

Steenbokstraat 10
Postbus 4142
7320 AC Apeldoorn

T (055) 527 29 11
E info@vallei-veluwe.nl
I www.vallei-veluwe.nl

Vooroeververdedigingen in de IJssel

Ter bescherming van natuurvriendelijke
oevers.

Eindrapport

Datum	20 augustus 2013
Opgemaakt door	K.R.G. Reef
Kenmerk	Eindrapport



Opdracht periode:
27-05-2013 tot en met 01-08-2013

Titel Vooroeververdedigingen in de IJssel

Pagina 2 van 57

Vooroeververdedigingen in de IJssel

Ter bescherming van natuurvriendelijke oevers.

Vooroeververdedigingen in de IJssel

K. R. G. Reef

20-augustus 2013

K.R.G.Reef@student.utwente.nl

Omslagafbeelding: Oever met vooroeververdediging, in de vorm van een schanskorf, langs de IJssel bij De Zande. Bij rivierkilometer 991 linkeroever. Bron: Henri Cormont <https://beeldbank.rws.nl>, Rijkswaterstaat

Auteur:	1^e herziening	2^e herziening
K.R.G. Reef	B.W. Borsje	R. Ten Tusscher
31-juli 2013	01-augustus 2013	09-augustus 2013

Voorwoord

Als afsluiting van mijn Bachelor opleiding Civiele Techniek aan de Universiteit Twente moet een Bachelor-eindopdracht uitgevoerd worden. Als invulling voor mijn Bachelor-eindopdracht heb ik de kans gekregen om voor Waterschap Vallei en Veluwe een onderzoek te doen naar het ontwerp van vooroevers in de IJssel, in het kader van het project KRW-maatregelen IJssel.

Nadat ik contact had gezocht met de opdrachtgever kwam ik in contact met de heer Ten Tusscher, projectleider op de afdeling Projectrealisatie van het waterschap. Ik ben erg blij dat het mogelijk was om mijn opdracht nog voor september af te ronden, dat ik daarvoor 3 uur per dag moest reizen heeft niet tot problemen geleid.

Tijdens de uitvoering van mijn Bachelor-eindopdracht heb ik de kans gehad om kennis te maken met Waterschap Vallei en Veluwe. Zo ben ik meer te weten gekomen over de taken van het waterschap en op welke manier het waterschap daaraan invulling tracht te geven. Ik heb mijn periode bij het waterschap als een prettige tijd ervaren, temeer ook door de vriendelijkheid van alle mensen op de afdeling Projectrealisatie.

De totstandkoming van dit rapport was niet mogelijk geweest zonder de ondersteuning van mijn verschillende begeleiders welke ik daarvoor allemaal wil bedanken. De heer Ten Tusscher voor het begeleiden tijdens mijn werkzaamheden bij het waterschap en het verduidelijken van de opdracht. De heer Brem voor het meedenken op momenten dat ik niet helemaal uit een vraagstuk kwam. Ook wil ik de heer Borsje bedanken voor de begeleiding vanuit de universiteit en voor de constructie feedback en commentaren.

Goor, 20 augustus 2013

Koen Reef

Samenvatting

Door het inwerkingtreden van de Kader Richtlijn Water (KRW) is het nodig de ecologische waterkwaliteit in de IJssel te vergroten. Dit wordt bewerkstelligd door Rijkswaterstaat in samenwerking met Waterschap Vallei en Veluwe. Om de natuurwaarden te vergroten worden verschillende maatregelen genomen zoals het aanleggen van nevengeulen en het aanleggen van natuurvriendelijke oevers met vooroever.

Het in dit rapport beschreven onderzoek is uitgevoerd om te toetsen of het gemaakte voorlopig ontwerp van de vooroevers bestand is tegen de optredende belastingen. Wanneer het ontwerp niet blijkt te voldoen moet het ontwerp worden aangevuld. Het ontwerp moet getoetst worden op de hoeveelheid erosie, zowel onder natuurlijke omstandigheden als onder omstandigheden waarbij stromingen door scheepvaart en hoogwater optreden. De onderzoeksvragen zoals die gebruikt zullen worden voor het onderzoek staan hieronder:

1. *Is de voorziene vooroever in zijn huidige ontwerp (met hergebruik van vrijkomende oeverbestorting) voldoende om te voorkomen dat dit erosiemateriaal in de vaargeul sedimenteert en tevens belast is tegen scheepvaartgolven en stromingen als gevolg van die scheepvaart en hoogwater?*
2. *Indien het antwoord op bovenstaande vraag ontkennend is, wat zijn dan de eisen die gesteld moeten worden aan:*
 - a. *Het bestortingsmateriaal*
 - b. *Het ontwerp*
3. *Zijn de opgestelde eisen bruikbaar voor andere vergelijkbare projecten met vooroeververdediging?*

Onderzoeksvraag 2 is enkel van toepassing wanneer het antwoord op vraag 1 ontkennend is.

De te toetsen ontwerpen beschrijven vooroevers op verschillende locaties in de rivier. De locaties liggen allemaal aan de IJssel tussen Dieren en Olst. De stad Zutphen ligt net stroomafwaarts van de locatie Zutphen Links en Deventer ligt tussen de locaties Ravens- en Stobbenweerd.

Om de bij dit doel horende onderzoeksvragen beantwoord te krijgen is eerst literatuur-onderzoek gedaan naar beschikbare informatie over vooroevers. Hieruit zijn verschillende eisen naar voren gekomen voor vooroevers, deze staan hieronder:

1. *de toegepaste breuksteen van de topplaag moet bestand zijn tegen golf- en stroomaanval;*
2. *de verdediging moet waterdoorlatend zijn (en blijven) om overdrukken onder de verdediging te vermijden;*
3. *de opbouw van de taludverdediging moet zodanig zijn dat grondkorrels niet door de verdediging heen kunnen uitspoelen (grond dichtheid);*
4. *de taludverdediging moet diep genoeg worden doorgezet om aantasting aan de teen te voorkomen.*
5. *de kop van de vooroever moet 30% zwaarder uitgevoerd worden, ofwel door toepassen van 1,3 keer zwaardere steen ofwel door het talud flauwer te maken met een factor 1,3.*

Met behulp van deze eisen is het ontwerp getoetst. Om te bepalen of de ontwerpen voldoen aan Eis 1 is onderzoek gedaan naar de verschillende belastingen die optreden in de rivier. Hierbij zijn windgolven, scheepsgolven, natuurlijke stroming en retourstroming als belastingen gekwantificeerd.

Hierbij zijn verschillende methodes gebruikt om tot de gekwantificeerde belasting te komen. De windgolf belasting is bepaald met behulp van het computerprogramma Hydra-R van Rijkswaterstaat, hiermee is ook de natuurlijke stroming bepaald. De scheepsgolven zijn met behulp van het computerprogramma DIPRO+ van Rijkswaterstaat bepaald, net als de retourstroming.

Gebleken is dat de maatgevende belasting veroorzaakt wordt door scheepvaart. Hierbij is de haalgolf veroorzaakt door de passage van een Groot Rijnschip de maatgevende scheepsgolf. Met behulp van rekenregels zijn vervolgens waarden voor de bestortingsparameter berekend. Deze waarden zijn vergeleken met de beschikbare informatie over de oeverbestorting en de resultaten daarvan (Eis 1) en van de overige eisen zijn te vinden in hoofdstuk 6.

Met behulp van deze gegevens is de toetsing uitgevoerd, waarbij gebleken is dat de gemaakte ontwerpen niet voldoen. Onderzoeksvraag 1 wordt daarom beantwoordt met nee. Omdat onderzoeksvraag 2 de vraag stelde welke aanvullende eisen dan noodzakelijk zijn, zijn uiteindelijk aanvullende eisen opgesteld. Deze zijn hieronder te zien, voor een uitgebreidere beschrijving wordt verwezen naar Bijlage 1.

*Eis 1: De voor de vooroever te gebruiken breuksteen moet voldoen aan:
 $\Delta D_{50} > 0,2m$.*

Eis 2: De te gebruiken materialen moeten waterdoorlatend zijn.

Eis 3: Er moet een filter worden aangebracht onder de constructie.

Eis 4: De verdediging moet minimaal 1m onder de overeengekomen laagste rivierstand (OLR) worden doorgezet.

Eis 5: De voor de kop van de vooroever te gebruiken breuksteen moet voldoen aan een van de volgende twee voorwaarden:

- De voor de kop van de vooroever te gebruiken breuksteen moet voldoen aan: $\Delta D_{50} > 0,22m$*
- De voor de kop van de vooroever te gebruiken breuksteen moet voldoen aan: $0,22m > \Delta D_{50} > 0,2m$ en de taludhelling is 1:4.*

Deze eisen moeten gesteld worden aan de oevers zoals beschreven in het bestaande ontwerp. Vergelijkbare eisen zullen ook van toepassing zijn wanneer vergelijkbare ontwerpen getoetst/gemaakt worden. Hierbij zullen de getallen als gebruikt in Eis 1, 4 en 5 waarschijnlijk wel verschillen wanneer de maatgevende scheepvaart anders is.

Op basis van het uitgevoerde onderzoek zijn aanbevelingen gedaan voor verder onderzoek, zoals het onderzoeken van het effect van grotere schepen en bijbehorende belasting op vooroevers. Een tweede aanbeveling is het onderzoeken van het effect van een ruimer rivierprofiel dan dat van de IJssel en een laatste suggestie is het onderzoeken van het gedrag van de vooroever bij een hoge waterstand.

Lijst met symbolen

A_c	oppervlakte nat vaarwegdwarsprofiel	$[m^2]$
A'_c	oppervlakte nat vaarwegdwarsprofiel tussen scheepsas en oever bij uit de as varen	$[m^2]$
A_m	grootspantoppervlak	$[m^2]$
B_b	breedte vaarweg op bodem	$[m]$
B_s	scheepsbreedte	$[m]$
b_w	breedte vaarweg op waterlijn	$[m]$
c	coëfficiënt	$[-]$
c_{fr}	schuifspanning coëfficiënt	$[-]$
D_{50}	karacteristieke steendiameter	$[m]$
D_{n50}	nominale steendiameter	$[m]$
F_{vis}	verhouding tussen vaarsnelheid en grenssnelheid	$[m/m]$
g	zwaartekrachtversnelling	$[ms^{-2}]$
h'	imaginaire waterdiepte	$[m]$
h_1	waterdiepte	$[m]$
H_i	golfhoogte interferentiepieken	$[m]$
H_s	significante golfhoogte	$[m]$
k	taludfactor	$[-]$
k_s	ruwheid coëfficiënt	$[-]$
K_t	turbulentiefactor	$[-]$
L_s	scheepslengte	$[m]$
L_{wi}	golflengte interferentiepieken	$[m]$
m	taludhelling	$[m/m]$
M_{50}	karacteristieke massa	$[kg]$
s	afstand zijkant schip tot interferentiepiek	$[m]$
T_p	Golfperiode	$[s]$
T_s	Gemiddelde scheepsdiepgang	$[m]$
u_r	retourstroomsnelheid	$[ms^{-1}]$
u^*_r	extreme retoursnelheid	$[ms^{-1}]$
V_l	grenssnelheid	$[ms^{-1}]$
$V_{l,b}$	grenssnelheid betrokken op de waterdiepte	$[ms^{-1}]$
$V_{l,ls}$	grenssnelheid betrokken op de scheepslengte	$[ms^{-1}]$
$V_{L,Schiff,cen}$	grenssnelheid volgens Schijf in de vaarwegas	$[ms^{-1}]$
$V_{L,Schiff,excen}$	grenssnelheid volgens Schijf bij excentrisch varen	$[ms^{-1}]$
$V_{natuurlijk}$	natuurlijke stroomsnelheid	$[ms^{-1}]$
V_{totaal}	stroomsnelheid als combinatie van natuurlijke en retourstroming	$[ms^{-1}]$
x	karacteristieke lengtemaat	$[m]$
X	Afstand tot boeg van schip	$[m]$

y	positie in vaarweg t.o.v. vaarwegas	[m]
y'	positie in vaarweg t.o.v. vaarweggrens	[m]
$z_{\max}$	haalgolfhoogte	[m]
α	taludhoek	[°]
Δ	relatieve dichtheid	[-]
ΔD_{50}	besortingsparameter	[m]
Δh	gemiddelde waterspiegeldaling	[m]
Δ^h	extreme waterspiegeldaling	[m]
ε	hoek van inwendige wrijving	[°]
ξ	brekerparameter	[-]
ρ	dichtheid	[kgm ⁻³]
ρ_s	dichtheid breuksteen	[kgm ⁻³]
Ψ_c	kritieke schuifspanning volgens Shields	[-]
$\Psi_{u,w}$	upgrading factor voor golfaanval	[-]

INHOUDSOPGAVE

1.	Inleiding	10
1.1.	Aanleiding.....	10
1.2.	Onderzoeksvragen	11
1.3.	Afbakening.....	11
1.4.	Leeswijzer.....	11
2.	Achtergrond	13
2.1.	Vooroevers	13
2.2.	Vergelijkbare projecten	14
3.	Huidige situatie	15
3.1.	Situatie beschrijving.....	16
3.2.	Belastingen	16
4.	Maatgevende belasting	19
4.1.	Methode	19
4.2.	Windgolven	19
4.3.	Scheepsgolven	21
4.4.	Natuurlijke stroming	23
4.5.	Retourstroming	24
4.6.	Maatgevende belasting	24
5.	Invloed individuele parameters	25
5.1.	Haalgolf	25
5.2.	Bestortingsparameter	27
6.	Toetsing.....	28
6.1.	Overzicht toetsingsresultaten	29
6.2.	Bestorting.....	31
7.	Discussie.....	32
7.1.	Aannames.....	32
7.2.	Interpretatie	33
7.3.	Toetsingsresultaten	35
8.	Conclusie en Aanbeveling	36
8.1.	Conclusie	36
8.2.	Aanbeveling	37
9.	Geciteerde werken:	38
Bijlage 1.	Aanvullende eisen	40
Bijlage 2.	Modelbeschrijving.....	42
Bijlage 3.	Gevoeligheidsanalyse.....	49
Bijlage 4.	Profielen per oever	55

1. Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de aanleiding van het onderzoek behandeld. Dit zal worden gevolgd door de onderzoeksvragen en een afbakening van het onderwerp. De leeswijzer voor de rest van dit rapport maakt dit hoofdstuk compleet.

1.1. Aanleiding

“Water is geen gewone handelswaar, maar een erfgoed dat als zodanig beschermt, verdedigt en behandeld moet worden.” Met deze tekst begint de Richtlijn 2000/60/EG van het Europees Parlement en de Raad (EP, 2000) beter bekend als de Kaderrichtlijn Water (KRW). De Kaderrichtlijn Water voorziet in concrete doelen om de toestand van ons water te verbeteren.

In 2010 hebben Waterschap Vallei en Veluwe en Rijkswaterstaat Oost-Nederland een samenwerkingsovereenkomst ondertekend voor de realisatie van de maatregelen binnen de Kaderrichtlijn Water binnen het waterlichaam IJssel. Het doel hiervan is het vergroten van de ecologische waarden van de IJssel voor 2016.

Het project KRW-maatregelen IJssel wordt gefinancierd door Rijkswaterstaat en gerealiseerd door het waterschap. Binnen het samenwerkingsconcept is Rijkswaterstaat beleidsverantwoordelijk voor het halen van de doelen en het waterschap voor het realiseren van de scope binnen het beschikbare budget en de beschikbare tijd.

In de huidige situatie scoort de IJssel onvoldoende op ecologische waarden voor de doelsoorten stroming-minnende vissen en macrofauna (kleine ongewervelde organismen). Geschikte maatregelen om dit probleem op te lossen zijn het aanleggen van nevengeulen en natuurvriendelijke oevers. Waterschap Vallei en Veluwe voert de maatregelen uit en is in 2011 gestart met de planstudiefase.

Er is een maatregelenpakket opgesteld om aan de KRW-eisen te voldoen. Onder deze maatregelen bevinden zich 12 geplande oevers langs de IJssel waar, naast de aanleg van natuurvriendelijke oevers, vooroeverconstructies gepland staan. Op dit moment wordt betwijfeld of het vrijkomende oevermateriaal (voor 70% staalslakken) civieltechnisch geschikt is als vooroevermateriaal, los van de vraag of het vrijkomende oevermateriaal milieutechnisch daarvoor toegepast mag worden in het kader van het Besluit bodemkwaliteit. Hierbij heeft Deltares aangegeven dat de benodigde filtereigenschappen bepalend zijn of de vooroever voldoende stabiel is (R. van der Mark, 2013)

1.2. Onderzoeksvragen

Het doel van dit onderzoek is het toetsen van het gemaakte voorontwerp van de vooroever. Daar waar het ontwerp niet blijkt te voldoen moet het ontwerp aangepast worden. Het ontwerp moet getoetst worden op de hoeveelheid erosie, zowel onder natuurlijke omstandigheden als ten gevolge van stromingen door scheepvaart en hoogwater. De onderzoeksvragen zoals die gebruikt zullen worden voor het onderzoek staan hieronder:

1. Is de voorziene vooroever in zijn huidige ontwerp (met hergebruik van vrijkomende oeverbestorting) voldoende om te voorkomen dat dit erosiemateriaal in de vaargeul sedimenteert en tevens belast is tegen scheepvaartgolven en stromingen als gevolg van die scheepvaart en hoogwater?
2. Indien het antwoord op bovenstaande vraag ontkennend is, wat zijn dan de eisen die gesteld moeten worden aan:
 - a. Het bestortingsmateriaal
 - b. Het ontwerp
3. Zijn de opgestelde eisen bruikbaar voor andere vergelijkbare projecten met vooroeververdediging?

Onderzoeksvraag 2 is enkel van toepassing wanneer het antwoord op vraag 1 ontkennend is.

1.3. Afbakening

In dit onderzoek wordt onder vooroever verstaan de constructie die op het voorland voor de daadwerkelijke rivieroever gerealiseerd wordt. Wanneer gesproken wordt over het huidige ontwerp van de vooroever wordt het bestaande voorontwerp wat gemaakt is door Tauw (Rob Hendriks, 2013) bedoeld. Dit is gemaakt in opdracht van Waterschap Vallei en Veluwe. In dit rapport wordt consequent de term breuksteen gebruikt, ook wanneer een mengsel van breuksteen en bijvoorbeeld staalslakken bedoeld wordt.

