

Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken

**Ruwheid ten aanzien van golfoverslag van
steen-zetting met dambordpatroon en ribbenpatroon**



Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken

**Ruwheid ten aanzien van golfoverslag van steenzetting met
dambordpatroon en ribbenpatroon**

A. Capel
M. Klein Breteler

1208618-005

Titel

Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat, WVL

Project

1208618-005

Kenmerk

1208618-005-HYE-0013

Pagina's

60

Trefwoorden

Golfoverslag, ruwheidscoëfficiënt, ruwheidsdichtheid, dambord, ribbenpatroon, steenzetting, dijken.

Samenvatting

Het onderliggende rapport beschrijft het modelonderzoek naar het gedrag van ruwheidspatronen in een dijkbekleding ten aanzien van de golfploopremmende eigenschappen.

Meer dan 160 testen zijn uitgevoerd waarbij verschillende patroonconfiguraties zijn getest. Zowel een dambordpatroon als een ribbenpatroon is gebruikt en de positie van dit patroon op het dijktaald is gevarieerd. De analyse van resultaten is op twee manieren uitgevoerd:

- 1 Analyse van meting in relatie tot het TAW-Technisch Rapport "Golfploop en Overslag bij Dijken" (TAW 2002).
- 2 Analyse van de paarsgewijs uitgevoerde proeven (met en zonder ruwheid)

De eerste methode heeft een gemakkelijk te gebruiken set ruwheidscoëfficiënten opgeleverd. De tweede methode heeft geresulteerd in een formule waarmee de ruwheidscoëfficiënt bepaald kan worden voor loodrecht invallende golven. Deze ruwheidscoëfficiënt blijkt afhankelijk te zijn van een aantal parameters.

Bij toenemende golfoverslag wordt als gevolg van een toenemende waterlaagdikte van de golfplooptong de invloed van de ruwheidselementen kleiner en de ruwheidscoëfficiënt zal naar 1,0 gaan voor extreme hoeveelheden overslag. Steile golven ondervinden daarnaast minder ruwheid dan lange golven. De locatie van de ruwheidselementen op het taald is belangrijk. Ruwheidselementen onder water hebben maar een kleine bijdrage in de reductie van de golfoverslag. De ruwheidscoëfficiënt is afhankelijk van het aantal vierkante meters ruwheidselementen verdeeld over het dijktaald.

De proeven zijn uitgevoerd in het kader van het project 'Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken'. Dit onderzoek is aan Deltares opgedragen door Rijkswaterstaat WVL, namens het Projectbureau Zeeweringen, het Project Afsluitdijk, het Corporate Innovatieprogramma van RWS en drie noordelijke waterschappen (Wetterskip Fryslân, Waterschap Noorderzijlvest, Waterschap Hunze en Aa's, in het kader van een projectoverstijgende verkenning van HWBP).

Referenties

project "Vergelijkend Onderzoek Zetsteen", RWS zaaknr. 31087167, 29.11.2013
contactpersoon WVL: ir L.E.B. Saathof

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	apr 2014	A. Capel		M. Klein Breteler		M. van Gent	
2	juli 2014	A. Capel		M. Klein Breteler		M. van Gent	
5	okt 2015	A. Capel		M. Klein Breteler		M. van Gent	
6	mei 2016	A. Capel		M. Klein Breteler		K.J. Bos	

Status

definitief

Titel

Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat, WVL

Project

1208618-005

Kenmerk

1208618-005-HYE-0013

Pagina's

60

Inhoud

1 Inleiding	1
2 Modelopzet	3
2.1 Faciliteit	3
2.2 Modelschematisering	3
2.3 Modelschaal	4
2.4 Metingen	5
2.5 Configuraties	6
2.6 Testprogramma	8
2.6.1 Algemeen	8
2.6.2 Spectrum	9
2.6.3 Testseries	10
3 Analyse van de resultaten t.o.v. TAW (2002)	15
3.1 Inleiding	15
3.2 Analyse van relatie tussen overslagdebiet en kruinhoogte	15
3.3 Ruwheid	17
3.4 Vergelijking met TAW (2002)	19
3.5 Conclusie op basis van analyse t.o.v. TAW (2002)	22
4 Analyse van proefparen	23
4.1 Inleiding	23
4.2 Golfoverslagvolume	23
4.3 Golfsteilheid	24
4.4 Nokhoogte	25
4.5 Ruwheidsdichtheid talud	26
4.6 Spectrumvorm	32
4.7 Taludhelling	33
4.8 Extreem grote overslag	39
4.9 Schaaffecten	40
4.10 Ruwheidscoëfficiënt	46
4.11 Voorbeeld Case	48
5 Vergelijking van de twee analysemethoden	51
5.1 Analyse van resultaten ten opzichte van TAW (2002)	51
5.2 Analyse op basis van proefparen	52
6 Conclusie	55
7 Referenties	59
 Bijlage(n)	
A Dwarsdoorsneden en bovenaanzichten proefopstellingen	A-1
B Resultaten golfcondities, overslagdebiet, gekalibreerde ruwheidscoëfficiënten	B-1

C Procedure bepaling ruwheidscoëfficiënt steenzettingsprofiel met ruwheidspatronen voor golfoploop en golfoverslag	C-1
D Voorbeelden Steenzetting met ruwheidspatroon	D-1
E Figuren bij hoofdstuk 3	E-1
F Overslagvolume	F-1

Lijst met Symbolen

A_{nok}	het gemiddelde aanstroomoppervlak van de uit het talud stekende nokken per meter dijk, zie Figuur 5.2	[m]
a, b	coëfficiënten in de formule voor het bepalen van het overslagvolume	[-]
b	coëfficiënt voor de gradiënt in TAW formule 24	[-]
$c^*/c_0/c_1/C$	coëfficiënten	[-]
d_{ruw}	diepte onder de stilwaterlijn vanaf waar de ruwheid meetelt	[m]
d_{tong}	dikte van de golfplooptong ter hoogte van z boven SWL	[m]
f_h	hoogte van de ruwheidselementen (TAW 2002)	[m]
f_L	hart-op-hart afstand van de ruwheidselementen (TAW 2002)	[m]
f_b	breedte van de ruwheidselementen, haaks op de dijk, gemeten langs het talud (TAW 2002)	[m]
g	zwaartekrachtversnelling	[m/s ²]
h	lokale waterdiepte aan de teen	[m]
h_a	oplooptong laagdikte op locatiehoogte z	[m]
h_k	relatieve kruinhoogte	[m]
h_{nok}	nokhoogte	[m]
h_{refnok}	referentie nokhoogte	[m]
H_{m0}	significante golfhoogte op basis van het variantie-dichtheidspectrum; $H_{m0}=4\cdot\sqrt{m_0}$	[m]
H_s	significante golfhoogte aan de teen; hier geldt $H_s=H_{m0}$	[m]
$H_{2\%}$	golfhoogte die door 2% van de golven wordt overschreden	[m]
$L_{m-1,0}$	golflengte op lokale waterdiepte die hoort bij de spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$	[m]
L_0	fictieve diep water golflengte die hoort bij de spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$	[m]
m_0	oppervlak energiedichtheidspectrum	[m ²]
N	aantal golven	[-]
P_{ov}	kans op overslag per golf	[-]
$P_{V\%}$	$P(V \geq V)$ kans dat het overslagvolume groter dan of gelijk aan V is	[-]
q	gemiddeld golfoverslag debiet per strekkende meter kruin	[m ³ /m/s]
q^*	dimensieloos golfoverslagdebet	[-]
q_0	overloopcoëfficiënt	[-]
S_{om}	$H_{m0}/(gT_{m-1,0}^2/(2\pi))$ = golfsteilheid op basis van $T_{m-1,0}$	(-)
$S_{m-1,0}$	golfsteilheid gebaseerd op lokale golflengte $L_{m-1,0}$	[-]
S_0	fictieve golfsteilheid gebaseerd op fictieve diep water golflengte L_0 ($S_0=H_{m0}/L_0$)	[-]
$S(f)$	variantie-dichtheidspectrum	[m ² /Hz]
$T_{m-1,0}$	gemiddelde energie periode	[s]
T_p	piekperiode	[s]
V	volume van overslaande golven per strekkende meter	[m ³ /m]
V_{ov}	volume van overslaande golven per strekkende meter met een overschrijdskans van P_{ov}	[m ³ /m]
$V_{0,1\%}$	maximum overslagvolume per strekkende meter kruin bij 1000 golven	[m ³ /m]
V_{Δ}	relatief overslagvolume per strekkende meter kruin gedefinieerd als $(V_{0,1\%}-V_{ov})/V_{ov}$	[-]
z	niveau boven de stilwaterlijn	(m)

$z_{2\%}$	golfoploophoogte die door 2% van de inkomende golven wordt overschreden	[m]
α	taludhelling	[°]
δ_{ruw}	= $\rho_{\gamma f}$ = ruweheidsdichtheid: het gemiddelde aanstroomoppervlak van de uit het talud stekende nokken per m ² oploophoogte tot de kruin, maar niet hoger dan de golfoploophoogte $z_{2\%}$	(-)
γ_f	reductiefactor op de oploop of overslag als gevolg van de ruwheid bij golfoverslag en golfoploop	[-]
$\gamma_{f,w}$	ruweheidsbreedte	[-]
γ_b	factor voor de invloed van een berm (= 1 in dit onderzoek)	(-)
γ_β	factor voor de invloed van de hoek van golfinval (= 1 in dit onderzoek)	(-)
γ_v	factor voor de invloed van een verticale wand op het talud (= 1 in dit onderzoek)	(-)
$\rho_{\gamma f}$	ruweheidsdichtheid op basis van h_{nok} , h_k , $\gamma_{f,w}$ en $\sin(\alpha)$	[-]
$\rho_{\gamma f,w}$	lineaire ruweheidsdichtheid op basis van h_k en $\gamma_{f,w}$	[1/m]
$\rho_{\gamma f,w^*}$	tijdelijke lineaire ruweheidsdichtheid op basis van h_k , $\gamma_{f,w}$ en $\sin(\alpha)$	[1/m]
$\xi_{0m-1,0}$	brekerparameter gebaseerd op $\tan(\alpha)/\sqrt{[2\pi H_s/(gT_{m-1,0}^2)]}$	[-]
ξ_{0m}	$\tan\alpha/\sqrt{s_{0m}}$ = brekerparameter	[-]

1 Inleiding

In het kader van het project 'Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken' is het effect van een speciale geometrie van de steenzetting op de golfploop/golfoverslag onderzocht. Dit onderzoek is aan Deltares opgedragen door Rijkswaterstaat WVL, namens het Projectbureau Zeeweringen, het Project Afsluitdijk, het Corporate Innovatieprogramma van RWS en drie noordelijke waterschappen (Wetterskip Fryslân, Waterschap Noorderzijlvest, Waterschap Hunze en Aa's, in het kader van een projectoverstijgende verkenning van HWBP).

