditionele steenbestorting. Dit wordt gedaan omdat het economisch voordelig is en al jaren wordt toegepast.

Het handboek Kademuren (CUR) beschrijft het volgende: “Wanneer stroomsnelheden groter worden dan 3.5 m/s, ofwel benodigd steengewicht > 1-3 ton, veroorzaakt door hoog turbulente schroefstralen is het niet meer economisch voordelig gestorte breuksteen toe te passen.” ^[1]

De trend van de scheepvaart laat grotere stroomsnelheden zien waardoor er behoefte zal zijn aan een andere vorm van bodembescherming. Ook blijken bestaande constructietypen niet aan de verwachte levensduur te voldoen. De voor- en nadelen van de huidige bodembescherming zijn terug te vinden in hoofdstuk 3.

1.2 Hoofd- & deelvragen

De hoofdvraag luidt:

Kan er (uit restmaterialen) een In Situ- en/of Prefab bodembescherming ontwikkeld worden die een alternatief biedt op de traditionele steenbestorting en gebruikt kan worden ter bescherming van kademuren?

De deelvragen luiden:

1. Aan welke (toekomstige) eisen moet de bodembescherming voldoen, en welke materialen zijn hiervoor te gebruiken?
2. Hoe kan een prefab bodembescherming aan de hand van deze eisen geoptimaliseerd worden?
3. Hoe kan een in-situ bodembescherming aan de hand van deze eisen geoptimaliseerd worden?
4. Welke duurzame (rest)materialen kunnen gebruikt worden om tot een dergelijk geoptimaliseerde oplossing te komen?
5. Kunnen de gevonden oplossingen toegepast worden voor kademuurbescherming?

1.3 Doelstelling

De doelstelling van dit onderzoek is om een nieuwe bodembescherming te ontwikkelen die bestand is tegen de huidige en toekomstige belastingen, veroorzaakt door schepen. Daarnaast is het van belang dat dit nieuwe concept economisch voordeliger is dan traditionele steenbestorting.

Volker Staal en Funderingen heeft duurzaamheid hoog in het vaandel staan. Dit gedachtegoed wordt doorgetrokken naar de nieuw te ontwerpen bodembeschermingsconstructie. Er zal worden gekeken of het mogelijk is om restmaterialen in de constructie te verwerken, dit is geen vereiste.

1.4 Opbouw van het rapport

Deze paragraaf beschrijft beknopt de inhoud van het verslag. In hoofdstuk 2 & 3 zal worden uitgelegd waarom bodembescherming noodzakelijk is en wat de voor- en nadelen van de huidig bestaande constructietypen zijn. Hoofdstuk 4 geeft een afbakening van dit onderzoek. In hoofdstuk 6 worden de belangrijkste bevindingen uit de algemene literatuurstudie beschreven, deze bevindingen worden in de proef schroefkrachten verder uitgewerkt. Hoofdstuk 8 gaat in op de maatgevende krachten. Hoofdstuk 9 beschrijft het opgestelde Trade off Matrix toetsingssysteem voor de Prefab & In-Situ ontwerpen. Alle gemaakte ontwerpen en uitvoeringsmethodieken worden in hoofdstuk 10 & 14 behandeld en getoetst. Het definitieve Prefab & In-Situ ontwerp staat in hoofdstuk 11 & 15. In hoofdstuk 16 wordt er een kostenraming gemaakt van de ontwikkelde en huidige bodembescherming. Hoofdstuk 17 beschrijft de totstandkoming van het optimale ontwerp Prefab vs. In Situ. Het verslag wordt afgesloten met een conclusie & aanbevelingen.

2. Bodembescherming

In dit hoofdstuk zullen de belangrijkste benodigde definities worden beschreven. De huidige problematiek bij bodembeschermingsconstructies wordt beschreven en er worden een aantal praktijkvoorbeelden gegeven.

2.1 Definitie bodembescherming

Om te begrijpen wat de bestaande problematiek bij bodembescherming inhoudt moet er eerst duidelijk worden wat bodembescherming is. Hieronder staat de definitie gegeven;

Bodembescherming is een beschermende constructie die op bodems wordt toegepast in bijvoorbeeld havens of rivieren.

Bodembescherming biedt een beschermende functie voor de onderliggende grondlagen, deze kunnen wegspoelen door verschillende krachten van buitenaf. De drie belangrijkste krachten zijn: krachten door getij, krachten door golven en krachten door schroeven/jetmotoren van schepen. Zou er dus geen bodembescherming zijn dan zouden de grondlagen kunnen wegspoelen/eroderen en kan de kadeconstructie bezwijken.

2.2 Definitie Prefab & In Situ

In dit rapport zal er worden gezocht naar een mogelijkheid om de bodem te beschermen met een Prefab en/of In Situ constructie. Om duidelijkheid te verschaffen wordt er voor Prefab & In Situ een definitie gegeven:

Prefab is een product dat vooraf is gefabriceerd en daarmee gereed is voor gebruik. In dit onderzoek wordt onder Prefab verstaan: Bodembescherming opgebouwd uit één (of meerdere) kant-en-klare constructie element(en).

In Situ is een constructie die op de bouwplaats wordt gevormd. Hierbij kan gedacht worden aan het ter plekke vermengen van grond met een vaak vloeibare substantie waardoor er een 'harde' constructie ontstaat.

2.3 Problematiek bodembescherming

Bij het ontbreken van een bodembeschermingsconstructie kunnen rondom kademuren ontgrondingskuilen ontstaan. Deze ontgrondingskuilen veroorzaakt door schroefstraalbelasting kunnen voor instabiliteit van de kademuur zorgen. In het dictaat van Roubos^[5] wordt het volgende beschreven:

Wanneer de stroomsnelheid boven een aangebrachte bestorting een zogenaamde kritieke waarde overschrijdt, wordt de bodembescherming lokaal door de schroefstaal belasting veroorzaakte stroming meegevoerd. Dit transport leidt tot een ontgroning. De diepte van de ontgroning wordt groter naarmate de stroomsnelheden hoger zijn en de stroming langer duurt. Ontgrondingen kunnen leiden tot de volgende ongewenste gebeurtenissen:

1. Zakkingen van het terrein achter de kademuur:
 - Bij het ontstaan van een ontgrondingskuil kan er door verschillende mechanismen grond vanachter de kademuur in de haven wegspoelen, dit leidt tot verzakkingen van het achterliggende terrein.
2. Deformaties van de kademuur (vervorming):
 - Ontgrondingen naast de damwand zorgen ervoor dat er minder grond tegen de damwand aandrukt, met als mogelijk gevolg dat de damwand kan vervormen en zelfs bezwijken.



2.4 Praktijkvoorbeelden huidige bestaande problematiek

Er zijn een aantal voorbeelden van problemen met bodembeschermingsconstructies. In deze paragraaf worden er een aantal genoemd.

Oosterscheldedam

De bodembescherming (stortstenen constructie) bij de Oosterscheldedam is op diverse plaatsen niet meer functioneel. Er zijn gaten ontstaan van 50 meter diep en de waterkerende werking is daarmee op termijn in gevaar. (Uit het artikel blijkt niet vanaf welk punt deze diepte gemeten wordt.) De gaten komen door een constante overtrekkende stroming, niet door schepen.^[2]

Praktijkvoorbeeld

Volgens Herman Asbroek (directeur van 'Van Heteren') ontstaan er ontgrondingskuilen tot wel 6 meter diep. Deze kuilen zijn door zijn bedrijf geconstateerd bij kademuuren in de regio Overijssel, het betreft plaatsen waar alleen kleinere scheepvaart mogelijk is. Daarnaast is er verteld dat door het continu aan- en afmeren de ontgrondingskuilen verplaatsen en 'zelfhelend' zijn.

Weymouth, Verenigd Koninkrijk

In 2013 is er in Weymouth een kademuur ingestort doordat ferryschepen hier ontgrondingskuilen hadden veroorzaakt.

"Initial investigations revealed that the subsidence was caused by scour from where the ferries were turning as they entered and exited the port. Some of the holes were up to 6m deep and had destabilised the wall by causing it to move down and out into the harbour,"^[12]



Figuur 2: Reparatie van de kademuur



Figuur 1 op pagina 1 laat het bezwijken van een kademuur bij Montrose Ports UK zien.



3. Huidig bestaande constructie typen

In dit hoofdstuk zullen de belangrijkste bevindingen uit de analyse over de huidig bestaande bodembeschermingsconstructies (bijlage B1) worden gegeven. De belangrijkste voor- en nadelen van bestaande constructies en de daaraan gekoppelde eisen staan hieronder genoemd.

Er zijn een aantal verschillende constructietypen geanalyseerd, hieronder staan de belangrijkste weergegeven ter bevordering van de beeldvorming:



Figuur 3: Stortsteen^[19]



Figuur 4: Blokkenmat^[20]



Figuur 5: Gabion^[21]



Figuur 6: Geohooks^[22]

Uit de analyse over bestaande constructiemethoden zijn een aantal belangrijke voor- en nadelen te noemen waarin de nieuw te ontwerpen constructie zal moeten verbeteren al dan niet dezelfde kwaliteit moet waarborgen:

Voordelen

1. Waterdoorlatendheid van de constructie verhelpt bezwijkmechanismen ten gevolge van de overdruk onder de constructie (filterwerking).
2. Als de constructie uit zichzelf één geheel vormt zullen er geen interne aansluitingen benodigd zijn. (tijdsbesparing uitvoering).
3. Flexibiliteit van de constructie voorkomt schade bij eventuele zettingen of optredende erosie.

Nadelen

1. Constructietypen maken gebruik van colloïdaal beton (onderwater beton) om een goede aansluiting met de kademuur te garanderen. Colloïdaal beton is duur en zorgt voor een extra handeling.
2. Constructietypen bestaande uit elementen moeten (te) groot gedimensioneerd worden om niet weg te spoelen bij bestaande belastingen.
3. Bestaande constructies zijn lastig te repareren.
4. Levensduur van de constructies kan niet altijd worden gewaarborgd.
5. Beperkte constructie hoogte (aantasting contract diepte van de haven).
6. Constructies slibben gemakkelijk dicht door sediment ophoping waardoor contractdiepte aangetast wordt.

De voor- en nadelen van de bestaande constructietypen geven een richtlijn voor de nieuw te ontwerpen constructie. Duidelijk wordt dat er een aantal verbeterpunten zijn:

1. De constructie moet van zichzelf een dichte aansluiting garanderen met de kademuur, om ontgrondingskuilen aan de voet van de kademuur te voorkomen.
2. De rand van de constructie moet voldoende flexibel zijn om eventuele zettingen en ontgrondingen van de onderliggende grond te volgen.
3. Als de constructie op de bodem uit zichzelf één geheel vormt kan de constructie met meer precisie geplaatst worden.
4. Constructies opgebouwd uit elementen kunnen zorgen voor te grote afmetingen en extra handelingen in de uitvoering.
5. Bestaande constructies kosten bij een gemiddelde dimensionering € 60, - p/m².^[23] De nieuw te ontwerpen constructie zal hiermee moeten concurreren.



4. Projectgrenzen

Na het analyseren van de bestaande constructie typen is de beperking van het onderzoeksgebied vastgesteld. De nieuw te ontwerpen bodembescherming kan op veel vlakken worden getoetst. Echter zal dit onderzoek geen rekening houden met een aantal aspecten, de belangrijkste aspecten staan in dit hoofdstuk genoemd, zie voor het volledige rapport bijlage C2.

4.1 Getijden & Golven

Ontstane stromingen op de bodemverdediging veroorzaakt door getijden en/of golven zijn van mindere invloed dan schroefstraalbelasting en worden daarom niet meegenomen in de berekeningen voor de maatgevende kracht.

4.2 Bezwijkmechanismen ondergrond

Bezwijkmechanismen van de grond ontstaan doordat de omliggende constructies en/of de grond zelf niet van voldoende kwaliteit zijn. De constructie van de bodembescherming zelf draagt niet bij aan deze bezwijkmechanismen maar heeft als doel om deze mechanismen te voorkomen.

4.3 Verontreinigde ondergrond

Bij het aanleggen van een bodembeschermingsconstructie wordt er vaak gewerkt in een verontreinigde ondergrond. In dit rapport wordt er bij het bepalen van de uitvoeringskosten geen rekening gehouden met het saneren van deze ondergrond.

4.4 Toekomstige scheepsaandrijving

De nieuw te ontwerpen bodembescherming zal een minimale levensduur van 50 jaar moeten weerstaan, dit staat in het volgende hoofdstuk programma van eisen. Echter kan de manier waarop schepen worden aangedreven veranderen in de komende 50 jaar, en zal de constructie ook hier tegen bestand moeten zijn. In dit rapport wordt alleen rekening gehouden met jet aangedreven schepen (zie hoofdstuk 6.3). Over andere toekomstige aandrijvingen is weinig onderzoek gedaan en worden in deze scriptie niet verder behandeld.

5. Programma van eisen

Tijdens de analysefase zijn een groot aantal aspecten aan het licht gekomen en randvoorwaarden opgesteld. Deze randvoorwaarden kunnen worden omgezet in een programma van eisen. Het programma van eisen is bindend voor de te maken ontwerpen. Het volledige programma van eisen inclusief uitleg en motivatie is terug te vinden in bijlage C1. Het beknopte programma van eisen is terug te vinden in appendix F. In dit hoofdstuk worden de drie belangrijkste eisen gegeven:

1. De bodembescherming moet op een juiste manier aansluiten met de kade. De constructie van de bodembescherming moet hiermee dus een dicht geheel vormen met de kade.
2. Waar de bodemverdediging eindigt zal de (rand van de) bodemverdedigingsconstructie zodanig flexibel zijn dat zij ontgrondingen zonder problemen kan volgen.
3. De kosten van de gehele constructie + uitvoeringskosten moeten vergelijkbaar / goedkoper zijn dan de totale kosten die benodigd zijn voor traditionele bodembeschermingsconstructies.



6. Bevindingen uit de literatuur

Dit hoofdstuk bevat de belangrijkste bevindingen uit de literatuurstudie. Uit deze bevindingen zijn er projectgrenzen en een programma van eisen opgesteld.

6.1 Havens en schepen

Om een zo breed mogelijk toepassingsgebied voor de nieuw te ontwerpen bodembescherming te verkrijgen zijn er verschillende aanwezige haventypen in Rotterdam geanalyseerd. Aan de verschillende typen haven zijn de grootst mogelijke schepen gekoppeld. De havens met de daaraan gekoppelde 'maatgevende' schepen bepalen de parameters voor dit onderzoek. Met deze parameters worden de bodemsnelheden berekend waaraan de constructie wordt getoetst.

Er zijn verschillende haventypen beschouwd zodat er gevarieerd kan worden met de dimensionering van de bodembescherming. Hierdoor kan er gekeken worden of een ontwerp bij elk type haven in zijn functie voldoet. Zie voor de volledige rapporten (bijlage B2 & B3).

In onderstaande tabel staan de havens met de daaraan gekoppelde schepen gegeven:

Haven	Haventype	Schip	Scheepstype
Tweede Maasvlakte	Containerhaven	Maersk triple E class	Containerschip
Eerste Maasvlakte	Droge bulk haven	MS Vale Brasil	Bulkcarrier
Botlek Haven	Natte bulk haven	S Klasse	Bulkcarrier
Petroleumhaven	Chemiehaven	Alframax	Tanker
Waalhaven	Binnenvaarthaven	Vorstenbosch	Binnenvaartschip
Wilheminaakade	Cruise terminal	Oasis	Cruiseschip (roll on roll off ship)

Tabel 1: Combinaties havens met schepen

De meeste scheepvaart klassen krijgen assistentie van sleepboten tijdens het afmeren in het Rotterdams havengebied. Door de assistentie van de sleepboten is het voor de schepen niet noodzakelijk om het volle beschikbare vermogen te gebruiken. Om te weten wat de grootste stroomsnelheid is zijn de belastingen veroorzaakt door sleepboten ook berekend en vergeleken met de stroomsnelheden veroorzaakt door de 'normale' schepen.

In onderstaande tabel staan de grootst voorkomende sleepboten per haventypen;

Sleepboot	Haven
RT Adriaan	2 ^e Maasvlakte
RT Adriaan	1 ^e Maasvlakte
SD Jacoba	Botlek
Chalone	Petroleumhaven

Tabel 2: Combinatie havens met sleepboten

Uit de berekeningen (hoofdstuk 8.2) is gebleken dat de Oasis in combinatie met de Wilhelminaakade de grootste stroomsnelheid op de bodem veroorzaakt. De Oasis is een cruiseschip (roll on roll off ship); deze gebruiken vrijwel geen sleepboot assistentie tijdens het afmeren waardoor er meer eigen vermogen benodigd is. Zie voor percentages aangewend motorvermogen de volgende pagina.



6.2 Aangewend vermogen van hoofd- en boegschroef

Zoals eerder vermeld gebruiken een aantal schepen de assistentie van sleepboten. Voor het aangewend motorvermogen zijn in de literatuur verscheidende waarden te vinden. Tijdens dit onderzoek wordt er gerekend met de volgende waarden, voortgekomen uit de EAU 1996 ^[3]:

Hoofdschroef

- Zeeschepen met sleepboot : 40 % van het totale vermogen
- Binnenvaartschepen : 50 % van het totale vermogen
- Roll on Roll of schepen : 60 % van het totale vermogen

Boegschroef

- Alle scheepsklassen : 100 % van het totale vermogen

Sleepboot

- Alle scheepsklassen : 100 % van het totale vermogen

Duidelijk wordt dat bij Roll on Roll off (cruiseschepen) het grootste percentage aangewend vermogen wordt gebruikt bij de hoofdschroef. Het aangewende vermogen bij de boegschroeven wordt bij elk schip op 100 % gehouden.

Hoofdschroef uitzonderlijke situaties

Onder uitzonderlijke situaties wordt verstaan dat een schip in hoek van een haven aanlegt. De grootste schepen meren over het algemeen nooit aan in de hoek van een haven. Indien deze situaties zich voordoen, zullen de schepen zeer langzaam varen, dit resulteert in een laag percentage van het aangewend motorvermogen van de hoofdschroef. Doordat schepen in deze situaties zeer langzaam zullen manoeuvreren wordt er gerekend met de laagst gevonden waarden in de literatuur ^[5].