1.4. Leeswijzer

In dit onderzoeksrapport staat het verloop van dit onderzoek beschreven. Als eerste wordt de achtergrond van het onderzoek in Hoofdstuk 2 beschreven, hier zal aandacht besteedt worden aan wat er bekend is over het onderwerp vanuit de literatuur. Daarna zal de huidige situatie van de rivier en de belastingen in Hoofdstuk 3 beschreven worden. Dit wordt gevolgd door de bepaling van de belastingen in Hoofdstuk 4, waarbij vier verschillende belastingen gekwantificeerd zullen worden.

In Hoofdstuk 5 wordt de invloed van individuele parameters beschreven waarbij aandacht wordt besteed aan de gevoeligheid van de maatgevende belasting voor verscheidene input gegevens. In Hoofdstuk 6 zal het ontwerp getoetst worden op basis van de in Hoofdstuk 2 gevonden eisen. Hoofdstuk 7 is de discussie waarin aannames beschreven worden en de effecten daarvan op de resultaten evenals een interpretatie van de gevonden resultaten van dit onderzoek. Als laatste worden in Hoofdstuk 8 de conclusies en aanbevelingen beschreven die het resultaat zijn van dit onderzoek.

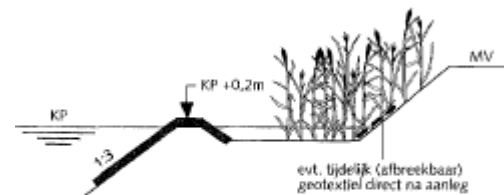
2. Achtergrond

In dit hoofdstuk wordt beschreven wat er vanuit de literatuur bekend is over het onderwerp van dit onderzoek. Hierbij wordt eerst ingegaan op de beschikbare kennis over vooroeverconstructies op basis van rapporten van onder andere de stichting civieltechnisch centrum uitvoering research en regelgeving (CUR). Vervolgens zal specifiek ingegaan worden op vergelijkbare projecten en bevindingen die gedaan zijn op het gebied van vooroevers dan wel oeverbekleding.

Gebleken is dat over de dimensionering van oeververdedigingen en vooroeverdammen wel het een en ander bekend is aan ontwerpregels. Onderzoek gericht op evaluatie van vooroevers is ook wel uitgevoerd alleen heeft dit zich voornamelijk gericht op de ecologische effecten. Er is weinig onderzoek gedaan naar erosie aan vooroeverconstructies.

2.1. Vooroevers

Vooroevers, vooroeverdrempels of vooroeververdedigingen zijn constructies die in een waterlichaam voor de oever gebouwd worden. Het doel van deze constructie is het verminderen van de belasting op de oever om bijvoorbeeld erosie van de achterliggende oever te verminderen, of om luwten te creëren die de ontwikkeling van waterplanten ten goede komt.



Figuur 1: Oever met vooroeververdediging (CUR, 1999).

Vooroever constructies komen voor in verschillende vormen. Echter in dit onderzoek wordt enkel gekeken naar vooroevers die volledig bestaan uit losse gestorte materialen die direct dan wel indirect op de kribvakbodem zal worden aangebracht. Een voorbeeld van een oever met vooroeververdediging is te zien in Figuur 1.

Het CUR heeft in publicatie 197 (CUR, 2000) een aantal toepassingen van breuksteen beschreven, waaronder het gebruik ervan in vooroevers. In het rapport wordt beschreven dat een waterdoorlatende constructie gedimensioneerd kan worden als ware het taludverdediging, dit is een veilige benadering omdat door de waterdoorlatende eigenschap van het materiaal de breuksteen beter bestand is tegen golfaanvallen dan een waterdichte constructie.

Ook zijn in bovenstaande publicatie een aantal eisen opgesteld met betrekking tot het gebruik van breuksteen in (voor)oeververdedigingen. Deze eisen staan hieronder opgesomd:

1. de toegepaste breuksteen van de topplaag moet bestand zijn tegen golf- en stroomaanval;
2. de verdediging moet waterdoorlatend zijn (en blijven) om overdrukken onder de verdediging te vermijden;
3. de opbouw van de taludverdediging moet zodanig zijn dat grondkorrels niet door de verdediging heen kunnen uitspoelen (gronddichtheid);
4. de taludverdediging moet diep genoeg worden doorgezet om aantasting aan de teen te voorkomen.
5. de kop van de vooroever moet 30% zwaarder uitgevoerd worden, ofwel door toepassen van 1,3 keer zwaardere steen ofwel door het talud flauwer te maken met een factor 1,3.

In CUR publicatie 201 (CUR, 1999) worden verschillende typen natuurvriendelijke oevers beschreven, waaronder vooroeverdammen. Er wordt verwezen naar formules van Pilarczyk voor het bepalen van stabiliteitsparameters voor breuksteenconstructies.

In een literatuurstudie door Van Kouwen (2011) is gebleken dat voor inrichting van natuurvriendelijke oevers (inclusief vooroeverdammen) er duidelijkheid is welke richtlijnen van belang zijn en wat er gebeurt wanneer het ontwerp wordt aangepast. Wel wordt opgemerkt dat deze richtlijnen niet gekwantificeerd zijn en dat het dus bij kwantitatieve uitspraken blijft "het effect is grofweg bekend".

2.2. Vergelijkbare projecten

Het aanleggen van vooroeververdedigingen in waterlichamen is in Nederland niet nieuw. Een overzicht van natuurvriendelijke oevers (stand van zaken 1 december 2011) is gemaakt door (van Kouwen, 2011), hieruit wordt duidelijk dat er in totaal 69 oevers met vooroevers/luwtedammen zijn uitgevoerd. Van deze 69 oevers is er van 25 oevers data beschikbaar. De locaties waarvan data beschikbaar is zijn onder andere het Markermeer, de Twenthekanalen en de Haringvliet. In Figuur 2 is een voorbeeld te zien van een vooroeverconstructie in de Korendijksche slikken (aan de Haringvliet).

De conclusies die op basis van deze projecten getrokken worden zijn veelal gericht op de ecologische effecten. Echt duidelijkheid over erosie van vooroevers ontbreekt. Conclusies die wel getrokken worden op het gebied van waterdynamiek zijn onder andere dat de noodzakelijke hoogte van de vooroeververdediging hoger is in wateren met scheepvaart, dit geldt ook voor locaties met frequent voorkomende waterstandvariaties. Ook wordt geconstateerd dat de meest gebruikte materialen voor natuurvriendelijke oevers steen, schanskorven, geotextiel, hout en plantmateriaal zijn.

De materiaalvoorkeur moet volgens Van Kouwen liggen bij zo licht mogelijke, het liefst gebiedseigen, materialen om de natuur zo min mogelijk te beïnvloeden. Een grote dynamiek kan echter aanleiding zijn tot het gebruik van zwaardere materialen (breuksteen, puin). Verder wordt melding gedaan van weggezakte en vernielde schanskorven en de hoge onderhoudsintensiteit van palenrijen met snoeimateriaal. Opgemerkt wordt dat het mogelijk is de waterzijde van de vooroever zwaar uit te voeren en de landzijde lichter.



Figuur 2: Natuurvriendelijke vooroever in de Korendijksche slikken.
<https://beeldbank.rws.nl> (RWS, 2013a).

Het beoogde doel van de vooroeverconstructie is het verminderen van belasting op de achterliggende rivieroever. Daarnaast zorgt een vooroever er ook voor dat er achter de constructie een stromingsluwte ontstaat waar bepaalde ecologische waarde ontstaat. Volgens bovenstaande bron kunnen deze doelen zeker bereikt worden, al zijn daarvoor wel eisen aan het ontwerp nodig. Deze eisen worden in de literatuurstudie niet kwantitatief beschreven.

3. Huidige situatie

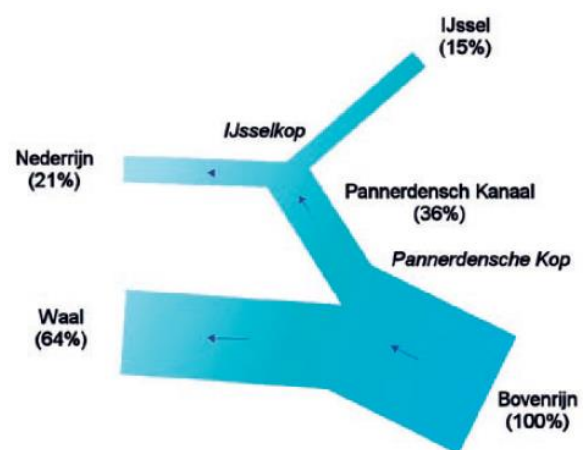
In dit hoofdstuk wordt het rivier systeem beschreven van de rivier de IJssel. Onder het riviersysteem vallen alle processen die zich in de rivier afspelen, waaronder watertransport, sedimenttransport of scheepvaart. Omdat voor dit onderzoek de belasting op de (voor)oever relevant is zal aan de hand van een situatie beschrijving een overzicht van de optredende en belangrijke belastingen opgesteld worden. Als laatste zal beschreven worden hoe de verschillende belastingen gekwantificeerd worden.

3.1. Situatie beschrijving

De rivier de IJssel, soms ook Gelderse IJssel genoemd, is een zijtak van de Rijn. Bij Arnhem takt de IJssel af van de Rijn om met een lengte van 125km naar het IJsselmeer te stromen. Onderweg passeert de IJssel onder andere de Hanzesteden Doesburg, Zutphen, Deventer en Kampen. De IJssel stroomt van het zuiden naar het noorden door het IJsseldal, dat gelegen is tussen de Veluwe in het westen en de Sallandse Heuvelrug in het Oosten (RWS, IJssel, 2013).

De oevers van de IJssel zijn na de Tweede Wereldoorlog versterkt door het aanbrengen van oeververdediging. Doel daarvan was het op diepte houden van de vaargeul door de toename van het scheepvaartverkeer met steeds grotere schepen. Deze oeververdediging bestaat onder andere uit stenen, staalslakken en grind. De minimale diepgang die nagestreefd wordt bij de Overeengekomen Laagste Rivierstand (OLR) is 2,5m en wordt elke 10 jaar opnieuw vastgesteld. Bij de Mediane Rivierstand (MR) is de diepgang 3,5m.

Qua afvoer is de IJssel de kleinste van de drie grote Rijntakken (Waal, Neder-Rijn en IJssel). De afvoer van de IJssel bedraagt bij de maatgevende rijnafvoer 15% van het totale Rijnwater dus 2400m³ per seconde. De verdeling van het Rijnwater in de maatgevende situatie is te zien in Figuur 3.



Figuur 3: De afvoerverdeling over de Rijntakken bij maatgevende afvoer (RWS, 2007)

De IJssel wordt gebruikt voor scheepvaart waarbij belangrijke aansluitende vaarwegen de

Twenthe kanalen, het Zwarte Water, het IJsselmeer en de Rijn zijn. De IJssel is geschikt voor Groot Rijnschepen (CEMT klasse Va) en recreatievaart klasse AM. De maximale afmetingen van een Groot Rijnschip is 110m lengte bij 11,4m breedte en hebben een diepgang van maximaal 2,8m (RWS, 2011).

3.2. Belastingen

Binnen het riviersysteem vinden verschillende processen plaats die ook een belasting op de (voor)oever veroorzaken. Deze belastingen kunnen verschillende oorzaken hebben, zo veroorzaakt de scheepvaart onder andere golf- en

stroombelastingen. Daarnaast vinden ook een aantal belastingen van nature plaats zoals natuurlijke stroming in de rivier en windgolven.

Naast deze hydraulische belastingen bestaat ook de kans dat andere (mechanische) belastingen optreden. Voorbeelden hiervan zijn ijsgang, vandalisme of andere incidentele belastingen. Omdat deze belastingen zeer onregelmatig en zelden optreden wordt met deze groep belastingen geen rekening gehouden. Maatregelen die genomen kunnen worden om deze schade deels te beperken zijn beleidsmatige maatregelen bijvoorbeeld toegang tot de constructie verbieden. Eventuele schade die volgt uit dit type belasting zal bij inspecties geconstateerd moeten worden en eventueel gerepareerd worden.

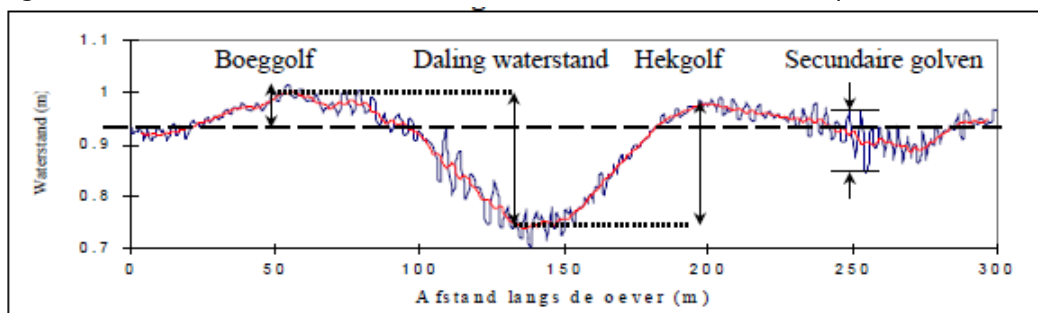
3.2.1. Windgolven

Op plaatsen waar een groot open water voorkomt ontstaan onder invloed van de wind, windgolven. Van belang bij het ontstaan en de uiteindelijke intensiteit van windgolven zijn onder andere de parameters windsnelheid en – duur, strijklengte en waterdiepte. Windgolven worden uitgedrukt in de significante golfhoogte H_s welke het gemiddelde is van het hoogste eenderdedeel van alle golfhoogten gedurende een bepaalde periode. De golfperiode T_p is een belangrijke parameter en geeft de gemiddelde tijd tussen twee golfpieken (CUR, 2000).

3.2.2. Scheepsgolven

Scheepsgolven zijn golven die veroorzaakt worden door passerende scheepvaart. Scheepsgolven kunnen bestaan uit verschillende soorten golven, bij het passeren van schepen treden onder andere frontgolven, secundaire golven en hekgolven op. In Figuur 4 is een weergave te zien van de front- en hekgolf van een passerend schip.

De frontgolf van een passerend schip vormt de begrenzing van de waterspiegel daling welke optreedt bij de passage van een schip. De hekgolf vormt de achterste begrenzing van deze waterstanddaling. In Figuur 4 is het systeem van boeggolf, waterstanddaling, hekgolf en secundaire golven daarachter goed weergegeven. Volgens CUR publicatie 201 (CUR, 1999) moet in een scheepvaartkanaal met gangbare afmetingen (breedte 50m en diepte 4m) rekening gehouden worden met waterspiegelfluctuaties in de orde van 0,3-0,5m voor de front en haalgolf, met een golf duur van 2-5 seconden. Incidenteel kunnen waarden van 1m optreden.

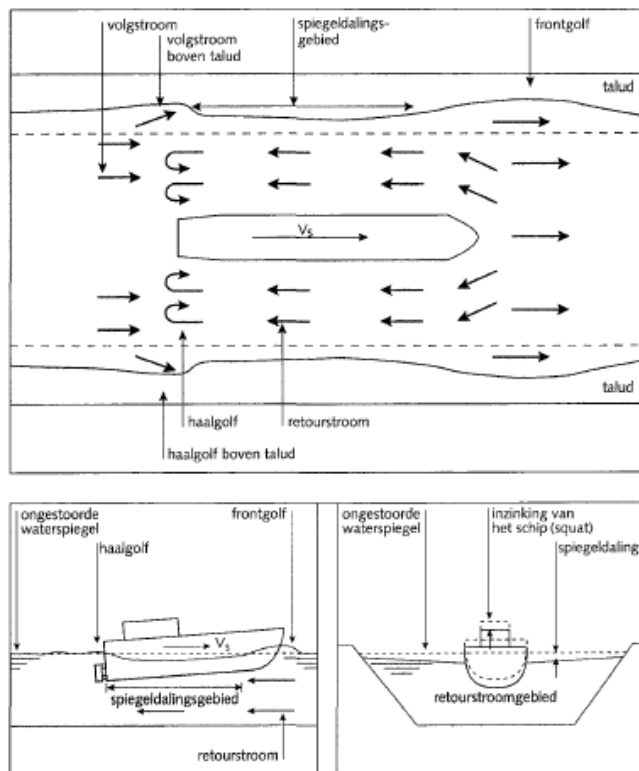


Figuur 4: Registratie van de waterstand langs de oever aan de waal (blauw), bij een scheepspassage (Brinke, 2003). Het patroon van de waterbeweging is weergegeven in rood.

3.2.3. Natuurlijke stroming

In een rivier vindt van nature stroming plaats, het gevolg van het hoogteverschil tussen water bovenstrooms en benedenstrooms. De stroomsnelheid in rivieren varieert en is afhankelijk van de afvoer en het rivierprofiel. Het blijkt dat de belasting door natuurlijke stroming veelal kleiner is dan die veroorzaakt door scheepsgolven. Het is wel van belang om onder de waterspiegel rekening te houden met stromingen omdat stromingen optreden in het gehele profiel. Volgens CUR publicatie 201 (CUR, 1999) worden

stroomsnelheden van 0,5 m/s nabij de oever zelden overschreden. Bij hoogwater zijn stroomsnelheden van 1,0 m/s niet onmogelijk.



Figuur 5: Karakteristieke waterbeweging door varende schepen; primaire golven (CUR, 1999).

3.2.4. Retourstroming

Retourstroming is stroming die veroorzaakt wordt door varende schepen. Water dat zich voor het schip bevindt, wordt door de beweging van het schip gedwongen om het schip heen te bewegen. In Figuur 5 is ook de retourstroming om een schip weergegeven.