De golfploop kan op steenzettingen worden beperkt door een speciale geometrie te hanteren, zoals dat van een dambordpatroon. Daarbij wordt de steenzetting aangelegd alsof het een dambord is met op de zwarte vlakken hogere zuilen dan op de witte vlakken. Door uit te gaan van een vlakke ondergrond (steenslag) kan in de praktijk de steenzetting opgebouwd worden door voor de sets (van doorgaans ongeveer één vierkante meter) niet allemaal dezelfde hoogte te kiezen. Door sets van bijvoorbeeld 20 cm en 40 cm om en om op het talud te plaatsen wordt een ruw talud verkregen dat de golfploop remt (zie Figuur 1.1 voor een voorbeeld met Basalton).

In de praktijk zullen de hoeken van de vlakken niet exact op elkaar aansluiten. We spreken dan van een 'overlap': zie Figuur 1.1 voor een voorbeeld met 20% overlap met de hoger gelegen sets. Het ideale dambord heeft een overlap van 0% en wanneer er sprake is van rechte banen het talud op is er een overlap van 100%. Hoe kleiner de overlap, hoe groter het te verwachte effect op de golfploop/golfoverslag, hoewel het verschil tussen 20% en 0% waarschijnlijk klein is. De grootte van deze overlap zal hoogstwaarschijnlijk langs de dijk variëren, maar verwacht wordt dat een overlapvariatie van 0% tot 40% tot de mogelijkheden behoort.



Figuur 1.1: Basalton steenzetting in dambord patroon met ongeveer 20% overlap

Het doel van dit onderzoek is het bepalen van de golfploopremmende eigenschappen van een steenzetting voor speciale geometrieën, oftewel de ruwheid in de vorm van een ruwheidsfactor ten aanzien van golfploop/golfoverslag.

Om dit van een dergelijk dambordpatroon te bepalen zijn meerdere proevenseries uitgevoerd met behulp van kleinschalig modelonderzoek. Als variant op de geometrie van het dambordpatroon is tevens een ribbenpatroon beproefd. In Figuur 1.2 is een soortgelijk ribbenpatroon te zien. Hier is de afstand tussen de ribben groter dan in het model en wordt een rib gevormd door een reeks van twee sets hoog en dan weer één set laag.



Figuur 1.2: Breskens; steenzetting in ribbenpatroon met veel openingen per rib en een grote afstand tussen de ribben

De opbouw van dit rapport is als volgt. In hoofdstuk 2 wordt de model-opzet van dit onderzoek beschreven. In hoofdstuk 3 worden de resultaten van de ruwheden op basis van de TAW formule (TAW 2002) gegeven. In hoofdstuk 4 wordt de analyse met bijbehorende ruwheidsvoorspelling gegeven en tenslotte in hoofdstuk 5 is de conclusie beschreven.

2 Modelopzet

2.1 Faciliteit

Het effect van speciale geometrieën op de golfoverslag, zoals een dambordpatroon, is getest in de Oosterscheldegoet van Deltares. De Oosterscheldegoet heeft een lengte van 55m, is 1m breed en 1,2m hoog. De golfgoet maakt bij het golfschot gebruik van actieve reflectie compensatie, een systeem waarmee gereflecteerde golven van de constructie door het golfschot worden geabsorbeerd. De gereflecteerde golf wordt daarmee dus verwijderd, waarmee onrealistische situaties, die ook niet in de natuur voorkomen, worden voorkomen. Tweede orde golfschotsturing wordt gebruikt voor het genereren van het golfveld.

2.2 Modelschematisering

In Figuur 1.1 en Figuur 1.2 worden voorbeelden van speciale geometrieën in de vorm van het dambordpatroon en het ribbenpatroon weergegeven. Het patroon heeft bij Basalton een typische setbreedte van ca. 1,1 m, terwijl bij bijvoorbeeld Hydroblocks dit 1,0 m is.

Om eenzelfde patroon in de golfgoet te modeleren is gebruikt gemaakt van ruwe kubussen van beton. Hiermee hebben we de hydraulische ruwheid van een steenzetting waarschijnlijk goed genoeg kunnen benaderen. Een voorbeeld is te zien in Figuur 2.1. Deze kubussen zijn 5x5x5 cm groot en representeren per kubus de grootte van een typisch steenzettingsset. Om het hoogteverschil te verkrijgen is in de modelopstelling gebruikgemaakt van betonnen plaatjes van ongeveer 5x5x1,1 cm³. Dit hoogteverschil wordt in het vervolg nokhoogte genoemd. De meest proeven zijn uitgevoerd met een nok hoogte van 11 mm, en enkele zijn uitgevoerd met 16 mm (serie 5b).

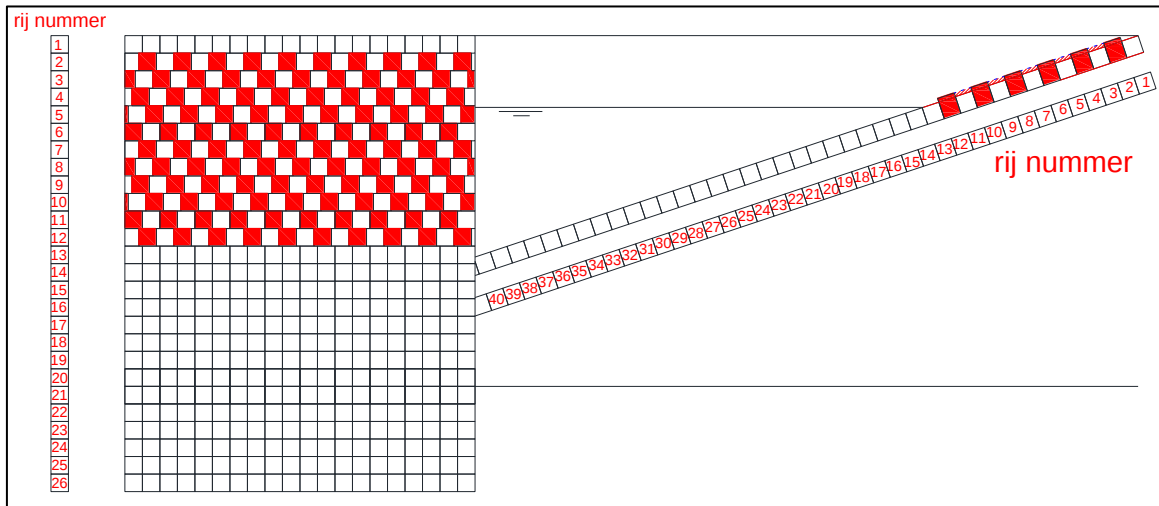
In Figuur 2.1 is de 20% overlap tussen de kubussen, zoals in Figuur 1.1 weergegeven, aangebracht door dezelfde plaatjes van 11 mm dikte aan de zijkant van de eerste kubus in de rij te plaatsen. Met deze schematisering van een steenzettingsset is het daarnaast vrij eenvoudig geworden om de overlap te verkleinen of te vergroten en daarmee de invloed van deze parameter in het onderzoek te meten.



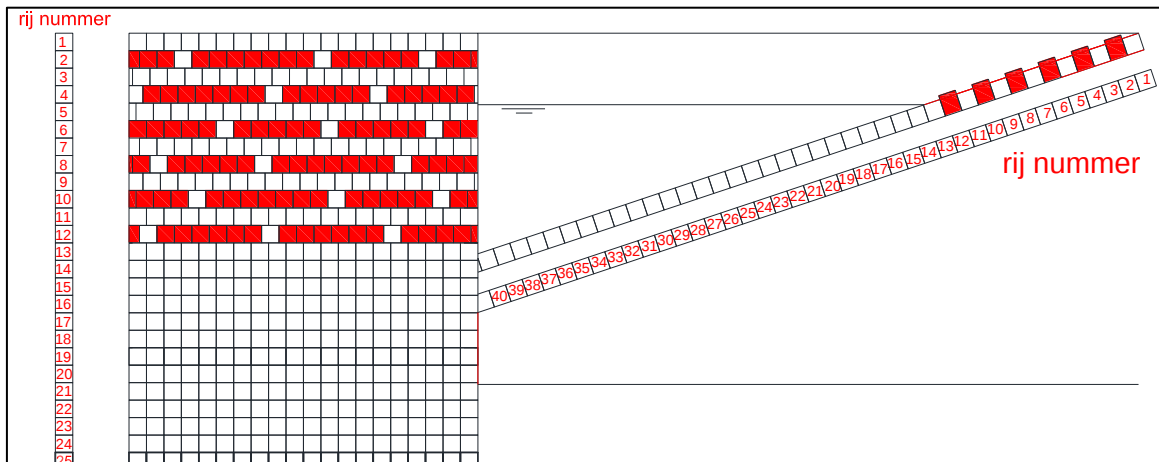
Figuur 2.1: modelschematisering steenzetting in dambord patroon

In Figuur 2.2 en Figuur 2.3 is een modelopstelling van het dambordpatroon en het ribbenpatroon als bovenaanzicht en als dwarsdoorsnede weergegeven. De sets van de steenzetting zijn per set van ongeveer 1 m² in de vorm van een kubus gemodelleerd en

vormen zo het patroon. De kubussen zijn allen geplaatst op een houten ondoorlatende ondergrond. De bovenste rij kubussen heeft geen speciale geometrie gekregen, zodat de hoogte van het kruinniveau goed gedefinieerd is.



Figuur 2.2: Modelopstelling dambordpatroon (links: bovenaanzicht, rechts: dwarsdoorsnede)



Figuur 2.3: Modelopstelling ribbenpatroon (links: bovenaanzicht, rechts: dwarsdoorsnede)

De overgang van een rij met uitstekende nokken naar rijen die geheel glad zijn, lag initieel op of net boven de waterstand in de eerste testseries. Doordat de waterstand in het testprogramma is gevarieerd, is het patroon voor iedere waterstand aangepast.

Om te voorkomen dat het water tussen de rijen in bleef staan is een kleine porositeit aangebracht door alle rijen kubussen een kleine onderlinge afstand van 1 mm te geven. Deze kier is gerealiseerd door op de houten ondergrond een klein stripje met dikte van 1 mm en hoogte van 2 cm te monteren. Daarnaast is er bij het dambordpatroon altijd een overlap aanwezig en zijn er bij het ribbenpatroon per uitstekende rij 3 kubussen verlaagd (niet uitstekend), zie bovenaanzicht Figuur 2.3. Een kier van ongeveer 1 mm was ook aanwezig tussen iedere naastgelegen kubus van een enkele rib.