- Zeeschepen met sleepboot : 10 % van het totale vermogen
- Binnenvaartschepen : 10 % van het totale vermogen
- Roll on Roll of schepen : 40 % van het totale vermogen



Figuur 7: Uitzonderlijke situatie, directe belasting van hoofdschroef tegen kademuur ^[13]

Schepen kunnen in de toekomst op andere innovatieve manieren worden aangedreven. Zo worden tegenwoordig een aantal schepen uitgerust met een pumpjet aandrijving. De pumpjet aandrijving veroorzaakt een ander (sneller) stroombeeld. Met deze snellere stroomsnelheden is tijdens het ontwerpen van de nieuwe constructie rekening gehouden. Het 'toekomstperspectief' wordt op de volgende pagina verder uitgewerkt.

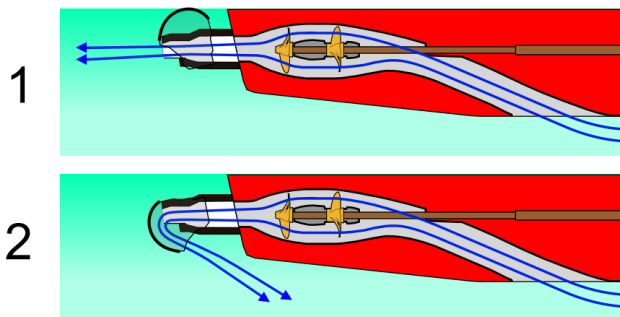


6.3 Toekomstperspectief

Bij het ontwerpen van nieuwe schepen richten rederijen zich voornamelijk op het verkrijgen van meer snelheid zonder toename van het benodigde vermogen. De hogere snelheid kan worden bereikt door het gebruik van pumpjets. Deze pumpjets werken met hetzelfde vermogen als schroef aangedreven schepen. Echter ontstaat er bij het gebruik van pumpjets een meer gerichte en compactere aandrijvingsstraal dan bij het gebruik van schroeven. Deze compactere straal kan hogere bodemsnelheden veroorzaken.

Voordeel van een pumpjet is, dat er een hogere topsnelheid kan worden bereikt bij een bepaalde waterstand voordat cavitatie plaatsvindt. Ook zal het schip beter kunnen manoeuvreren en zuiniger zijn.

Een nadeel van een pumpjet is dat als het schip achteruit vaart de straal onder een hoek van 30° naar de bodem wordt gericht, (zie onderstaand figuur 8). Hierbij ontstaan er stroomsnelheden op de bodem van ongeveer 10 m/s, deze waarde is verkregen uit de Rock Manual^[4]. Deze snelheid is circa twee maal zo groot als de berekende maatgevende snelheid achter de hoofdschroef op de bodem in normale situaties.



Figuur 8: Situatie 1: pumpjet normale propulsie. Situatie 2: pumpjet 'reversed' propulsie (10 m/s) ^[7]

Bij een bodembescherming opgebouwd uit steenbestorting zullen de stenen bij een bodemsnelheid van 10 m/s groot moeten worden gedimensioneerd. Dit nadeel biedt kansen voor het nieuw te ontwerpen bodembeschermingsconstructie. Er wordt gezocht naar een constructie die deze snelheden kan weerstaan zonder groot gedimensioneerd te hoeven worden.

Tijdens dit onderzoek is een proef uitgevoerd om te onderzoeken wat de verschillen zijn in bodemsnelheden veroorzaakt door schroefstraal- en pumpjetbelasting. Hiermee wordt aangetoond of de gecentreerde straal van een pumpjet negatievere effecten op een bodembescherming heeft, en eventueel andere stroombeelden veroorzaakt. De 'schroefkrachten proef' staat verder uitgewerkt in het volgende hoofdstuk.

Naast de jet aandrijving worden schepen ook uitgerust met het zogeheten 'wave propulsion system'. Hierbij wordt er achter een schip een plat scherm geplaatst die door op en neer te bewegen het schip voortstuwt. Over de stroomsnelheden die door dit mechanisme ontstaan is te weinig bekend. Dit moet eerst verder onderzocht moeten worden en wordt niet verder behandeld in dit onderzoek. Zie onderstaand figuur ter verduidelijking:



Figuur 9: Wave propulsion system ^{[25][26]}



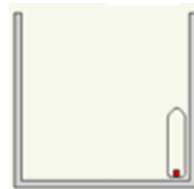
7. Proef schroefkrachten

Tijdens het literatuuronderzoek is er een proef uitgevoerd. Het doel van deze proef was om een beeld te vormen van de krachten die spelen op bodembeschermingsconstructies. (De volledig uitgewerkte proef is terug te vinden als bijlage E1).

Samenvattend wordt er een antwoord gegeven op de volgende drie vragen:

1. ***Zijn er situaties waarin de bestaande formules voor schroefstraalbelasting niet voldoen? Zo ja, hoe kan hier dan een maximale bodemsnelheid worden gevonden.***
2. ***Werken er bij een schroefstraal ook stromingen in een andere richting dan recht achter de schroef? Zo ja, hoe groot en tot welke afstand?***
3. ***Wat zijn de verschillen in de gevonden bodemsnelheden tussen schroefstraalbelasting en jet straalbelasting?***

1. Ja deze bestaan. Mocht een schip in een hoek van een haven liggen en gebruik maken van zijn hoofdschroef, dan kan de maximale snelheid op de bodem evenwijdig aan de kade niet bepaald worden door middel van bestaande formules. Bestaande formules gaan er vanuit dat de $U_{b,max}$ op de bodem plaats vindt op een afstand van 5.55 keer de afstand van de schroefas tot aan de bodem. Als een schip direct in de hoek ligt dan is de afstand ($5.55 * h_{pb}$) dus niet haalbaar, want de hoofdschroef ligt te dichtbij bij de kademuur. Zie figuur hiernaast:



Figuur 10: Schip in hoek afgemeerd (hoofdschroef)

De belasting aan de voet van de kademuur veroorzaakt door een hoofdschroef van een schip die in de hoek van de haven ligt kan benaderd worden met de formule van de boegschroefstraalbelasting tegen de kademuur [7]. De uitstroomsnelheid achter de hoofdschroef moet wel met de gebruikelijke formule worden bepaald [1].

Dit betekent dat de bodembescherming in de hoeken van de havens zwaarder gedimensioneerd zal moeten worden.

2. Ja, deze stromingen bestaan in andere richtingen dan alleen recht achter de schroef. Hierbij moet wel vermeld worden dat ze niet groter zijn dan de bodemsnelheden gemeten in een rechte lijn achter de schroef. Dit betekent dat de rand van de bodembescherming flexibel moet zijn om mee te kunnen bewegen met eventuele ontgrondingskuilen.

3. Bodemsnelheden veroorzaakt door schroefstraalbelasting zijn in de proef altijd groter geweest dan de bodemsnelheden veroorzaakt door jet straal belasting. Dit komt doordat een jet straal veel meer gecentreerd is en dus minder invloed uitoefent op de bodem. De invloed van de hoog in het water gelegen jet straal bereikt de bodem nauwelijks.

Bodemsnelheden veroorzaakt door schroefstralen zijn groter dan snelheden veroorzaakt door jetstralen. Mocht een schip met een jetstraal 'achteruit varen' en deze onder een hoek van 30° op de bodem richten worden bodemsnelheden groter^[4]. Dit moet nader onderzocht worden.

Nadat de proef is uitgevoerd zijn voor de eerder genoemde havens de maatgevende bodemsnelheden berekend. Aan de hand van de maatgevende bodemsnelheden kan het benodigd gewicht van een constructie uitgevoerd in stortsteen worden berekend. Het volgende hoofdstuk gaat hier verder op in.

8. Maatgevende belastingen

Alvorens de maatgevende stroomsnelheden per combinatie van havens en schepen kunnen worden berekend is er onderzocht wat het benodigd gewicht moet zijn als de constructie wordt opgebouwd uit stortstenen. Om het benodigd gewicht te kunnen berekenen moet eerst de stabiliteitsfactor bepaald worden. De stabiliteitsfactor is in grote mate bepalend voor het minimaal benodigd gewicht van de stortstenen.

8.1 Stabiliteitsfactor

In deze paragraaf zal de stabiliteitsfactor voor verschillende belasting worden beschreven. Deze ' $\beta_{ls,cr}$ ' factor bepaalt in welke mate er beweging van de bodembescherming is toegestaan.

Schroefstraalbelasting

Het minimaal benodigd gewicht tegen het wegspoelen van de constructie kan verkregen worden met behulp van de D_{50} die volgt uit de formule van Izbash [8]. De diameter verkregen uit deze formule wordt vervolgens omgezet naar de inhoud van een bol om zo het minimaal benodigde gewicht te verkrijgen. (Rapport D2)

Kritische stabiliteitsfactor

De $\beta_{ls,cr}$ is de kritische stabiliteitsfactor. Door gemeente werken Rotterdam wordt uitgegaan van:

$\beta_{ls,cr} = 3.0$ als geen beweging van stenen wordt geaccepteerd.

$\beta_{ls,cr} = 2.5$ als enige beweging van stenen acceptabel is.

In de gebruikelijke situaties wordt voor het dimensioneren van de bodembescherming met een stabiliteitsfactor van 2.5 gerekend.

Echter, zal bij het berekenen in uitzonderlijke (incidentele) situaties een stabiliteitsfactor van 2.5 resulteren in over-dimensionering van het benodigde gewicht van de constructie. Dit komt doordat de berekende bodemsnelheden volgens de vergelijkingen van Römisch al een overschatting geven. Door de overschatting van Römisch worden de bodemsnelheden in uitzonderlijke situaties zo groot, dat er een over-dimensionering ontstaat van het benodigde gewicht van de constructie elementen (bijv. 200 ton bij een snelheid van 7.2 m/s). Bij de berekening van de snelheden in de uitzonderlijke situaties zal de stabiliteitsfactor verkleind moeten worden.

Om de over-dimensionering in uitzonderlijke situaties te compenseren zal in deze situaties worden gerekend met een stabiliteitsfactor van 1.3.

"In 1993 concludeerde Römisch dat $\beta_{ls,cr} = 1.3$ à 0.7. Deze waarden zijn alleen geldig indien ook de formules van Römisch voor het bepalen van de maximale bodemsnelheid worden gehanteerd (dat is in dit onderzoek het geval). Deze snelheden zijn groter dan de werkelijk optredende bodemsnelheid. Het logische gevolg is een afname van de stabiliteitscoëfficiënt. "[5]

"Voor de stabiliteit factor variëren de waarden in de literatuur tussen de 1.3 en 6.6." [6]

Om tot een conclusie te komen van de best te gebruiken kritische stabiliteitsfactor is er ook onderzocht welke factor er wordt gebruikt bij het berekenen van het minimaal benodigd gewicht tegen pumpjetbelasting. De relatie tussen de stabiliteitsfactor wordt op de volgende pagina verduidelijkt.



Pompjetbelasting

Het Waterloopkundig Laboratorium (tegenwoordig Deltares) heeft een andere empirische stabiliteitsrelatie [9] voor schroefstraalstroming gevonden, gebaseerd op de Izbash-relatie. Deze relatie wordt gebruikt voor het berekenen van het benodigd gewicht bij pompjet belasting.

Het Waterbouwkundig Laboratorium stelt dat de stabiliteitsparameter ook als maat van de turbulentie gebruikt wordt en heeft hiervoor waarden gevonden. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen “geen transport van de korrels” en “verplaatsing van een aantal korrels.”

Deze waarden staan in onderstaande tabel weergegeven;

Waterloopkundig laboratorium β

Geen transport van de korrels	0.55
Verplaatsing van een aantal korrels	0.70

Tabel 3: Stabiliteitsfactor volgens Waterloopkundig Laboratorium

Bij de berekening met de pompjet kan alleen de WL-relatie gebruikt worden. De eerder genoemde formule van Izbash [8] kan hier niet worden toegepast, omdat deze alleen voor uniforme stroming geldt. In het geval van een pompjet is er geen sprake van een uniforme stroming^[8].

Conclusie

Geconcludeerd kan worden dat de volgende waarden voor de kritische stabiliteitsfactor worden aangehouden (verplaatsing van korrels is toegestaan):

	Pompjet	Schroefbelasting, normale situatie	Schroefbelasting, uitzonderlijke situatie
$\beta_{ls,cr}$	0.70	2.5	1.3

Tabel 4: Stabiliteitsfactor volgens Waterloopkundig Laboratorium



8.2 Werkende belastingen

De combinaties tussen havens en maatgevende schepen hebben een aantal parameters opgeleverd (Bijlage D1). Met deze parameters zijn de maatgevende belastingen op de bodem van de haven berekend. De schroefstraalbelasting veroorzaakt door schepen is maatgevend. Belasting veroorzaakt door getijden en/of golven zijn van minder grootte waarden en kunnen verwaarloosd worden.

Er zijn een aantal belastingen die kunnen worden uitgerekend met formules [1] t/m [7];

- Maatgevende stroomsnelheid op de bodem veroorzaakt door de hoofdschroef(ven).
- Maatgevende stroomsnelheid op de bodem veroorzaakt door de boegschroef(ven).
- Maatgevende stroomsnelheid op de bodem veroorzaakt door de hoofdschroef(ven) in de hoek van de haven.

Zoals in hoofdstuk 6.3 vermeld bestaat de mogelijkheid dat schepen in de toekomst uitgerust zullen worden met pumpjets, volgens literatuur kunnen daarbij stroomsnelheden tot 10 m/s ontstaan. De nieuw te ontwerpen bodembeschermingsconstructie wordt naast de schroefbelastingen ook gedimensioneerd en berekend op de (10 m/s) veroorzaakt door een pumpjet belasting.

Daarnaast moet er rekening gehouden worden met de grotere stroomsnelheden die ontstaan in de hoek van de haven. Deze snelheden ontstaan doordat de straal achter de hoofdschroef via de kademuur direct naar de bodem wordt afgewend.

De nieuw te ontwerpen bodembeschermingsconstructie zal gedimensioneerd worden op onderstaande gevonden stroomsnelheden. Er zal een vergelijking worden gemaakt tussen het benodigd gewicht in stortsteen en het benodigd gewicht van de nieuwe constructie. Aan de hand van de stroomsnelheden en benodigde gewichten wordt er een kostenraming gemaakt van de verschillende constructie typen.

Stroomsnelheden zijn berekend bij de laagste waterstand (eb), dit geeft de grootste stroomsnelheid.

Haven	2 ^e Maasvlakte	1 ^e Maasvlakte	Botlek	Petroleumhaven	Waalhaven	Wilhelminakade
Schip	Maersk Triple E	MS Vale Brasil	S-klasse	Aframax	Vorstenbosch	Oasis
Waterdiepte	20 meter	23 meter	11 meter	15.5 meter	7.5 meter	13 meter
Maatgevende stroomsnelheid hoofdschroef	2.11 m/s	3.29 m/s	2.99 m/s	4.23 m/s	1.87 m/s	4.74 m/s
Maatgevende snelheid boegschroef	1.65 m/s	1.61 m/s	2.04 m/s	2.47 m/s	1.46 m/s	2.56 m/s
Uitzonderlijke belasting hoofdschroef in de hoek van de haven	4.74 m/s	5.99 m/s	4.49 m/s	6.09 m/s	3.73 m/s	7.20 m/s
Jetaangedreven schepen	-	-	-	-	-	10 m/s
Benodigd gewicht in kg $B_{Is,cr} = 2.5$	60 kg	857 kg	483 kg	3869 kg	29 kg	7660 kg
Benodigd gewicht in kg in de hoek van de haven $B_{Is,cr} = 1.3$	1077 kg	4386 kg	778 kg	4844 kg	255 kg	13.229 kg
Benodigd gewicht in kg bij pumpjet $B_{Is,cr} = 0.7$	-	-	-	-	-	15.000 kg

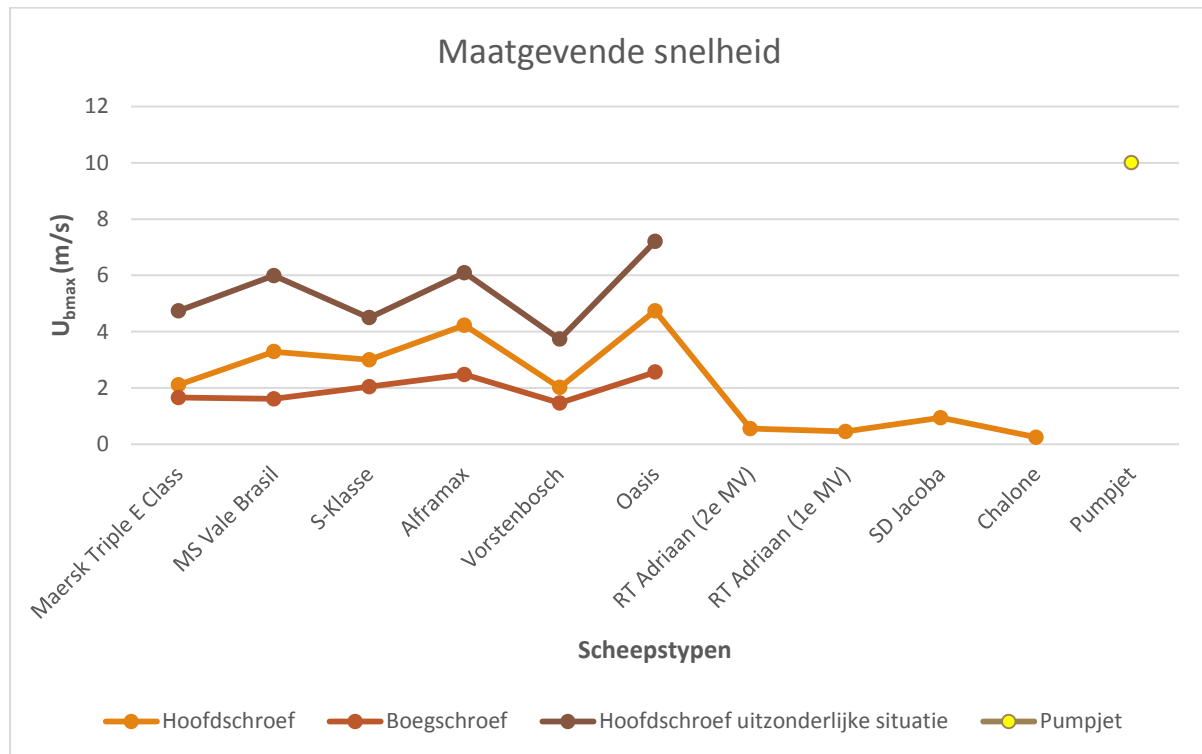
Tabel 5: Maatgevende belastingen



8.3 Vergelijking verschillende belastingen

In onderstaande grafiek zijn de verschillende belastingen die worden veroorzaakt per schip duidelijk weergegeven. In de literatuur wordt uitgegaan dat een pumpjet aangedreven schip een stroomsnelheid van 10 m/s op de bodem kan veroorzaken. In de grafiek is de bodemsnelheid veroorzaakt door pumpjets te zien, deze waarde wordt gebruikt ter vergelijking met de “normale” krachten van de hoofd- en boegschroeven.