Volgens CUR publicatie 197 (CUR, 2000) kan de retourstroming in rivieren uitkomen op ongeveer 0,5 -1,0 m/s. Van belang is wel dat rekening gehouden wordt met de combinatie van natuurlijke en retourstroming. De retourstroming vindt plaats in tegengestelde richting van de scheepvaart. Wanneer het schip stroomopwaarts vaart vindt de retourstroming in afstromende richting plaats, op deze manier versterkt deze de natuurlijke stroming. Deze situatie is waarschijnlijk maatgevend. Omgekeerd, wanneer een schip stroomafwaarts vaart doven de retour- en natuurlijke stroming elkaar uit.

4. Maatgevende belasting

Om te bepalen of de gemaakte ontwerpen voldoen aan de eisen is het van belang om te weten hoe groot de belastingen zijn die op de vooroevers werken. Als de vooroever voldoende bestand is tegen de optredende belastingen zal deze niet of nauwelijks eroderen. Om dit te bepalen moeten de beschreven belastingen gekwantificeerd worden. In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe de belastingen gekwantificeerd zijn en hoe groot de verwachte belasting op de vooroever zal zijn.

4.1. Methode

Om tot bruikbare eisen te komen waaraan de constructie moet voldoen om de belastingen te kunnen weerstaan, is het van belang dat de belastingen worden gekwantificeerd. Voor het bepalen van golfbelasting voor bekledingen is onbekend welke windsnelheden toegepast dienen te worden (RWS, 2007b). Bij gebrek aan deze informatie wordt geadviseerd de ontwerpwindnelheden aan te houden. Met behulp van de Hydra computerprogramma's van Rijkswaterstaat is het mogelijk de ontwerp windbelasting en bijbehorende (wind)golfbelasting te bepalen.

Voor het bepalen van golfbelasting veroorzaakt door scheepvaart wordt door het Technisch Rapport Ontwerpbelastingen voor het rivierengebied (RWS, 2007b) het computerprogramma DIPRO+ (DIimensionering PROtections) aanbevolen. Ook in CUR publicatie 201 (CUR, 1999), CUR publicatie 197 (CUR, 2000) en het TR 25b "Steenzettingen. Ontwerp" (TAW, 2003b) wordt het gebruik van DIPRO aangeraden voor het bepalen van schepen geïntroduceerde belastingen. DIPRO is het originele computerprogramma uit 1989 en in 2003 is de recente versie van DIPRO+ uitgekomen met verscheidene verbeteringen (RWS, 2003).

De maatgevende natuurlijke stroomsnelheid bij de MHW kan net als de windbelasting bepaald worden met behulp van het computerprogramma Hydra-R (Duits, 2007). Voor het bepalen van de retourstroomsnelheid ingezet door scheepvaart kan DIPRO ook gebruikt worden (Waterloopkundig Laboratorium, 1997).

Wanneer de verschillende vier belastingen gekwantificeerd zijn en bekend is welke karakteristieke massa (M_{50}) per belasting noodzakelijk is kan de maatgevende belasting per locatie bepaald worden door de hoogste M_{50} te selecteren.

4.2. Windgolven

Zoals beschreven wordt de windgolf belasting op de constructie bepaald met behulp van het computer programma Hydra-R (RWS, 2007a). Volgens (Duits, 2007) wordt Hydra-R gebruikt om de correcte golfbelasting aan de oever te bepalen. Dit wordt gedaan door de lokale waterstand en de lokale windcondities te vertalen naar de

hydraulische golfcondities ter plaatse (golfhoogte, -periode en -richting). Deze golfcondities zijn onder meer afhankelijk van de effectieve strijklengte en de karakteristieke bodemhoogte en worden berekend met behulp van de golfgroeiformules van Bretschneider (Duits, 2007).

Hoewel Hydra-R primair bedoeld is om gebruikt te worden in het toetsingsproces van primaire waterkeringen is het volgens (RWS, 2007b) mogelijk Hydra-R te gebruiken als inschattingmiddel. Het voornaamste verschil tussen ontwerpen en toetsen is dat rekening gehouden moet worden met veranderende omstandigheden, bijvoorbeeld klimaatverandering, in de toekomst.

Wanneer de windgolven worden bepaald, met behulp van Hydra-R, voor de verschillende locaties waar vooroevers gepland staan worden de volgende waarden verkregen, zoals te zien in Tabel 1.

Tabel 1: Maximale windgolfbelasting per oeverlocatie.

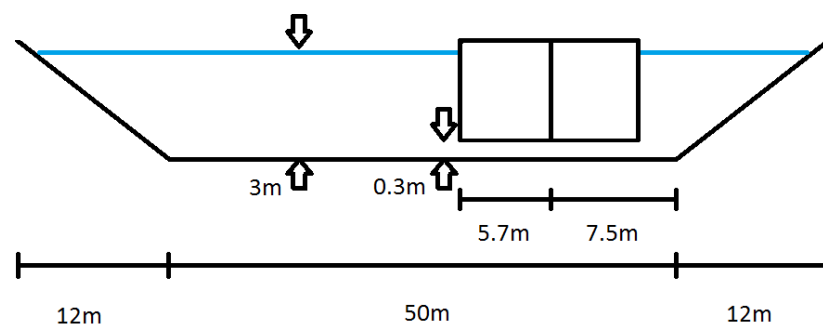
$M_{50} = D_{n50}^3 \cdot \rho_s$	1	locaties naar	H_s	T_p	M₅₀
		rijnkilometer	[m]	[s]	[kg]
met $D_{n50} = \frac{H_s}{\left(\frac{2,25 \cos \alpha}{\xi^{0,5}}\right) \cdot \Delta}$	2	Spankerense Weilanden	0,11	1,55	0,26
		Gelderse Toren	0,00	0,00	0,00
		de Schans	0,00	0,00	0,00
met $\xi = \frac{\tan \alpha}{\left(\frac{H_s}{1,56 T_p^2}\right)^{0,5}}$	3	Leuvenheim	0,00	0,00	0,00
		Bronkhosterwaarden	0,00	0,00	0,00
		Stroomkanaal	0,26	1,98	2,78
		Zutphen Links	0,23	1,87	1,85
		Eesterweerd	0,11	1,66	0,32
		Ravensweerd	0,22	1,83	1,68
		Stobbenweerd	0,27	2,07	3,26
		Keizerswaarden	0,17	1,79	0,88
		Hengforderwaarden	0,27	2,00	3,00

Wat opvalt, is dat voor vier locaties een waarde 0 gegeven wordt voor zowel de golfhoogte als de periode. Dit kan mogelijk verklaard worden door zeer korte effectieve strijklengtes bij de MR. Dit ondanks dat rekening gehouden wordt met water in de uiterwaarden, wat tot een overschatting van de strijklengte zou moeten leiden omdat deze bij de OLR en MR niet volstaan.

M₅₀ is bepaald met behulp van formules verkregen uit (CUR, 1999), welke ook hierboven met vergelijking 1 tot en met 3 beschreven worden.

4.3. Scheepsgolven

Het bepalen van golfbelasting veroorzaakt door scheepvaart wordt gedaan met behulp van het computerprogramma DIPRO+ (RWS, 2003). Het programma berekent met behulp van gegevens over onder andere de vaarweg, maatgevende scheepvaart en hydraulische omstandigheden de scheepsgeïnduceerde belasting op de oever. Hoewel vooroeverconstructies en "natte" stroken niet te dimensioneren zijn met behulp van DIPRO+ kan het programma wel behulpzaam zijn bij het dimensioneren van een verdedigingsconstructie aan de vaarwegzijde van de "natte" strook (Waterloopkundig Laboratorium, 1997).



Figuur 6: Afmeting vaarweg en scheepvaart in profiel Spankerense Weilanden.

Gebleken is dat de haalgolf verantwoordelijk is voor de maatgevende scheepsgolf belasting. De haalgolf is de achterste begrenzing van de waterspiegeldaling rondom een bewegend schip. De haalgolf wordt in DIPRO bepaald met behulp van onderstaande vergelijking:

$$z_{max} = 23,6 \left(\frac{A'_c}{A_c} \right)^{-0,7} * \left(\frac{A_m}{A_c} \right)^2 * \left(\frac{B_s}{h_1} \right)^{0,5} * \left(\frac{V_{schip}}{\sqrt{g h_1}} \right)^4 * h_1 * m^{0,4} \quad 13$$

Waarbij:

A_c	= oppervlakte nat vaarwegdwarsprofiel	[m ²]
A'_c	= oppervlakte nat vaarwegdwarsprofiel tussen scheepsas en oever	[m ²]
A'_c	bij uit de as varen	
A_m	= grootspantoppervlak	[m ²]
B_s	= breedte van schip	[m]
g	= zwaartekrachtversnelling	[m/s ²]
h_1	= waterdiepte	[m]
m	= taludhelling	[m/m]
V_{schip}	= scheepssnelheid	[m/s]
z_{max}	= haalgolfhoogte boven talud	[m]

Een uitgebreide modelbeschrijving van DIPRO is te vinden in de bijlage.

Als input bij het berekenen van de scheepsgeïnduceerde waterbewegingen is in Tabel 2 te zien.

Tabel 2: Input gegevens ten bate van bepaling scheepsgeïnduceerde belastingen.

Input	Waarde	Motief
Rivier profiel	Zie Tabel 3	Afhankelijk van locatie.
Maatgevende Scheepvaart	110 x 11,4 x 2,7 (lxbxd)	Groot Rijnschip (CEMT klasse Va) (RWS, 2011)
Stroomsnelheid	0,27-1 m/s	Hydraulische randvoorwaarden
Waterhoogte	3 m	MR garandeert minimale waterhoogte 3m
Y'	7,5	7,5m tussen vaarweggrens en scheepsas
F_{vls}	0,9	Factor van grenssnelheid

Zoals beschreven in Tabel 2 staan de details voor het rivierprofiel per locatie in Tabel 3. Hierin staan de breedte op de bodem van de rivier, de breedte op het waterniveau en de taludhelling. Dit zijn de drie parameters die per locatie verschillen, parameters die niet per locatie verschillen zijn onder andere de waterhoogte en de taludhelling vanaf 1m onder het waterniveau. De waarde voor de waterhoogte is 3m. In Figuur 6 is een schematisering van het rivierprofiel voor de Spankerense Weilanden te zien.

Tabel 3: Details rivierprofiel per locatie.

locaties naar Rijn kilometer	Breedte bodem ¹ [m]	Breedte oppervlak ² [m]	Talud helling [- ¹]	A _c [m ²]
Spankerense W.	50,0	70,0	4,0	186
Gelderse Toren	50,0	80,0	6,0	204
de Schans	50,0	80,0	6,0	204
Leuvenheim	50,0	80,0	6,0	204
Bronkhosterwaarden	50,0	80,0	6,0	204
Stroomkanaal	50,0	75,0	5,0	195
Zutphen Links	50,0	75,0	5,0	195
Eesterweerd	60,0	90,0	6,0	234
Ravensweerd	60,0	90,0	6,0	234
Stobbenweerd	60,0	90,0	6,0	234
Keizerswaarden	60,0	90,0	6,0	234
Hengforderwaarden	60,0	95,0	7,0	243

¹= Afkomstig uit gegevens over waterhoogten op de IJssel bij OLR en MR.

²= Afgeleid van kaarten en profielen

Met behulp van deze input gegevens is in DIPRO per locatie de scheepsgeïnduceerde belasting bepaald. Hieronder, in Tabel 4, staan de maatgevende golfbelasting en bijbehorende M₅₀ per locatie.

Tabel 4: Maximale scheepsgolf belasting per locatie.

locaties naar rijnkilometer	Hs [m]	M ₅₀ [kg]
Spankerense Weilanden	0,47	4,50
Gelderse Toren	0,46	4,22
de Schans	0,46	4,22
Leuvenheim	0,46	4,22
Bronkhosterwaarden	0,46	4,22
Stroomkanaal	0,47	4,50
Zutphen Links	0,47	4,50
Eesterweerd	0,48	4,80
Ravensweerd	0,48	4,80
Stobbenweerd	0,48	4,80
Keizerswaarden	0,48	4,80
Hengforderwaarden	0,47	4,50

4.4. Natuurlijke stroming

De maatgevende natuurlijke stroomsnelheden zijn net als de gegevens van de windgolf belasting afkomstig uit de hydraulische randvoorwaarden. Deze gegevens zijn onttrokken uit de database van Hydra-R (RWS, 2007a). De waarden voor de maximale natuurlijke stroming per locatie zijn hieronder in Tabel 5 weergegeven.

Tabel 5: Maximale waarden natuurlijke stroming per locatie.

locaties naar rijnkilometer	V _{natuurlijk} [m/s]	M ₅₀ [kg]
Spankerense Weilanden	0,64	0,02
Gelderse Toren	0,56	0,02
de Schans	0,54	0,02
Leuvenheim	0,49	0,02
Bronkhosterwaarden	0,70	0,02
Stroomkanaal	0,58	0,02
Zutphen Links	1,00	0,07
Eesterweerd	0,44	0,00
Ravensweerd	0,27	0,00
Stobbenweerd	0,81	0,02
Keizerswaarden	0,45	0,00
Hengforderwaarden	0,75	0,02

De waarden voor M₅₀ zijn verkregen door gebruik te maken van het diagram van Hjulström (CUR, 2000). Wat opvalt, is dat de stroomsnelheid bij Zutphen maximaal is, hier is de rivier de IJssel ook op zijn smalst.

Tabel 6: Gegevens en maximale waarden (retour)stroomsnelheden per locatie.

locaties naar rijnkilometer	Westoever [j/n]	$V_{\text{natuurlijk}}$ [m/s]	U_r [m/s]	V_{totaal} [m/s]	M_{50} [kg]
Spankerense Weilanden	J	0,64	0,84	1,48	0,31
Gelderse Toren	J	0,56	0,77	1,33	0,16
de Schans	J	0,54	0,77	1,31	0,16
Leuvenheim	J	0,49	0,77	1,26	0,16
Bronkhosterwaarden	N	0,70	0,77	-0,07	0,00
Stroomkanaal	N	0,58	0,81	-0,23	0,00
Zutphen Links	J	1,00	0,81	1,81	2,50
Eesterweerd	N	0,44	0,72	-0,28	0,00
Ravensweerd	N	0,27	0,72	-0,45	0,00
Stobbenweerd	N	0,81	0,72	0,10	0,00
Keizerswaarden	N	0,45	0,72	-0,27	0,00
Hengforderwaarden	N	0,75	0,70	0,05	0,00

4.5. Retourstroming

Voor de bepaling van de retourstroming veroorzaakt door scheepvaart is gebruik gemaakt van DIPRO+. Voor de bepaling van de retourstroming zijn dezelfde gegevens gebruikt als voor de bepaling van de scheepsgolf belasting. De resultaten van de deze berekeningen zijn hieronder in Tabel 6.

Voor de bepaling van de retourstroming is het van belang om te weten in welke richting de scheepvaart vaart, stroomopwaarts of stroomafwaarts. Wanneer een schip stroomopwaarts vaart valt de retourstroming samen met de natuurlijke stroming en versterken elkaar. Voor stroomafwaarts varen geldt het tegenovergestelde. Omdat schepen zoveel mogelijk rechts moeten houden geldt dat langs de westoever van de IJssel de retour- en natuurlijke stroming elkaar versterken.

4.6. Maatgevende belasting

Met behulp van de bepaalde waarden voor M_{50} per belasting geval is het mogelijk om de maatgevende belasting per locatie te bepalen. De maatgevende belasting voor een locatie is de belasting waarvoor geldt dat de M_{50} de grootste is op een bepaalde locatie. In Tabel 7 zijn de verschillende M_{50} per belasting geval weergegeven inclusief de maatgevende M_{50} . Wat opvalt, is dat op elke locatie scheepsgolven de maatgevende belasting zijn.

Tabel 7: Maatgevende M_{50} per locatie.

Locaties naar rijnkilometer	M_{50-wg} [kg]	M_{50-sg} [kg]	M_{50-ns} [kg]	M_{50-rs} [kg]	M_{50-mg} [kg]	ΔD_{50} [m]
Spankerense Weilanden	0,26	4,50	0,02	0,31	4,50	0,22
Gelderse Toren	0,00	4,22	0,02	0,16	4,22	0,21
de Schans	0,00	4,22	0,02	0,16	4,22	0,21
Leuvenheim	0,00	4,22	0,02	0,16	4,22	0,21
Bronkhosterwaarden	0,00	4,22	0,02	0,00	4,22	0,21
Stroomkanaal	2,78	4,50	0,02	0,00	4,50	0,22
Zutphen Links	1,85	4,50	0,07	2,50	4,50	0,22
Eesterweerd	0,32	4,80	0,00	0,00	4,80	0,22
Ravensweerd	1,68	4,80	0,00	0,00	4,80	0,22
Stobbenweerd	3,26	4,80	0,02	0,00	4,80	0,22
Keizerswaarden	0,88	4,80	0,00	0,00	4,80	0,22
Hengforderwaarden	3,00	4,50	0,02	0,00	4,50	0,22

5. Invloed individuele parameters

In dit hoofdstuk zal de invloed van de individuele parameters op de belasting en benodigde bestorting beschreven worden. Dit zal deels aan de hand van figuren gebeuren. Een groot aantal van de figuren die verkregen zijn bij de gevoeligheidsanalyse zijn te vinden in Bijlage 3, de belangrijkste zijn in dit hoofdstuk te vinden. Als eerste zal de gevoeligheid van de maatgevende belasting, de haalgolf z_{max} , beschreven worden gevolgd door de gevoeligheid van de bestortingsparameter ΔD_{50} .