2.3 Modelschaal

De kubus van 5cm breedte dient een steenzettingsset voor te stellen. Deze set kan een breedte van ongeveer 1,0 tot 1,1m hebben. Om de modelschaal te bepalen hebben we gekozen voor de grootste setbreedte, namelijk 1,10 m. Hiermee wordt een lengteschaal n_l

van 22 verkregen (overslagschaal: $n_q = n_l^{1.5} = 103$). De nokhoogte is dan 24 cm. Vrijwel alle testseries zijn in dit onderzoek uitgevoerd op een schaal 1:22. In één serie met een ribbenpatroon is een schaal ten aanzien van de geometrie aangepast, waardoor alles twee keer zo groot was. In deze proevenserie werd een set niet door één kubus gevormd maar door vier kubussen en bestond de nokhoogte niet uit één maar uit twee betonnen plaatjes. De drie openingen per rib werden op de grotere schaal gevormd door 1 grote opening van 4 lage kubussen en een halve opening van 2 lage kubussen. In Figuur 2.4 worden beide schalen van eenzelfde ribbenpatroon weergegeven.



Figuur 2.4: Proevenserie ribbenpatroon schaal 1:22 (boven) en schaal 1:11 (onder)

2.4 Metingen

Verschiede metingen hebben plaatsgevonden tijdens de proeven, namelijk:

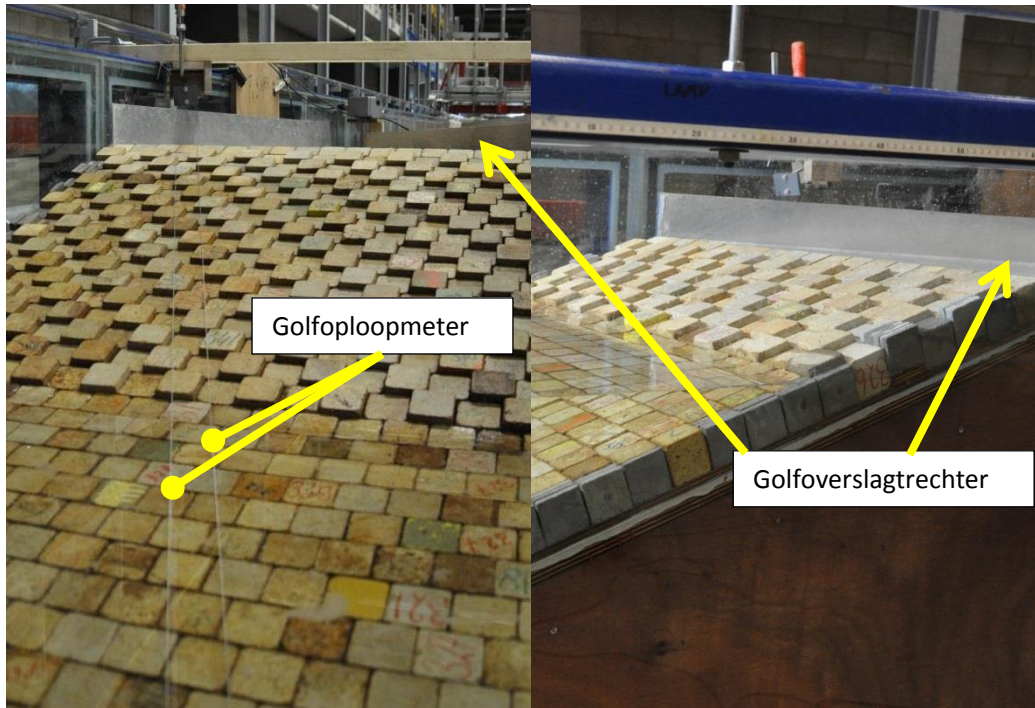
- Inkomende en gereflecteerde golven door middel van vier golfhoogtemeters op twee plaatsen voor de constructie (zie Figuur 2.5);



Figuur 2.5: positie golfhoogtemeters in Scheldegoot

- Golfploopmetingen door middel van een diagonaal gespannen capacitieve draad net boven de kubussen (zie Figuur 2.6);

Metingen van de golfoverslag over de hele breedte van de goot. Een overslagbak met drie compartimenten van oplopende grootte stond achter de golfoverslagtrechter. Door gebruik te maken van verschillende grootte compartimenten konden ook kleine overslaghoeveelheden met voldoende nauwkeurigheid gemeten worden.



Figuur 2.6: Meetinstrumenten voor golfploop (dunne staaldraden, links) en golfoverslag (trechter en bak, rechts)

Er is gebruikt gemaakt van twee sets van 4 golfhoogtemeters, in plaats van 3 golfhoogtemeters per set. Dit is gedaan omdat het testprogramma een grote spreiding van golfperiodes en daarmee golflengtes omvat. De analyse van de inkomende en gereflecteerde golven is hierdoor gebaseerd op de methode van Zelt & Skjelbreia (Zelt and Skjelbreia (1992)). De volgende data is verkregen vanuit de signalen van de 4 golfhoogtemeters:

- De piekperiode T_p (s); dit is de golfperiode die gerelateerd is aan de piek van het variantie-dichtheidspectrum $S(f)$ (m^2/Hz);
- De spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$ (s);
- De significant golfhoogte H_{m0} (m) op basis van het variantie-dichtheidspectrum $H_{m0}=4 \cdot \sqrt{m_0}$; De significante golfhoogte wordt in de tekst ook aangeduid met H_s .
- De golfhoogte die door 2% van de golven wordt overschreden, $H_{2\%}$ (m);

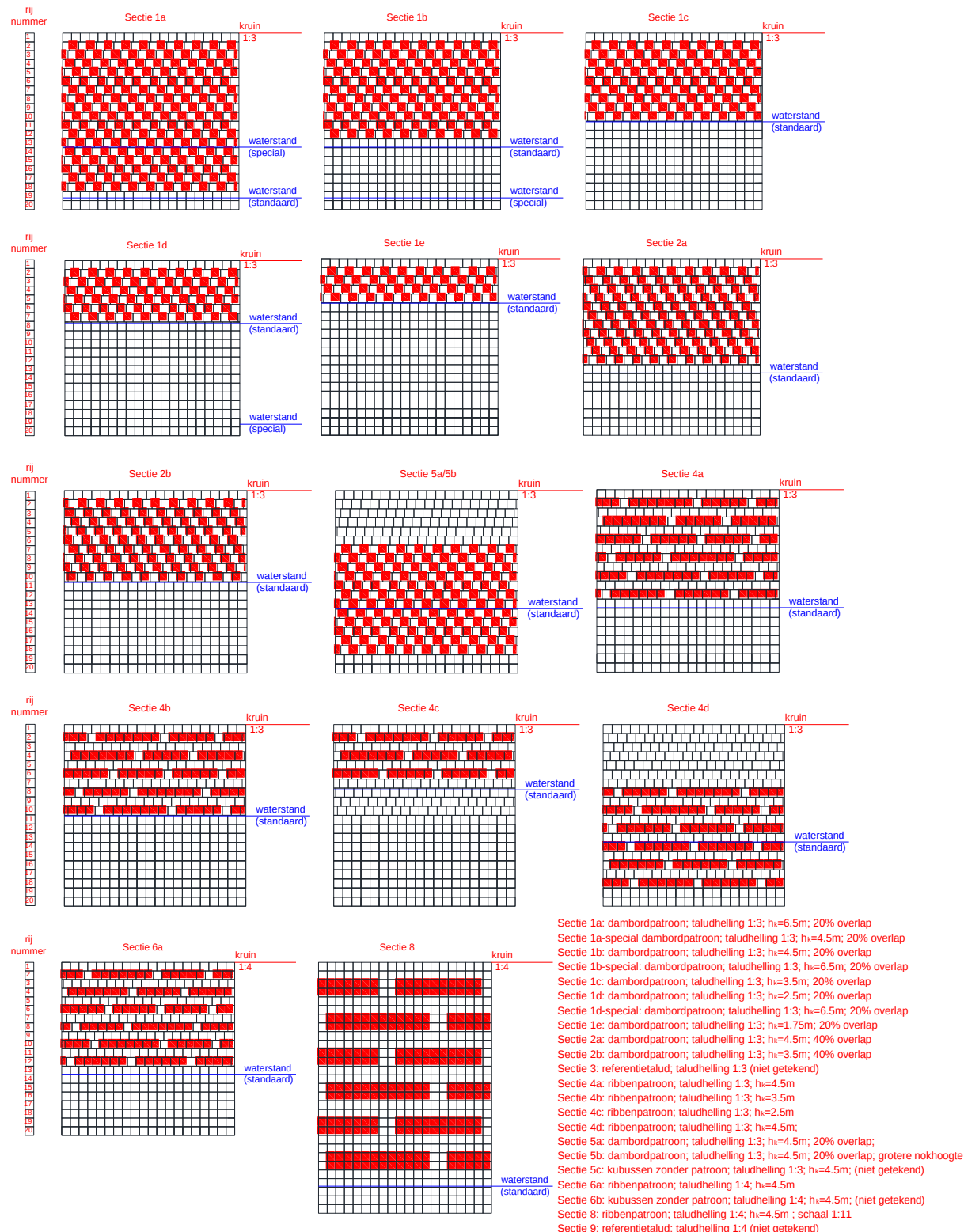
2.5 Configuraties

Het dambordpatroon en het ribbenpatroon zijn in verschillende configuraties getest, namelijk:

- het aantal rijen en daarmee dus de grootte van het ruwe oppervlak op het talud;
- de positie van het ruwe oppervlak op het talud;
- de grootte van de overlap bij het dambordpatroon;
- de grootte van de nokhoogte;

- het aantal rijen onder water;
- het effect van alleen rijen bovenin het talud;
- de hellingshoek van het talud.

Figuur 2.7 geeft als voorbeeld het bovenaanzicht van de verschillende configuraties.



Figuur 2.7: verschillende configuraties waarbij het aantal rijen, de positie, de overlap en de geometrie is gevarieerd

Om een goede vergelijking te kunnen maken tussen de golfoploopremmende eigenschappen van het patroon zijn ook met alle golfcondities oploop- en overslagmetingen uitgevoerd met een glad talud. Hiervoor werden dezelfde golfstuurfiles gebruikt, zodat in principe exact dezelfde inkomende golven verkregen werden aan de teen van de constructie.

Het gladde talud was van hout en is zowel met een helling van 1:3 als 1:4 toegepast. Naast het gladde talud van hout is ook een glad talud van kubussen toegepast. De kubussen hebben in deze configuratie een theoretische nokhoogte van 0 cm. Naast het feit dat met deze configuratie een indruk wordt gekregen in hoeverre de gevonden ruwheid aansluit bij die van een standaard steenzetting in de praktijk zal die ook worden gebruikt in de analyse voor het effect van de nokhoogte op de ruwheid.