In de tabel is af te lezen dat de bodemsnelheden veroorzaakt door sleepboten kleiner zijn dan de bodemsnelheden veroorzaakt door de ‘te assisteren’ schepen. Het ontwerp zal niet gedimensioneerd worden op de belastingen veroorzaakt door sleepboten (RT Adriaan t/m Chalone).



Figuur 11: Maatgevende kracht

De stroomsnelheden veroorzaakt door hoofdschroeven zijn groter dan de stroomsnelheden veroorzaakt door boegschroeven. Dit komt doordat bij de formules voor het berekenen van de hoofdschroefstraalbelasting wordt gerekend met een f-factor. De f-factor bepaald de manier waarop het stroombeeld gericht wordt op de kademuur. In de berekeningen is er gerekend met een f-factor van 1.2, deze factor gaat uit van een schuine projectie op de kademuur waarbij de stroomsnelheden maximaal zijn. Er wordt hierdoor uitgegaan van de meest ongunstige situatie.

De bodembescherming die wordt toegepast in gebieden waar uitzonderlijke situaties zich voor kunnen doen zal zwaarder moeten worden gedimensioneerd. Hier zijn de bodemsnelheden altijd het grootst.

De Oasis die in de Wilheminakade manoeuvreert veroorzaakt de grootste schroefstraalbelasting. Dit komt doordat de Oasis geen gebruik maakt van sleepbootassistentie en het grootste percentage aangewend motovermogen nodig heeft (60%).



9. Trade off Matrix

Nadat alle eisen en maatgevende belastingen in kaart zijn gebracht is er begonnen met het opstellen van een Trade off Matrix (T.O.M.). Deze matrix heeft als doel om de verschillende (schets)ontwerpen met elkaar te vergelijken en te kunnen beoordelen welk ontwerp optimaal is. Door het gebruiken van een T.O.M. worden de sterke en zwakke punten van de ontwerpen inzichtelijk.

Bij het ontwerpen van de Prefab- en In Situ constructies is er gebruik gemaakt van 5 verschillende T.O.M. tabellen, deze zijn te onderscheiden in:

1. Prefab schetsontwerpen
Hierin worden de verschillende schetsontwerpen met elkaar vergeleken.
2. Prefab definitieve varianten
Van het best scorend schetsontwerp zijn varianten gemaakt die wederom vergeleken zijn.
3. Prefab materiaal
Er worden verschillende (potentiele) materialen getoetst, toegepast op de definitieve variant.
4. In Situ uitvoeringsmethodiek
De verschillende In Situ uitvoeringstechnieken worden met elkaar vergeleken.
5. In Situ materiaal
Er worden verschillende (potentiele) materialen getoetst, toegepast op de definitieve uitvoeringsmethodiek.
6. Prefab vs. In Situ
De optimale Prefab constructie wordt vergeleken met de optimale In Situ uitvoeringsmethodiek. Uit deze Matrix volgt het advies voor de beste bodembescherming.

In de volgende hoofdstukken wordt de totstandkoming van de definitieve constructie typen beschreven. De sterke en zwakke punten van de verschillende ontwerpen en de totaalscores verkregen via de matrixen worden gegeven. Er wordt voor zowel de Prefab als de In Situ constructie een definitief ontwerp inclusief uitvoeringsplan uitgewerkt. Het definitieve prefab constructietype is getest in een proef, dit staat verder uitgewerkt in hoofdstuk 7.

In appendix A t/m E zijn alle T.O.M. overzichtstabellen opgenomen. Het overzichtstabel waarin de definitieve Prefab- en de In Situ constructie met elkaar worden vergeleken is opgenomen in hoofdstuk 17.



10. Prefab ontwerpen

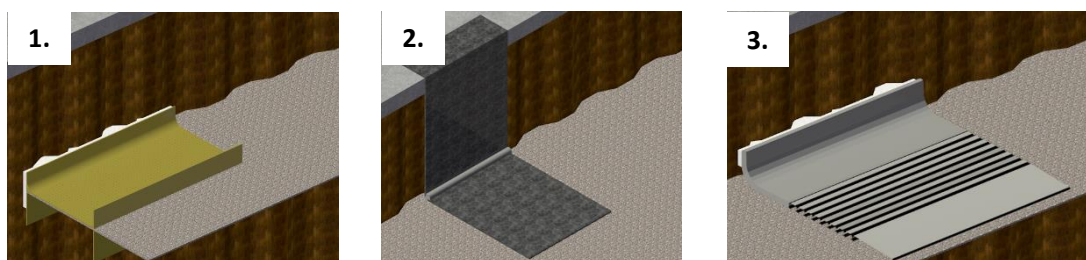
Dit hoofdstuk bevat alle prefab ontwerpen, eerst zullen alle schetsontwerpen worden getoond, vervolgens de definitieve varianten en er wordt afgesloten met het optimale Prefab constructie type. Ook zal worden uitgelegd wat de sterke en zwakke punten van de ontwerpen zijn. Het gehele rapport over de Prefab ontwerpen is terug te vinden in bijlage G1.

10.1 Schetsontwerpen

Deze paragraaf bevat alle beoordeelde schetsontwerpen en beschrijft de totstandkoming van het best scorende schetsontwerp. Eerst worden de drie slechtst scorende schetsontwerpen getoond met de bijbehorende score & sterke en zwakke punten. Daarna worden de twee best scorende schetsontwerpen getoond waarop is door ontworpen. De hoogst haalbare score is een 5, de laagste score is een 1.

10.1.1 Laagst scorende schetsontwerpen

Deze paragraaf bevat de benodigde informatie over de laagst scorende schetsontwerpen.



Figuur 12: Drie laagst scorende schetsontwerpen

Schetsontwerp 1 is een constructie die de vorm heeft van een tafel. De constructie kan met wanden in de grond worden verankerd. De opstaande wanden boven de grond wonden de schroefstraal belasting van de bodem af.

Deze constructie is te duur en heeft van zichzelf geen geometrisch dichte aansluiting met de damwand. De uitvoering vergt veel tijd en precisie (koppelingen tussen elementen)

Score: 2.3

Schetsontwerp 2 is een constructie die op de kade wordt gehangen. Onderaan de constructie bevindt zich een scharnier, dit scharnier zorgt ervoor dat de grondplaat van de constructie kan meebewegen.

Er zal extra materiaal benodigd zijn voor deze constructie, vooral in havens met een grote diepgang. Dit leidt tot hoge materiaal kosten. De uitvoering vergt bij elke haven een nieuwe aanpak.

Score: 2.8

Schetsontwerp 3 wordt als pakket in het water afgedreven, en gevuld met een vloeibaar materiaal. Het middelste gedeelte van het matras fungeert als zinkconstructie. De buitenste delen klappen uit tijdens het vullen van het matras.

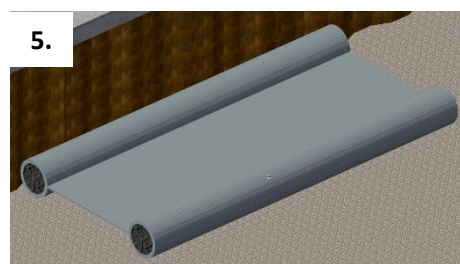
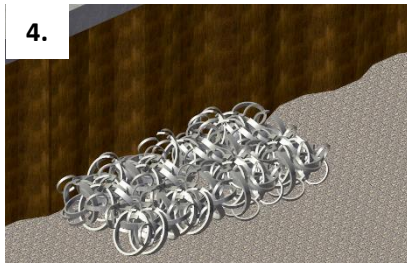
Het is onzeker of de flappen uit zullen klappen tijdens het vullen, en of ze een dichte aansluiting zullen vormen met de kade. Ook bevat de constructie veel onderlinge zwakke punten.

Score: 3.1



10.1.2 Hoogst scorende schetsontwerpen

Deze paragraaf bevat de benodigde informatie over de hoogst scorende schetsontwerpen.



Figuur 13: Twee hoogst scorende schetsontwerpen

Schetsontwerp 4 bestaat uit losse constructie elementen die in elkaar haken en daardoor een geheel vormen. Hierdoor verkrijgt de constructie genoeg gewicht om de schroefstraal belasting te weerstaan. Ook heeft de constructie als doel om sediment vast te houden.

Score: 3.8

Schetsontwerp 5 is een constructie die uit twee zakken bestaat die gevuld kunnen worden met zwaar vloeibaar / granulair materiaal. De twee uiteinden van de constructie dienen als zinkconstructie, tevens zijn deze uiteinden flexibel bevestigd om met ontgrondingskuilen mee te bewegen.

Score 3.8

Schetsontwerp 4 scoort net beter dan schetsontwerp 5 (3.83 & 3.81). Echter, is het nadeel van dit ontwerp dat de constructie teveel onzekerheden heeft:

- Het is niet zeker dat de constructie een (homogeen) geheel zal vormen.
- Zonder hulp constructie is de geometrisch dichte aansluiting met de kade niet te garanderen.
- Het is niet zeker dat de schroefstralen genoeg zullen worden afgeremd, omdat de constructie hydraulisch open is.
- Schetsontwerp 4 heeft geen variatie mogelijkheden, er kan alleen met de buisdiameters gevarieerd worden. Hierdoor zal het ontwerp moeilijk geoptimaliseerd kunnen worden.

De genoemde nadelen van schetsontwerp 4 hebben geleid tot de keuze om schetsontwerp 5 verder uit te werken. De scores van beide ontwerpen lagen zeer dicht bij elkaar. Echter is er bij schetsontwerp 5 nog veel ruimte voor verbetering. Er kunnen meerdere varianten worden uitgewerkt om zo tot een optimale score te komen. De volgende punten kunnen ten opzichte van het originele ontwerp verbeterd worden:

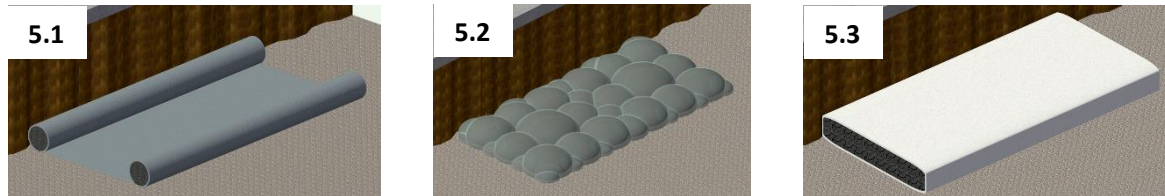
- De constructie bevat zwakke onderdelen, deze kunnen leiden tot bezwijken van de constructie. Vooral de aansluitingen vormen de zwakke punten in de constructie.
- De onderlinge aansluiting van de constructie-elementen zal bij het getoond ontwerp zeer lastig zijn. Bij varianten is dit een aandachtspunt.
- Schetsontwerp 4 zal gemakkelijk uit te voeren zijn, de elementen kunnen worden gestort vanaf een schip. Bij schetsontwerp 5 vergt de uitvoering nog teveel moeilijke handelingen. Hier ligt ruimte voor verbetering.
- De aansluiting met een stalen damwand kan nog verder onderzocht worden.

Er zijn varianten op schetsontwerp 5 gemaakt om dit ontwerp te optimaliseren. In appendix A is de volledige scoringstabel van de schetsontwerpen terug te vinden, voortgekomen uit het Trade off Matrix.



10.2 Definitieve varianten

Deze paragraaf bevat alle uit schetsontwerp 5 voortgekomen definitieve varianten. Ook beschrijft deze paragraaf de totstandkoming van de best scorende Prefab variant. De hoogst haalbare score is een 5, de laagste score is een 1.



Figuur 14: Definitieve varianten

Variant 5.1 is een constructie die uit twee zakken (worsten) bestaat met daartussenin een geperforeerde geotextielen laag. De zakken worden gevuld met zand (afvalgrond). Deze twee 'zakken' dienen als zinkconstructie.

Score: 3.5

Variant 5.2 is een constructie die bestaat uit een zak (geotextiel) die gevuld is met een super absorberend polymeer. Het doel van dit polymeer is dat die water opneemt, waardoor de zakken tegen elkaar uitzetten en er zo een homogene constructie ontstaat.

Score: 4.6

Variant 5.3 heeft de vorm van een matras. De constructie zal gevuld worden met jetgroutretourstroming. Doordat dit pas na 1 dag zal zijn uitgehard kan er een dichte verbinding met de kade worden verkregen. Tijdens het uitharden zal de constructie uitzetten.

Score: 4.2

Variant 5.1 geeft een lage score (3.5) en valt hiermee definitief af van de varianten. Dit constructietype heeft veel nadelen:

- Moeilijk uit te voeren vanwege de onderlinge aansluiting,
- Veel zwakke aansluitingen (onderling tussen het geotextiel en de zakken & tussen de aansluiting van de elementen),
- Herstelmogelijkheden zijn beperkt,
- Gevolgen van bezwijken groot,
- Moeilijk toe te passen met eventuele obstakels (buispalen / remmingwerk).

De tweede en derde variant scoren allebei goed (4.6 & 4.2). Het verschil tussen deze twee varianten wordt gemaakt door de volgende punten:

Voordelen variant 5.3

- Variant 3 lijkt beter bestand te zijn tegen overbelasting en er zullen ook minder gevolgen zijn na bezwijking.

Nadelen variant 5.3

- Variant 3 is moeilijk uit te voeren (tijdrovend),
- Er is weinig zekerheid over onderlinge aansluiting en aansluiting met de kademuur / damwand,
- Deze variant is moeilijk toe te passen met eventuele obstakels (buispalen / remmingwerk).



Voordelen variant 5.2

- Variant 5.2 is makkelijker toepasbaar per haventype (anders dimensioneren is goed mogelijk) en er kan ook preciezer een aansluiting met de kademuur worden gegarandeerd.
- Mocht er een element bij variant 5.2 aan onderhoud toe zijn, dan kan een element boven het water worden gehesen en worden vervangen door een nieuw element. Dit wordt verder toegelicht in het uitvoeringsplan (hoofdstuk 13).
- De tweede variant is snel en eenvoudig uit te voeren. De zakken kunnen op het schip worden gevuld en te water worden gelaten. Terwijl een zak water absorbeert kan de zak op zijn plek worden afgezonken en die zal hier na verloop van tijd uitharden. Er kan zelfs gezocht worden naar een uitvoeringsmethodiek waarbij de zakken achter elkaar door van de boot af geladen worden en dat het schip al varende de bodembescherming aanbrengt.
- De kosten van variant 5.2 scoort op alle aspecten goed, er is weinig productie en weinig investering nodig. De productie is niet ingewikkeld en zal weinig tijd in beslag nemen. En het allerbelangrijkste de kosten per m² zijn erg laag in vergelijking met traditionele bodembescherming. Naar schatting meer dan 25 % goedkoper.

De kosten worden verder toegelicht in hoofdstuk 8.4

Variant 5.2 scoort het best en is daarmee de optimale variant. Deze variant blijft flexibel door het gebruik van polymeren en er kunnen restmaterialen gebruikt worden om elementen te vullen. Er zal nog een materiaaloptimalisatie gedaan worden om te bepalen uit welke materialen dit constructietype zal bestaan. Dit zal niet ver afwijken van de momenteel gekozen materiaalkeuze: (geotextiel & polymeer). De derde variant liet zien dat jetgroutretourstroming ook veel voordelen biedt. Dit materiaal is goedkoop, zwaar & vloeibaar aan te brengen. In de materiaalanalyse zal dus ook gekeken worden naar jetgroutretourstroming toegepast in variant 5.2.

In appendix B is de volledige scoringstabel van de definitieve varianten terug te vinden, voortgekomen uit het Trade off Matrix.

Er is een proef uitgevoerd om de werking van variant 5.2 te testen. Tijdens de proef zal er onder andere worden gekeken naar de minimaal benodigde afmetingen van de elementen (dit heeft invloed op de contractdiepte). Ook kan er aan de hand van de dimensionering een kostenraming worden gemaakt. De proef staat uitgewerkt in hoofdstuk 12.



10.3 Materiaaloptimalisatie Prefab

Om het definitieve Prefab constructietype zo goed mogelijk in zijn functie te laten voldoen is er een materiaaloptimalisatie uitgevoerd. Er is gekeken naar 5 bruikbare materialen met allemaal bijzondere eigenschappen. Deze materialen zijn met elkaar vergeleken in een T.O.M. terug te vinden op de volgende pagina, voor het volledige rapport zie Bijlage G4.

De volgende materialen zijn onderzocht om de geotextielen zakken te vullen:

- Jetgrout retourstroom (cementspecie vrijgekomen na jetgrouten)
- Polymeren:
 - Gelatine + eventueel bariet, (eiwitproduct met uitzettende eigenschappen)
 - Super absorberende polymeer (korrels die 100 x eigen gewicht aan water opnemen)
 - Hydrogel / Supergel (korrels die 800 x eigen gewicht aan water opnemen)
- Staalslakken (restproduct van hoogovens)

In onderstaande tabel is te zien dat de totaalscores van zowel SAP (super absorberend polymeer) als supergel gelijk zijn. Daarnaast is er een klein verschil te zien met het materiaal staalslakken. Er wordt in dit onderzoek gekozen om SAP toe te passen in de nieuwe bodembeschermingsconstructies. Supergel is een product dat in 2013 is ontdekt en nog volop in ontwikkeling is, het product heeft veel potentie maar nog te veel onzekerheden over de werking en de uiteindelijke kosten.