5.1. Haalgolf

Zoals ook beschreven in de Bijlage 2 is de haalgolf de achterste begrenzing van de waterspiegeldaling die optreedt langs varende schepen. Voor geladen motorschepen onder de voorwaarde dat z_{max} niet kleiner is dan de extreme waterspiegeldaling ($\hat{\Delta}h$), kan z_{max} bepaald worden met de volgende relatie:

$$z_{max} = 23,6 \left(\frac{A'_c}{A_c} \right)^{-0,7} * \left(\frac{A_m}{A_c} \right)^2 * \left(\frac{B_s}{h_1} \right)^{0,5} * \left(\frac{V_{schip}}{\sqrt{gh_1}} \right)^4 * h_1 * m^{0,4} \quad 13$$

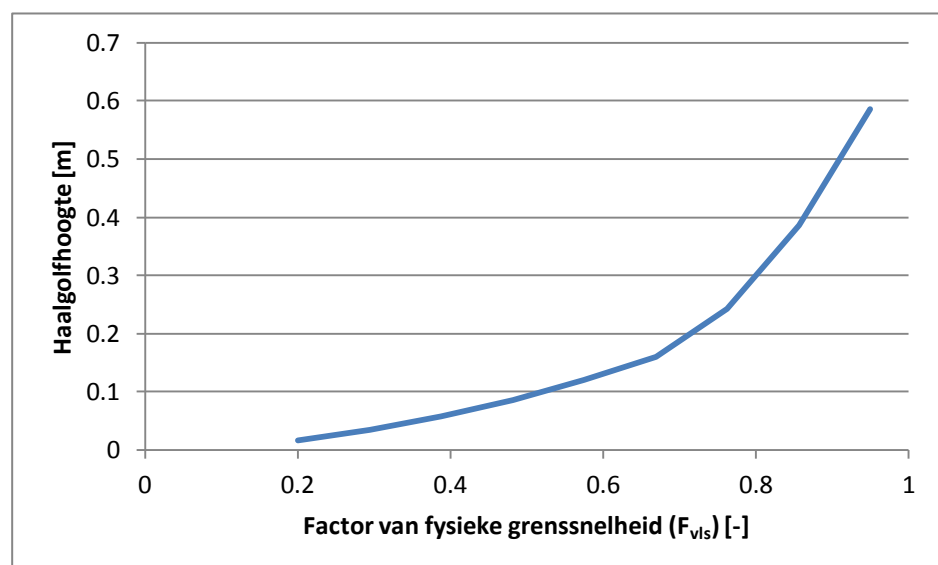
Aan deze relatie is te zien dat het hier gaat om een empirisch bepaalde formule. Uit onderzoek van (Waterloopkundig Laboratorium, 1997) is gebleken dat "het merendeel van de meetwaarden binnen de 15% nauwkeurigheidsgrenzen te liggen". Deze relatie is ontleend, net als de overige formules in DIPRO, aan het rapport M1115 deel XIX (Laboyrie, 1988) wat een eindrapport is van een studie die van 1972 tot 1988 heeft geduurd.

Interessante parameters om de gevoeligheid van te bepalen zijn de parameters met (grote) invloed op de uiteindelijke waarde van $z_{\max}$. Uit de analyse van verschillende parameters is gebleken dat onder andere B_b , B_s , F_{vls} , T_s en γ een grote invloed hebben op de waarde van $z_{\max}$. Minder van belang blijken h_1 en L_s , wanneer L_s gevarieerd wordt blijkt $z_{\max}$ zelfs niet te veranderen.

De grootste variatie blijkt veroorzaakt te worden door de snelheid van de scheepvaart, deze wordt in DIPRO berekend met de F_{vls} , de fysieke grenssnelheid. Doordat V_{schip} lineair afhankelijk is met F_{vls} betekend het variëren van F_{vls} het in even grote mate variëren van V_{schip} . In Figuur 7 is de invloed van F_{vls} op de haalgolf te zien, wat opvalt is dat wanneer de snelheid hoger wordt de haalgolf exponentieel groter wordt. Dit is te verklaren doordat een hogere vaarsnelheid zorgt voor een grotere waterverplaatsing, waardoor een grotere waterstandsdeling en dus haalgolf optreedt.

De gebruikte waarde voor F_{vls} is 0,9; uit Figuur 7 blijkt dat dit een betrekkelijk veilige keuze is geweest. De invloed van de vaarsnelheid heeft een grote invloed op grote van de haalgolf en dientengevolge ook op de belasting. De twee parameters met het op één en op twee na grootste effect zijn B_s en T_s . Ook deze parameters blijken een exponentieel verband met de haalgolf te hebben, wat ook verklaard wordt door de machten in de formule voor $z_{\max}$ (13).

Wat opvalt is dat de drie parameters die de grootste invloed hebben op $z_{\max}$ alle drie verband houden met de scheepvaart en niet met de geometrie van de vaarweg, hieruit blijkt dat de maatgevende scheepvaart een grote invloed heeft op de belasting.



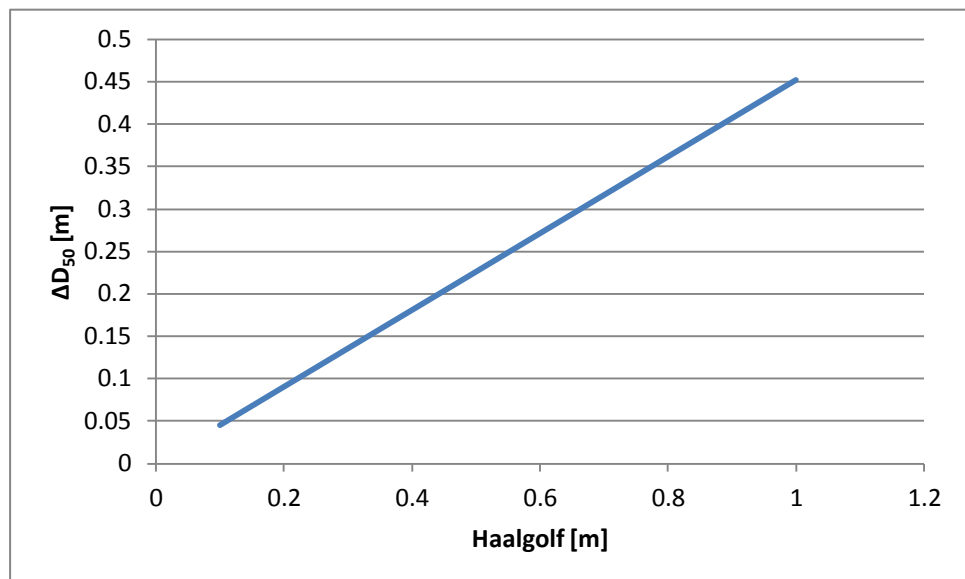
Figuur 7: Het effect van het variëren van de factor van de fysieke grenssnelheid op de haalgolfhoogte.

5.2. Bestortingsparameter

De bestortingsparameter ΔD_{50} , welke bestaat uit de relatieve dichtheid (Δ) en D_{50} de karakteristieke diameter wordt bepaald met behulp van onderstaande formule. Deze formule is ook terug te vinden in Bijlage 2.

$$\Delta D_{50-zm} = \frac{z_{max}}{\psi_{u,w} * c * (\cot \alpha)^{0.33}} \quad 23$$

Wat direct te zien is aan deze relatie is dat wanneer de termen onder streep gelijk blijven en enkel z_{max} gevarieerd wordt, ΔD_{50} gelijk zal veranderen. Dit lineaire verband blijkt ook uit de gevoeligheidsanalyse die in DIPRO is uitgevoerd welke te zien is in Figuur 8. Hier zal dus ook gelden dat F_{vls} de grootste invloed heeft op de bestortingsparameter.



Figuur 8: ΔD_{50} t.o.v. Haalgolf

6. Toetsing

Dit hoofdstuk beschrijft de toetsing van het ontwerp aan de gestelde eisen. De toetsing vindt per eis plaats en uiteindelijk wordt een overzicht gepresenteerd waarin per locatie wordt aangegeven of het ontwerp voldoet.

1. De toegepaste breuksteen van de toplaag moet bestand zijn tegen golf- en stroomaanval.

De toplaag van de constructie moet bestand zijn tegen zowel golf- als stroomaanvallen. Dit is van belang omdat het onwenselijk is dat toplaagelementen uit de constructie bezwijken en in de rivier terechtkomen. Voor de toetsing op deze eis zijn verschillende belastingen op de constructie bepaald. Vervolgens is voor de maatgevende (maximale) belasting onderzocht of de constructie bestand is tegen deze belasting. Een overzicht voor welke (deel)locaties voldoen is te zien in Tabel 9 en in het overzicht van alle eisen per locatie in Tabel 8 is te zien welke locaties voldoen aan deze eis.

2. De verdediging moet waterdoorlatend zijn (en blijven) om overdrukken onder de verdediging te vermijden.

De tweede eis die gesteld wordt aan het ontwerp is dat de constructie waterdoorlatend moet zijn. Dit is van belang om overdrukken in de constructie, bijvoorbeeld door een dalende waterstand, te voorkomen. Wanneer breuksteen gebruikt wordt in de constructie geldt dat de constructie waterdoorlatend is (CUR, 2000). Op basis van de aanwezige bestortingsmaterialen en aanwezige D_{50} voldoet iedere locatie. Dit is ook te zien in Tabel 8.

3. De opbouw van een talud-verdediging moet zodanig zijn dat grondkorrels niet door de verdediging heen kunnen uitspoelen (gronddichtheid).

De derde gestelde eis behelst de gronddichtheid van de constructie. Het is van belang dat de constructie voorkomt dat het materiaal onder de constructie (zand) wegspoelt door de constructie heen. Wanneer dit gebeurt wordt de stabiliteit van de gehele constructie ondermijnd. Een mogelijkheid om te bewerkstelligen dat de constructie grond dicht is, is het toepassen van een filter (bijvoorbeeld van geotextiel). In het ontwerp is op geen enkele locatie een filter aangebracht onder de constructie, hierop voldoet het ontwerp dus niet aan de gestelde eis.

4. De taludverdediging moet diep genoeg worden doorgezet om aantasting aan de teen te voorkomen.

Om te voorkomen dat het land onder de constructie wordt aangetast, en daarmee de constructie zelf ook, is het van belang dat de verdediging diep genoeg wordt doorgezet. Volgens (CUR, 2000) moet de vooroeververdediging worden doorgezet tot een diepte van tenminste $2 H_s$. Dit is op alle locaties het geval bij de MR. Echter is er een drietal locaties waar oevers gepland staan die kort onder de OLR

ophouden. Deze locaties lopen gevaar op erosie van de grond onder de vooroever en voldoen niet aan de gestelde eis, welke locaties dit zijn is te zien in Tabel 8.

5. De kop van de vooroever moet 30% zwaarder uitgevoerd worden, ofwel door toepassen van 1,3 keer zwaardere steen ofwel door het talud flauwer te maken met een factor 1,3.

Doordat de belasting op de kop van de constructie groter is en de stabiliteit van de stenen kleiner is het van belang de kop van de constructie zwaarder uit te voeren. Op basis van (CUR, 2000) is de eis gesteld dat de verdediging op de kop een factor 1,3 zwaarder moet zijn dan op de rest van de vooroever. Gebleken is dat vooroevers met sorteringen die voldoen aan Eis 1 ook voldoen aan deze eis. Dit is ook te zien in Tabel 8.

6.1. Overzicht toetsingsresultaten

In Tabel 8 is te zien welke locaties aan welke eisen voldoen. Te zien is dat op vier locaties de bestorting niet voldoet. Op drie locaties (vier deellocaties) wordt dit veroorzaakt door de aanwezigheid van verkitte slak in het betortingsmateriaal. Op twee (deel)locaties is een te fijne sortering aanwezig. Doordat er op twee locaties een te fijne sortering aanwezig is, voldoet deze ook niet aan Eis 5 dat op de kop 30% zwaarder materiaal aangebracht moet worden.

Verder voldoen alle locaties aan de eis dat de constructie waterdoorlatend moet zijn (Eis 2). Geen locatie heeft een filter opgenomen in het ontwerp, geen locatie voldoet aan Eis 3. Gevolg is dat geen enkel ontwerp direct voldoet aan de gestelde eisen. Er zijn drie locaties waar de vooroeververdediging niet diep genoeg is doorgezet onder de OLR, waardoor twijfels ontstaan over de stabiliteit van de constructie. Deze locaties voldoen niet aan Eis 4.

Gedetailleerde bestortingsgegevens en bepaling of de bestorting voldoet is in paragraaf 6.2 en Tabel 9 te zien.

Tabel 8: Eisen per locatie.

Locatie	Eis 1	Eis 2	Eis 3	Eis 4	Eis 5	Voldoet
Spankerense Weilanden	Nee ¹	Ja	Nee	Ja	Ja	Nee
Gelderse Toren	Ja	Ja	Nee	Nee	Ja	Nee
de Schans	Nee ²	Ja	Nee	Nee	Nee ³	Nee
Leuvenheim	Ja	Ja	Nee	Ja	Ja	Nee
Bronkhosterwaarden	Ja	Ja	Nee	Ja	Ja	Nee
Stroomkanaal	Ja	Ja	Nee	Ja	Ja	Nee
Zutphen Links	Nee ¹	Ja	Nee	Ja	Ja	Nee
Eesterwaard	Ja	Ja	Nee	Ja	Ja	Nee
Ravenswaard	Ja	Ja	Nee	Nee	Ja	Nee
Stobbenwaard	Nee ^{1,2}	Ja	Nee	Ja	Nee ³	Nee
Keizerswaarden	Ja	Ja	Nee	Ja	Ja	Nee
Hengforderwaarden	Ja	Ja	Nee	Ja	Ja	Nee

¹= Verkitte slik aanwezig, wordt afgevoerd om milieutechnische redenen (Tusscher, 2013).

²= Te fijne sortering aanwezig, stabiliteit voldoet niet.

³= Te fijne sortering voor de kop, stabiliteit voldoet niet.

6.2. Bestorting

De bestortingsgegevens in Tabel 9 zijn afkomstig van een bestortingsonderzoek uitgevoerd door CSO (CSO, 2013). Kolom A geeft de bestortingsparameter ΔD_{50} waarbij in de relatieve dichtheid het percentage slaalslak is verwerkt. In kolom B is de benodigde ΔD_{50} te zien. Kolom C is A-B waarbij een waarde onder 0 een te kleine sortering aanduidt. In kolom d is de aanwezige bestorting - benodigde ΔD_{50} op de kop te zien.

Tabel 9: Overzicht bestorting naar deellocaties.

Deellocaties	lengte [km]	Hoofd- bestand	Staalslak [%]	D_{50} [m]	A [m]	B [m]	C [m]	D [m]
Spankerense Weilanden	0,6	Slakken	80	0,25	0,50	0,22	0.28	0.26
Spankerense Weilanden ¹	1,7	Verkitte slak	90	0,30	0,61	0,22	Verkit	Verkit
Gelderse Toren	0,5	Slakken	80	0,30	0,59	0,21	0.38	0.36
de Schans	0,2	grind	0	0,10	0,15	0,21	-0.06	-0.08
Leuvenheim	1,2	slakken	60	0,17	0,32	0,21	0.10	0.08
Bronkhosterwaarden	0,8	slakken	90	0,30	0,61	0,21	0.40	0.38
Stroomkanaal	0,2	slakken	60	0,30	0,56	0,22	0.34	0.32
Stroomkanaal	0,0	grind	10	0,30	0,47	0,22	0.25	0.23
Zutphen links	0,9	Verkitte slak	75	0,30	0,59	0,22	Verkit	Verkit
Zutphen links	0,1	Slakken	75	0,30	0,59	0,22	0.37	0.35
Zutphen links	1,6	Verkitte slak	100	0,26	0,55	0,22	Verkit	Verkit
Zutphen links	0,4	grind	10	0,30	0,47	0,22	0.25	0.23
Eesterweerd	0,8	natuursteen	0	0,28	0,42	0,22	0.20	0.18
Ravensweerd	0,8	natuursteen	0	0,30	0,45	0,22	0.23	0.21
Stobbenweerd	0,3	natuursteen	5	0,23	0,35	0,22	0.13	0.11
Stobbenweerd	0,1	slakken	90	0,50	1,02	0,22	0.80	0.78
Stobbenweerd	0,1	natuursteen	0	0,30	0,45	0,22	0.23	0.21
Stobbenweerd	0,3	slakken	50	0,26	0,47	0,22	0.25	0.23
Stobbenweerd	0,1	Verkitte slak	95	0,30	0,62	0,22	Verkit	Verkit
Stobbenweerd	0,1	Slakken	80	0,10	0,20	0,22	-0.02	-0.04
Stobbenweerd	0,2	natuursteen	10	0,30	0,47	0,22	0.25	0.23
Keizerswaarden	0,7	Slakken	50	0,28	0,50	0,22	0.28	0.26
Hengforderwaarden	0,4	natuursteen	5	0,30	0,46	0,22	0.24	0.22
Hengforderwaarden	0,2	natuursteen	40	0,30	0,52	0,22	0.30	0.28
Hengforderwaarden	0,2	natuursteen	5	0,30	0,46	0,22	0.24	0.22
Hengforderwaarden	0,5	natuursteen	30	0,30	0,50	0,22	0.29	0.27

¹= Zowel deellocatie Spankerense Weilanden als Gelderse Toren.

Bij $\rho_{\text{steen}}=2500 \text{ kg/m}^3$ & $\rho_{\text{staalslak}}=3000 \text{ kg/m}^3$ (minimale dichtheid breuksteen 2500 kg/m^3 en minimale dichtheid staalslak 3100 kg/m^3 volgens (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2013)).

7. Discussie

In dit hoofdstuk worden de gebruikte aannames besproken en wordt bediscussieerd wat mogelijke gevolgen zijn wanneer deze aannames veranderd worden. Dit wordt gevolgd door de interpretatie en verklaring van de resultaten. Hierbij wordt ook aandacht besteedt aan de achterliggende mechanismen en bruikbaarheid van de resultaten voor andere projecten.

7.1. Aannames

Binnen dit onderzoek zijn dwarsprofielen gebruikt voor de verschillende locaties waarbij deels gebruik is gemaakt van bekende gegevens en deels aannames gemaakt zijn. Ook worden in deze paragraaf aannames met betrekking tot de maatgevende scheepvaart besproken.

7.1.1. Dwarsprofiel

De gebruikte dwarsprofielen voor de verschillende locaties zijn opgesteld rond de bekende gegevens over de breedte van de vaarweg op de bodem van de rivier. Deze bodemgegevens zijn afkomstig van gegevens over de vaargeul en de vaardiepte bij de MR en OLR. De breedte op het waterniveau is afkomstig van kaartmateriaal en met behulp van beiden is de taludhelling bepaald. Hierbij is de aanname gedaan dat het dwarsprofiel te schematiseren is als trapeziumvorm.