In bijlage A worden naast al deze bovenaanzichten ook de bijbehorende dwarsdoorsneden gegeven.

2.6 Testprogramma

2.6.1 Algemeen

Het testprogramma dient toepassingen in de Waddenzee, de Ooster- en Westerschelde en het IJsselmeer af te dekken. In de Waddenzee kunnen golven met een significante hoogte van wel 4,0 tot 4,5m optreden. In het IJsselmeer zullen deze eerder orde 1,0-2,0m zijn. In de Oosterscheldegoot kunnen significante golven worden gegenereerd van ongeveer 25 cm groot. Met de gekozen schaal van 1:22 is dus het hele bereik van 1 tot 4,5m goed realiseerbaar.

Bij het opstellen van het proevenprogramma, zie Tabel 2.1, is rekening gehouden met de gehele variatie in golfhoogte, $H_s=1,0-4,5\text{m}$, en golfsteilheden, $s_o=2\%-5\%$, waarbij de fictieve golfsteilheid s_o gebaseerd is op de fictieve diepwatergolflengte en de energieperiode $T_{m-1,0}$ ($s_o = H_s/(1,56T_{m-1,0}^2)$). Echter voor de grootste golven ($\geq 3\text{m}$) is aangehouden dat deze een minimale golfsteilheid van 3,5% hebben.

De kruin van het model is ten opzichte van de gootbodem constant. Door de waterstand te variëren zijn verschillende relatieve kruinhoogtes getest. De gekozen waterstand is bepaald op basis van een gewenst overslagdebiet van ongeveer 1 tot 5 l/s/m. Dit debiet is de geschatte waarde die vaak aanwezig zal zijn bij de overgang van de steenzetting naar een grasbekleding.

Bij het opstellen van het proevenprogramma is Formule 24 (brekende golven) gebruikt uit het TAW-Technisch Rapport "Golfoploop en Overslag bij Dijken" (TAW 2002) voor het berekenen van het verwachte overslagdebiet. Voor de berekening van de overslag bij verschillende geometrieën is een ruwheidsparameter van 0,8 gekozen. Op basis van eerder onderzoek met een glad houten talud is de 5% ondergrenswaarde van formule 24 gebruikt om de overslagdebieten voor de verschillende waterstanden te berekenen.

Tabel 2.1 geeft het overzicht van de condities. De waarde h_k staat voor de kruinhoogte boven de waterstand. Om niet te veel verschillende waterstanden in het definitieve testprogramma op te nemen en daarmee het aantal verbouwingen van de constructie te limiteren is Tabel 2.1 geoptimaliseerd voor 5 waterstanden, zie Tabel 2.2-Testserie 1.

Tabel 2.1 Basisproevenprogramma (voorgenomen proeven, zie bijlage B voor gerealiseerde proeven)

Test ID	H_{m0}	$T_{m-1,0}$	h_k	s_o	Test ID	H_{m0}	$T_{m-1,0}$	h_k	s_o
Test 101	1.00	3.58	1.25	5.0%	Test 141	2.50	6.33	4.50	4.0%
Test 102	1.00	4.00		4.0%	Test 142	3.00	6.20		5.0%
Test 111	1.00	4.62	1.75	3.0%	Test 143	2.00	8.00		2.0%
Test 112	1.50	4.38		5.0%	Test 144	2.50	7.31		3.0%
Test 113	1.00	5.66		2.0%	Test 151	3.00	6.93	4.0%	
Test 121	1.50	4.90	2.50	4.0%	Test 152	3.50	6.70	5.25	5.0%
Test 122	1.50	5.66		3.0%	Test 161	2.50	8.95	6.75	2.0%
Test 123	2.00	5.06		5.0%	Test 162	3.50	7.49		4.0%
Test 131	2.00	5.66		3.50	4.0%	Test 163	4.00		7.16
Test 132	1.50	6.93	2.0%		Test 164	4.00	8.00		4.0%
Test 133	2.50	5.66	5.0%						
Test 134	2.00	6.53	3.0%						

Alle testen zijn uitgevoerd voor 1000 golven. De stuurfiles zijn gemaakt op basis van de H_{m0} en T_p . De $T_{m-1,0}$ is echter gebruikt in de analyse.

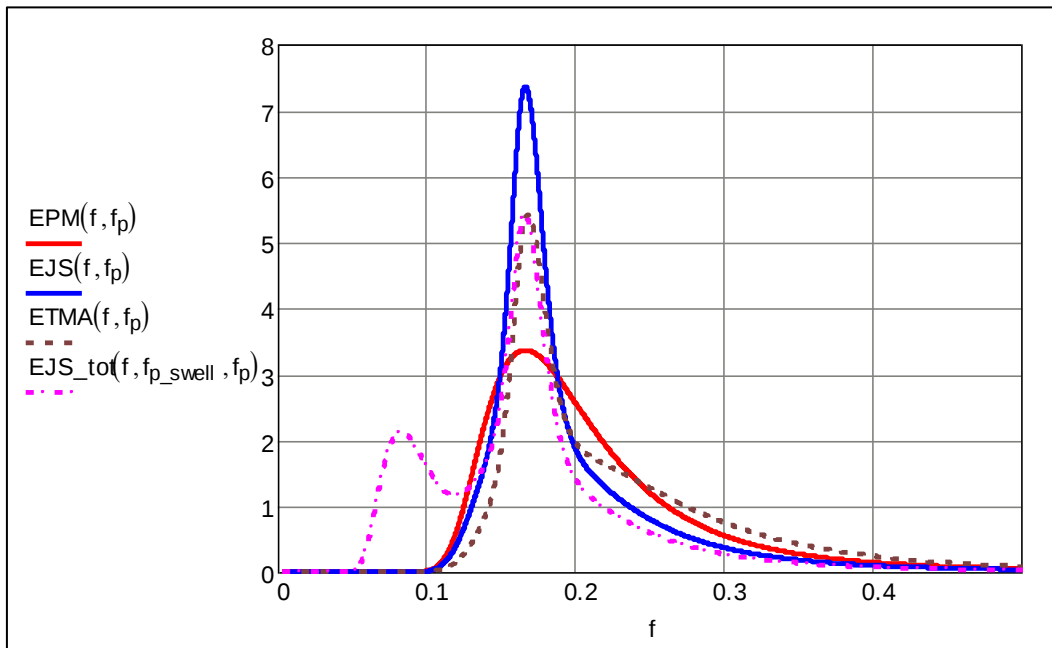
2.6.2 Spectrum

In de TAW-formule voor golfoverslag is ervoor gekozen om de energieperiode $T_{m-1,0}$ te gebruiken, waardoor er nog slechts een verwaarloosbare invloed is van de verschillende golfspectra. In het onderzoek van Van Gent (1999) en Van Gent (2001) is de afhankelijkheid van de deze spectrale energieperiode naar voren gekomen. De keuze voor een type golfspectrum is dan niet essentieel meer in golfoploop en overslag.

Het gekozen spectrum in dit onderzoek is voor de meeste proeven het theoretische JONSWAP spectrum. Dit spectrum past het beste voor golfcondities in de Waddenzee, het IJsselmeer en de Ooster- en Westerschelde. De golfcondities worden namelijk het meest gekarakteriseerd door jonge zeegangen. Grote noordwester stormen worden door de banken voor de Nederlandse kust gebroken en golfspectra zullen dan vaak gepieker zijn dan een Pierson-Moskowitz spectrum. Ook de 'beschermde' ligging van dijken in de Ooster- en Westerschelde zorgt ervoor dat de steenzettingen worden belast door golfcondities die bepaald worden door kleine strijklengtes en daardoor een typische jonge zeegang hebben. Een TMA spectrum voor het IJsselmeer is theoretisch ook mogelijk maar levert met name wat meer energie op in het hogere frequentiedeel zoals in Figuur 2.8 te zien is. Aangezien de verwachting was dat dit niet zou leiden tot andere conclusies ten aanzien van de ruwheid van de geometrie is er gekozen om toch een standaard JONSWAP spectrum te hanteren.

Een dubbelpiekig spectrum is ook meegenomen in het testprogramma aangezien een dergelijk spectrum in het oostelijk deel van de Waddenzee voorkomt en dient hier als verificatie of de keuze van het spectrum inderdaad niet essentieel is.

Het dubbelpiekige spectrum is als volgt opgebouwd: de H_{m0} is opgebouwd uit een deiningscomponent die gebaseerd is op het PM spectrum waarbij het deinings aandeel voor de meeste condities 10% van de totale energie uitmaakt en in sommige gevallen 30%. De andere component zal een JONSWAP spectrum zijn met windgolven met grotere golfsteilheid. De opgetelde spectra komen theoretisch overeen met de H_{m0} en $T_{m-1,0}$ van het standaard JONSWAP spectrum. In het testprogramma worden deze condities aangeduid met '_1' in geval van 10% deiningsaandeel en '_2' in geval van 30% deinings aandeel.



Figuur 2.8: Enkele voorbeelden van veel voorkomende golfspectra

2.6.3 Testseries

Onderstaand is een overzicht gegeven van de verschillende condities per testserie. In Testserie 1 met dambordpatroon (zie Figuren A-1.1 t/m A.1-5) zijn vijf relatieve kruinhoogtes getest (29 testen). Al deze testcondities zijn in Testserie 3 (glad 1:3 referentie talud van hout) herhaald. De overige series waren met name bedoeld om eventuele kleine opbouwverschillen te detecteren en waar mogelijk te kwantificeren. Testserie 1-specials (6 testen) is gevormd door andere combinaties van doorsneden en testcondities, bijvoorbeeld testconditie TC141 die eerst gecombineerd was met doorsnede 1-B is nu in de specials-serie gecombineerd met doorsnede 1-A, zie ook bovenste afbeeldingen van Figuren A-1.1, A-1.2 en A-1.4. In Testserie 2 (12 testen) is het dambord getest met een overlap van 40% in plaats van 20%, zie Figuren A-2.1 t/m A.2-2. In Testserie 4 (21 testen) is in plaats van een dambordpatroon gekozen voor een ribbenpatroon. Het verschil tussen 4-A en 4-D is de positie van het ribbenpatroon op het talud, zie ook Figuren A-4.1 en A-4.4. In Testserie 5 (21 testen) is de nokhoogte gevarieerd (Figuur A-5.1). In Testserie 6 (16 testen) is het ribbenpatroon op een 1:4 talud geplaatst (Figuur A-6.1). Het talud is verflauwd door te roteren ten opzichte van het snijpunt van de waterlijn met de constructie. De relatieve kruinhoogte is daardoor ook veranderd, maar het aantal ribben is gelijk gebleven. Als variant is ook nog een glad talud van kubussen beschouwd (Figuur A-6.2). In Testserie 7 (3 testen) zijn extreme overslaghoeveelheden getest op dezelfde doorsnede als in 6-A. In Testserie 8 (7 testen) is het ribbenpatroon op schaal 1:11 getest (zie Figuur A-8.1). Aangezien de kruinhoogte ten opzicht van de golfgoetbodem gelijk bleef, werd de waterdiepte flink kleiner en waren de golven diepte-gelimiteerd. In Testserie 9 zijn de unieke condities (18 testen) uit testseries 6, 7 en 8 op het referentietalud (een glad houten 1:4 talud) herhaald. Tabel 2.2 tot en met Tabel 2.10 geven een overzicht van de opgelegde condities.