Materiaal	TOTAALSCORE
Jetgrout	3.2
SAP	4.4
Gelatine	2.6
Supergel	4.4
Staalslakken	4.2

Tabel 6: Materiaal scores

Plastische materialen krijgen in dit onderzoek de voorkeur. Doordat de materialen plastisch zijn (voor uitharding) kan er een optimale aansluiting met een stalen damwand gerealiseerd worden. Daarnaast zijn obstakels gemakkelijk te integreren in het ontwerp. Staalslakken hebben het nadeel niet plastisch te zijn, hierdoor kan een optimale aansluiting niet gegarandeerd worden.

Andere voordelen aan SAP zijn de benodigde hoeveelheid materialen. Doordat dit materiaal 100x zijn eigen gewicht aan water op kan nemen zal het product uitzetten waardoor er relatief weinig materiaal nodig is. Door het absorberende- en uitzettende vermogen van het materiaal blijven de kosten laag.

Ook wordt er aangenomen dat de verwerking van SAP in het definitief ontwerp snel en gemakkelijk zal zijn. Als er water aan het materiaal wordt toegevoegd bereikt het element binnen een half uur zijn benodigde grootte. In het definitieve ontwerp zal er gewerkt worden met geotextielen zakken, deze zakken worden gevuld met SAP korrels. De zak wordt vervolgens langs de kade naar beneden geleid waarna het materiaal water zal opnemen en uitzetten. De constructie zal zichzelf tegen de kadeconstructie aan drukken. De zakken worden uitgevoerd in geotextiel, door de open structuur van geotextiel zal de overdruk onder de constructie geminimaliseerd worden.

In appendix C is de volledige scoringstabel van de Prefab materialen terug te vinden, voortgekomen uit het Trade off Matrix.

In het volgende hoofdstuk wordt variant drie uitgewerkt tot een definitief ontwerp.



11. Definitief Prefab ontwerp

Variant 3 wordt in dit hoofdstuk uitgewerkt tot definitief ontwerp. Deze variant heeft de naam 'Jellyfish' gekregen vanwege zijn vorm en flexibiliteit. Er zal een beschrijving worden gegeven van de Jellyfish bodembeschermingsconstructie. In deze beschrijving zal de keuze voor dit ontwerp verder worden toegelicht, ook zal een uitvoeringsplan worden gegeven.

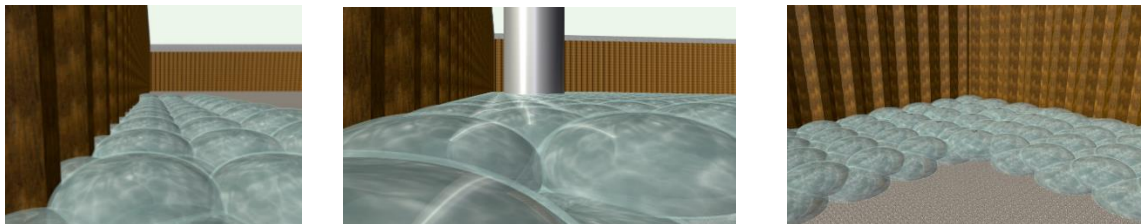
Er is een proef uitgevoerd om de werking van de Jellyfish te testen, de resultaten zijn terug te vinden in hoofdstuk 12. Voor het volledige rapport van het definitief ontwerp zie bijlage H1, het uitvoeringsplan is terug te vinden in bijlage I1.

11.1 Jellyfish bodembescherming

De Jellyfish constructie is een innovatief concept die toegepast kan worden als bodembescherming. De constructie bestaat uit een geotextielen zak die SAP korrels bevat. Deze korrels kunnen tot 100 maal de eigen massa aan water op nemen en vasthouden. Hierdoor zal een Jellyfish element uitzetten nadat het met water in aanraking komt en vervolgens uitgezet blijven.

De elementen bevatten een minimaal percentage toegevoegd gewicht (zand) zodat de elementen gemakkelijk naar de bodem zinken, om daar vervolgens uit te zetten en een homogeen vlak te vormen.

Om een beeld te krijgen van hoe de constructie eruit ziet, staan hieronder een aantal tekeningen van de Jellyfish weergegeven:



Figuur 15: Jellyfish bodembescherming

Doordat de elementen op de bodem tegen elkaar aan liggen en vervolgens uitzetten kan een homogeen 'vlak' op de bodem ontstaan (de elementen drukken tegen elkaar aan). Dit 'tegen elkaar aandrukken' zorgt ervoor dat de Jellyfish elementen kleiner dan het minimaal benodigd gewicht kunnen worden gedimensioneerd. De spanning die door de schroefstraalbelasting op één element ontstaat, wordt namelijk overgedragen op de omringende Jellyfish elementen. De flexibiliteit en vervormbaarheid van een Jellyfish element vergroot de mogelijkheid om deze spanning over te dragen en op te nemen.

De zakken bestaan uit geotextiel om watervoerend te kunnen zijn waardoor de overdruk onder de constructie wordt weggenomen. Het polymeer in de zakken is net zoals het geotextiel watervoerend.

Voordelen uitzettend vermogen Jellyfish:

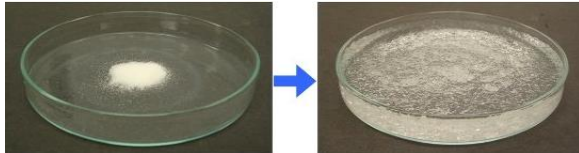
1. Elementen kunnen minder zwaar (kleiner) worden gedimensioneerd dan stortsteen.
2. De constructie creëert uit zichzelf een dichte aansluiting met een stalen damwand.
3. De constructie kan eventuele obstakels zoals buispalen integreren.
4. Er is weinig materiaal nodig (grootste gedeelte is water).
5. Snelle uitvoering doordat elementen 'overboord' kunnen worden gegooid.
6. Niet uitgezette elementen nemen weinig ruimte in (transport).

Bovenstaande voordelen maken de Jellyfish een economisch voordelig bodembeschermingsconcept. Het nadeel van de Jellyfish is dat er een aantal onzekerheden zijn die verder onderzoek vereisen. Deze te onderzoeken onzekerheden worden in het laatste hoofdstuk aanbevelingen verder toegelicht.



11.2 Uitzettend & klemmend vermogen S.A.P.

Zoals eerder genoemd is een SAP een kunstmatig polymeer dat extreem grote hoeveelheden vloeistof kan opnemen en vasthouden ten opzichte van zijn eigen massa (dit kan ook onder druk). Een SAP wordt ook wel gebruikt in tuinverwerking. SAP korrels worden op het gras gelegd waarna ze tot 100 keer het eigen gewicht in water vasthouden (het gras kan dit water dan later absorberen). Zie onderstaand figuur voor verduidelijking van de werking van een SAP.



Figuur 16: Werking van Super Absorberend Polymeer^[9]

De SAP korrels in de Jellyfish zullen grote hoeveelheden water opnemen. De uitgezette SAP korrels zullen dit water vasthouden en het geheel zal zich klemmen.



Figuur 17: uitgezette SAP substantie^[11]

Links: water wordt bij SAP korrels toegevoegd

Midden: een 'stokje' wordt tussen de harde uitgezette korrels geplaatst

Rechts: het 'stokje' blijft ondersteboven op zijn plaats

11.3 Levensduur

In de literatuur fluctueren de gegeven waarden voor de levensduur. Bij de toepassing in de tuinindustrie zullen de SAP korrels zichzelf constant helemaal vol met water zuigen en vervolgens weer leeglopen (dit is een constant herhalend proces). Hierbij is de verwachte levensduur ongeveer 8 jaar.

Echter zijn er SAP toepassingen in de techniek en geneeskunde die spreken van een 'zeer lange levensduur'. Ook is er onlangs op de Radboud Universiteit een SAP genaamd 'supergel' ontwikkeld waarvan de uitvinder spreekt van een extreem lange levensduur^[24]. Dit moet nader onderzocht worden.

De verwachte levensduur van geotextiel varieert tussen de 20 en 100 jaar, afhankelijk van de hoeveelheid ondervonden Uv-straling^[10].

11.4 Duurzaamheid

Super absorberende polymeren komen voor in verschillende soorten toepassingen, momenteel vooral in de tuinindustrie. Een SAP is een niet natuurlijk product en is dus kunstmatig gefabriceerd. Echter zeggen de producenten dat deze SAP korrels niet schadelijk zijn voor het milieu. Daarnaast worden niet schadelijke super absorberende polymeren gebruikt, bijvoorbeeld in: tuinindustrie, maandverband, tampons en gelverdichtingen op wonden.

In de literatuur is geen duidelijke richtlijn te vinden over de schade die een SAP korrel kan veroorzaken aan het milieu. Bovenstaande voorbeelden laten zien dat SAP korrels momenteel wel worden toegepast in dagelijkse toepassingen. Geotextiel is niet schadelijk voor het milieu. Geotextiel is al veelvuldig toegepast bij bodembescherming. Hiernaast wordt geotextiel gebruikt in veel andere toepassingsmethodieken: Geotubes, zinkstukken en dijkversterkingen. Er zal verder onderzoek naar de duurzaamheid verricht moeten worden.



12. Proef Jellyfish

Eerder zijn een aantal voordelen van de Jellyfish constructie genoemd (pagina 22). Met de aangenomen stellingen tijdens de Jellyfish proef is getracht deze voordelen en de verdere werking van de Jellyfish constructie te bewijzen. De volledige proefuitwerking is terug te vinden in bijlage E5.

12.1 Proefopstellingen

Tijdens deze proef zijn er 5 losse proefopstellingen bedacht. De vierde en vijfde proefopstellingen waren overkoepelend en bevatte alle benodigde aspecten voor de beantwoording van de vooraf gestelde stellingen. Onderstaand wordt proef 5 met figuren verduidelijkt, de overige proefopstellingen zijn terug te vinden in bijlage E5.



Proef 5: Tijdens de proef is er een damwand nagebootst en is er een buispaal geplaatst. Het toepassingsgebied is afgeschermd met opsluitzakken. Met een waterstraal is de maximale belasting bepaald.

Figuur 18: Proefopstelling 5

12.2 Stellingen

Deze paragraaf beschrijft de vier vooraf gestelde stellingen met het bijbehorende antwoord.

Stelling 1

Jellyfish elementen kunnen kleiner worden gedimensioneerd dan het minimaal benodigd gewicht voor een stortsteen bodembeschermingsconstructie. Dit komt doordat ze tegen elkaar uitzetten en hierdoor een geheel vormen.

Resultaat

Ja, dit klopt, bij proef 4 en proef 5 bleef de Jellyfish constructie intact bij een bodemsnelheid van 1.75 m/s. Volgens de formule van Izbash [8] zal een stortsteen ongeveer 20 kilogram moeten wegen om niet weg te spoelen bij een snelheid van 1.75 m/s. Het zwaarste Jellyfish element woog ongeveer 150 gram.

Stelling 2

Jellyfish elementen geven de ondervonden belastingen aan elkaar door (schuifspanning).

Resultaat

Ja, dit klopt, bij proef 5 werd duidelijk waargenomen dat het belasten van één element beweging van een verderop liggend element veroorzaakte.

Stelling 3

Doordat Jellyfish elementen tegen elkaar en tegen objecten uitzetten, kan er een geometrisch dichte aansluiting met een stalen damwand worden gecreëerd.

Resultaat

Ja, dit klopt, dit is bij de 4de proef gebleken; het onderliggende zand bleef liggen na belasting met een bodemsnelheid van 1.75 m/s.

Stelling 4

Doordat Jellyfish elementen tegen elkaar en tegen objecten uitzetten, kan er een dichte aansluiting met een buispaal / stalen damwand worden gecreëerd.

Resultaat

Ja, dit klopt, dit is bij de 5de proef gebleken; de Jellyfish constructie vormde om een buispaal heen en bleef intact bij een bodemsnelheid van 1.75 m/s.



Conclusie & Aanbevelingen van de proef

Er kan door middel van de Jellyfish methode een bodembeschermingsconstructie worden gecreëerd. De elementen zetten uit en hierdoor kan er een homogeen vlak op de bodem ontstaan. Dit principe zorgt ervoor dat elementen kleiner kunnen worden gedimensioneerd. Ook vormt de constructie om een stalen damwand of buispaal heen. Wel zijn er een aantal belangrijke aandachtspunten voortgekomen uit de proef:

- Er moet een opsluiting rondom het toepassingsgebied van de Jellyfish elementen worden gecreëerd, zodat de elementen zichzelf hier tegen aan kunnen drukken. De flexibiliteit van deze 'opsluitband' moet geminimaliseerd worden, dit ter voorkoming van het wegdrukken van de opsluitband door de Jellyfish elementen.
- In de kasten van damwanden moeten Jellyfish elementen geplaatst worden met een extra toevoeging van polymeer. Dit element heeft meer uitzettend vermogen en zorgt hierdoor voor een geometrisch dichte aansluiting. Dit element kan geplaatst worden met behulp van een valpijp.
- Een Jellyfish element moet in alle richtingen evenveel kunnen uitzetten. De Jellyfish zak zal uit een niet te rekbaar materiaal (geotextiel) moeten bestaan. Is dit niet het geval dan zal het polymeer de weg van de minste weerstand zoeken en in maar één richting gaan uitzetten. Hiermee kan geen homogeen in elkaar uitzettend vlak worden gecreëerd.
- Er moeten twee lagen Jellyfish elementen worden aangebracht. De bovenste laag moet groter gedimensioneerd worden dan de onderste laag. Hierdoor worden alle kleine open ruimte opgevuld. Ook zal de bovenste laag iets zwaarder gedimensioneerd zijn als een veiligheidsfactor voor uitzonderlijke belastingen.
- De tweede laag (toplaag) zorgt ervoor dat de elementen niet worden opgedrukt of over elkaar heen schuiven. Dit moet tijdens een vormstudie verder onderzocht worden.
- Een Jellyfish heeft ongeveer 1/20 van zijn uiteindelijke gewicht nodig om meteen te zinken naar de bodem. Hierdoor ontstaan er tijdens de uitvoering geen problemen met eventuele stromingen.

Er moet nog een onderzoek naar de beste vorm van een element worden gedaan. De Jellyfish elementen die tijdens de proef zijn gebruikt waren nooit perfect rond en konden te veel uitzetten in alle richtingen. Hierdoor is er als het ware in een slechte situatie getest. Het nog niet zeker of rond überhaupt de beste vorm is. Er is tijdens de proef gewerkt met ronde elementen, deze elementen rolde naarmate ze uitzetten van elkaar weg en creëerde hierdoor een homogeen vlak.

De elementen gebruikt in de proef weerstonden een stroomsnelheid van 1.75 m/s. Met behulp van de verschalingsformules [10] & [11] kan een vertaling naar de werkelijkheid worden gemaakt. Door deze verscaling toe te passen kan er een kostenraming worden gemaakt van een werkelijke constructie, zie hoofdstuk 16.



Figuur 19: Impressie van de werking van de Jellyfish bodembescherming



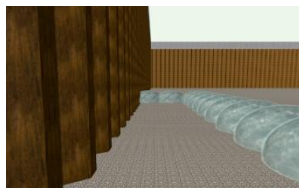
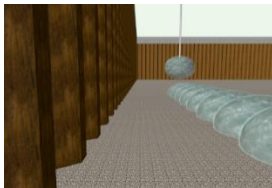
13. Uitvoeringsplan Jellyfish

Dit hoofdstuk bevat de uitvoeringsmethodiek voor de Jellyfish, deze uitvoeringsmethodiek is tot stand gekomen door de bevindingen uit de proef. Tijdens de proef zijn er een aantal sterke en zwakke punten van de constructie naar voren gekomen, zie bijlage E5.

Stap 1, De opsluiting

Om te beginnen zullen er opsluitzakken vanaf een schip/kade te water gelaten worden. Deze opsluitzakken, vormen de grens van de constructie en zullen hierdoor met precisie geplaatst moeten worden (GPS).

Naast de afgrenzende functie van de opsluitzakken moeten deze zakken ook weerstand bieden tegen de uitzettende Jellyfish elementen die in een latere stap tussen de kade en de opsluiting geplaatst worden. De afsluitende zakken zullen voor 80 % gevuld zijn met secundair materiaal en voor 20 % met polymeer.



Figuur 20: De afsluitende rij opsluitzakken

Stap 2, Basis laag

Zodra de opsluitzakken geplaatst en uitgezet zijn kan de basis laag van de Jellyfish elementen geplaatst worden. De basis laag bestaat uit elementen die zijn voorzien van $\frac{1}{20}$ deel aan toegevoegd gewicht (5% van het gewicht aan geabsorbeerd polymeer) waardoor de elementen tijdens het afzinken geen invloed hebben van eventueel aanwezige stroming.



Figuur 21: De basis laag i.c.m. de opsluitzakken

Stap 3, Damwand elementen

Zodra de basis laag samen met de opsluitzakken tot een homogeen bed is gevormd kunnen de damwand elementen geplaatst worden. Doordat de basis laag al ligt zullen de damwand elementen zichzelf uitzetten tussen de damwand en de basis laag, hierdoor ontstaat een geometrisch dichte aansluiting. Er is bij de damwand elementen gekozen voor een grotere hoeveelheid polymeer om te garanderen dat het element voldoende uitzet tussen de damwand elementen.



Figuur 22: Aansluiting met damwand d.m.v. damwand elementen

Stap 4, Toplaag

Zodra de damwand elementen zijn geplaatst kan de toplaag worden gestort. Deze toplaag is voorzien van een groter percentage toegevoegd gewicht dan de basis laag. Het toegevoegde gewicht zorgt ervoor dat de basis laag te allen tijde een homogeen vlak kan vormen. Daarnaast vangt de toplaag eventuele overbelasting of incidentiele belasting op.



14. In Situ

Nadat de definitieve Prefab constructie is uitgewerkt zal nu worden ingegaan op de In Situ bodembescherming.

Het In Situ verbeteren van grond wordt tot op heden vooral toegepast voor het verstevigen van funderingen van bouwwerken, wegen en terreinen. Hierbij kan gedacht worden aan het verstevigen van de grondlaag onder een funderingspaal of het creëren van een waterdichte laag in een bouwkuip.