Deze aanname was nodig omdat DIPRO enkel instaat is rechthoekige, trapeziumvormige, gebroken en profielen met berm te berekenen. Uiteindelijk is gebleken dat de afmetingen voor het rivierprofiel geen grote invloed hebben op de maatgevende, haalgolf, belasting. Dit kan vastgesteld worden omdat bij verschillende profielen en een gelijke maatgevende scheepvaart op gelijke afstand van de vaarweggrens er een minimale variatie in de scheepsgolven zit. Dit zal verder besproken worden in paragraaf 7.2 Interpretatie.

Een variatie in het dwarsprofiel dat wel effect heeft op de haalgolf hoogte met +/- 0,1m is toepassen van een gebroken profiel met vanaf 1m onder de waterspiegel een taludhelling van 1:3 om de vooroever te simuleren. Zo groot als dit effect lijkt op de haalgolf hoogte, zo klein is het effect van deze variatie op de benodigde bestortingsparameter ΔD_{50} . Deze waarde blijkt ongeveer gelijk te blijven.

7.1.2. Scheepvaart

De scheepvaart is verantwoordelijk voor de maatgevende belasting op de (voor)oevers in de IJssel. Dit blijkt uit het bepalen van de maatgevende belasting. Als gevolg hiervan is het extra relevant welk type scheepvaart gebruik maakt van de rivier. In dit onderzoek is een scheepvaartscenario geschetst waarbij een Groot Rijnschip op korte afstand langs de oever vaart waarbij dit geladen schip slechts

30cm kielspeling heeft ten opzichte van de gegarandeerde waterdiepte. Gekozen is voor een enkele scheepspassage, een 'ontmoeting' van twee schepen kan leiden tot hogere golven. Hier is geen rekening mee gehouden in dit onderzoek. De vraag is ook hoe waarschijnlijk een combinatie van scheepspassages en de gekozen extreme situatie is.

De afstand die aangehouden wordt tussen de scheepsas en de rand van de vaarweggrens op de bodem is 7,5. Deze waarde is gekozen omdat een Groot Rijnschip dan slechts 1,8 meter uit de vaarweggrens vaart wat een extremere situatie lijkt te zijn. Dit is ook gebleken uit de gevoeligheidsanalyse waaruit naar voren is gekomen dat naarmate een schip dichterbij de oever vaart de haalgolf belasting groter zal zijn.

Verder zijn voor de scheepsafmetingen de waarden overgenomen uit de richtlijn vaarwegen (RWS, 2011). De lengte en breedte van een Groot Rijnschip (CEMT klasse Va) zijn hieruit afkomstig. In ditzelfde document wordt echter door Rijkswaterstaat al een kanttekening geplaatst bij de afmetingen als vastgesteld in de CEMT klassen. Er wordt melding gemaakt van het feit dat "de cijfers in de CEMT-tabel niet langer representatief zijn voor de huidige West-Europese binnenvaartvloot en opgetreden schaalvergroting geen recht doen". Gevolg is dat voor nieuwe vaarwegen grotere afmetingen worden aangeraden. De gevolgen van grotere scheepvaart kunnen groot zijn aangezien gebleken is dat de scheepsafmetingen grote invloed hebben op de haalgolf belasting.

7.2. Interpretatie

In deze paragraaf zullen de resultaten van dit onderzoek geïnterpreteerd worden om tot een conclusie en werkbare aanbevelingen te komen. Hierbij zullen zowel opvallende resultaten als de uiteindelijke resultaten ter beantwoorde van de onderzoeksvragen beschreven worden.

7.2.1. Maatgevende belasting

De maatgevende belasting is bepaald door vier verschillende belastingen te bepalen en daarvan de maximale belasting te nemen. Bij de keuze van deze vier belastingen is getracht de meest realistische belastingen mee te nemen. Het is goed mogelijk dat andere belastingen zoals een aanvaring of ijsgang tot een grotere belasting leidt dan de in dit onderzoek gekwantificeerde belastingen. Hierbij is van belang te benadrukken dat deze belastingen zeer incidenteel, zelfs zeldzaam, van aard zijn en schade als gevolg hiervan lastig uit te sluiten is.

De uiteindelijk bepaalde maatgevende belasting blijkt overal de scheepsgolf te zijn waarbij de haalgolf de maatgevende scheepsgolf is. De uiteindelijke variatie van de scheepsgolf lijkt vrij klein de significante golfhoogte H_s verschilt minder dan 0,03m tussen de maximale en minimale waarde. Wat opvalt aan de significante golfhoogte is dat deze bij een breder rivierprofiel groter is dan bij een smaller rivierprofiel en ook groter lijkt te zijn bij een steile oever. Dit zijn echter zeer kleine verschillen waardoor zelfs gesteld worden dat de verschillen verwaarloosbaar zijn omdat deze binnen de foutmarge van het model vallen. Zoals eerder beschreven wordt in de DIPRO handleiding beschreven dat uit meetresultaten is gebleken dat het merendeel van de meetwaarden binnen de 15% nauwkeurigheidsgrenzen liggen (Waterloopkundig Laboratorium, 1997).

Uit de gevoeligheidsanalyse is gebleken dat de maatgevende belasting vooral afhankelijk is van de scheepvaart. Hierbij zijn de afmetingen van de scheepvaart van belang maar ook de afstand tot de oever. Hierdoor is het aannemelijk dat de maatgevende belasting niet veel zal variëren voor andere locaties, mits er geen grote strijklengte is waardoor windgolven maatgevend zijn (bijvoorbeeld op meren) en er geen grotere scheepvaart plaatsvindt.

7.2.2. Vooroeververdediging en sortering

De vooroeververdediging moet uiteindelijk de maatgevende belasting weerstaan om de achterliggende oever te verdedigen. Met behulp van rekenregels afkomstig uit CUR publicatie 197 (CUR, 2000) is de benodigde sortering bepaald om de belasting te kunnen weerstaan. Deze is vergeleken met de sortering die DIPRO noodzakelijk acht en deze twee bleken gelijk te zijn. Er wordt op elke vooroever een sortering 80/200 geadviseerd waarbij de bestortingsparameter ΔD_{50} varieert van 0,18m tot 0,21 m. Ook dit is een zeer klein, verwaarloosbaar verschil.

Van belang om te vermelden is dat de maatgevende belasting zoals hier bepaald zich concentreert rond de waterspiegel. De stroombelasting, waarbij de retourstroming samen met de natuurlijke stroming voor het grootste gevaar zorgt, vindt over het gehele natte profiel plaats en kan zand van de oever meevoeren. Betoogd kan worden dat bij de verwachte stroombelasting verdediging van de rivierbodem noodzakelijk is om erosie van de oever te voorkomen. Hierbij is echter de vraag of het wenselijk is dit soort maatregelen toe te passen. Daarnaast is het maar de vraag of deze maatregel daadwerkelijk noodzakelijk is aangezien de rivierbodem te allen tijde dynamisch is. Een extreme scheepspassage als geschetst in dit onderzoek kan zeker erosie aan deze bodem veroorzaken. De vraag is echter of dat niet hersteld wordt door het natuurlijk evenwicht. Hier is echter op basis van dit onderzoek geen duidelijke inschatting te maken.

7.2.3. Opvallende resultaten

Gedurende het onderzoek zijn verschillende resultaten verkregen waarvan een aantal minder logisch lijken dan andere. Zo is bij de bepaling van de maatgevende belasting gebleken dat op sommige locaties de windgolfbelasting door Hydra-R op 0 is gesteld. Wat hier de precieze oorzaak van is, is niet bekend. Gedacht kan worden aan een oorzaak dat de combinatie van de betrekkelijk lage waterstand van de MR en de bodemligging als verwerkt in de het programma leidt tot een (zeer) kleine strijklengte. Een kleine strijklengte betekent dat er te weinig ruimte is voor de wind om een golf te laten groeien. De uiteindelijke invloed van dit resultaat is niet bijzonder groot omdat de windgolf belasting nergens maatgevend is gebleken.

Een ander resultaat dat opvallend genoemd kan worden is het feit dat de retourstroom belasting op oevers aan de westzijde van de IJssel groot is en aan de oostzijde vrijwel nihil. Dit komt voornamelijk omdat aan de westzijde de schepen opvaren met als gevolg dat de natuurlijke stroming de retourstroming versterkt. Aan de oostzijde doven deze elkaar uit. Belangrijk is wel te beseffen dat wanneer de scheepvaart om wat voor reden dan ook aan de oostzijde van de rivier zou opvaren de retourstroming daar maximaal wordt.

7.3. Toetsingsresultaten

Op basis van de resultaten die verkregen zijn bij het bepalen van de belastingen en benodigde bestorting is een toetsing uitgevoerd. Hieruit is gebleken dat geen locatie voldoet aan alle eisen, omdat geen enkele locatie een filter in het ontwerp heeft opgenomen. Hierbij moet opgemerkt worden dat het getoetste ontwerp nog niet tot in detail ontworpen is. Daarnaast zijn er twee locaties waar de aanwezige bestorting niet voldoet op basis van stabiliteit en zijn er drie locaties waar de vooroever dieper moet worden doorgezet. Gevolg hiervan is dat de toetsing negatief is uitgevallen en alle ontwerpen aangevuld moeten worden.

Door bepaalde eisen aan het definitieve ontwerp te stellen is het mogelijk alsnog een uitvoerbaar en beheerbaar ontwerp te realiseren. Als basis voor deze functionele eisen kunnen de eerder gebruikte toetsingscriteria gebruikt worden. Wanneer het uiteindelijk ontwerp wordt aangepast om te voldoen aan die eisen kan gesteld worden dat de ontwerpen alsnog voldoen.

Gesteld kan worden dat voor alle locaties geldt dat er een breuksteen sortering 20/800 moet worden toegepast ($\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$) waarbij de verdediging tenminste tot 2 H_s (ongeveer 1m) onder de laagste waterstand (OLR) moet worden doorgezet. Daarbij is het van belang dat het ontwerp een filter bevat.

8. Conclusie en Aanbeveling

In dit laatste hoofdstuk wordt antwoord gegeven op de aan het begin van dit onderzoek gestelde onderzoeksvragen. Op basis van deze conclusie en de eerder opgestelde eisen zal vervolgens een aanbeveling gedaan worden voor mogelijk extra onderzoek.

8.1. Conclusie

De onderzoeksvragen zoals gesteld aan het begin van dit onderzoek worden in deze paragraaf beantwoordt.

1. *Is de voorziene vooroever in zijn huidige ontwerp (met hergebruik van vrijkomende oeverbestorting) voldoende om te voorkomen dat dit erosiemateriaal in de vaargeul sedimenteerd en tevens belast is tegen scheepvaartgolven en stromingen als gevolg van die scheepvaart en hoogwater?*

Op basis van de uitgevoerde toetsing is gebleken dat de voorzien vooroevers in hun huidige ontwerp niet voldoende zijn om te voorkomen dat erosiemateriaal in de vaargeul sedimenteerd. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt doordat in het huidige ontwerp geen filter is opgenomen. Op sommige locaties wordt ook aan ander gestelde eisen niet voldaan. Zo is het op 3 locaties noodzakelijk het ontwerp aan te passen door de verdediging dieper door te zetten. Ook is het op 2 locaties noodzakelijk andere breuksteen te gebruiken dan de aanwezige omdat deze niet aan Eis 1 voldoet. Het antwoord op onderzoeksvraag 1 is dus ontkennend.

2. *Indien het antwoord op bovenstaande vraag ontkennend is, wat zijn dan de eisen die gesteld moeten worden aan:*
 - a. *Het bestortingsmateriaal*
 - b. *Het ontwerp*

Als basis voor de eisen die gesteld moeten worden aan het bestortingsmateriaal en het ontwerp worden de gebruikte toetsingscriteria gebruikt. Het stellen van aanvullende eisen aan het ontwerp en het bestortingsmateriaal blijkt noodzakelijk omdat het antwoord op onderzoeksvraag 1 ontkennend is.

Aan het bestortingsmateriaal moet op locatie de Schans en een deellocatie van Stobbenweerd de eis worden gesteld dat grover bestortingsmateriaal noodzakelijk is. Daarnaast zijn eisen die aan het ontwerp gesteld moeten worden dat een filter op alle locaties noodzakelijk is en het dieper doorzetten van de verdediging op locaties Gelderse Toren, de Schans en Ravensweerd noodzakelijk.

Een compleet overzicht van aanvullende eisen is te vinden in Bijlage 1.

3. Zijn de opgestelde eisen bruikbaar voor andere vergelijkbare projecten met vooroeververdediging?

Te verwachten is dat de opgestelde eisen goed stand houden bij het gebruik in vergelijkbare projecten. Eis 2 en 3 zijn kwalitatief en specifiek gericht op de vooroeverconstructie, deze eisen kunnen zonder probleem overgenomen worden. De eisen 1, 4 en 5 zijn deels kwantitatief en zullen per locatie variëren. Door de keuze voor een betrekkelijk extreem scheepvaartscenario zal de kwantificering stand houden voor (binnen)wateren, niet zijnde meren, waarbij de maatgevende scheepvaart gelijk is. Dit geldt temeer omdat gebleken is dat de maatgevende belasting vooral afhankelijk is van de afmetingen en afstand tot de oever van de scheepvaart.

8.2. Aanbeveling

In deze paragraaf worden aanbevelingen gedaan op basis van de resultaten en conclusies van dit onderzoek. Deze aanbevelingen richten zich op het doen van verder onderzoek over dit onderwerp.

Uit dit onderzoek is gebleken dat scheepvaart grote belasting kan uitoefenen op (voor)oevers. In dit onderzoek is de scheepvaart beperkt tot de maatgevende belasting op de IJssel (Grote Rijnschepen) maar in Nederland komen ook grotere schepen voor. De eerste aanbeveling is dan ook het onderzoek doen naar de effecten van grotere schepen op het gebied van belasting van oevers.

Een tweede suggestie is het onderzoeken van het effect van (veel) ruimere profielen, zoals deze bijvoorbeeld op de Waal voorkomen. Uit dit onderzoek is gebleken dat de variatie in rivierprofiel weinig tot geen invloed heeft gehad op de maatgevende belasting. Wellicht blijkt dat wanneer het rivierprofiel sterk verandert ten opzicht van de gebruikte profielen in dit onderzoek dat er wel een grotere verandering optreedt in de te verwachten belasting.

Als derde en laatste suggestie wordt aangedragen om onderzoek te doen naar het gedrag van de vooroever wanneer deze door een hoge waterstand volledig onderwater komt te staan. Hierbij kan gedacht worden aan scenario's waarin hoogwater gecombineerd met scheepvaart voorkomt en de invloed van de stroming in de rivier in zo'n situatie op de oever en vooroever.

9. Geciteerde werken:

CSO. (2013). *Besortingsonderzoek KRW-maatregelen IJssel*. Deventer: CSO.

CUR. (1999). *CUR-publicatie 201 "Natuurvriendelijke oevers: belasting en sterkte"*. Gouda: Stichting CUR.

CUR. (2000, Juni). *CUR-publicatie 197 "Breuksteen in de praktijk. Deel 2: dimensionering van constructies in binnenwateren"*. Gouda: Stichting CUR.

Duits, M. (2007). *Hydra-R voor HR2006 Gebruikshandleiding versie 1.1*. HKV.

EP. (2000). *Richtlijn 2000/60/EG van het Europees Parlement en de Raad van 23 oktober 2000 tot vaststelling van een kader voor communautaire maatregelen betreffende het waterbeleid*. Brussel: Europees Parlement.

Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2013). *Bouwstoffen en afvalstoffen*. Retrieved 7 24, 2013, from Bodemrichtlijn:
<http://www.bodemrichtlijn.nl/Bibliotheek/bouwstoffen-en-afvalstoffen>

Mark, R. van der. (2013). *Morfologische effectstudie KRW-maatregelen IJssel*. Delft: Deltares.

Hendriks, Rob, J.d.. (2013). *Ontwerpnoot Oeverlocaties - KRW-maatregelen IJssel*. Deventer: Tauw.

RWS. (2003, 12). *DIPRO+*. Retrieved 06 12, 2013, from Rijkswaterstaat:
<http://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/applicaties-modellen/@3764/dipro/>

RWS. (2007a, 09 26). *Hydra-R*. Retrieved 6 26, 2013, from Rijkswaterstaat:
<http://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/applicaties-modellen/@22160/hydra-r/>

RWS. (2007b). *Tehcnisch Rapport Ontwerpbelastingen voor het rivierengebied*. Den Haag: Ministerie van Verkeer en Waterstaat.

RWS. (2011). *Richtlijn Vaarwegen 2011*. Rijkswaterstaat.

RWS. (2013). *IJssel*. Retrieved 06 26, 2013, from Rijkswaterstaat:
http://www.rijkswaterstaat.nl/water/feiten_en_cijfers/vaarwegenoverzicht/ijssel/

TAW. (2003b). *Technisch Rapport Steenzettingen. Ontwerp. (TR 25b)*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen:
<http://www.enwin.nl/tool/view/download.php?pub=aHR0cDovL3d3dy5lbnRpbmZvLm5sL2FzcC9iZXN0ZWxsZW4tZGV0YWlsLXB1YmxpY2F0aWUuYXNwP1B1YmxpY2F0aWVJR01MzI=>.

Tusscher, R. ten (2013, 12 juli). Toelichting verkitte slak.

Kouwen, L. van (2011). *Effectiviteit KRW herstelmaatregelen in de Rijkswateren. Natuurvriendelijke oevers: typologie en stand van zaken kennis inrichting, beheer en onderhoud*. Delft: Deltares.

Waterloopkundig Laboratorium. (1997). *DIPRO 3.02n Gebruikshandleiding*. Delft: DELF HYDRAULICS and Ministry of Transport, Public Works and Water Management.

Bijlage 1. Aanvullende eisen

In deze bijlage staan de aanvullende eisen die noodzakelijk zijn om de gemaakte voorontwerpen te laten voldoen aan de toetsingscriteria. Hierbij is geen onderscheid gemaakt tussen de verschillende oevers omdat de eisen voor alle oevers gelijk zijn. De eisen staan hieronder genummerd uitgewerkt.