Tabel 2.2: Testserie 1: dambord patroon met talud 1:3 en 20% overlap (doorsnede 1-A t/m 1-E) ; Testserie 3: houten talud 1:3 (doorsnede 3) (voorgenomen proeven, zie bijlage B voor gerealiseerde proeven)

Doorsnede	Testconditie	H_{m0}	T_p	$T_{m-1.0}$	h_k	s_o	spectrum
1-A 3	TC 151	3,0	7,62	6,93	6,50	4,00%	JONSWAP
	TC 152	3,5	7,37	6,70		5,00%	JONSWAP
	TC 153	2,5	9,85	8,95		2,00%	JONSWAP
	TC 154	3,5	8,24	7,49		4,00%	JONSWAP
	TC 155	4,0	7,88	7,16		5,00%	JONSWAP
	TC 156	4,0	8,80	8,00		4,00%	JONSWAP
	TC 151_1	3,0	-	6,93		4,00%	Dubbel-piekig
	TC 153_1	2,5	-	8,95		2,00%	Dubbel-piekig
	TC 153_2	2,5	-	8,95		2,00%	Dubbel-piekig
1-B 3	TC 141	2,5	6,96	6,33	4,50	4,00%	JONSWAP
	TC 142	3,0	6,82	6,20		5,00%	JONSWAP
	TC 143	2,0	8,80	8,00		2,00%	JONSWAP
	TC 144	2,5	8,04	7,31		3,00%	JONSWAP
	TC 141_1	2,5	-	6,33		4,00%	Dubbel-piekig
	TC 141_2	2,5	-	6,33		4,00%	Dubbel-piekig
1-C 3	TC 131	2,0	6,23	5,66	3,50	4,00%	JONSWAP
	TC 132	1,5	7,62	6,93		2,00%	JONSWAP
	TC 133	2,5	6,23	5,66		5,00%	JONSWAP
	TC 134	2,0	7,18	6,53		3,00%	JONSWAP
	TC 131_1	2,0	-	5,66		4,00%	Dubbel-piekig
	TC 131_2	2,0	-	5,66		4,00%	Dubbel-piekig
1-D 3	TC 121	1,0	6,23	5,66	2,50	2,00%	JONSWAP
	TC 122	1,5	5,39	4,90		4,00%	JONSWAP
	TC 123	1,5	6,23	5,66		3,00%	JONSWAP
	TC 124	2,0	5,57	5,06		5,00%	JONSWAP
1-E 3	TC 111	1,0	3,94	3,58	1,75	5,00%	JONSWAP
	TC 112	1,0	4,40	4,00		4,00%	JONSWAP
	TC 113	1,0	5,08	4,62		3,00%	JONSWAP
	TC 114	1,5	4,82	4,38		5,00%	JONSWAP

Tabel 2.3: Testserie 1: dambord met talud 1:3, specials (voorgenomen proeven, zie bijlage B voor gerealiseerde proeven)

Doorsnede	Testconditie	H_{m0}	T_p	$T_{m-1.0}$	h_k	s_o	spectrum
1-A	TC 141	2,5	6,96	6,33	4,5	4,00%	JONSWAP
	TC 144	2,5	8,04	7,31		3,00%	JONSWAP
1-B	TC 153	2,5	9,85	8,95	6,5	2,00%	JONSWAP
	TC 156	4,0	8,80	8,00		4,00%	JONSWAP
1-D	TC 153	2,5	9,85	8,95	6,5	2,00%	JONSWAP
	TC 156	4,0	8,80	8,00		4,00%	JONSWAP

Tabel 2.4: Testserie 2: dambord met talud 1:3 en 40% overlap (voorgenomen proeven, zie bijlage B voor gerealiseerde proeven)

Doorsnede	Testconditie	H_{m0}	T_p	$T_{m-1.0}$	h_k	s_o	spectrum
2-A	TC 131	2,0	6,23	5,66	3,50	4,00%	JONSWAP
	TC 132	1,5	7,62	6,93		2,00%	JONSWAP
	TC 133	2,5	6,23	5,66		5,00%	JONSWAP
	TC 134	2,0	7,18	6,53		3,00%	JONSWAP
	TC 131_1	2,0	-	5,66		4,00%	Dubbel-piekig
	TC 131_2	2,0	-	5,66		4,00%	Dubbel-piekig
2-B	TC 141	2,5	6,96	6,33	4,50	4,00%	JONSWAP
	TC 142	3,0	6,82	6,20		5,00%	JONSWAP
	TC 143	2,0	8,80	8,00		2,00%	JONSWAP
	TC 144	2,5	8,04	7,31		3,00%	JONSWAP
	TC 141_1	2,5	-	6,33		4,00%	Dubbel-piekig
	TC 141_2	2,5	-	6,33		4,00%	Dubbel-piekig

Tabel 2.5: Testserie 4: ribbenpatroon met talud 1:3 i.p.v. dambord (voorgenomen proeven, zie bijlage B voor gerealiseerde proeven)

Doorsnede	Testconditie	H_{m0}	T_D	$T_{m-1.0}$	h_k	s_o	spectrum
4-A	TC 141	2,5	6,96	6,33	4,50	4,00%	JONSWAP
	TC 142	3,0	6,82	6,20		5,00%	JONSWAP
	TC 143	2,0	8,80	8,00		2,00%	JONSWAP
	TC 144	2,5	8,04	7,31		3,00%	JONSWAP
	TC 141_1	2,5	-	6,33		4,00%	Dubbel-piekig
4-B	TC 131	2,0	6,23	5,66	3,50	4,00%	JONSWAP
	TC 132	1,5	7,62	6,93		2,00%	JONSWAP
	TC 133	2,5	6,23	5,66		5,00%	JONSWAP
	TC 134	2,0	7,18	6,53		3,00%	JONSWAP
	TC 131_1	2,0	-	5,66		4,00%	Dubbel-piekig
4-C	TC 122	1,5	5,39	4,90	2,50	4,00%	JONSWAP
	TC 123	1,5	6,23	5,66		3,00%	JONSWAP
	TC 124	2,0	5,57	5,06		5,00%	JONSWAP
4-D	TC 141	2,5	6,96	6,33	4,50	4,00%	JONSWAP
	TC 142	3,0	6,82	6,20		5,00%	JONSWAP
	TC 143	2,0	8,80	8,00		2,00%	JONSWAP
	TC 144	2,5	8,04	7,31		3,00%	JONSWAP
	TC 145	3,0	6,30	6,00		5,40%	JONSWAP
	TC 146	3,3	6,00	5,70		6,60%	JONSWAP
	TC 141_1	2,5	-	6,33		4,00%	Dubbel-piekig

Tabel 2.6: Testserie 5 dambord patroon van 6 rijen boven en onder water; 1:3; A versie nokhoogte = 0,24m, B versie nokhoogte = 0,35m, C versie met glad kubussen talud (nokhoogte = 0-0,02m) (voorgenomen proeven, zie bijlage B voor gerealiseerde proeven)

Doorsnede	Testconditie	H_{m0}	T_D	$T_{m-1.0}$	h_k	s_o	spectrum
5-A	TC 141	2,5	6,96	6,33	4,50	4,00%	JONSWAP
	TC 142	3,0	6,82	6,20		5,00%	JONSWAP
	TC 143	2,0	8,80	8,00		2,00%	JONSWAP
	TC 144	2,5	8,04	7,31		3,00%	JONSWAP
	TC 145	3,0	6,30	6,00		5,40%	JONSWAP
	TC 146	3,3	6,00	5,70		6,60%	JONSWAP
	TC 141_1	2,5	-	6,33		4,00%	Dubbel-piekig
5-B	TC 141	2,5	6,96	6,33	4,50	4,00%	JONSWAP
	TC 142	3,0	6,82	6,20		5,00%	JONSWAP
	TC 143	2,0	8,80	8,00		2,00%	JONSWAP
	TC 144	2,5	8,04	7,31		3,00%	JONSWAP
	TC 146	3,3	6,00	5,70		6,60%	JONSWAP
	TC 141_1	2,5	-	6,33		4,00%	Dubbel-piekig
5-C	TC 141	2,5	6,96	6,33	4,50	4,00%	JONSWAP
	TC 142	3,0	6,82	6,20		5,00%	JONSWAP
	TC 143	2,0	8,80	8,00		2,00%	JONSWAP
	TC 144	2,5	8,04	7,31		3,00%	JONSWAP
	TC 145	3,0	6,30	6,00		5,40%	JONSWAP
	TC 146	3,3	6,00	5,70		6,60%	JONSWAP
	TC 122	1,5	5,39	4,90	2,50	4,00%	JONSWAP
	TC 123	1,5	6,23	5,66		3,00%	JONSWAP

Tabel 2.7: Testserie 6 ribbenpatroon 1:4 i.p.v. 1:3; A versie nokhoogte = 0,24m, B versie met glad kubussen talud (nokhoogte = 0-0,02m) (voorgenomen proeven, zie bijlage B voor gerealiseerde proeven)

Doorsnede	Testconditie	H_{m0}	T_p	$T_{m-1.0}$	h_k	s_o	spectrum
6-A	TC 141	2,5	6,96	6,33	3,45	4,00%	JONSWAP
	TC 142	3,0	6,82	6,20		5,00%	JONSWAP
	TC 143	2,0	8,80	8,00		2,00%	JONSWAP
	TC 144	2,5	8,04	7,31		3,00%	JONSWAP
	TC 145	3,0	6,30	6,00		5,40%	JONSWAP
	TC 146	3,3	6,00	5,70		6,60%	JONSWAP
	TC 141_1	2,5	-	6,33		4,00%	Dubbel-piekig
	TC 141_2	2,5	-	6,33		4,00%	Dubbel-piekig
6-B	TC 141	2,5	6,96	6,33	3,45	4,00%	JONSWAP
	TC 142	3,0	6,82	6,20		5,00%	JONSWAP
	TC 143	2,0	8,80	8,00		2,00%	JONSWAP
	TC 144	2,5	8,04	7,31		3,00%	JONSWAP
	TC 145	3,0	6,30	6,00		5,40%	JONSWAP
	TC 146	3,3	6,00	5,70		6,60%	JONSWAP
	TC 141_1	2,5	-	6,33		4,00%	Dubbel-piekig
	TC 141_2	2,5	-	6,33		4,00%	Dubbel-piekig