De bestaande methodes voor In Situ bodemverbetering bevatten allemaal een injectie- en/of vermengingsmethodiek. Zo kunnen er door middel van jetgrouten kolommen naast elkaar worden geïnjecteerd. Met een waterglasinjectie kan het grondpakket onder een funderingspaal verstevigd worden, hierdoor zal er meer draagkracht verkregen kunnen worden. Een aantal In Situ methodes bieden potentie voor een bodembeschermingsconstructie.

Om tot een optimale In Situ bodembeschermingsconstructie te komen zijn er een aantal In Situ bodemverbeteringsmethodes onderzocht. De potentiële In Situ methodieken waarmee een bodembescherming kan worden gerealiseerd worden in dit hoofdstuk beknopt beschreven. Ook worden de methodieken met elkaar vergeleken en wordt er een uiteindelijk een optimale In Situ bodembescherming verkregen met behulp van een Trade off Matrix. Aan deze optimale bodembescherming wordt een materiaal gekoppeld.^[15]

14.1 In Situ methodieken

Er zijn een aantal bodemverbeteringsmethodieken onderzocht; cutter soil mixing, jetgrouten, BeauDrain en injecteren. Onderstaand staan de methodes beschreven met de bijbehorende voor- en nadelen.

Cutter Soil Mixing



Figuur 23: CSM methodiek
[14]

Bij Soil Mixing wordt er een cementmengsel onder druk door een holle voerbuis naar een injectieopeningen in de mixkop gepompt. Door de draaiende beweging van de mixkop wordt het cementmengsel gemengd met de losgemaakte grond.

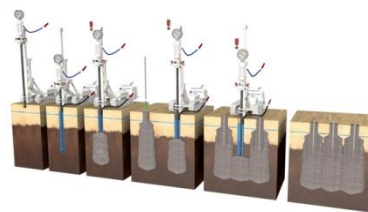
Voordelen:

- Hoge productiviteit
- Door boorkop toepasbaar in bijna alle grondsoorten

Nadelen:

- Minimale laagdikte relatief groot door afmetingen boorkop

Jetgrouten



Figuur 24: Jetgrout
[15]

Jetgrouten is een injectiesysteem op basis van zeer hoge druk. Bij deze techniek wordt de te behandelen grond versneden en vervolgens vermengd met grout (cementmengsel). Er kan in beperkte ruimtes worden gewerkt.

Voordelen:

- Grote sterkte te verkrijgen
- Toepasbaar in bijna alle grondsoorten

Nadelen:

- Tijdens de uitvoering altijd rekening houden met retourspoeling
- Gevoelig voor onbekende grotere obstakels onder de grond

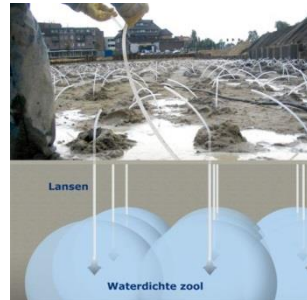


BeauDrain



Figuur 25: BeauDrain
[16]

Injecteren



Figuur 26: Injecteren (waterglas)
[17]

Voor de installatie van een BeauDrain-systeem wordt met een multifunctioneel ploegmes met een sleufloze techniek door de grond gesneden. Tijdens dit snijproces worden drains in de grond aangebracht. Met de horizontale drain wordt er injectievloeistof in de bodem geïnjecteerd.

Voordelen:

- Geen aanvoer van drainzand of afvoer/opslag van uitkomende grond
- Korte installatieperiode

Nadelen:

- Moeilijk te beoordelen kwaliteit van de gevormde constructie
- Vanwege nieuw systeem weinig ervaring

Niet cohesieve grond, zoals zand en grind kan worden geïnjecteerd met een mengsel (dit gebeurt met een relatieve lage injectiedruk). Hiermee worden de korrels aan elkaar gekit of de ruimtes tussen de korrels gevuld, zodat een steenachtig of waterkerend massief ontstaat

Voordelen:

- Verontreinigde grondlagen inkapselen

Nadelen:

- Duurzaamheid kan niet worden gegarandeerd
- Alleen toepasbaar in grofkorrelige grondsoorten

14.2 Trade off Matrix methodieken

Om de In Situ methodieken met elkaar te vergelijken is een Trade off Matrix opgesteld. Het volledige rapport is terug te vinden in bijlage G5. In appendix D staat de volledige T.O.M. tabel weergegeven.

Jetgrouten & Injecteren

De jetgrout- en injectie methodiek zullen in dit rapport niet worden vergeleken en vallen meteen af. Vooraf werd duidelijk dat deze methodieken te veel negatieve eigenschappen bevatten:

1. Het is niet zeker of de aangebrachte grondlaag een (homogeen) hard geheel zal vormen. (Deze onzekerheid bestaat ook bij de andere methodieken maar in mindere mate.)
2. De uitvoering van vooral de injectie methodiek vergt veel moeilijke handelingen en is niet snel te volbrengen.
3. Bij de injectie methodiek kan er niet in alle grondsoorten worden gewerkt.
4. Overtollig materiaal dat tijdens het 'opvullen' van de grond vrijkomt, kan de contractdiepte aantasten.
5. Bovenstaande technieken zijn in vergelijking met de overige methodieken relatief duur.

Jetgrouten & injecteren hebben wel één gemeenschappelijke positieve eigenschap; namelijk een dichte aansluiting verkrijgen met een stalen damwand/obstakels. Door deze eigenschap is er besloten om deze methodieken eventueel als combinatie of reparatie te gebruiken. Jetgrouten krijgt hierbij de voorkeur omdat injecteren arbeidsintensief is.



Cutter Soil Mixing & BeauDrain

Het aanbrengen van een bodemverbetering door middel van cutter soil mixing scoort het hoogst in de Trade off Matrix voor In Situ methodieken (4.1). Een bodembeschermingsconstructie aangelegd met een BeauDrain scoort slecht in vergelijking met de CSM methodiek (2.7).

De CSM methode scoort het hoogst door de volgende eigenschappen van de methodiek:

1. Kan toegepast worden in elk type grond. De boor en/of frees kop mixt de ondergrond onder de contractdiepte met het betreffende materiaal waarna er een harde ondergrond gevormd wordt.
2. Vrijwel elk materiaal kan worden verwerkt door de Deep Soil Mixer.
3. Er kan tot op grote diepte gewerkt worden.
4. De CSM methode is economisch gezien voordeliger dan de andere In Situ methodieken (€ 100, - p/m²).
5. Het is een sterke methode met betrekking tot de uitvoering en de benodigde tijd hiervoor.

Echter, heeft deze methodiek een extra handeling nodig om een geometrisch dichte aansluiting met een stalen damwand/obstakels te kunnen garanderen. Voor deze 'extra handeling' kan gedacht worden aan jetgrouten.

Het aanbrengen van een bodembescherming met een BeauDrain wordt niet verder uitgewerkt. De BeauDrain methodiek scoort slecht op de volgende punten:

1. Grote arbeidsintensiteit vereist.
2. Er is een grote investering nodig om een BeauDrain om te bouwen (huidig bestaande machines werken alleen verticaal, voor een bodembescherming moeten ze horizontaal kunnen werken)
3. Onzekerheid of de ontstane constructie homogeen is.

Daarnaast kan er net zoals bij de CSM methodiek geen aansluiting worden gecreëerd met een stalen damwand/obstakels.

De CSM methodiek zal verder worden uitgewerkt, eerst is er naar een materiaal gezocht om bij deze methodiek toe te passen. Voor het creëren van een aansluiting met een stalen damwand zullen er jetgrouten kolommen worden geplaatst.



14.3 In Situ Materialen

Nadat er een optimale In Situ uitvoeringsmethodiek is verkregen, moet er een materiaal aan deze uitvoeringsmethodiek worden gekoppeld. Om dit te bereiken zijn vier materialen met elkaar vergeleken (toegepast op de CSM methodiek). Hieronder staan een aantal van deze materialen + korte uitleg gegeven:

Jetgrout retourstroom

Tijdens het jetgrouten komt een mengsel van water, grout en grond omhoog, 'spoil' genoemd. Deze spoil kan worden hergebruikt (jetgrout retourstroming).

Cement

Cement is een fijngemalen materiaal dat na mengen met water een plastische massa vormt, die zowel onder water als in de buitenlucht verhardt. Aan de cementmix kan hydraulisch kalk worden toegevoegd, hierdoor wordt het cement in meer grondsoorten toepasbaar.

Waterglas

Waterglas is, zoals de naam al aangeeft, een transparante vloeistof die ook wel bekend staat als natriumsilicaat. Waterglas is waterafstotend; wordt het diep in de bodem geïnjecteerd en vormt het een dicht grond 'tapijt', dan houdt het opkomend grondwater effectief tegen. Het waterglas moet dan wel met een zogeheten 'harder' zijn vermengd, omdat het anders te vloeibaar blijft.

Micro cement

Micro cement is cement dat met kleinere korrels vermengd kan worden. Met microcement, ook wel ultrafijn cement genoemd, is het mogelijk tot middel grof zand te injecteren. Het voordeel van microcement is dat in de fijnere poriën van vaste grondsoorten en rots 'geïnjecteerd' kan worden.

14.4 Trade off Matrix In Situ materialen

Om de In Situ materialen met elkaar te vergelijken is een Trade off Matrix opgesteld. Het volledige rapport is terug te vinden in bijlage G5. In appendix E staat de volledige T.O.M. tabel weergegeven.

Microcement en waterglas + harder scoorde het laagst van alle materialen (2.2). Allebei de materialen zijn duurder dan jetgrout retourstroming & cement. Daarnaast is microcement alleen toepasbaar in een beperkt aantal grondsoorten. Beide materialen voldoen wel aan de minimaal benodigde levensduur (50 jaar).

Jetgrout retourstroming & cement scoren het best (5). Beide materialen zijn relatief goedkoop en voldoen ook aan de benodigde levensduur. Echter is er wel één groot nadeel aan Jetgrout retourstroming:

1. De retourstroom moet binnen 24 uur van het vrijgekomen werk getransporteerd worden en vervolgens aangebracht worden op het nieuwe werk (dit proces kan iets verlengd worden door een 'antistollingsmiddel' toe te voegen).

Door het bovengenoemde nadeel is ervoor gekozen om cement als optimaal materiaal te benoemen.

De CSM methodiek in combinatie met een cementspecie is de optimale In Situ grondverbeteringsoplossing om een bodembescherming mee te verkrijgen. De aansluiting met de damwand kan worden gecreëerd met jetgrouten kolommen. In het volgende hoofdstuk is hiervoor een uitvoeringsplan gemaakt.



15. Uitvoeringsplan CSM + Jetgrout

Na het bepalen van de optimale In Situ methodiek voor het aanbrengen van een bodembescherming, is er voor deze methodiek een uitvoeringsplan opgesteld. Dit hoofdstuk bevat het uitvoeringsplan.

De In Situ bodembeschermingsconstructie zal worden gerealiseerd door het combineren van twee grondverbeteringstechnieken. Met de Cutter Soil Mix methodiek zal de basis van de constructie worden verkregen. Met Jetgrouting wordt de geometrisch dichte aansluiting met de damwand en/of kademuur gegarandeerd.

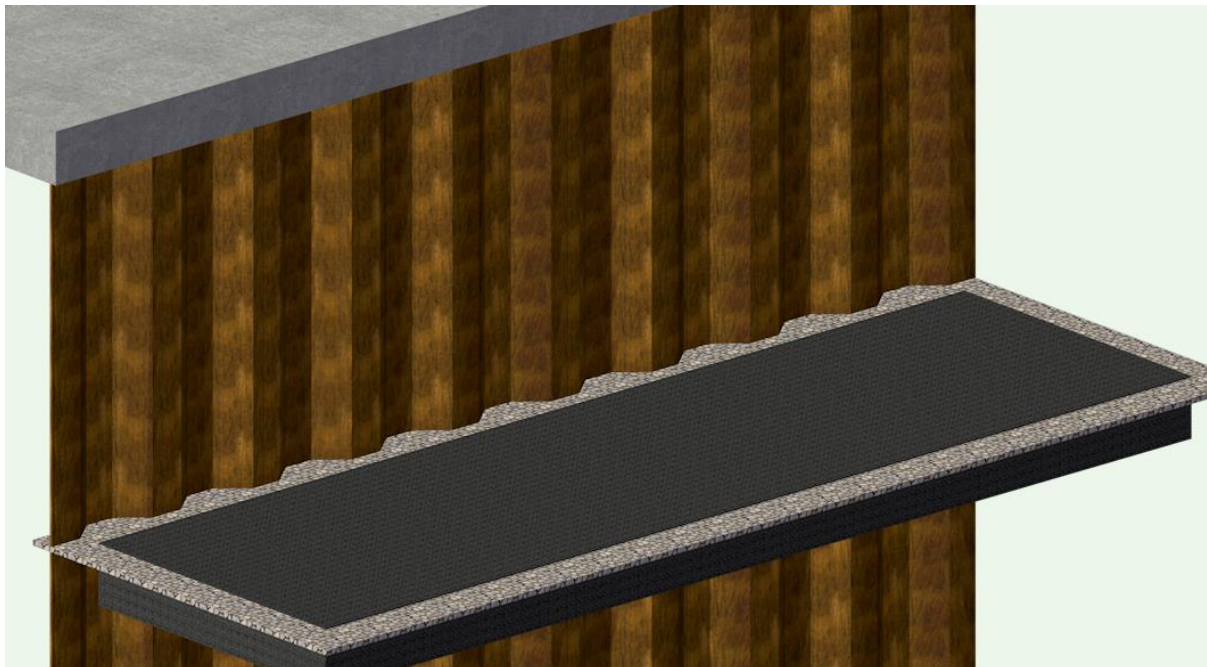
15.1 Basis constructie

De basis constructie wordt aangebracht met de CSM methodiek. Tijdens de uitvoer zal er een graafmachine in combinatie met mixunits op een ponton worden geplaatst. De CSM boorkoppen die momenteel worden gebruikt zijn 550 mm breed. De minimale laagdikte die kan worden aangebracht met de CSM methodiek is ongeveer 600 mm. Er wordt uitgegaan dat deze 600 mm aan verharde grond voldoende is om de schroefkrachten op te kunnen vangen (dit moet nader worden onderzocht).

Doordat er op de bodem van de haven over het algemeen veel slib ligt, wordt de constructieve laag 2 meter dieper aangebracht dan de bodem van de betreffende haven. Door het dieper aanbrengen van de constructieve laag wordt er voorkomen dat het (eventueel vervuilde) sediment 'opwaait' tijdens de uitvoering, dit moet nader onderzocht worden.

Bij de uitvoering wordt er een graafmachine in het midden van het ponton geplaatst en zal het ponton langzaam voortbewegen terwijl de graafmachine roterende bewegingen maakt. Hierdoor wordt uiteindelijk de gehele oppervlakte aan grond vermengd.

(Ter verduidelijking is in onderstaand figuur de 2 meter bovenliggende grond/sliblaag weggelaten.)



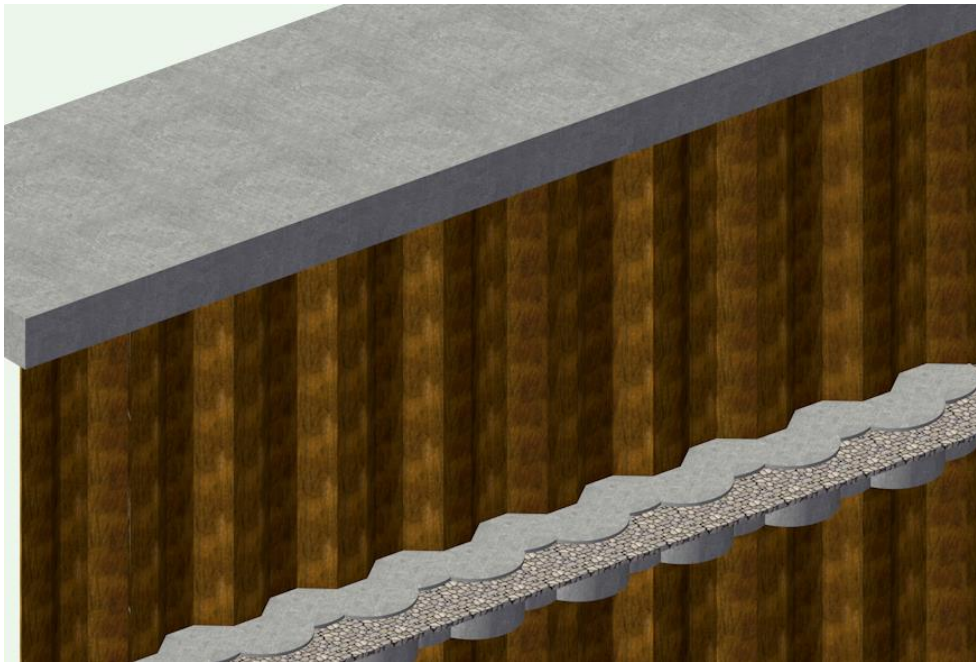
Figuur 27: Basis constructie gerealiseerd met de CSM methodiek



15.2 Aansluiting met de damwand

De boorkop die wordt gebruikt bij de CSM methodiek is relatief groot waardoor deze niet in de 'kasten' van de damwand kan komen. Hierdoor ontstaat er een strook grond die nog niet verhard is. Om de geometrisch dichte aansluiting met de damwand en/of kademuur toch te verkrijgen zal deze strook ongeharde grond worden verdrongen en vervolgens verhard met behulp van jetgrouting.