*Eis 1: De voor de vooroever te gebruiken breuksteen moet voldoen aan:
 $\Delta D_{50} > 0,2m$.*

Eis 2: De te gebruiken materialen moeten waterdoorlatend zijn.

Eis 3: Er moet een filter worden aangebracht onder de constructie.

Eis 4: De verdediging moet minimaal 1m onder de OLR worden doorgezet.

Eis 5: De voor de kop van de vooroever te gebruiken breuksteen moet voldoen aan een van de volgende twee voorwaarden:

- De voor de kop van de vooroever te gebruiken breuksteen moet voldoen aan: $\Delta D_{50} > 0,22m$*
- De voor de kop van de vooroever te gebruiken breuksteen moet voldoen aan: $0,22m > \Delta D_{50} > 0,2m$ en de taludhelling is 1:4.*

Ad Eis 1:

Uit de resultaten is gebleken dat de maatgevende belasting op alle locaties vraagt om breuksteen dat voldoet aan de voorwaarde dat de bestortingsparameter ΔD_{50} groter is dan 0,2m. Het gevolg hiervan is dat op 2 locaties gekomen moet worden tot het afkeuren van de aanwezige materialen.

Ad Eis 2:

Wanneer breuksteen gebruikt wordt dat voldoet aan Eis 1 wordt in principe ook voldaan aan Eis 2, wel moet ervoor zorg worden gedragen dat tijdens de realisatie geen waterdichte kern ontstaat in de constructie door bijvoorbeeld het gebruik van (fijn) zand.

Ad Eis 3:

Het is van belang dat onder de constructie een filter wordt aangebracht om ervoor te zorgen dat er geen materiaaltransport door de constructie heen plaatsvindt. Wanneer een geotextiel gebruikt wordt dient zo gekozen te worden dat O_{90} , de openingen in het geotextiel, kleiner zijn dan D_{90} , de zeefmaat waar 90% van de ondergrond doorheen gaat.

Ad Eis 4:

Omdat het van belang is dat de verdediging diep genoeg wordt doorgezet, om erosie onder de constructie te voorkomen is het van belang dat de verdediging tot tenminste $2 H_s$ wordt doorgezet. H_s , de significante golfhoogte, is voor alle locatie gelijk aan 0,45 – 0,50m waarbij de verdediging dus tot 1m onder de OLR moet worden doorgezet.

Ad Eis 5:

Omdat de kop van de dam het meest kwetsbare deel van de vooroeverconstructie is, is het van belang dit deel zwaarder uit te voeren. Er moet of een 30% flauwere taludhelling worden gebruikt (1:3 wordt 1:4). Of de gebruikte steen moet 30% zwaarder zijn dan die op de rest van de dam benodigd is (ΔD_{50} wordt $1,1 \times \Delta D_{50}$).

Bijlage 2. Modelbeschrijving

Voor de bepaling van de Scheepsgeïnduceerde bewegingen wordt zoals beschreven in het voorgaande hoofdstuk gebruik gemaakt van het computerprogramma DIPRO+ (DIMensioning PROtections). In dit hoofdstuk wordt de werking van het programma beschreven, deze informatie is afkomstig uit de handleiding van DIPRO (Waterloopkundig Laboratorium, 1997).

DIPRO is bedoelt voor het bepalen van de afmetingen van oeververdediging langs waterwegen. Ook is het mogelijk om enkel de scheepsgeïnduceerde waterbeweging met DIPRO te bepalen.

A. Waterbeweging

Met behulp van DIPRO kunnen de scheepsgeïnduceerde waterbewegingen berekend worden. Het programma is in staat om de volgende waterbewegingen te berekenen:

- primaire scheepsgolf: retourstroom aan weerszijden van het schip optredend in samenhang met de waterspiegeldaling van boeg tot hek, met bij de boeg de frontgolf en bij het hek de haalgolf;
- secundaire scheepsgolven of interferentiepieken die vooral ontstaan bij de boeg en onder een hoek in de richting van de oever lopen; en
- schroefstralen van hoofdschroef en boegschroef.

Randvoorwaarden

Voor het berekenen van de waterbewegingen die optreden als gevolg van scheepvaart heeft DIPRO verschillende gegevens nodig. Zo zijn de volgende input gegevens belangrijk:

- Geometrie en afmetingen van de vaarweg.
- Het type schip dat op de vaarweg verwacht mag worden.
- De maatgevende scheepsafmetingen.
- Het vaargedrag van schepen, gekarakteriseerd door de vaarsnelheid en de positie y in de vaarweg.
- Gegevens over de scheepsdiepgang, of het schip op/afvaart en of het daarbij geladen/ongeladen is.

In deze paragraaf wordt beschreven hoe de hierboven genoemde waterbewegingen berekend worden.

Primaire scheepsgolf

Voor het berekenen van de gemiddelde waterspiegeldaling en retourstroom wordt gebruik gemaakt van een eendimensionale methode gebaseerd op door Thiele afgeleide relaties. De continuïteitsvergelijking bij een scheeps- en een retoursnelheid is gelijk aan vergelijking 4, de waterspiegeldaling inclusief een door Schijf geïntroduceerde correctie factor α_s wordt berekend met vergelijking 5.

$$A_c V_{ship} = A_w (V_{ship} + u_r) \quad 4$$

$$\Delta h = \frac{V_{ship}^2}{2g} \left\{ \alpha_s * \left(\frac{A_c}{A_w} \right)^2 - 1 \right\} \quad 5$$

met $\alpha_s = 1,4 - 0,4 \frac{V_{ship}}{V_L} \quad 6$

Waarbij

Δh = waterspiegeldaling [m]

A_c = oppervlakte nat vaarwegdwarsprofiel [m²]

A_w = oppervlakte nat vaarwegdwarsprofiel verminderd met
grootspantoppervlak schip en spiegeldaling [m²]

g = zwaartekrachtversnelling [m/s²]

u_r = retourstroomsnelheid [m/s]

V_L = grenssnelheid [m/s]

V_{ship} = vaarsnelheid ten opzichte van het water [m/s]

Voor de bepaling van de grenssnelheid V_L wordt gebruik gemaakt van de kleinste waarde uitkomst van de drie vergelijkingen hieronder:

De grenssnelheid volgens Schijf inclusief excentrisch
varen luidt:

$$V_{L,Schijf,exen} = V_{L,Schijf,cen} \left(1 - \frac{0,15y}{0,5b_w} \right) \quad 7$$

met $\frac{V_{L,Schijf,cen}}{\sqrt{gh'}} = \left(\frac{2}{3} \right)^{\frac{3}{2}} \left(1 - \frac{A_m}{A_c} + \frac{V_{L,Schijf,cen}^2}{2gh'} \right)^{\frac{3}{2}} \quad 8$

De grenssnelheid in relatie tot de scheepslengte luidt:

$$V_{L,L_s} = \sqrt{\left(\frac{gL_s}{2\pi} \right)} \quad 9$$

De grenssnelheid in relatie tot de waterdiepte luidt:

$$V_{L,h} = \sqrt{gh_1} \quad 10$$

Waarbij:

A_c = natte dwarsdoorsnede [m²]

A_m = natte gedeelte grootspantoppervlak [m²]

b_w = breedte van de vaarweg op de waterspiegel [m]

g = zwaartekrachtversnelling [m/s²]

h_1 = waterdiepte in de vaarwegas [m]

h' = imaginaire waterdiepte, $h' = A_c / b_w$ [m]

V_L = grenssnelheid [m/s]

$V_{L,h}$ = grenssnelheid betrokken op de waterdiepte [m/s]

V_{L,L_s} = grenssnelheid betrokken op de scheepslengte [m/s]

$V_{L,Schijf,cen}$	= grenssnelheid volgens Schijf bij varen in de as van de vaarweg	[m/s]
$V_{L,Schijf,excen}$	= grenssnelheid volgens Schijf bij varen buiten de as van de vaarweg	[m/s]

Voor motorschepen geldt dat een globale afschatting voor de extremen van de waterspiegeldaling en retourstroming verkregen wordt met de volgende relaties:

$$\frac{\hat{\Delta}h}{\Delta h} = 2,0 - 2,0 \frac{A'_c}{A_c} \quad 11$$

$$\frac{\hat{u}_r}{u_r} = 1,5 - 1,0 \frac{A'_c}{A_c} \quad 12$$

Waarbij:

Δh	= gemiddelde waterspiegeldaling	[m]
$\hat{\Delta}h$	= extreme waterspiegeldaling nabij oever	[m]
A_c	= oppervlakte nat vaarwegdwarsprofiel	[m ²]
A'_c	= oppervlakte nat vaarwegdwarsprofiel tussen scheepsas en oever bij uit de as varen	[m ²]
u_r	= gemiddelde retourstroombnelheid	[m/s]
$\hat{u}_r$	= extreme retoursnelheid nabij oever	[m/s]

De haalgolf is de achterste begrenzing van de waterspiegeldaling die optreedt langs varende schepen. Voor geladen motorschepen onder de voorwaarde dat z_{max} niet kleiner is dan de extreme waterspiegeldaling ($\hat{\Delta}h$), kan z_{max} bepaald worden met de volgende relatie:

$$z_{max} = 23,6 \left(\frac{A'_c}{A_c} \right)^{-0,7} * \left(\frac{A_m}{A_c} \right)^2 * \left(\frac{B_s}{h_1} \right)^{0,5} * \left(\frac{V_{schip}}{\sqrt{gh_1}} \right)^4 * h_1 * m^{0,4} \quad 13$$

Waarbij:

A_c	= oppervlakte nat vaarwegdwarsprofiel	[m ²]
A'_c	= oppervlakte nat vaarwegdwarsprofiel tussen scheepsas en oever bij uit de as varen	[m ²]
A_m	= grootspantoppervlak	[m ²]
B_s	= breedte van schip	[m]
g	= zwaartekrachtversnelling	[m/s ²]
h_1	= waterdiepte	[m]
m	= taludhelling	[-]
V_{schip}	= scheepssnelheid	[m/s]
z_{max}	= haalgolfhoogte boven talud	[m]

De frontgolf is de voorste begrenzing van de waterspiegeldaling die optreedt langs schepen. Voor motorschepen en sleeboten kan de volgende relatie gebruikt worden om de hoogte van de frontgolf te berekenen:

$$\hat{\Delta}h_f = (0,1 * \Delta h) + \hat{\Delta}h \quad 14$$

Waarbij:

Δh = gemiddelde waterspiegeldaling [m]

$\hat{\Delta}h$ = extreme waterspiegeldaling [m]

$\hat{\Delta}h_f$ = frontgolfhoogte boven talud [m]

Secundaire scheepsgolven

Bij secundaire scheepsgolven moet een onderscheid gemaakt worden tussen 2 soorten, divergerende en transversale golven. Wanneer deze twee golven samenkomen, interfereren, dan ontstaan interferentiepieken. Met behulp van de volgende vergelijkingen kunnen de parameters van de interferentiepieken berekend worden:

$$\frac{H_i}{h_1} = \alpha_1 * \left(\frac{s}{h_1}\right)^{-\frac{1}{3}} * F_h^{4,0} \quad 15$$

$$L_{wi} = 0,67 * 2\pi * \frac{V_{schip}^2}{g} \quad 16$$

$$T_i = 5,1 * \frac{V_{schip}}{g} \quad 17$$

Waarbij:

α_1	= scheepsafhankelijke coëfficiënt ($0,28 * T_s^{1,25}$)	[-]
F_h	= Froudegetal ($F_h < 0,8$)	[-]
g	= zwaartekrachtversnelling	[m/s ²]
h_1	= waterdiepte	[m]
H_i	= hoogte van een interferentiepiek	[m]
L_{wi}	= gemiddelde golflengte van een interferentiepiek	[m]
s	= afstand van interferentiepieken tot zijkant schip	[m]
T_i	= gemiddelde golfperiode van een interferentiepiek	[s]
V_{schip}	= scheepssnelheid	[m/s]

B. Oeververdediging

Naast het kunnen berekenen van de scheepsgeïnduceerde waterbewegingen is DIPRO+ ook geschikt voor het dimensioneren van oeververdediging. De afmetingen en eigenschappen van het oeverontwerp worden enkel bepaald op basis van de belastingen voortkomend uit de scheepsgeïnduceerde waterbewegingen.

De afmetingen en eigenschappen van het oevermateriaal worden bepaald op basis van 3 belastingen, stroombelasting, haalgolf en interferentiepiek. Op deze manier worden 3 steendiameters d50 verkregen waarvan de grootste maatgevend is voor

het bovendee van de verdediging. Frontgolven en transversale golven worden niet maatgevend geacht.

Stroombelasting

Het bepalen van de benodigde diameter D_{50} bij stroombelasting wordt gedaan met behulp van de formule van Shields (18). Hierbij vormt de formule van Isbash (19) een eerste schatting.

$$D_{50-ur,S} > \frac{0,5c_{fr}K_t u^2}{\psi_{u,s}\Psi_c k g \Delta} \quad 18$$

$$D_{50-ur,I} > \frac{1,4K_t u^2}{\psi_{u,s} k 2g \Delta} \quad 19$$

Waarbij:

α	= taludhoek	[°]
Δ	= relatieve dichtheid	[-]
ε	= hoek van inwendige wrijving (ca. 40° voor breuksteen)	[°]
$\psi_{u,s}$	= upgrading factor voor stroomaanval	[-]
Ψ_c	= kritieke schuifspanning parameter volgens Shields	[-]
k	= $\cos \alpha (1 - \tan^2 \alpha / \tan^2 \varepsilon)^{0.5}$	[-]
K_t	= turbulentiefactor	[-]
u	= extreme stroomsnelheid	[m/s]

In DIPRO wordt als waarde voor $\psi_{u,s}$ de waarde 1 aangehouden, voor Ψ_c de waarde 0,03 en voor K_t bij retourstroming de waarde 1.

Verder geldt voor c_{fr} , de schuifspanningscoëfficiënt:

$$c_{fr} = \left(2,87 + 1,58 \log \frac{x}{k_s} \right)^{-2,5} \quad 20$$

$$\text{met} \quad x = \frac{u}{V_{schip} + u} X \quad 21$$

$$\text{met} \quad X = 0,15 L_s \quad (10m \leq X \leq 20m) \quad 22$$

Waarbij:

c_{fr}	= schuifspanningscoëfficiënt	[-]
k_s	= taludruwheid ($k_s = 2 * D_{50-ur,I}$)	[m]
L_s	= lengte schip	[m]
V_{schip}	= scheepssnelheid	[m/s]
x	= karakteristieke afstand	[m]
X	= deel van de scheepslengte	[m]

Haalgolf

Het bepalen van de benodigde steendiameter D_{50} bij belasting door de haalgolf wordt gedaan met behulp van de volgende formule:

$$D_{50-zm} = \frac{Z_{max}}{\psi_{u,w} * c * (\cot \alpha)^{0.33} * \Delta} \quad 23$$

Waarbij:

α	= taludhoek	[°]
----------	-------------	-----

Δ	= relatieve dichtheid	[-]
$\psi_{u,w}$	= upgrading factor voor golfaanval	[-]
c	= scheepsafhankelijke coëfficiënt	[-]
D_{50}	= karakteristieke steendiameter	[m]
$z_{\max}$	= spiegeldaling aan het begin van haalgolf boven talud	[m]

Als waarde voor c kan bij een geladen motorschip 1,4 aangehouden worden en als waarde voor $\psi_{u,w}$ wordt 1 aangehouden.

Interferentiepieken

De benodigde D_{50} als gevolg van aanvallen door interferentiepieken wordt bepaald met behulp van onderstaande formule:

$$D_{50-H_i} = \frac{H_i (\cos \beta)^{0,5}}{\psi_{u,w} 1,6 (\cot \alpha)^{0,33} * \Delta} \quad 24$$

Waarbij:

α	= taludhoek	[°]
β	= hoek van golfinval interferentiepieken	[°]
Δ	= relatieve dichtheid	[-]
$\psi_{u,w}$	= upgrading factor voor golfaanval	[-]
D_{50}	= karakteristieke steendiameter	[m]

Als waarde voor $\psi_{u,w}$ kan voor een conventionele breuksteenconstructie de waarde 1 aangehouden worden.

Sortering

De sortering en daarmee samenhangend de massa van de breuksteen wordt bepaald doormiddel van de hiervoor berekende D_{50} , de hoogste waarde van D_{50} is maatgevend. Op basis van deze $D_{50_benodigd}$ wordt een sortering gekozen waarvoor geldt: $D_{50_sortering} \geq D_{50_benodigd}$. Hieronder in Figuur 9 is een overzicht van standaard breuksteensorteringen met verschillende eigenschappen, waaronder D_{50} , te zien.

Sortering ¹	D ₅₀ (m)	W ₅₀ (kg)	D _n (m)	Laag ²	
				dikte (m)	massa (kg/m ²)
30/80 mm	0,045 – 0,065	0,15 – 0,45	0,038 – 0,055	0,09	150
40/100 mm	0,063 – 0,090	0,4 – 1,2	0,053 – 0,075	0,12	200
50/150 mm	0,090 – 0,125	1,2 – 3,1	0,075 – 0,110	0,17	300
80/200 mm	0,125 – 0,180	3,1 – 9,3	0,11 – 0,15	0,24	400
5 – 40 kg	0,20 – 0,25	13 – 26	0,17 – 0,21	0,35	600
10 – 60 kg	0,25 – 0,31	26 – 46	0,21 – 0,26	0,42	700
40 – 200 kg	0,38 – 0,44	90 – 140	0,32 – 0,37	0,60	1000
60 – 300 kg	0,45 – 0,52	150 – 220	0,38 – 0,43	0,72	1200
Opm 1 De sortering 30/80 mm is geen standaard sortering. De overige sorteringen zijn standaard breuksteensorteringen. Opm 2 De laagdikte volgt uit $1,5 \cdot D_{50}$. Deze laagdikte geldt als minimum in omstandigheden waarin het gelijkmatig verdeeld aanbrengen van de steen goed gecontroleerd kan worden. Bovendien geldt deze laagdikte slechts voor smalle sorteringen zoals hier het geval is. Overigens moet worden opgemerkt dat de kwetsbaarheid van geringe laagdikten bij de fijnere sorteringen (50/150 mm en kleiner) groot is. Een grotere massa per m² (bijvoorbeeld 400 kg/m²) kan deze kwetsbaarheid reduceren.					