Tabel 2.8: Testserie 7 ribbenpatroon 1:4 –extreme overslag (voorgenomen proeven, zie bijlage B voor gerealiseerde proeven)

Doorsnede	Testconditie	H_{m0}	T_p	$T_{m-1.0}$	h_k	s_o	spectrum
6-A	TC 251	4,5	8,40	8,00	3,45	4,50%	JONSWAP
	TC 252	5,0	8,93	8,50		4,40%	JONSWAP
	TC 253	5,5	9,45	9,00		4,30%	JONSWAP

Tabel 2.9: Testserie 8 ribbenpatroon op talud 1:4 met schaal 1:11 (voorgenomen proeven, zie bijlage B voor gerealiseerde proeven) (*Door de geringe waterdiepte kon de golfhoogte bij de gegeven golfperiode niet gehaald worden de golfmachine brak de sturing af na 670 golven)

Doorsnede	Testconditie	H_{m0}	T_p	$T_{m-1.0}$	h_k	s_o	spectrum
8	TC 341	2,2	8,4	8,00	3,45	2,20%	JONSWAP
	TC 342	2,2	7,35	7,00		2,90%	JONSWAP
	TC 343	2,7	8,4	8,00		2,70%	JONSWAP
	TC 344	2,5	6,3	6,00		4,40%	JONSWAP
	TC 345*	2,7	6,3	6,00		4,80%	JONSWAP
	TC 346	2,7	9,45	9,00		2,10%	JONSWAP
	TC 347	2,7	7,35	7,00		3,50%	JONSWAP

Tabel 2.10: Testserie 9 glad houten talud. A-versie schaal 1:22, B-versie schaal 1:11 (voorgenomen proeven, zie bijlage B voor gerealiseerde proeven) (*Door de geringe waterdiepte kon de golfhoogte bij de gegeven golfperiode niet gehaald worden de golfmachine brak de sturing af na 670 golven)

Doorsnede	Testconditie	H_{m0}	T_p	$T_{m-1.0}$	h_k	s_o	spectrum
9-A	TC 141	2,5	6,96	6,33	3,45	4,00%	JONSWAP
	TC 142	3,0	6,82	6,20		5,00%	JONSWAP
	TC 143	2,0	8,80	8,00		2,00%	JONSWAP
	TC 144	2,5	8,04	7,31		3,00%	JONSWAP
	TC 145	3,0	6,30	6,00		5,40%	JONSWAP
	TC 146	3,3	6,00	5,70		6,60%	JONSWAP
	TC 141_1	2,5	-	6,33		4,00%	Dubbel-piekig
	TC 141_2	2,5	-	6,33		4,00%	Dubbel-piekig
	TC 251	4,5	8,40	8,00		4,50%	JONSWAP
	TC 252	5,0	8,93	8,50		4,40%	JONSWAP
	TC 253	5,5	9,45	9,00		4,30%	JONSWAP
9-B	TC 341	2,2	8,4	8,00	3,45	2,20%	JONSWAP
	TC 342	2,2	7,35	7,00		2,90%	JONSWAP
	TC 343	2,7	8,4	8,00		2,70%	JONSWAP
	TC 344	2,5	6,3	6,00		4,40%	JONSWAP
	TC 345*	2,7	6,3	6,00		4,80%	JONSWAP
	TC 346	2,7	9,45	9,00		2,10%	JONSWAP
	TC 347	2,7	7,35	7,00		3,50%	JONSWAP

3 Analyse van de resultaten t.o.v. TAW (2002)

3.1 Inleiding

Ruim 160 proeven zijn uitgevoerd om de ruwheid van speciale geometrieën op een dijkta- lude te onderzoeken. Binnen deze 160 proeven zaten 29 unieke golfcondities op een 1:3 talud en 18 unieke golfcondities op een 1:4 talud. Deze unieke golfcondities zijn allemaal ook voor een glad referentietalud gedraaid.

Er is gekozen om de golfploopresultaten voorlopig nog niet te beschouwen. Deze data kan niet gemakkelijk gebruikt worden omdat bijvoorbeeld voor het referentietalud ongeveer 1 op 3 golven tot overslag heeft geleid. Een golfploopwaarde $z_{2\%}$ is dan niet te bepalen. Voor de testseries met een specifiek patroon was ook geen $z_{2\%}$ waarde af te leiden aangezien hier veel meer dan 1 op de 50 golven tot overslag heeft geleid.

De resultaten van de gemeten golfoverslagdebieten zijn weergegeven in Bijlage B. De golfcondities die aan de teen van de constructie gemeten zijn, staan hier ook.

De analyse is op twee manieren uitgevoerd:

- 1 Analyse van meting in relatie tot het TAW-Technisch Rapport "Golfploop en Overslag bij Dijken" (TAW 2002). Dat Technisch Rapport is de huidige standaard die gebruikt wordt voor het toetsen en ontwerpen van dijken in Nederland.
Door hiervan uit te gaan ontstaat echter het gevaar dat nog niet eerder geconstateerde trends over het hoofd gezien worden.
- 2 Analyse van proefparen
De proeven zijn steeds paarsgewijs uitgevoerd, waarbij steeds een proef is uitgevoerd zonder ruwheid en een met ruwheid. Door deze paarsgewijs te analyseren kunnen nieuwe trends ontdekt worden, maar is het moeilijker om trends en spreiding van elkaar te onderscheiden.

Beide methoden hebben dus hun voor- en nadeel. In dit hoofdstuk wordt de eerste methode gehanteerd en in hoofdstuk 4 de tweede.

3.2 Analyse van relatie tussen overslagdebiel en kruinhoogte

Zoals in TAW (2002) wordt er in deze analyse van de proeven onderscheid gemaakt tussen op het talud brekende en niet brekende golven. Voor gladde taluds zijn de volgende twee formules in TAW (2002) opgenomen met gemiddelde waarden van de coëfficiënten (voor probabilistische berekeningen), die het beste aansluiten bij de toen beschikbare metingen:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = \frac{0,067}{\sqrt{\tan \alpha}} \gamma_b \xi_{om} \cdot \exp \left(-4,75 \frac{h_k}{H_{m0}} \frac{1}{\gamma_b \gamma_f \gamma_\beta \gamma_v \cdot \xi_{om}} \right) \quad (\text{brekende golven}) \quad (3.1)$$

Met als maximum:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0,2 \cdot \exp \left(-2,6 \frac{h_k}{H_{m0}} \frac{1}{\gamma_f \gamma_\beta} \right) \quad (\text{niet-brekende golven}) \quad (3.2)$$

Met:

q = gemiddelde golfoverslagdebiel ($\text{m}^3/\text{m/s}$)

H_{m0}	= significante golfhoogte berekend uit het spectrum ($\approx H_s$) (m)
$T_{m-1,0}$	= spectrale golfperiode (-)
γ_f	= ruwheidscoëfficiënt die toegepast kan worden in golfoploop- en golfoverslagformules (-)
h_k	= kruinhoogte ten opzichte van de stilwaterlijn (m)
s_{om}	= $H_{m0}/(gT_{m-1,0}^2/(2\pi))$ = golfsteilheid op basis van $T_{m-1,0}$ (-)
g	= versnelling als gevolg van de zwaartekracht (m/s^2)
α	= taludhelling ($^\circ$)
ξ_{om}	= $\tan\alpha/\sqrt{s_{om}}$ = brekerparameter (-)
γ_b	= factor voor de invloed van een berm (= 1 in dit onderzoek) (-)
γ_β	= factor voor de invloed van de hoek van golfinval (= 1 in dit onderzoek) (-)
γ_v	= factor voor de invloed van een verticale wand op het talud (= 1 in dit onderzoek) (-)

Zodra formule (3.2) van toepassing is, is er sprake van niet-brekende golven en anders van brekende golven. Verder geldt volgens TAW (2002) dat de waarde van γ_f constant is voor $\xi_{om} < 1,8$ en loopt hij lineair op naar 1,0 tussen $1,8 < \xi_{om} < 10$ (lange golven en/of zeer steil talud).

Het huidige onderzoek richt zich op het bepalen van γ_f voor de taluds met damborden en taluds met ribben.

Allereerst is voor elk van de proeven beoordeeld of er sprake is van brekende golven of niet-brekende golven. Er is voor alle proeven berekend of het overslagdebiet volgens formule (3.1) of volgens formule (3.2) het grootste is om zo vast te stellen of er een belasting met brekende of niet-brekende golven was. Voor deze opsplitsing wordt gesteld dat $\gamma_f = 1$, want de waarde van de ruwheidsfactor heeft hierop nauwelijks invloed.

Met het zo verkregen onderscheid tussen brekende en niet-brekende golven zijn de gemeten waarden van de golfoverslag vergeleken met de berekende waarden volgens formules (3.1) en (3.2) met $\gamma_f = 1$. Dit is weergegeven in Figuur 7.1 t/m Figuur 7.12 in bijlage E.

In deze figuren is op de verticale as gebruik gemaakt van het dimensieloze overslagdebiet $q^* = q/\sqrt{(gH_{m0}^3)}$ op logaritmische schaal en op de horizontale as van de dimensieloze kruinhoogte $h_k^* = h_k/H_{m0}$. Bij de brekende golven is bovendien de waarde op de verticale as vermenigvuldigd met $(\sqrt{\tan\alpha})/\xi_{om}$ en die op de horizontale as is gedeeld door ξ_{om} . Op die manier kan in de figuur ook formule (3.1) weergegeven worden.

De getekende onzekerheid in formule (3.1) en (3.2) is in de figuren weergegeven door met een stippellijn de 5% onder- en overschrijdingslijn uit TAW (2002) te geven.

In alle figuren is met een rode lijn de trend in de meetpunten weergegeven, behalve in de figuren met een glad talud.

Uit Figuur 7.1 t/m Figuur 7.4 blijkt dat de metingen met een glad houten talud en met een gladde steenzetting goed overeenkomen met de formules van TAW (2002). Vrijwel alle metingen liggen binnen de betrouwbaarheidsband van de formules en ook gemiddeld is de afwijking gering (paar procent). De spreiding in de metingen met niet-brekende golven op het houten talud is vrij groot.