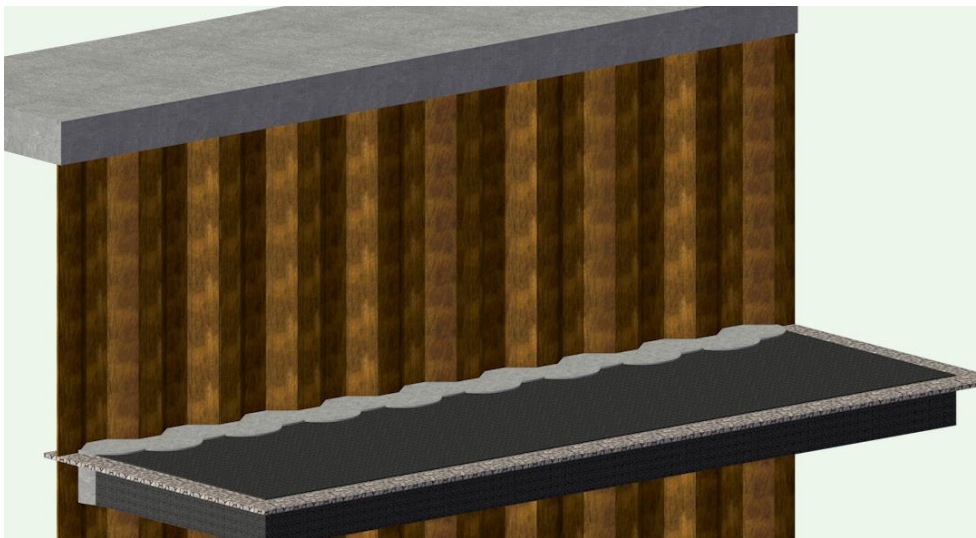
De jetgrout kolommen zullen met eenzelfde dikte als de constructieve vloer van 600 mm worden uitgevoerd. Om de geometrisch dichte aansluiting te garanderen zullen de kolommen elkaar overlappen.



Figuur 28: Jetgrout kolommen t.b.v. geometrisch dichte aansluiting

15.3 Volledige constructie

Op onderstaand figuur is een voltooide In Situ bodembeschermingsconstructie weergegeven.



Figuur 29: Complete In Situ bodembeschermingsconstructie

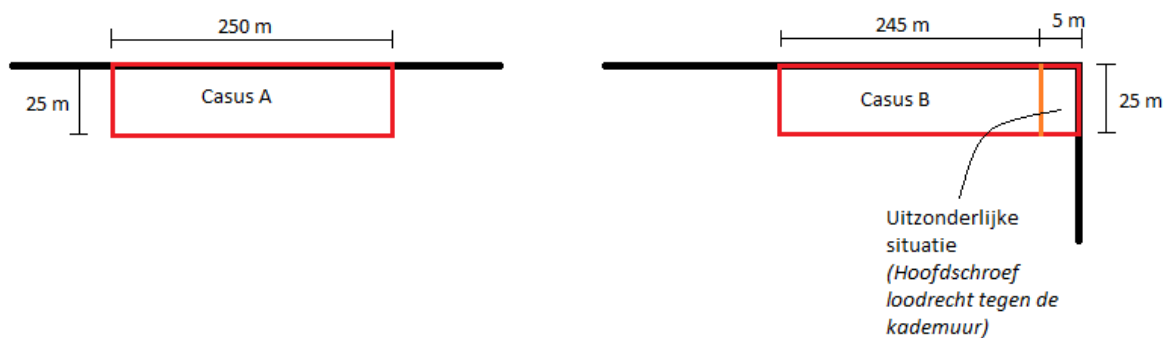


16. Kosten

In dit hoofdstuk wordt er een vergelijking gemaakt tussen de benodigde kosten voor een Prefab en een In Situ bodembescherming. Deze kosten worden vergeleken met de voordeligste 'traditionele' bodembeschermingsconstructie, steenbestorting.

In dit eindverslag worden de belangrijkste aannames en totale kostentabellen genoemd, zie voor het volledige rapport met de totstandkoming van alle prijzen en optimalisaties bijlage H3.

Tijdens het vooronderzoek zijn er verschillende havens van Rotterdam geanalyseerd. Aan de havens zijn maatgevende schepen gekoppeld, met deze schepen is de maatgevende stroomsnelheid verkregen. Om een overzichtelijk beeld te krijgen van de kosten bij verschillende stroomsnelheden worden de stroomsnelheden (die bij de verschillende havens zijn verkregen) gekoppeld aan 2 casussen. Deze twee casussen (A&B) hebben een bepaald oppervlakte waar de bodembeschermingsconstructie wordt toegepast. Casus A gaat uit van een 'open' haven, Casus B gaat uit van een 'dichte' haven. Zie onderstaand figuur ter verduidelijking;



Figuur 30: Casus A & B

Er is gekozen voor het werken met twee vooraf bepaalde casussen omdat het bepalen van het invloedsgebied per haven veel tijd in beslag neemt en niet relevant is voor dit onderzoek. Casus B bevat een gebied met een uitzonderlijke belasting, waarbij grotere stroomsnelheden ontstaan en de constructies groter gedimensioneerd moeten worden. Hierdoor ontstaat er een duidelijk beeld over de verschillen tussen de kosten per constructietypen.

Er is een kostenraming gemaakt voor de snelheden die gekoppeld zijn aan de geanalyseerde havens, hierbij worden de Jellyfish constructie en de CSM methode met elkaar vergeleken. Hierbij wordt ook gerekend met de stroomsnelheid van 10 m/s veroorzaakt door een jetstraal.

Naast de kostenraming voor de geanalyseerde stroomsnelheden is er een prijs vergelijking gemaakt tussen de traditionele en de nieuw ontwikkelde constructies. Tijdens het literatuuronderzoek zijn er twee prijzen gevonden die worden gehanteerd voor een kostenraming ten behoeve van het aanbrengen van een traditionele bodembeschermingsconstructie. Deze prijzen zijn van toepassing bij 2 stroomsnelheden, 2.3 m/s en 2.6 m/s^[23]. Bij deze snelheden worden de drie constructie typen met elkaar vergeleken.



16.1 Algemene kosten Jellyfish

Dit hoofdstuk bevat de totstandkoming van de algemene kosten van een Jellyfish element.

Materiaalkosten

De afmetingen van de Jellyfish elementen verschillen per stroomsnelheid. Het benodigde gewicht van een element bij een bepaalde snelheid is berekend met behulp van de schaalfactor (Froude). Met deze schaalfactor is het gewicht van een element uit de proef verschaald naar de geanalyseerde stroomsnelheden.

Voorbeeld: een basis laag element van de Jellyfish proef weegt 105 gram en weerstaat een stroomsnelheid van 1.75 m/s. Dit element bevat 5 % toegevoegd gewicht (zand) van het gewicht van het geabsorbeerde polymeer. Als dit element wordt verschaald naar de Botlek haven (2.99 m/s), zal dit element ongeveer 2.6 kg moeten wegen. Onderstaande tabel geeft een overzicht van een basis laag element met de benodigde afmetingen en gewichten verschaald naar de verschillende havens. Een Jellyfish element wordt als perfect rond beschouwd.

Haven	Stroom Snelheid [m/s]	Benodigd gewicht Jellyfish (kg)	Gewicht polymeer (kg)	Gewicht van toegevoegd materiaal (kg)	Benodigde afmeting (m) Ø	Benodigde hoeveelheid geotextiel (m ²)
Wilhelminakade	4,74	41,50	39,40	2,10	0,40	0,45
Petroleumhaven	4,23	20,95	20,00	1,05	0,30	0,30
1 ^{ste} Maasvlakte	3,29	4,65	4,40	0,25	0,20	0,10
Botlek	2,99	2,60	2,50	0,15	0,15	0,07
2 ^{de} Maasvlakte	2,11	0,30	0,31	0,02	0,07	0,02
Waalhaven	1,87	0,15	0,15	0,01	0,06	0,01
'Stortsteenvergelijking'	2,60	1,15	1,10	0,05	0,10	0,04
'Stortsteenvergelijking'	2,30	0,55	0,50	0,03	0,10	0,03

Tabel 7: Samenstelling jellyfish elementen per haventypen

Met de verkregen gewichten en afmetingen zijn prijzen bepaald voor één Jellyfish basis laag element. De prijzen staan in onderstaande tabel gegeven. De eenheidsprijs van het polymeer is € 3, - per 2500 kg (volledig geabsorbeerd). De eenheidsprijs van zand is € 15,- p/m3. Geotextiel kost € 1, - per m2. Deze kosten zijn verkregen na telefonisch contact met *Rob Kwakkelstein, uitvoerder bij KWS*.

Haven	Stroom Snelheid [m/s]	Prijs Polymeer €	Prijs Geotextiel €	Prijs Zand €	Prijs Jellyfish €
Wilhelminakade	4,74	0,0450	0,45	0,0170	0,50
Petroleumhaven	4,23	0,0250	0,30	0,0090	0,30
1 ^{ste} Maasvlakte	3,29	0,0055	0,10	0,0020	0,10
Botlek	2,99	0,0030	0,05	0,0010	0,08
2 ^{de} Maasvlakte	2,11	0,0004	0,02	0,0001	0,02
Waalhaven	1,87	0,0002	0,01	0,0001	0,01
'Stortsteenvergelijking'	2,60	0,0015	0,04	0,0005	0,04
'Stortsteenvergelijking'	2,30	0,0005	0,03	0,0002	0,03

Tabel 8: Kosten Jellyfish elementen per haventypen

Dezelfde tabellen zijn voor alle typen elementen gemaakt. Met onder andere deze tabellen zijn de uiteindelijke kosten bepaald.



Optimalisatie

Er is een optimalisatie gemaakt voor de minimale afmeting van een Jellyfish element. Dit is gedaan omdat bij lagere stroomsnelheden is gebleken dat Jellyfish elementen klein kunnen worden gedimensioneerd. Deze kleine afmetingen kunnen leiden tot te hoge materiaalkosten, voornamelijk doordat er veel 'duur' geotextiel benodigd is. Doordat er meer elementen geproduceerd moeten worden stijgen de productiekosten. De optimalisatie is berekend door de verschillende maatgevende stroomsnelheden op een oppervlakte van 6250m² te projecteren (Casus A).

Uit de optimalisatie (bijlage H3, hoofdstuk 2) is gebleken dat de kostprijs van de toplaag + basis laag optimaal is bij een stroomsnelheid van ≈ 3.0 m/s. Bij lagere stroomsnelheden wordt de kostprijs van deze twee lagen duurder. De diameters van een basis laag- en toplaag element zijn bij deze snelheid: 15cm en 16cm.

Naast de optimalisatie van de basis- en toplaag elementen is er ook berekend tot welke stroomsnelheid het economisch voordelig is de opsluitzakken kleiner te dimensioneren. Voor de opsluitzakken geldt dat de kostprijs bij een stroomsnelheid van ≈ 4.25 m/s het meest voordelig is. Dit komt door de afmetingen ($l \cdot b \cdot h = 1.9 \times 1.9 \text{ m} \times 0.64$); er zullen minder elementen geplaatst te hoeven worden waardoor de uitvoeringskosten worden geminimaliseerd. Voor snelheden groter dan 4.25 m/s is een aparte berekening gemaakt.

Voor de damwandelementen wordt er uitgegaan van een standaard afmeting die toepasbaar is in een damwandprofiel. Er wordt uitgegaan van een element van $\varnothing 600$ mm die in de kast van een damwand wordt geplaatst.

Uitvoeringskosten

Bij de uitvoering van een Jellyfish bodembescherming wordt uitgegaan van een aantal (te huren) machines en (in te huren) werknemers. De kosten (verkregen van de afdeling calculatie VSF) voor de machines en personeel zijn in onderstaande tabel 9 gegeven. Voor de verschillende Jellyfish elementen is de tijdsduur van uitvoering gegeven in tabel 10.

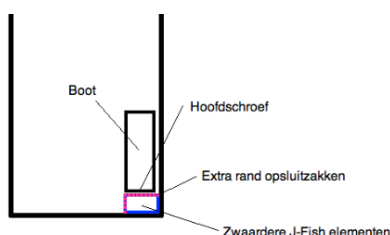
Materieel en Manuur	Prijs per 40 uur	Jellyfish typen	Tijdsduur plaatsing
Rupskraan	€ 3115,-	Opsluitzak	6 stuks per uur
Poliepgrijper	€ 500,-	Basis laag	250 m ² per uur
Kantelcontainers (x4)	€ 400,-	Toplaag	250 m ² per uur
Ponton inclusief aandrijving	€ 1450,-	Damwandelementen	25 stuks per uur
Grondwerkers (x4)	€ 4800,-		
Machinist (x1)	€ 2000,-		
Totaalprijs	€ 12.265,-		

Tabel 10: Tijdsduur uitvoering Jellyfish bodembescherming

Tabel 9: Kosten uitvoering Jellyfish bodembescherming

Uitzonderlijke belasting

Om de uitzonderlijke belasting veroorzaakt door een hoofdschroef loodrecht tegen de kademuur te weerstaan worden er in de hoek van de haven verzwaarde Jellyfish elementen geplaatst (dit is van toepassing bij casus B). Dit 'vlak' aan Jellyfish elementen wordt afgegrensd door een rij zwaardere opsluitzakken. De verzwaarde zakken worden tot 5 meter uit de kade en over de gehele breedte van het invloedsgebied toegepast. Onder de laag verzwaarde Jellyfish elementen wordt de basis laag doorgetrokken. Zie onderstaand figuur ter verduidelijking:



Figuur 31: Gebied verzwaarde jellyfish elementen



16.2 Algemene kosten Cutter Soil Mixing + Jetgrouting

Bij de CSM- en Jetgrout methodiek wordt er gewerkt met een cementspecie. De kosten zijn verkregen bij de calculatieafdeling van VSF. De kosten worden per m² gegeven, inclusief uitvoering en materiaal.

- CSM = € 100,- p/m²
 - Constructiehoogte van 600 mm
- Jetgrouting = € 500,- p/m³
 - Kolommen van Ø 600 mm, laagdikte 600 mm = 0.17 m³/ per kolom

De minimale aangebrachte laagdikte van de CSM methodiek is 600 mm, in dit afstudeeronderzoek wordt er vanuit gegaan dat deze laagdikte bestand is tegen alle genoemde stroomsnelheden. Met de CSM methodiek kan er 175 m² bodembescherming per dag worden aangebracht.

De jetgrout kolommen die een aansluiting met de kade moeten vormen zijn Ø 600 mm met een laagdikte van 600 mm. Deze pilaren worden langs de gehele kade geplaatst.

16.3 Traditionele steenbestorting

Tijdens de literatuurstudie zijn twee prijzen voor het aanbrengen van een steenbestortingsconstructie gevonden. Deze kostprijzen hebben betrekking op een constructie die bestand is tegen een stroomsnelheid van 2.3 m/s en een constructie die bestand is tegen een snelheid van 2.6 m/s (In werkelijkheid wordt er niet kleiner gedimensioneerd dan de constructie die is berekend op 2.3 m/s).

T. Blokland beschrijft hierover het volgende:

“Bij bodembeschermingen belast door schroefstralen is in veel situaties een bestorting met breuksteen 40-200 kg of 60-300 kg nodig. In situaties met de straal van een hoofdschroef tegen een verticale wand (bijv. in de hoek van een haven) en bij hoofd- of boegschroeven dicht boven een oeverwalud kan een bescherming met gepenetreerde breuksteen nodig zijn omdat breuksteen 60-300 kg niet zwaar genoeg is.” [6]

Er wordt uitgegaan dat een bestorting van 40-200 kg (bij 2.3 m/s) minimaal benodigd is. Echter wordt er wel vanuit gegaan dat er colloïdaal beton benodigd is direct langs de kade tot 5 meter van de kade af. In onderstaande tabel worden de betreffende kosten weergegeven (inclusief uitvoeringskosten):

Stroomsnelheid	Gewicht stortsteen	Prijs	Gewicht stortsteen met colloïdaal beton	Prijs
Minimale situatie < 2.3 m/s	40-200 kg	€ 38,- p/m ²	5-40 kg	€ 52,- p/m ²
Standaard situatie 2.6 m/s	60-300 kg	€ 44,- p/m ²	10-60 kg	€ 57,- p/m ²

Tabel 11: Kosten stortsteen

Op de volgende pagina staan overzichtstabellen van de totale kostprijzen bij de verschillende stroomsnelheden. Hierin worden de verschillen tussen de constructies duidelijk.



16.4 Overzichtstabellen totale kostprijs

In dit hoofdstuk worden de overzichtstabellen gegeven van de totale kosten die berekend zijn voor casus A & B. Onderstaande tabel betreft casus A:

Bodemsnelheid [m/s]	Haven (Casus A)	Jellyfish (totaalprijs)	CSM (totaalprijs)	Steenbestorting (totaalprijs)
4,74	Wilhelminakade	€ 92.400,-	€ 655.000,-	-
4,23	Petroleumhaven	€ 88.700,-	€ 655.000,-	-
3,29	1 ^{ste} Maasvlakte	€ 87.500,-	€ 655.000,-	-
2,99	Botlek	€ 85.000,-	€ 655.000,-	-
2,60	Casus A	€ 85.000,-	€ 655.000,-	€ 291.300,-
2,30	Casus A	€ 85.000,-	€ 655.000,-	€ 255.000,-
2,11	2 ^{de} Maasvlakte	€ 85.000,-	€ 655.000,-	-
1,87	Waalhaven	€ 85.000,-	€ 655.000,-	-
10,00	Casus A	€ 132.400,-	€ 655.000,-	-

Tabel 12: Kostprijsvergelijking Casus A

Onderstaande tabel betreft casus B, deze casus bevat een gebied met een uitzonderlijke bodemsnelheid:

Bodemsnelheid [m/s]	Uitzonderlijke bodemsnelheid [m/s]	Haven (Casus A)	Jellyfish (totaalprijs)	CSM (totaalprijs)	Steenbestorting (totaalprijs)
4,74	7,20	Wilhelminakade	€ 97.000,-	€ 670.900,-	-
4,23	6,09	Petroleumhaven	€ 93.000,-	€ 670.900,-	-
3,29	5,99	1 ^{ste} Maasvlakte	€ 91.700,-	€ 670.900,-	-
2,99	4,49	Botlek	€ 88.800,-	€ 670.900,-	-
2,60	4,55	Casus B	€ 88.800,-	€ 670.900,-	€ 297.000,-
2,30	4,03	Casus B	€ 88.800,-	€ 670.900,-	€ 260.000,-
2,11	4,74	2 ^{de} Maasvlakte	€ 88.800,-	€ 670.900,-	-
1,87	3,73	Waalhaven	€ 88.800,-	€ 670.900,-	-
10,00	-	Casus B	€ 135.000,-	€ 655.000,-	-

Tabel 13: Kostprijsvergelijking Casus B

Uit de vergelijking van de kostprijs blijkt dat de bodembescherming opgebouwd uit Jellyfish elementen het meest voordelig is, gevolgd door de traditionele bodembescherming. De In Situ oplossing is het minst voordelig.