Figuur 9: Overzicht sorteringen (Waterloopkundig Laboratorium, 1997).

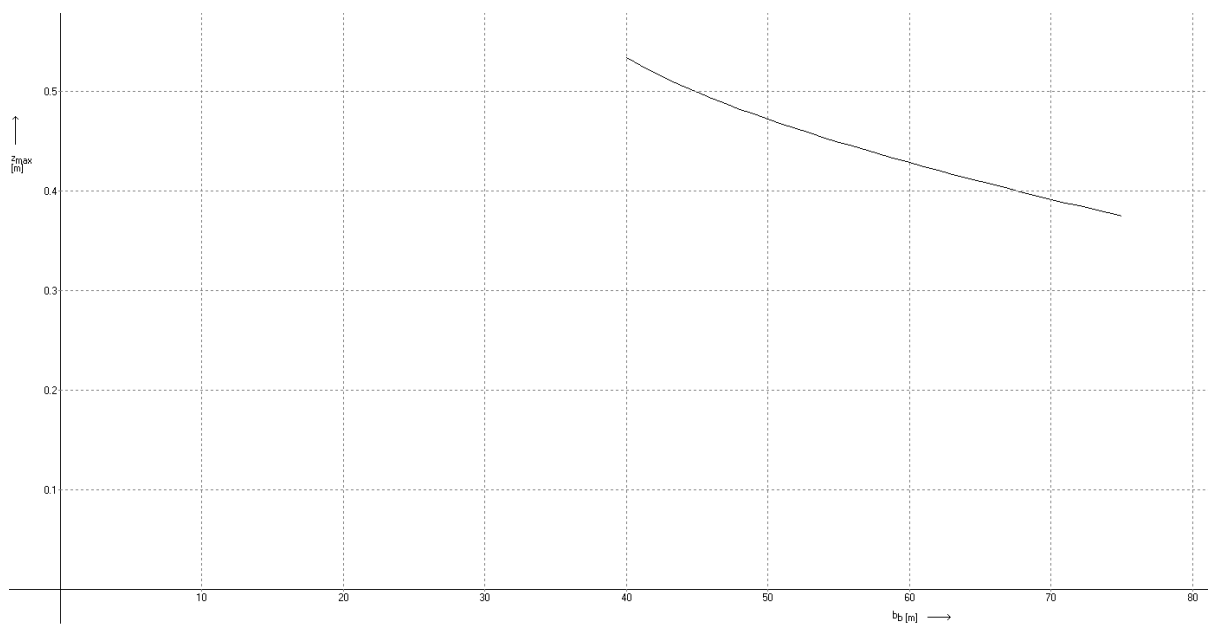
Bijlage 3. Gevoeligheidsanalyse

In deze bijlage worden de resultaten van de gevoeligheidsanalyse weergegeven. Voor duiding van de belangrijkste resultaten wordt verwezen naar hoofdstuk 5. Als eerste zullen de resultaten van de gevoeligheidsanalyse voor de haalgolf $z_{\max}$ gepresenteerd worden gevolgd door een korte analyse voor de bestortingsparameter ΔD_{50} .

A. Haalgolf $z_{\max}$

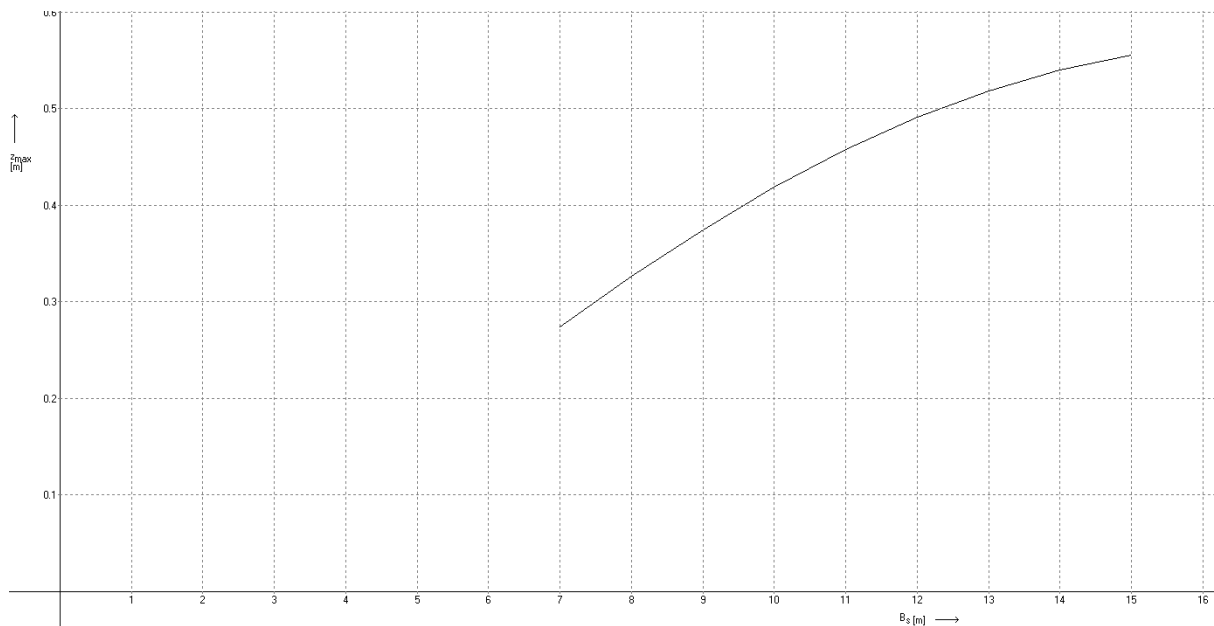
Omdat de haalgolf de maatgevende belasting op de oever is gebleken zullen hieronder de gevoeligheden van verscheidene parameters die van invloed zijn op de haalgolf besproken worden. Dit zal gedaan worden aan de hand van afbeeldingen afkomstig uit DIPRO. Hieronder is de formule die gebruikt wordt voor het bepalen van de haalgolf te zien:

$$z_{\max} = 23,6 \left(\frac{A'_c}{A_c} \right)^{-0,7} * \left(\frac{A_m}{A_c} \right)^2 * \left(\frac{B_s}{h_1} \right)^{0,5} * \left(\frac{V_{\text{schip}}}{\sqrt{gh_1}} \right)^4 * h_1 * m^{0,4} \quad 13$$



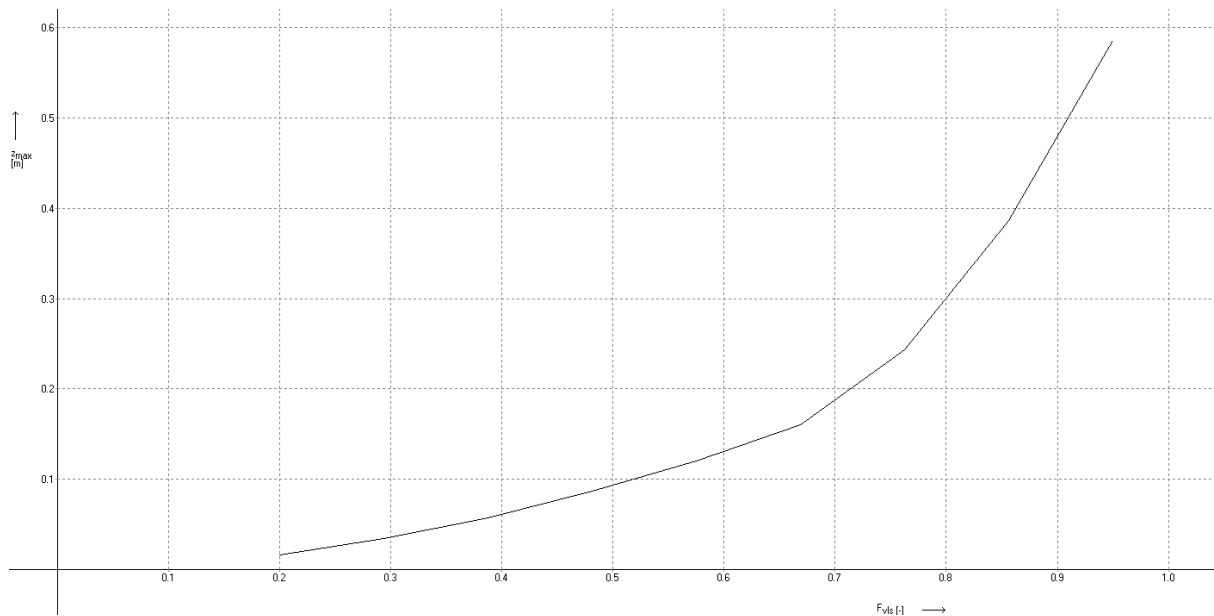
Figuur 10: Gevoeligheid van de haalgolf t.o.v. bodembreedte.

Hierboven is de gevoeligheid van de haalgolf t.o.v. de bodembreedte B_b te zien. Hier is te zien dat als de breedte van de rivier toeneemt, en het schip op dezelfde locatie in de rivier (t.o.v. de rivieras) blijft varen de haalgolf afneemt. Dit verband is niet duidelijk niet lineair, wat verklaard wordt doordat de termen A_c , A'_c en A_m welke afhankelijk zijn van B_b allemaal beïnvloed worden door een macht. Dit is ook te zien in Figuur 10.



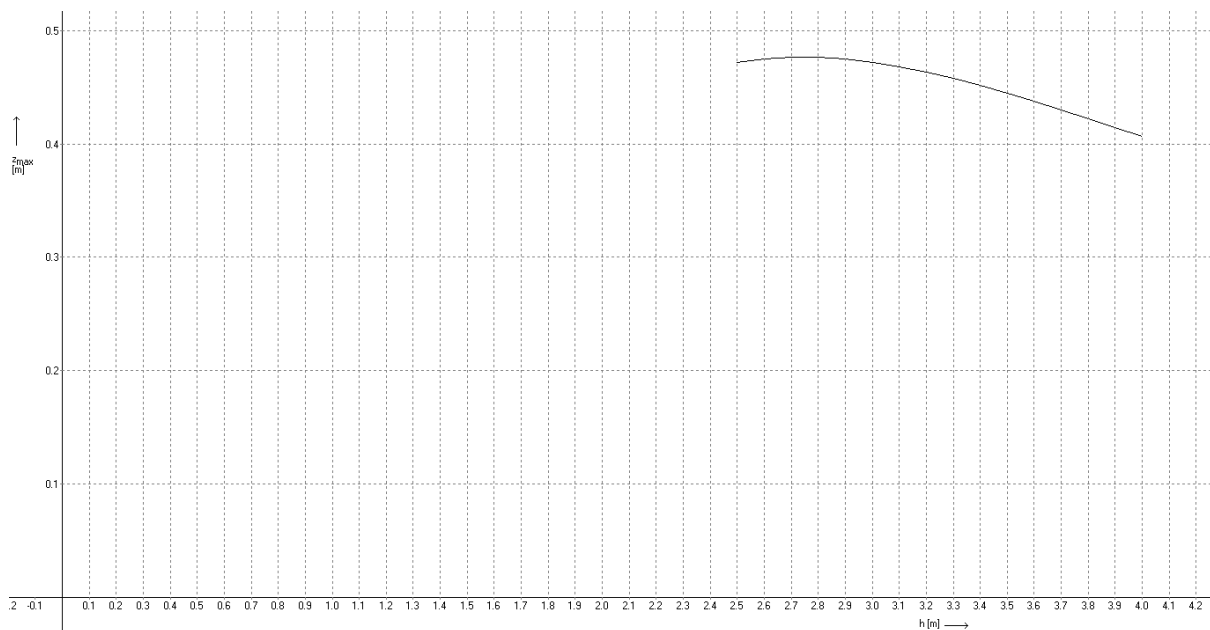
Figuur 12: Gevoeligheid van de haalgolf t.o.v. scheepsbreedte.

In Figuur 12 is de gevoeligheid van de haalgolf t.o.v. de breedte van het schip B_s te zien. Wat opvalt is dat wanneer de breedte van het schip toeneemt, en deze dus meer water verplaatst, de haalgolfhoogte ook toeneemt. Dit gebeurt niet lineair wat te verklaren is door de macht die term B_s beïnvloed.



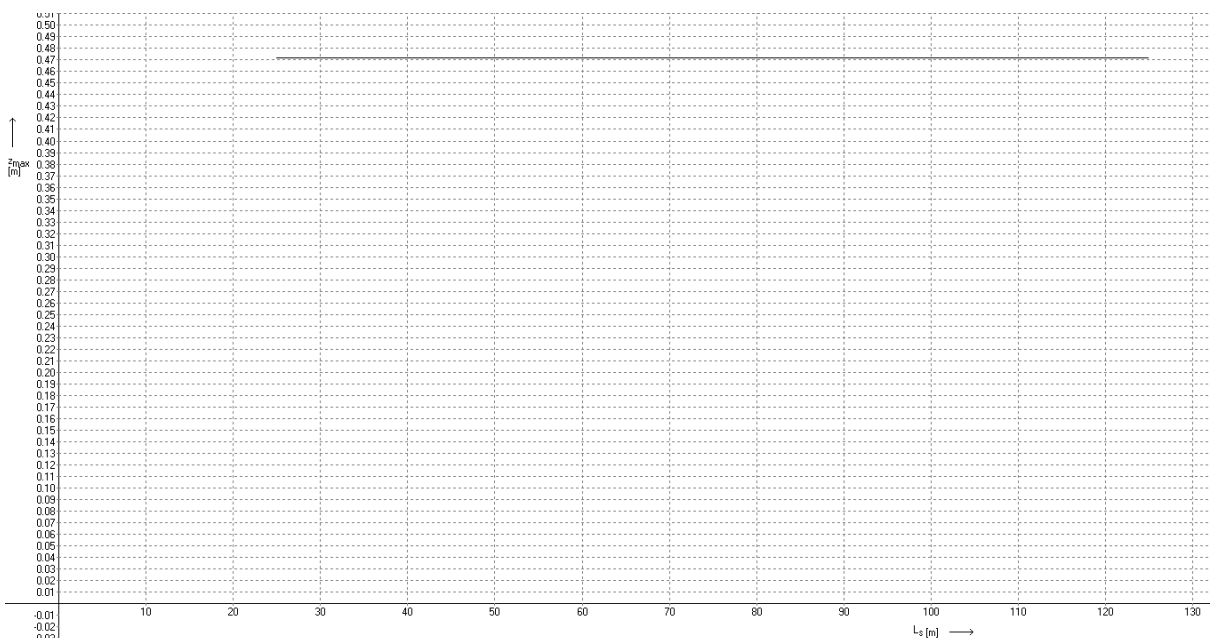
Figuur 11: Gevoeligheid van de haalgolf t.o.v. fysieke limiet snelheid.

In Figuur 11 is de gevoeligheid van de haalgolf t.o.v. de fysieke limiet snelheid van het schip (F_{vls}) te zien. Duidelijk is dat deze parameter van grote invloed is op de haalgolf hoogte. De relatie lijkt exponentieel te zijn wat ook te zien is in de formule voor z_{max} waarin V_{schip} , waarvoor F_{vls} van belang is, een machtsfactor 4 heeft.



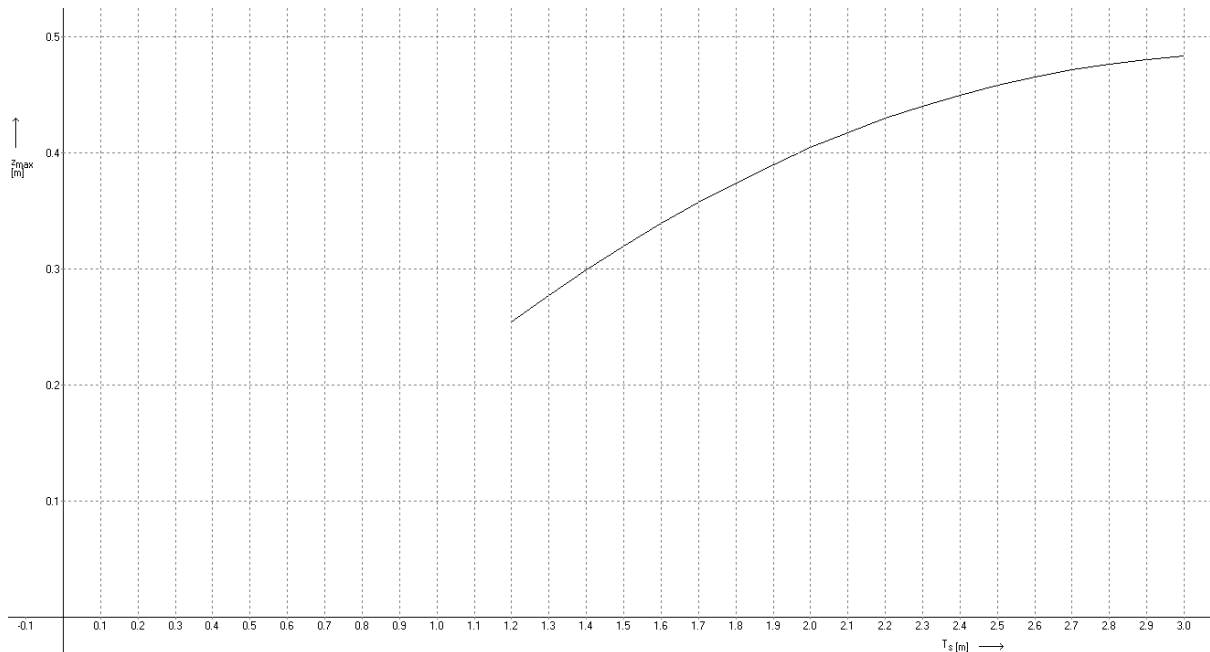
Figuur 14: Gevoeligheid van de haalgolf t.o.v. waterhoogte.

In Figuur 14 is de gevoeligheid van de haalgolf t.o.v. de waterhoogte h_1 te zien. Wat opvalt is dat er een lokaal maximum is bij een waterhoogte van 2,85m dit kan het gevolg zijn van de gekozen scheepsdiepgang van 2,7m maar dit is niet geheel duidelijk. De relatie is niet lineair, dit komt omdat h_1 op verschillende plekken in de formule terugkomt.