Verder valt op dat de proeven met een talud van 1:4 met brekende golven wat meer overslag geven dan volgens de formules van TAW (2002). Het is vooralsnog niet duidelijk waar dit aan ligt.

Ook de proeven met een vrij klein overslagdebiet zijn in de figuren opgenomen. Als $q < 0,005$ l/s/m in het model (0,5 l/s/m op prototype schaal) zou het resultaat beïnvloed kunnen zijn door

schaaleffecten. Dit komt ongeveer overeen met $q/\sqrt{(gH_{m0}^3)} \approx 5 \cdot 10^{-5}$. Deze metingen blijken bij een glad talud mooi tussen alle andere metingen te passen, maar bij een dambord met niet-brekende golven liggen de punten duidelijk lager dan de trend (Figuur 7.6). Deze proeven worden in het vervolg van deze analyse buiten beschouwing gelaten.

Sommige proeven zijn uitgevoerd met wat grotere golven ten opzichte van de waterdiepte ($2,8 < h/H_{m0} < 4$), waarbij door het breken van de golven in de goot de golfhoogteverdeling niet meer overeenkwam met de Rayleigh-verdeling. Dit zijn de groene driehoekjes in Figuur 7.1 en Figuur 7.2. Deze hebben een wat lagere overslag. Dit komt omdat vooral de hoogste golven, die het meeste overslag geven, tussen het golfschot en de dijk door het breken in hoogte verlaagd zijn. Deze proeven worden in het vervolg van deze analyse buiten beschouwing gelaten.

Bij enkele proeven was het overslagdebiet zo groot dat al na enkele tientallen golven de overslagbak vol zat en de proef gestopt moest worden. Deze proeven zijn daarom in delen uitgevoerd en zouden iets minder nauwkeurig kunnen zijn. De metingen zijn in Figuur 7.1 en Figuur 7.2 aangegeven met de kruisjes. Ze zijn uitgevoerd met een talud van 1:4. Het blijkt dat deze metingen vrij goed aansluiten op de trend van de overige metingen met een talud van 1:4. Desondanks zijn toch deze proeven in het vervolg van deze analyse buiten beschouwing gelaten, om alle twijfel over de kwaliteit van de geanalyseerde metingen te voorkomen.

3.3 Ruwheid

Met Figuur 7.1 t/m Figuur 7.12 uit bijlage E kan de ruwheid van het onderzochte talud vastgesteld worden. Er is namelijk een waarde van γ_f waarbij de formules (3.1) en (3.2) precies overeenkomen met de getrokken trendlijn (rode lijn in de figuren). De proeven met een erg klein overslagdebiet, brekende golven voor de constructie en proeven die in delen moesten worden uitgevoerd omdat het overslagdebiet zo groot was, zijn buiten beschouwing gelaten.

Op basis hiervan worden de volgende gemiddelde ruwheden verkregen:

ruwheid	brekende golven		niet-brekende golven	
	figuur	γ_f (-)	figuur	γ_f (-)
Glad houten talud	Figuur 7.1	1,02	Figuur 7.2	1,07
Gladde steenzetting	Figuur 7.3	0,98	Figuur 7.4	0,96
Dambord boven SWL	Figuur 7.5	0,73	Figuur 7.6	0,77
Ribben boven SWL	Figuur 7.7	0,76	Figuur 7.8	0,75
Dambord rond SWL	Figuur 7.9	0,82	Figuur 7.10	0,83
Ribben rond SWL	Figuur 7.11	0,82	Figuur 7.12	0,84

Tabel 3.1 Gemeten ruwheidsfactoren

De proeven die zijn uitgevoerd met een gladde steenzetting blijken een gemiddelde ruwheidscoëfficiënt te hebben van $\gamma_f = 0,97$. Die met een glad houten talud hebben een waarde die iets boven 1,0 ligt. De ruwheidscoëfficiënt van het gladde houten talud met niet-brekende golven blijkt vrij groot te zijn, maar ook de spreiding is erg groot, zoals te zien is in Figuur 7.2. Als deze metingen wat minder zwaar worden meegeteld, geldt gemiddeld voor brekende en niet-brekende golven dat $\gamma_{f,glad} = 1,03$ voor het gladde houten talud.

Het blijkt dat de damborden en ribben een ongeveer vergelijkbare ruwheidscoëfficiënt hebben. Als de ruwheid is aangebracht boven de stilwaterlijn tot aan de kruin, dan geldt een

gemiddelde waarde van ongeveer 0,75. Als de ruwheid alleen rond de stilwaterlijn is aangebracht en hoger op het talud er geen ruwheid aanwezig is, blijkt de ruwheidscoëfficiënt ongeveer 0,83 te zijn.

Of er een ribbenpatroon of een dambordpatroon wordt toegepast maakt dus kennelijk niets uit, maar als de golven tot boven het ribben/dambordpatroon op een glad talud kunnen komen, dan neemt de ruwheid af (grotere ruwheidscoëfficiënt).

In het proevenprogramma, dat in Figuur 7.1 t/m Figuur 7.12 is weergegeven, zijn ook nog andere aspecten gevarieerd (zie groene driehoeken in de figuren):

- De meest proeven zijn uitgevoerd met een overlap van 20% in de dambordgeometrie (20% van de breedte van de hoge dambordvlakken overlappen met elkaar). Sommige zijn echter uitgevoerd met een overlap van 40%.
- Er zijn proeven uitgevoerd met een 1,5 maal grotere ruwheidshoogte
- De meeste proeven zijn uitgevoerd met een talud van 1:3, maar er zijn ook enkele proeven gedaan met 1:4.

De ruwheid is voor elke proef uit de voor deze aspecten relevante series berekend met de volgende formules, die volgen uit herschrijven van formule (3.1) en (3.2):

$$\bullet \quad \text{brekende golven: } \gamma_{f, \text{proef}} = \frac{-4,75 \frac{h_k}{H_{m0}}}{\xi_{om} \cdot \ln \left(\frac{q \sqrt{\tan \alpha}}{0,067 \xi_{om} \sqrt{g H_{m0}^3}} \right)} \quad (3.3)$$

$$\bullet \quad \text{niet-brekende golven: } \gamma_{f, \text{proef}} = \frac{-2,6 \frac{h_k}{H_{m0}}}{\ln \left(\frac{q}{0,2 \sqrt{g H_{m0}^3}} \right)} \quad (3.4)$$

In Tabel 3.2 zijn de proefresultaten ten aanzien van deze aspecten met elkaar vergeleken. Steeds is de ruwheid gegeven die bepaald is op basis van de proeven met brekende golven, die met niet-brekende golven en de waarden die verkregen worden als alle proeven gemiddeld worden.

	Serie	Brekende golven	Niet-brekende golven	Gemiddeld over alle proeven
20% overlap	serie 1	0,73	0,79	0,76
40% overlap	serie 2a en 2b	0,76	0,83	0,79
normale ruwheidshoogte	serie 5a	0,83	0,85	0,84
1,5x grotere ruwheidshoogte	serie 5b	0,80	0,81	0,81
talud 1:3, ribben boven SWL	serie 4a b c	0,73	0,76	0,75
talud 1:4, ribben boven SWL	serie 6a	0,79	0,71	0,78
gladde steenzetting 1:3	serie 5c	0,94	0,97	0,95
gladde steenzetting 1:4	serie 6b	1,00	0,92	0,99

Tabel 3.2 Gemeten ruwheid tijdens de proevenseries met bijzondere aspecten

Het blijkt dat een overlap van 40% een iets grotere ruwheidscoëfficiënt geeft dan een overlap van 20%. Dit is logisch, omdat er met een toenemende overlap de opstaande randen, waar het

water tegenaan botst, steeds kleiner worden. Bij 100% overlap zijn er verticale stroken en zal de ruwheidscoëfficiënt bij loodrechte golfaanval ongeveer gelijk zijn als voor een gladde steenzetting.

Het verschil tussen 20% overlap en 40% overlap is niet bijzonder groot: slechts 0,03.

Bij een 1,5x grotere ruwheidshoogte neemt de ruwheidscoëfficiënt af (grotere ruwheid). Ook hierbij zien we een beperkt verschil, namelijk 0,03.

Bij een talud van 1:3 blijkt de ruwheidscoëfficiënt iets kleiner te zijn dan bij een talud van 1:4. Hetzelfde blijkt het geval te zijn bij een gladde steenzetting. Wellicht is dit dus een gevolg van de beperkte nauwkeurigheid van de TAW-formules ten aanzien van de invloed van de taludhelling.

3.4 Vergelijking met TAW (2002)

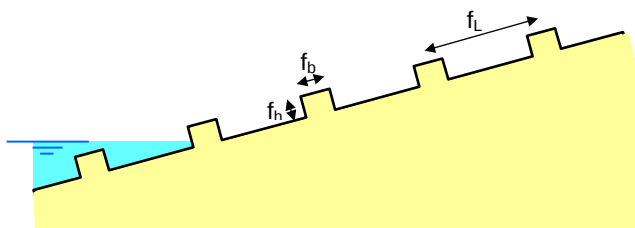
In TAW (2002) zijn de resultaten gepresenteerd van golfoploopprouwen met diverse soorten kunstmatige ruwheid. Het gaat om blokjes en ribbels op een verder glad talud (steenzetting).