Naar verwachting zal de kostprijs voor de traditionele bodembescherming snel stijgen naarmate de bodemsnelheid verhoogt. Bij een toename van 0.3 m/s stijgt de kostprijs met ongeveer 15%. De kostprijs van de In Situ bodembescherming zal daarentegen naar verwachting vanaf een bepaalde bodemsnelheid voordeliger worden, dit moet nader onderzocht worden.

De kostprijs van de Jellyfish bodembescherming valt relatief laag uit, dit wordt veroorzaakt door de lage uitvoeringskosten. Er is bij de Jellyfish elementen nog geen rekening gehouden met de bijkomende productiekosten. Deze extra kosten moeten nog nader bepaald worden, echter is een Jellyfish constructie 3 maal zo goedkoop als een steenbestortingsconstructie. Er is nog veel ruimte over voor de productiekosten.



17. Trade off Matrix Prefab versus In Situ

Tijdens dit onderzoek is zowel een Prefab als een In Situ bodembeschermingsconstructie ontwikkeld (Jellyfish & CSM). Deze twee constructie typen zullen met elkaar vergeleken moeten worden om tot een 'optimaal' constructietype te komen. Dit hoofdstuk bevat deze vergelijking.

Doordat beide constructietypen al de optimale variant zijn binnen de T.O.M. voor In Situ of Prefab, zal de vergelijking van deze twee typen constructies uit een beperkt aantal onderwerpen bestaan. De getoetste aspecten hebben betrekking op zowel In Situ als Prefab constructies en tonen het verschil tussen de Jellyfish en de CSM methode.

Onderstaande tabel geeft de scores weer, de hoogst haalbare score is 5, de laagst haalbare score is 1.

Onderwerp	Percentage	Score Jellyfish	Uitkomst	Score CSM	Uitkomst
Totaal kosten per m²	42	5	<u>2.10</u>	1	<u>0.42</u>
Investering	10	4	<u>0.40</u>	3	<u>0.30</u>
Homogeniteit	10	5	<u>0.50</u>	5	<u>0.50</u>
Aansluiting met de kademuur	10	5	<u>0.50</u>	3	<u>0.30</u>
Tijdsduur uitvoering	5	5	<u>0.25</u>	4	<u>0.20</u>
Hoeveelheid handelingen	5	4	<u>0.20</u>	3	<u>0.15</u>
Moeilijkheidsgraad uitvoering	4	5	<u>0.20</u>	4	<u>0.16</u>
Onderhoudsinspanning	4	4	<u>0.16</u>	4	<u>0.16</u>
Obstakels integreren	3	5	<u>0.15</u>	3	<u>0.09</u>
Beperken constructiehoogte	3	3	<u>0.09</u>	5	<u>0.15</u>
Gevolgen van bezwijken	2	2	<u>0.04</u>	3	<u>0.06</u>
Herstel mogelijkheden	2	4	<u>0.08</u>	5	<u>0.10</u>
Totaal	100 %	-	<u>4.7</u>	-	<u>2.6</u>

Tabel 14: Trade off Matrix Prefab versus In Situ

De tabel laat zien dat de Jellyfish methode de optimale methodiek is om een bodembescherming mee te realiseren. De score van de Jellyfish is bijna 2x zo hoog. Het verschil tussen de methodes wordt voornamelijk gemaakt door de volgende aspecten:

1. De totale kosten van de Jellyfish methode liggen lager dan bij de CSM methodiek (zie bijlage H4).
2. De Jellyfish methode kan zonder hulpconstructies een geometrische dichte aansluiting creëren met een stalen damwand of eventuele aanwezig obstakels zoals bijvoorbeeld buispalen. Dit is bij de CSM methode niet mogelijk.
3. De Jellyfish methode is sneller uit te voeren.
4. Voor de Jellyfish methode is een minder grote investering benodigd voordat er constructies gerealiseerd kunnen worden (aanschaf van nieuwe machines).

Echter, zijn er wel een paar verbeterpunten die nog verder uitgewerkt moeten worden:

1. De gevolgen van bezwijken en de mogelijkheden om herstelwerkzaamheden uit te voeren zijn beperkt bij de Jellyfish methode. Bij de CSM methode zijn er minder gevolgen en meer mogelijkheden tot herstellen.
2. De Jellyfish methode kan de constructiehoogte matig beperken, dit is nadelig voor de contractdiepte. De CSM methode wordt altijd onder de contractdiepte aangebracht.

De Jellyfish methode scoort voornamelijk hoger doordat deze methode goedkoper is dan CSM methodiek. Dit wordt verder toegelicht in bijlage H4.



18. Conclusie

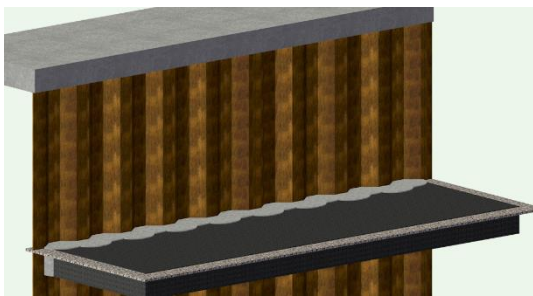
De doelstelling van dit onderzoek was het ontwikkelen van een nieuwe bodembescherming, die bestand is tegen de huidige en toekomstige belastingen veroorzaakt door schepen. Daarnaast is het van belang dat dit nieuwe concept economisch voordeliger is dan de traditionele steenbestorting.

Uit de literatuurstudie blijkt dat bodembeschermingsconstructies bij hogere stroomsnelheden niet meer economisch voordelig zijn. Gezien het toekomstperspectief zullen stroomsnelheden alleen maar stijgen, schepen uitgerust met een jetstraalaandrijving bereiken bodemsnelheden van 10 m/s. Volgens de huidige bestaande formule [8] zal een stortsteen bij een schroefstraalbelasting van 4.74 m/s minimaal 7660 kilogram moeten wegen om niet weg te spoelen. Dit gewicht kan alleen bereikt worden door de stortsteen groot te dimensioneren (diameter 1.75 meter).

Het stroombeeld van jetstraalaandrijving is in een proef getest. Bodemsnelheden veroorzaakt door jetstraalaandrijving zijn niet groter dan bodemsnelheden veroorzaakt door schroefstraalbelasting. Dit komt doordat een jetstraal meer gecentreerd is. In het geval dat een schip achteruit vaart wordt deze gecentreerde straal onder een hoek van 30° op de bodem geprojecteerd, hierdoor zal de belasting groter worden. Daarnaast is gebleken dat als een schip zijn hoofdschroef rechtstreeks tegen de kade aan projecteert de stroomsnelheden en daarmee het minimaal benodigd gewicht snel stijgen.

Met deze inzichten zijn er twee nieuwe typen bodembeschermingsconstructies ontwikkeld:

In Situ (*Cutter Soil Mixing in combinatie met Jetgrouten*)



Figuur 32: CSM bodembescherming

Bij de CSM methodiek wordt door middel van een mixkop de bodem vermengd met een cementspecie, waardoor er een verhard grondpakket ontstaat (zwart oppervlak op tekening). Voor een dichte aansluiting met de kade wordt er met een injectielans tussen het verharde grondpakket en de kade jetgrout geïnjecteerd (grijs oppervlak op tekening).

De CSM methodiek heeft ten opzichte van de traditionele steenbestorting één voordeel:

1. Bij de uitvoering van de CSM methodiek blijft de contractdiepte altijd onaangetast.

Er zijn een aantal voordelen te noemen waarnaar meer onderzoek gedaan moet worden:

1. Naarmate stroomsnelheden groter worden wordt het economisch voordeliger om de CSM methodiek toe te passen.
2. De minimale dikte van de verharde grondlaag bedraagt in dit onderzoek 600 mm (dit is de minimale afmeting van de mixkop). Deze laagdikte is bestand tegen alle voorkomende stroomsnelheden.
3. Er zitten weinig tot geen risico's aan het eroderen van de verharde grondlaag.
4. Door middel van jetgrouten kunnen beschadigde plekken gerepareerd worden, ook bij andere typen (bestaande) constructies.

De CSM methodiek biedt mogelijkheden maar vereist nog verder onderzoek.



Prefab (Jellyfish)



Figuur 33: Jellyfish bodembescherming

De Jellyfish bodembescherming is een constructie opgebouwd uit verschillende absorberende elementen, afgesloten door een verzwaarde rij opsluitzakken. De elementen bevatten super absorberende polymeren die tot 100x hun eigen massa aan water op kunnen nemen. Onderlinge elementen creëren door het uitzettende vermogen een homogeen vlak en een dichte aansluiting met de kade.

De Jellyfish constructie heeft ten opzichte van de traditionele steenbestorting een aantal voordelen:

1. Bij het plaatsen van de Jellyfish elementen wordt er door het uitzettend vermogen van de elementen een homogeen vlak gecreëerd. Doordat Jellyfish elementen tegen elkaar uitzetten en in 'elkaar haken' kunnen elementen minder zwaar worden gedimensioneerd dan stortsteen.
2. De constructie creëert uit zichzelf een dichte aansluiting met een stalen damwand doordat de elementen uitzetten.
3. De elementen vormen om obstakels heen en integreren deze in de constructie.
4. Er is weinig materiaal nodig (grootste gedeelte is water).
5. Snelle uitvoering doordat elementen 'overboord' kunnen worden gegooit.
6. Niet uitgezette elementen nemen weinig ruimte in (transport).
7. Doordat elementen kleiner kunnen worden gedimensioneerd kan de bodem ook in de toekomst worden beschermd tegen eventuele hogere stroomsnelheden (10 m/s bij jetstraal belasting).

De Jellyfish constructie is bij alle haventypen in Rotterdam toepasbaar. Daarnaast is de Jellyfish constructie economisch voordelig in vergelijking met de In Situ methodiek en de traditionele steenbestorting.

Beantwoording hoofd- & deelvragen

De hoofdvraag luidt:

Kan er (uit restmaterialen) een In Situ- en/of Prefab bodembescherming ontwikkeld worden die een alternatief biedt op de traditionele steenbestorting en gebruikt kan worden ter bescherming van kademuuren?

Ja, er is in dit afstudeeronderzoek zowel een Prefab als een In Situ bodembescherming ontwikkeld die eventueel kunnen dienen als alternatief op de traditionele steenbestorting. De Jellyfish constructie bestaat gedeeltelijk uit opsluitzakken die gevuld kunnen worden met een gerecycled materiaal. De cementspecie die wordt gebruikt tijdens het jetgrouten bij de CSM methodiek kan worden vervangen door jetgroutretourstroming (restmateriaal na jetgrouten). Echter is het gebruik van jetgroutretourstroming planningsafhankelijk.

Er moet nader onderzoek verricht worden naar een constructietypen dat ook kan dienen als kademuur bescherming.



De deelvragen luiden:

1. *Aan welke (toekomstige) eisen moet de bodembescherming voldoen, en welke materialen zijn hiervoor te gebruiken?*

Tijdens het onderzoek is er gebleken dat de bodembeschermingsconstructie moet voldoen aan een aantal belangrijke eisen:

- De te ontwikkelen constructie moet een stroomsnelheid van 10 m/s kunnen weerstaan.
- Het nieuwe constructie typen moet qua prijs gezien minimaal gelijk zijn aan de traditionele steenbestorting.
- Er moet een dichte aansluiting worden gecreëerd met de kademuur/stalen damwand om erosie van de onderliggende grondlagen te voorkomen.
- De rand van de constructie moet voldoende flexibel zijn om mee te kunnen vormen met eventuele ontgrondingen/zettingen.

Om aan de (toekomstige) eisen te voldoen kunnen de volgende materialen worden gebruikt:

- Super absorberend polymeer
- Geotextiel
- Cementspecie
- Jetgrout

2. *Hoe kan een prefab bodembescherming aan de hand van deze eisen geoptimaliseerd worden?*

Door een Prefab constructie te ontwikkelen die water absorbeert en vervolgens uitzet kan de constructie klein worden gedimensioneerd. Door het uitzettend vermogen worden de werkende belastingen aan elkaar overgedragen, wordt er een dichte aansluiting met de kade verkregen en is de rand van de constructie voldoende flexibel.

3. *Hoe kan een in-situ bodembescherming aan de hand van deze eisen geoptimaliseerd worden?*

Door gebruik te maken van een CSM-mixkop kunnen snel grote oppervlakten grond worden versterkt. Verwacht wordt dat de versterkte grondlaag hoge stroomsnelheden kan weerstaan. Met het Jetgrouten wordt de dichte aansluiting met de kade verkregen. Doordat de verharde vloer onder de contractdiepte wordt aangebracht hoeft de rand van de constructie in mindere mate flexibel te zijn.

4. *Welke duurzame (rest)materialen kunnen gebruikt worden om tot een dergelijk geoptimaliseerde oplossing te komen?*

De opsluitzakken die worden gebruikt bij de Jellyfish constructie kunnen gevuld worden met meerdere (granulaire) restmaterialen.

Bij het jetgrouten tijdens de CSM methode kan gekozen worden voor jetgroutretourstroming (restmateriaal bij jetgrouten).

5. *Kunnen de gevonden oplossingen toegepast worden voor kademuur bescherming?*

De gevonden oplossingen kunnen niet worden toegepast als kademuur bescherming.

De doelstelling van dit onderzoek, het ontwikkelen van een nieuwe bodembescherming, is voltooid. In het bijzonder de Prefab oplossing 'De Jellyfish' heeft veel potentie. De Jellyfish is bij alle onderzochte stroomsnelheden economisch voordeliger dan de traditionele steenbestorting. Een aantal elementen van de Jellyfish bodembescherming kunnen uitgevoerd worden met hergebruikt materiaal. De verwachting is dat de In Situ oplossing bij grotere stroomsnelheden economisch voordeliger zal zijn dan de traditionele steenbestorting.



19. Aanbevelingen

Vormstudie Jellyfish

Tijdens de proef is gebleken dat de vorm van de Jellyfish elementen sterk bepalend is voor de homogeniteit van de constructie. Het is belangrijk dat de elementen niet te extreem uitzetten, hierdoor kan er namelijk verdringing tussen de elementen ontstaan. Bij dit afstudeeronderzoek wordt er uit gegaan van een bolvormig element echter zou het mogelijk kunnen zijn dat een andere vorm, zoals bijvoorbeeld een tetrapod, beter kan werken. Ook moet er worden onderzocht wat de invloeden van buitenaf zullen zijn: neerlaten/over slepende ankers, eventuele baggerwerkzaamheden et cetera.

Benodigd gewicht opsluitzakken Jellyfish

Het benodigd gewicht van de opsluitzakken is benaderd door middel van de formule [8], deze formule is bedoeld om het minimaal benodigd gewicht van de stortsteen te berekenen. Echter heeft de opsluitzak niet dezelfde vorm als een stortsteen waardoor de gewichten anders kunnen zijn. Er moet worden onderzocht welke vorm, afmetingen en gewicht de opsluitzakken benodigd hebben.

(De hoogte van de opsluitzakken moet minimaal gelijk zijn aan de hoogte van de basis laag + toplaag.)

Levensduur SAP

In de literatuur worden verschillende waarden gegeven voor de levensduur van super absorberende polymeren, gemiddeld komen die neer op ongeveer 8 jaar. Deze 8 jaar gaat uit van continu opnemen en afgeven van water, bij de Jellyfish is dit niet het geval. Er zijn er ook super absorberende polymeren waarvan wordt beweerd dat de levensduur nog een stuk langer is. Het onderzoek naar de levensduur van polymeer zal verder onderzocht moeten worden.

Productiekosten Jellyfish

Bij het bepalen van de kostenraming van de Jellyfish constructie is er geen rekening gehouden met de productiekosten. Deze productiekosten moeten nader worden bepaald. Er is echter nog veel ruimte voor extra kosten zonder het economisch voordelige aspect te verliezen.

Sterkte CSM

De minimale laagdikte die kan worden aangebracht met de CSM methodiek is ongeveer 600 mm (in verband met de afmetingen van de mixkop). Er wordt uitgegaan dat deze 600 mm aan verharde grond voldoende is om de schroefkrachten op te kunnen vangen. Echter zal er moeten worden onderzocht welke laagdikte nodig is bij welke stroomsnelheid.

Uitvoeringsmethodiek CSM

Het uitvoeringsplan van de CSM methodiek gaat uit van het werken met één enkele mixkop waardoor de uitvoering lang duurt. Door een aanpassing te maken aan de bestaande machines kunnen er meerdere mixkoppen naast elkaar worden geplaatst. Hierdoor kan de productiviteit aanzienlijk verhogen. In eventuele aanpassingen zal geïnvesteerd moeten worden.

Kosten CSM vs. Steenbestorting

Het is tijdens het afstudeeronderzoek niet gelukt om voor verschillende stroomsnelheden een exacte m^2 prijs voor het aanbrengen van een traditionele steenbestorting constructie te vinden. Bij de gevonden prijzen is de CSM methodiek duurder dan de steenbestorting, verwacht wordt dat naarmate de stroomsnelheden hoger worden de CSM methodiek voordeliger wordt. Er zal een exacte kostenraming moeten worden gemaakt om te kijken vanaf welke stroomsnelheid de CSM methodiek economisch voordeliger wordt.