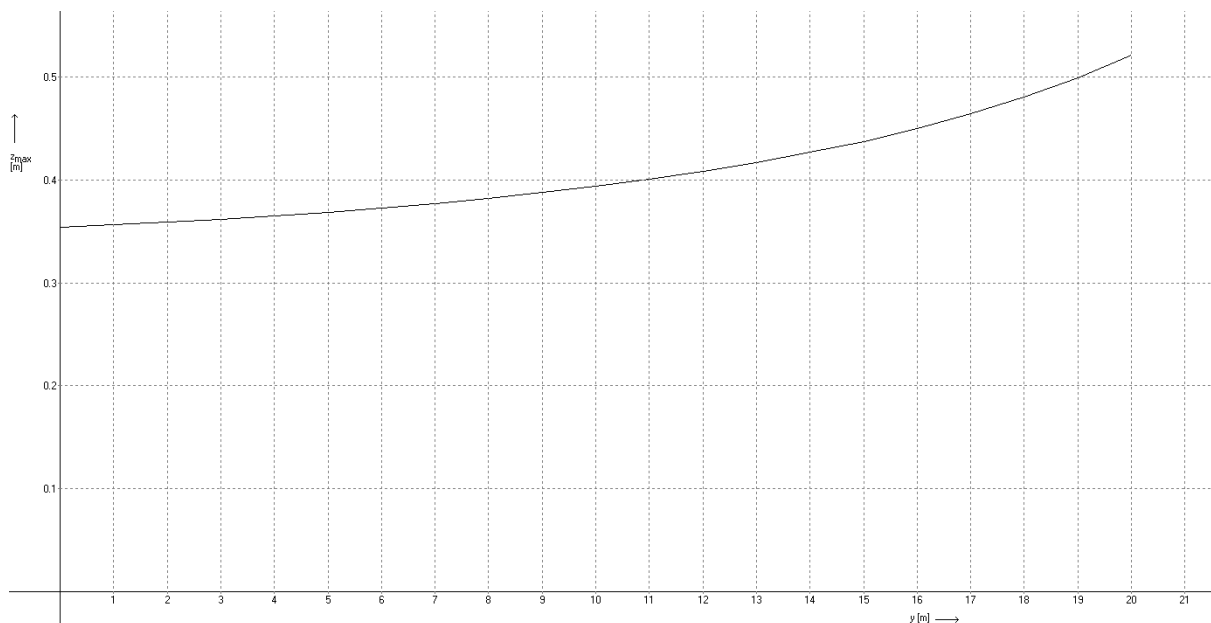
Figuur 13: Gevoeligheid van de haalgolf t.o.v. scheepslengte.

In Figuur 13 is de gevoeligheid van de haalgolf t.o.v. de scheepslengte L_s te zien. Wat duidelijk wordt is dat de lengte van het schip van 25 tot 125m geen enkele invloed heeft op de haalgolf.



Figuur 15: Gevoeligheid van de haalgolf t.o.v. gemiddelde diepgang.

In Figuur 15 is de gevoeligheid van de haalgolf t.o.v. de gemiddelde diepgang T_s te zien. Wat opvalt, is dat er duidelijk een verband tussen beide is. Deze niet lineaire relatie wordt veroorzaakt doordat T_s het grootspantoppervlak A_m en A'_c .



Figuur 16: Gevoeligheid van de haalgolf t.o.v. excentriciteit van schip.

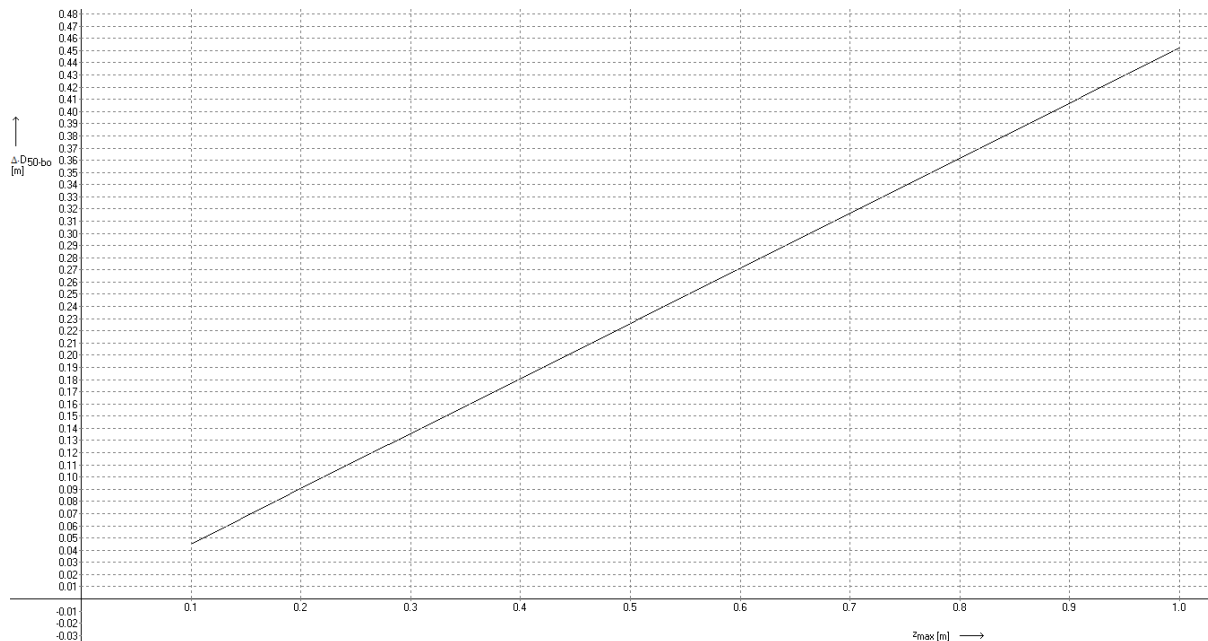
In Figuur 16 is de gevoeligheid van de haalgolf t.o.v. de excentriciteit van het schip te zien. Hierbij is te zien dat wanneer het schip dichterbij de oever vaart de haalgolf exponentieel groter wordt. Dit wordt verklaard doordat y van invloed is op zowel A'_c als A_m .

B. Bestortingsparameter ΔD_{50}

Hieronder zal een korte gevoeligheidsanalyse van de bestortingsparameter ΔD_{50} beschreven worden. Deze kan kort gehouden worden omdat er een lineair verband is tussen ΔD_{50} en de haalgolf, dit wordt ook duidelijk uit de relatie voor de bestortingsparameter die hieronder te zien is:

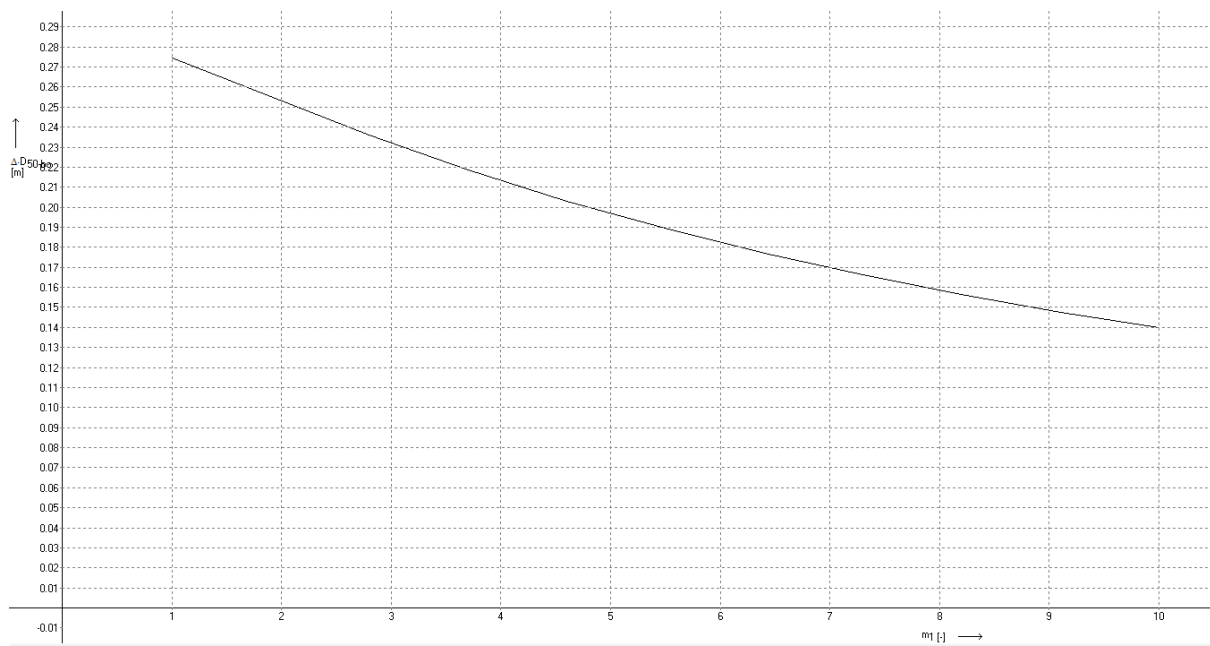
$$\Delta D_{50-zm} = \frac{z_{max}}{\psi_{u,w} * c * (\cot \alpha)^{0.33}}$$

25



Figuur 17: Gevoeligheid van de bestortingsparameter t.o.v. de haalgolf

In Figuur 17 is de gevoeligheid van de bestortingsparameter t.o.v. de haalgolf weergegeven. Hierbij is te zien dat dit een volledig lineair verband is, wanneer de haalgolf hoogte verandert zal de bestortingsparameter evenredig mee veranderen.



Figuur 18: Gevoeligheid van de bestortingsparameter t.o.v. taludhelling

In Figuur 18 is de gevoeligheid van de besortingsparameter t.o.v. de taludhelling m_1 weergegeven. Deze relatie is niet lineair wat een niet lineair verband tussen $z_{\max}$ en m_1 suggereert.

Bijlage 4. Profielen per oever

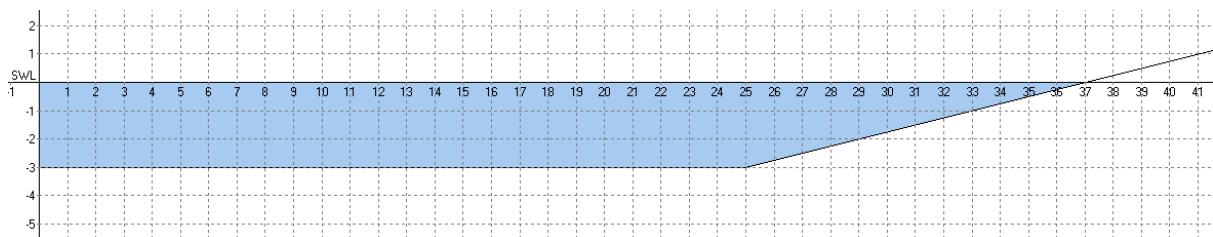
In deze bijlage worden de profielen zoals gebruikt in DIPRO beschreven. Dit zal gebeuren aan de hand van 5 schematiseringen van de profielen. Deze zijn hieronder te zien.

A. Spankerense Weilanden

Op basis van de steilere taludhelling dan op andere locaties het geval is, is gekozen om de locatie Spankerense Weilanden een apart profiel te geven. De gegevens voor deze locatie zijn hieronder in Tabel 10 te zien. De schematisering is te zien in Figuur 19.

Tabel 10: Details rivierprofiel Spankerense Weilanden.

locaties naar rijnkilometer	Breedte bodem ¹ [m]	Breedte oppervlak ² [m]	Talud helling [⁻¹]	A _c [m ²]
Spankerense W.	50,0	70,0	4,0	186



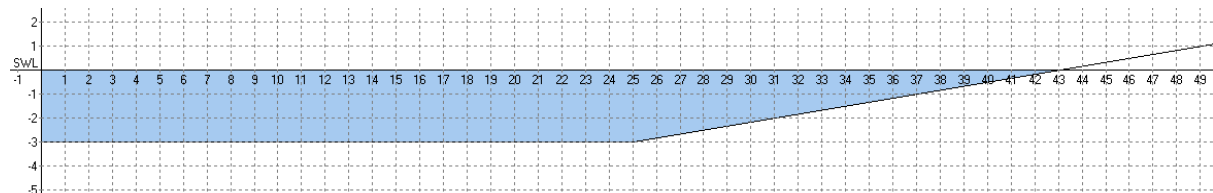
Figuur 19: Schematisering Spankerense Weilanden.

B. Gelderse Toren, de Schans, Leuvenheim en Bronkhorsterwaarden

De profielen van Gelderse Toren, de Schans, Leuvenheim en Bronkhorsterwaarden zijn gelijk geschematiseerd. Hieronder in Tabel 11 zijn de gegevens te zien. De schematisering is te zien in Figuur 20.

Tabel 11: Details rivierprofiel Gelderse Toren, de Schans, Leuvenheim en Bronkhorsterwaarden.

locaties naar rijnkilometer	Breedte bodem ¹ [m]	Breedte oppervlak ² [m]	Talud helling [⁻¹]	A _c [m ²]
Gelderse Toren	50,0	80,0	6,0	204
de Schans	50,0	80,0	6,0	204
Leuvenheim	50,0	80,0	6,0	204
Bronkhorsterwaarden	50,0	80,0	6,0	204



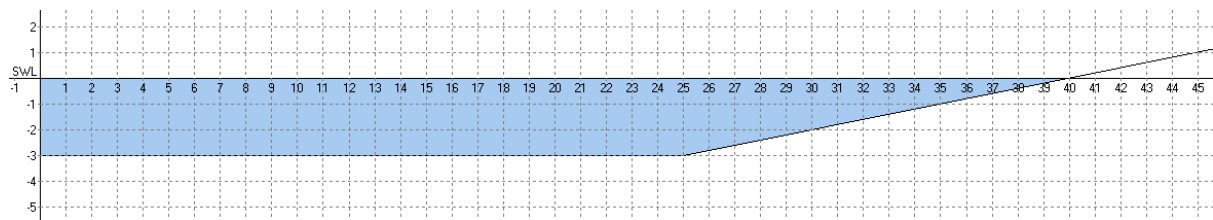
Figuur 20: Schematisering Gelderse Toren, de Schans, Leuvenheim en Bronkhorsterwaarden.

C. Stroomkanaal en Zutphen Links

De profielen van Stroomkanaal en Zutphen Links zijn gelijk geschematiseerd en de gegevens hiervan zijn hieronder in Tabel 12 te zien. De schematisering is te zien in Figuur 21.

Tabel 12 Details rivierprofiel Stroomkanaal en Zutphen Links.

locaties naar rijnkilometer	Breedte bodem ¹ [m]	Breedte op waterniveau ² [m]	Talud helling [°]	A _c [m ²]
Stroomkanaal	50,0	75,0	5,0	195
Zutphen Links	50,0	75,0	5,0	195



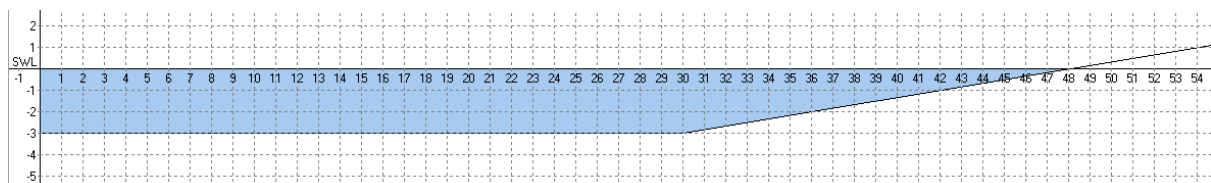
Figuur 21: Schematisering Stroomkanaal en Zutphen Links.

D. Eesterweerd, Ravensweerd, Stobbenweerd en Keizerwaarden

De profielen van Eesterweerd, Ravensweerd, Stobbenweerd en Keizerwaarden zijn gelijk geschematiseerd en de gegevens van deze 4 locaties zijn hieronder in Tabel 13 te zien. De schematisering is te zien in Figuur 22.

Tabel 13: Details rivierprofiel Eesterweerd, Ravensweerd, Stobbenweerd en Keizerwaarden.

locaties naar rijnkilometer	Breedte bodem ¹ [m]	Breedte op waterniveau ² [m]	Talud helling [°]	A _c [m ²]
Eesterweerd	60,0	90,0	6,0	234
Ravensweerd	60,0	90,0	6,0	234
Stobbenweerd	60,0	90,0	6,0	234
Keizerswaarden	60,0	90,0	6,0	234



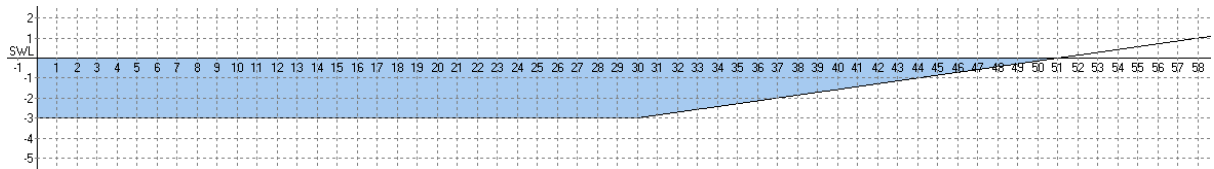
Figuur 22: Schematisering Eesterweerd, Ravensweerd, Stobbenweerd en Keizerswaarden.

E. Hengforderwaarden

De locatie Hengforderwaarden heeft vanwege de afwijkende talud helling een aparte schematisatie. De gegevens van deze locatie zijn te vinden in Tabel 14. De schematisering is te zien in Figuur 23.

Tabel 14: Details rivierprofiel Hengforderwaarden.

locaties naar rijnkilometer	Breedte bodem ¹ [m]	Breedte op waterniveau ² [m]	Talud helling [⁻¹]	A _c [m ²]
Hengforder- waarden	60,0	95,0	7,0	243



Figuur 23: Schematisering Hengforderwaarden.