Figurenlijst

Figuur 1: Bezwijken kademuur door ontgrondingskuilen, Montrose Ports UK, ^[18]	1
Figuur 2: Reparatie van de kademuur	4
Figuur 3: Stortsteen	5
Figuur 4: Blokkenmat	5
Figuur 5: Gabion	5
Figuur 6: Geohooks	5
Figuur 7: Uitzonderlijke situatie, directe belasting van hoofdschroef tegen kademuur ^[13]	8
Figuur 8: Situatie 1: pompjet normale propulsie. Situatie 2: pompjet 'reversed' propulsie (10 m/s)	9
Figuur 9: Wave propulsion system	9
Figuur 10: Schip in hoek afgemeerd (hoofdschroef)	10
Figuur 11: Maatgevende kracht	14
Figuur 12: Drie laagst scorende schetsontwerpen	16
Figuur 13: Twee hoogst scorende schetsontwerpen	17
Figuur 14: Definitieve varianten	18
Figuur 15: Jellyfish bodembescherming	21
Figuur 16: Werking van Super Absorberend Polymeer ^[9]	22
Figuur 17: uitzetten SAP substantie ^[11]	22
Figuur 18: Proefopstelling 5	23
Figuur 19: Impressie van de werking van de Jellyfish bodembescherming	24
Figuur 20: De afsluitende rij opsluitzakken	25
Figuur 21: De basis laag i.c.m. de opsluitzakken	25
Figuur 22: Aansluiting met damwand d.m.v. damwand elementen	25
Figuur 23: CSM methodiek	26
Figuur 24: Jetgrout	26
Figuur 25: BeauDrain	27
Figuur 26: Complete In Situ bodembeschermingsconstructie	27
Figuur 27: Basis constructie gerealiseerd met de CSM methodiek	30
Figuur 28: Jetgrout kolommen t.b.v. geometrisch dichte aansluiting	31
Figuur 29: Complete In Situ bodembeschermingsconstructie	31
Figuur 30: Casus A & B	312
Figuur 31: Gebied verzwaarde jellyfish elementen	34
Figuur 32: CSM bodembescherming	38
Figuur 33: Jellyfish bodembescherming	39



Tabellenlijst

Tabel 1: Combinaties havens met schepen	7
Tabel 2: Combinatie havens met sleepboten	7
Tabel 3: Stabiliteitsfactor volgens Waterloopkundig Laboratorium.....	12
Tabel 4: Stabiliteitsfactor volgens Waterloopkundig Laboratorium.....	12
Tabel 5: Maatgevende belastingen.....	13
Tabel 6: Materiaal scores.....	20
Tabel 7: Samenstelling jellyfish elementen per haventypen	33
Tabel 8: Kosten Jellyfish elementen per haventypen	33
Tabel 9: Kosten uitvoering Jellyfish bodembescherming	34
Tabel 10: Tijdsduur uitvoering Jellyfish bodembescherming	34
Tabel 11: Kosten stortsteen.....	35
Tabel 12: Kostprijsvergelijking Casus A.....	36
Tabel 13: Kostprijsvergelijking Casus B.....	36
Tabel 14: Trade off Matrix Prefab versus In Situ	37
Tabel 15: Trade off matrix Prefab schetsontwerpen	E
Tabel 16: Trade off matrix Prefab definitieve varianten.....	F
Tabel 17: Trade off matrix Prefab materialen	G
Tabel 18: Trade off matrix In Situ uitvoeringsmethodiek	H
Tabel 19: Trade off matrix In Situ materialen	I
Tabel 20: Programma van Eisen	J



Bibliography

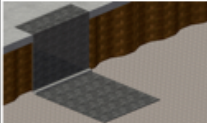
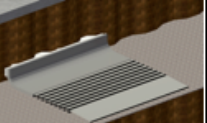
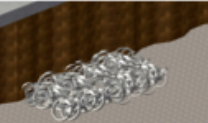
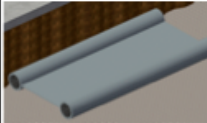
- [1] CUR. (2003). *Handboek Kademuren*. Gouda: Stichting CUR.
- [2] NRC . (2013, 08 12). *www.nrc.nl*. Retrieved from <http://www.nrc.nl/nieuws/2013/08/21/grote-gaten-in-oosterscheldedam/>
- [3] EAU1996. (2000). *Harbours and Waterways*. Committee for waterway structures.
- [4] CUR. (2007). *Rock Manual*.
- [5] Roubos, A.A. (2006). *Omgaan met onzekerheden bij het ontwerpen van bodembescherming nabij kademuren*. TU Delft.
- [6] Blokland, T. (1997). *Bodembescherming belast door schroefstalen*. TU Delft.
- [7] Pumpjet propulsion. (n.d.).
[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1a/Ship's_Waterjet_system_\(cut_view\)_NT.PNG](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1a/Ship's_Waterjet_system_(cut_view)_NT.PNG). Retrieved 05 12, 2014, from wikipedia.
- [8] John Rae Calizo Manaois. (2011). *Pumpjets in de binnenvaart*. TU Delft, Deltares, Rijkswaterstaat.
- [9] Imperial college London. (n.d.). *Imperial*. From <http://www3.imperial.ac.uk/>:
<http://www3.imperial.ac.uk/concretedurability/researchprojects/selfsealingconcrete>
- [10] bodemrichtlijn. (n.d.). *www.bodemrichtlijn.nl*. From
<http://www.bodemrichtlijn.nl/Bibliotheek/bouwstoffen-en-afvalstoffen/geotextiel/materiaaleigenschappen-geo106744>
- [11] MDD7. (n.d.). *Youtube*. From Super absorbent polymer:
<http://www.youtube.com/watch?v=ksjUW7jWJk0>
- [12] New Civil Engineer. (2013, 05). *New Civil Engineer*. Retrieved from www.nce.co.uk.
- [13] Mott MacDonald. (n.d.). *Global engineering management and development consultants*. Retrieved from <https://www.mottmac.com/jamaica>.
- [14] Hoffmanngroep. (n.d.). *Hoffmanngroep*. Retrieved from www.hoffmanngroep.com.
- [15] Franki-Geotechnics. (n.d.). <http://www.franki-geotechnics.be>. Retrieved from <http://www.franki-geotechnics.be/Business-Units/Bored---Micro-Piles/Jet-grouting.aspx>.
- [16] Beaudrain. (n.d.). <http://www.beaudrain.nl>. Retrieved from
http://www.beaudrain.nl/popup_dwarsdoorsnede.html.
- [17] emissbv. (n.d.). <http://www.emissbv.nl>. Retrieved from
<http://www.emissbv.nl/index.php/grondinjectie>.
- [18] Maritime Journal. (n.d.). *Maritime Journal*. Retrieved from www.maritimejournal.com.
- [19] van Oord. (n.d.). *paansvanoord*. Retrieved from <http://www.paansvanoord.com/>.
- [20] RWS. (n.d.). *beeldbank.rws*. Retrieved from
[https://beeldbank.rws.nl/RuimtevoorDeRivier/\(S\(2g0hzlyrf5qh3bha5arte3ri\)\)/MediaObject/Details/DWW_Blokkenmatten_oeververdediging_331718](https://beeldbank.rws.nl/RuimtevoorDeRivier/(S(2g0hzlyrf5qh3bha5arte3ri))/MediaObject/Details/DWW_Blokkenmatten_oeververdediging_331718).
- [21] Wikimedia. (n.d.). http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sivadeule_gabions_juin_2001_3.jpg.
Retrieved from http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sivadeule_gabions_juin_2001_3.jpg.



- [22] Geohooks. (n.d.). *Geohooks*. Retrieved from <http://www.geohooks.nl/natuurvriendelijke%20oevers%20en%20BShore.php>.
- [23] T. Blokland. (2005). *Kosten en duurzaamheid van oever- en bodembeschermingsconstructies met ground consolidator*. Delft: TU Delft.
- [24] Radboud Universiteit. (2013). *www.ru.nl*. Retrieved from www.ru.nl/@884148/pagina/.
- [25] inventorspot. (n.d.). Retrieved from www.inventorspot.com:
http://inventorspot.com/articles/ecofriendly_ship_cross_ocean_pow_11094
- [26] Wave Propulsion. (n.d.). Retrieved from www.wavepropulsion.com:
<http://www.wavepropulsion.com/>



Appendix A Prefab schetsontwerpen

	Schetsontwerp 1		Schetsontwerp 2		Schetsontwerp 3		Schetsontwerp 4		Schetsontwerp 5	
										
Onderdeel + Aspecten	%	Score	%	Score	%	Score	%	Score	%	Score
Technische/Functionele Aspecten	20	3.25	20	4	20	3.5	20	2.5	20	4
Aansluiting met de kademuur	25	3	25	5	25	3	25	3	25	4
Mogelijkheid tot precies afzinken	25	2	25	3	25	3	25	1	25	4
Aansluiting met de bodem	25	4	25	5	25	5	25	3	25	5
Sterkte van de constructie	25	4	25	3	25	3	25	3	25	3
Risico's	5	4	5	3.5	5	2	5	4	5	4
Bezwijken constructie	50	3	50	3	50	2	50	4	50	4
Overbelasting	50	5	50	4	50	2	50	4	50	4
Uitvoering	20	2.5	20	3.5	20	2.75	20	3.75	20	3.5
Tijdsduur tijdens uitvoer	50	2	50	4	50	3	50	3	50	4
Voorbereiding	25	3	25	2	25	2	25	4	25	3
Toepasbaarheid	25	3	25	4	25	3	25	5	25	3
Onderhoud	10	2.5	10	4	10	3.5	10	4	10	4
Herstelmogelijkheden	50	1	50	4	50	3	50	4	50	3
Tijdsduur tot onderhoud (groot/klein)	50	4	50	4	50	4	50	4	50	5
Kosten	45	1.6	45	1.6	45	3.2	45	4.4	45	3.8
Productie	20	3	20	3	20	3	20	4	20	3
Materiaal per m ²	60	1	60	1	60	3	60	5	60	4
Uitvoering	20	2	20	2	20	4	20	3	20	4
Totaal	100	2.32	100	2.795	100	3.14	100	3.83	100	3.81

Tabel 15: Trade off matrix Prefab schetsontwerpen



Appendix B Definitieve varianten

	Variant 5.1		Variant 5.2		Variant 5.3	
Onderdeel + Aspecten	%	Score	%	Score	%	Score
Technische/Functionele Aspecten	20	3.62	20	4.14	20	4.02
Minimaliseren constructie hoogte	8	4	8	4	8	5
Toepasbaarheid per haven	8	2	8	5	8	3
Aansluiting met de kademuur	14	4	14	5	14	5
Mogelijkheid tot precies afzinken	14	4	14	4	14	4
Stabiliteit	2	5	2	4	2	5
Aansluiting met de bodem	14	4	14	4	14	4
Sterkte van de constructie	14	2	14	4	14	4
Homogeniteit	2	4	2	4	2	4
Sediment ophoping voor constructie	4	3	4	3	4	3
Dichtslibben van constructie	6	4	6	3	6	4
Langsstroming tegengaan / verminderen	6	4	6	3	6	1
Mogelijkheid tot kleiner dimensioneren	8	5	8	5	8	5
Risico's	5	2.7	5	3.65	5	4.35
Bezwijken constructie	30	2	30	4	30	4
Gevolgen bezwijken	35	1	35	3	35	4
Overbelasting	35	5	35	4	35	5
Uitvoering	20	3.05	20	4.8	20	3.8
Hoeveelheid handelingen	10	3	10	4	10	3
Obstakels (palen, remmingswerk etc.)	10	1	10	4	10	2
Tijdsduur tijdens uitvoer	30	4	30	5	30	5
Moelijkheidsgraad	5	4	5	5	5	5
Voorbereiding	15	2	15	5	15	4
Verhinderen scheepsverkeer	5	2	5	5	5	3
Toepasbaarheid	15	3	15	5	15	3
Tijdsgebonden (eb/vloed)	5	3	5	5	5	4
Transportvorm van de constructie	5	5	5	5	5	3
Onderhoud	10	3.3	10	4.4	10	2.8
Onderhoudsinspanning	20	3	20	5	20	2
Herstel mogelijkheden	30	2	30	4	30	2
Tijdsduur tot onderhoud (groot/klein)	30	5	30	4	30	4
Kwaliteitsbehoud	20	3	20	5	20	3
Kosten	45	3.3	45	4.75	45	4.7
Productie	20	2	20	5	20	5
Materiaal per m ²	40	5	40	5	40	5
Onderhoud	10	5	10	4	10	5
Investering	15	3	15	4	15	4
Uitvoering	15	3	15	5	15	4
Totaal	100	3.509	100	4.548	100	4.177

Tabel 16: Trade off matrix Prefab definitieve varianten



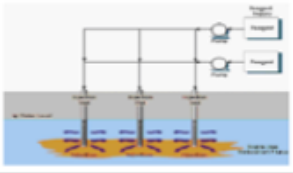
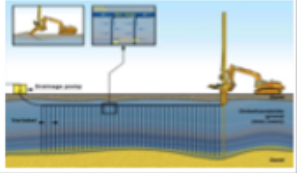
Appendix C Prefab materiaal

Toetsingsaspecten	Jetgrout retourstroomb			Super absorberend polymeer			Gelatine			Superqel			Staalslakken		
	%	Score	Berekend	%	Score	Berekend	%	Score	Berekend	%	Score	Berekend	%	Score	Berekend
Levensduur	15	5	0.75	15	5	0.75	15	2	0.3	15	5	0.75	15	5	0.75
Beschikbaar hoeveelheden	5	2	0.1	5	5	0.25	5	5	0.25	5	5	0.25	5	4	0.2
Kosten	45	2	0.9	45	4	1.8	45	1	0.45	45	4	1.8	45	5	2.25
Benodigde hoeveelheid	15	3	0.45	15	5	0.75	15	5	0.75	15	5	0.75	15	4	0.6
GER waarde	5	5	0.25	5	3	0.15	5	4	0.2	5	3	0.15	5	4	0.2
Verwerking materiaal	5	5	0.25	5	5	0.25	5	5	0.25	5	5	0.25	5	2	0.1
Plasticiteit voor uitharding	10	5	0.5	10	4	0.4	10	4	0.4	10	4	0.4	10	1	0.1
Totaal	100		3.2	100		4.35	100		2.6	100		4.35	100		4.2

Tabel 17: Trade off matrix Prefab materialen



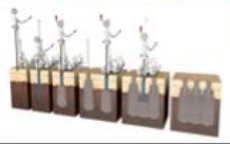
Appendix D In Situ uitvoeringsmethodiek

	Cutter Soil Mixing		Injecteren		Beaudrain	
						
Aspecten	%	Score	%	Score	%	Score
Aansluiting met de kademuur	12	3	12	2	12	3
Homogeniteit	12	5	12	2	12	3
Hoeveelheid handelingen	8	4	8	1	8	3
Obstakels	3	2	3	4	3	2
Tijdsduur uitvoering	8	3	8	1	8	2
Moeilijkheidsgraad uitvoering	5	3	5	2	5	3
Vorbereiding	5	5	5	2	5	4
Verhinderen scheepvaartsverkeer	3	4	3	2	3	2
Investering	22	4	22	4	22	1
Uitvoeringskosten	22	5	22	1	22	4
Totaal	100	4.08	100	2.12	100	2.69

Tabel 18: Trade off matrix In Situ uitvoeringsmethodiek



Appendix E In Situ materialen

	Jetgrout retourstroom		Cement		Waterglas + harder		Microcement	
								
Aspecten	%	Score	%	Score	%	Score	%	Score
Kosten	70	5	70	5	70	1	70	5
Levensduur	30	5	30	5	30	5	30	5
Totaal	100	5	100	5	100	2.2	100	2.2

Tabel 19: Trade off matrix In Situ materialen

Appendix F Programma van Eisen

Bodembescherming	Filterconstructie	Duurzaamheid	Uitvoerbaarheid
De bodembescherming moet op een juiste manier bevestigd kunnen worden tegen de kademuur. De constructie van de bodembescherming moet hiermee dus een dicht geheel vormen met de kademuur.	Het filter moet water doorlaten naar de onderliggende watervoerende grondpakketten.	De uitstoot van CO2 tijdens de productie moet geminimaliseerd worden.	De aan te brengen bodembescherming moet snel en met precisie uitvoerbaar zijn. De bodembescherming zal geheel/gedeeltelijk geprefabriceerd moeten zijn en of moet in situ toepasbaar zijn.
Het totale gewicht van de bodembescherming moet groter zijn dan de opwaartse kracht die onder het oppervlak van de bodembescherming plaatsvindt.	De fijnkorrelige ondergrond (de basis) moet afgedekt worden met een grofkorreliger materiaal zodat de ondergrond niet kan wegspoelen. Dit geldt alleen voor een granulaire filtertype.	Er moet voldoende aanbod beschikbaar zijn van de materialen die gebruikt worden voor de constructie van de bodembescherming.	De constructie moet met precisie te plaatsen / af te zinken zijn zodat er een juiste aansluiting met de kademuur kan worden gemaakt.
De bodemverdediging dient bestand te zijn tegen de optredende hydraulische belastingen (toplaagstabiliteit).	Het materiaal van het filter vormt over zijn totale oppervlak een samenhang en dus een eenheid van één en dezelfde minimaal benodigde kwaliteitseisen.		Mits er onderhoud gepleegd moet worden moet de constructie gedeeltelijk vervangen kunnen worden. Bij in situ geldt dit voor de bestaande en nieuwe constructietypes, bij Prefab geldt dit alleen voor de in dit onderzoek ontwikkelde constructies.
De verticale opbouw van de bodemverdediging dient zodanig te zijn dat onder de optredende belastingen geen transport van bodemmateriaal in horizontale of verticale richting optreedt.	De "dichte" materialen voor bodembeschermingsconstructies moet een minimaal porïënghalte hebben om het doorvoeren van water naar de onderliggende grondlagen te kunnen garanderen. De waarde die hieraan gekoppeld kan worden is 10 % per 1000 kg/m ³ .		De filterconstructie moet stabiel en recht evenredig op de bodem te plaatsen zijn.
Waar de bodemverdediging eindigt zal de (rand van de) bodemverdedigingsconstructie zodanig flexibel zijn dat de constructie ontgrondingen zonder problemen kan volgen.	De kwaliteit van de filterconstructie mag niet achteruit gaan door, het dichtslippen van de bodembescherming.		
De levensduur van de constructie moet minimaal evenredig zijn met de levensduur van de betreffende haven. Dit komt neer op 50 jaar.			
De constructie moet een geheel vormen zodat de onderliggende grondlagen nooit in rechtstreekse verbinding staan met de optredende belastingen.			
De kosten van de gehele constructie + uitvoeringskosten moeten vergelijkbaar / goedkoper zijn dan de totale kosten die benodigd zijn voor traditionele bodembeschermingsconstructies. Hierbij wel kijkend naar de prijs/kwaliteit verhouding. De traditionele bodembescherming kost ongeveer € 60,- / m ² .			

Tabel 20: Programma van Eisen