Voor de afmetingen van de ruwheid worden de volgende parameters gebruikt (zie Figuur 3.1):

- f_h : hoogte van de ruwheidselementen (m)
- f_L : hart-op-hart afstand van de ruwheidselementen (langs het talud, haaks op de waterlijn) (m)
- f_b : breedte van de ruwheidselementen (langs het talud, haaks op de waterlijn) (m)

De optimale ribbelafstand is volgens TAW (2002): $f_L/f_h = 7$. Voor $5 < f_h/f_b < 8$ en als bovendien het totale oppervlak door blokken of ribbels is bedekt en als de hoogte $f_h/H_{m0} = 0,15$, dan geldt volgens TAW (2002) (veilige waarde):

- Blok, bedekt oppervlak 1/25 van totaal: $\gamma_f = 0,85$
- Blok, bedekt oppervlak 1/9 van totaal: $\gamma_f = 0,80$
- Ribbels, ribbelafstand $f_L/f_b = 7$ (optimaal): $\gamma_f = 0,75$



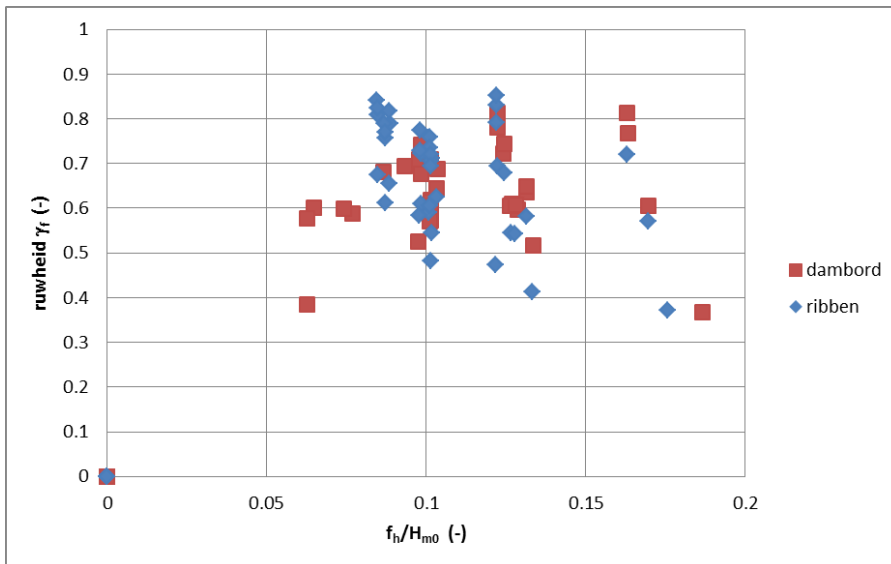
Figuur 3.1 Definitie van afmetingen ruwheidselementen in TAW (2002)

In de TAW (2002) staat overigens voor de optimale ribbelafstand $f_L/f_b = 7$, maar dat klopt niet gezien het achterliggende onderzoeksrapport. Verder lijkt het criterium $5 < f_h/f_b < 8$ ook een typefout te bevatten, maar met de onderzoeksrapporten is niet te achterhalen wat er bedoeld was.

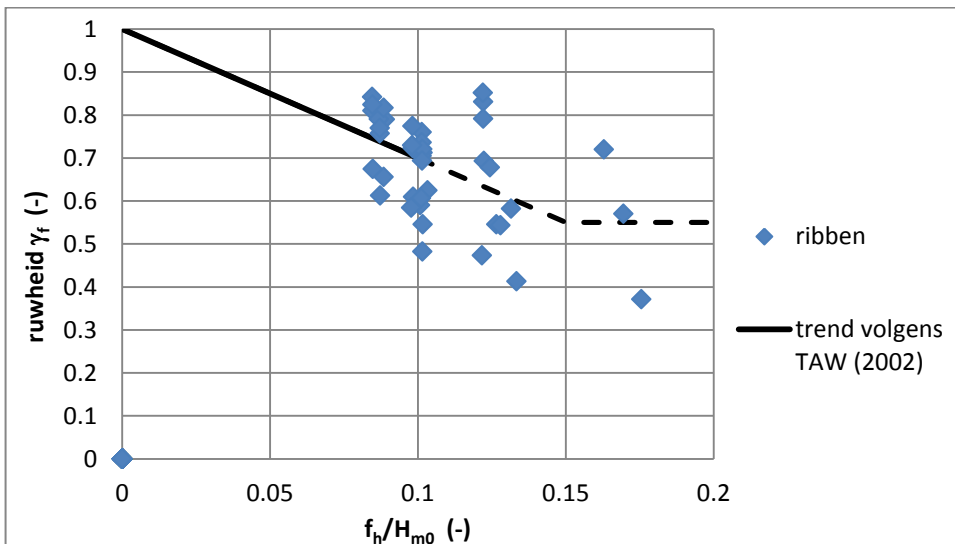
De blokjes hadden langs het talud omhoog dezelfde onderlinge afstand als in de richting evenwijdig aan de waterlijn.

Als de hoogte van de ribbels kleiner is dan $f_h/H_{m0} = 0,15$, dan moet lineair geïnterpoleerd worden naar $\gamma_f = 1$ bij $f_h = 0$.

In het huidige onderzoek waren de ribbels doorgaans wat kleiner, zoals te zien is in Figuur 3.2. Er is in de proefresultaten geen duidelijk relatie te zien tussen f_h/H_{m0} en γ_f , maar als alleen de proeven met ribben worden beschouwd, blijkt de puntenwolk niet strijdig te zijn met de conclusie van TAW (2002) dat er vanaf $f_h/H_{m0} = 0,15$ lineair kan worden geïnterpoleerd naar $\gamma_f = 1$ bij $f_h = 0$, zie Figuur 3.3.



Figuur 3.2 Gemeten ruwheid als functie van de ruwheidshoogte



Figuur 3.3 Gemeten ruwheid als functie van de ruwheidshoogte voor ribben, inclusief de trend volgens TAW (2002)

De verhouding $f_l/f_b = 2$ in het huidige onderzoek en ligt dus buiten de range van TAW (2002). Het lijkt echter minder logisch om de breedte van de ribbels in een criterium mee te nemen, omdat verwacht mag worden dat 4 keer smallere ribbels eenzelfde golfoverslagreductie geven als de in het onderzoek toegepaste ribbels. Het gaat immers vooral om de opstaande randen waar het oplopende water tegenop botst.

Het onderzoek dat ten grondslag lag aan TAW (2002) is Van der Meer en de Waal (1993). De resultaten uit dat onderzoek zijn samengevat in Tabel 3.3, samen met de huidige resultaten.

Een deel van het onderzoek was uitgevoerd met rechthoekige blokjes op een overigens glad talud of steenzetting. De horizontale afmetingen van de blokjes waren 1/5 van de hart-op-hart afstand in geval van het patroon met 1/25 bedekking en 1/3 van de hart-op-hart afstand bij 1/9 bedekking.

Patroon met blokken	f_h/f_b (-)	f_h/H_{m0} (-)	bedekking	γ_f (-)
1/25 blokopp.	0,88	0,11 – 0,21	1/25	0,85
1/9 blokopp.	0,88	0,11 – 0,17	1/9	0,80
Halve hoogte	0,44	0,05 – 0,11	1/25	0,90
Alleen boven SWL	0,88	0,11 – 0,16	1/25	0,90
Breed blok	0,18	0,10 – 0,20	1/4	0,80
Huidig boven SWL	0,22	0,08 – 0,16	1/2	0,75
Huidig rond SWL	0,22	0,08 – 0,16	1/2	0,83

Tabel 3.3 Geometrie van de ruwheidsblokken en resulterende ruwheidscoëfficiënt van Van der Meer en de Waal (1993) en het huidige onderzoek met ribbels/dambord boven de stilwaterlijn (SWL) en ribbels/dambord rond SWL (met standaard nokhoogte).

Voor het huidige patroon van ribben/dambord is de hoogte/breedte verhouding f_h/f_b wat kleiner dan bij de meeste proeven van Van der Meer en de Waal (1993). Alleen het brede blok heeft ongeveer dezelfde afmetingen als in het huidige onderzoek, waarbij ook f_h/H_{m0} ongeveer in dezelfde range ligt. De bedekking was bij die proeven wat minder, namelijk slechts 1/4 van het oppervlak, terwijl er in het huidige onderzoek gewerkt is met 1/2 van het oppervlak. Uitgaande van het resultaat van Van der Meer en de Waal (1993) met het brede blok, kan een verwachting gegeven worden van de ruwheid in het huidige onderzoek:

- Bij een 1/4 bezetting is de ruwheid van het brede blok 0,80
- Bij een 1/2 bezetting zou de ruwheid van het brede blok iets meer kunnen zijn, waardoor de ruwheidscoëfficiënt iets lager is, bijvoorbeeld: 0,75
- In het huidige onderzoek was de ruwheid in een deel van het onderzoek alleen boven SWL aangebracht. Daardoor zal de ruwheid weer iets minder zijn en dus de ruwheidscoëfficiënt iets hoger, bijvoorbeeld 0,80. Een dergelijke verhoging van de ruwheidscoëfficiënt is geconstateerd bij 1/25 bedekking in het onderzoek Van der Meer en de Waal (1993).
- In een ander deel van het huidige onderzoek was de ruwheid alleen rond SWL aanwezig, wat een nog iets hogere ruwheidscoëfficiënt zal geven: bijvoorbeeld 0,85.

Met bovenstaande redenering vanuit het onderzoek Van der Meer en de Waal (1993) komen we als schatting voor het huidige onderzoek met ribben/dambord boven SWL op $\gamma_f \approx 0,80$ en met ribben/dambord rond SWL op $\gamma_f \approx 0,85$. In het huidige onderzoek hebben we respectievelijk 0,75 en 0,83 gemeten. Gezien de vele stappen in bovenstaande redenering kan geconcludeerd worden dat de huidige proefresultaten vrij goed overeenkomen met die uit 1993.

In 1993 zijn ook proeven uitgevoerd met ribben. Een overzicht van de eigenschappen is gegeven in Tabel 3.4. Het blijkt dat de geometrie toen totaal anders was dan nu. De hoogte van de ribbels ten opzichte van de golfhoogte, f_h/H_{m0} , was echter wel redelijk vergelijkbaar, net als de onderlinge afstand ten opzichte van de hoogte: $f_L/f_h = 7$ en 9.

Dus wat betreft hoogte en hart-op-hart afstand, relatief berekend ten opzichte van de golfhoogte, zijn de proeven behoorlijk vergelijkbaar. In beide gevallen wordt een gemiddelde invloedsfactor van 0,75 gevonden. Maar bij de huidige proeven was er alleen

een ribbenpatroon boven water en zou op grond daarvan eerder een ruwheidscoëfficiënt van 0,80 verwacht worden. De gemeten waarde wijkt hier echter niet erg van af.

Patroon met ribben	f_h/f_b (-)	f_h/H_{m0} (-)	f_b/H_{m0} (-)	f_L/f_h (-)	f_L/H_{m0} (-)	γ_f (-)
Ribben 1993	1,00	0,12 – 0,19	0,12 – 0,20	7	0,8 – 1,5	0,75
Huidige ribben boven SWL	0,22	0,08 – 0,16	0,38 – 0,71	9	0,77 – 1,43	0,75
Huidige ribben rond SWL	0,22	0,08 – 0,16	0,38 – 0,71	9	0,77 – 1,43	0,83

Tabel 3.4 Geometrie van de ribben en resulterende ruwheidscoëfficiënt van Van der Meer en de Waal (1993) en het huidige onderzoek met ribbels/dambord boven de stilwaterlijn (SWL) en ribbels/dambord rond SWL.

3.5 Conclusie op basis van analyse t.o.v. TAW (2002)

Bovenstaande analyse van de proefresultaten, in vergelijking tot het onderzoek uit 1993 van Van der Meer en de Waal, geeft een goed beeld van de ruwheid van verschillende soorten ruwheidelementen. Hieruit worden de volgende conclusies getrokken:

- Ribben en damborden met $f_L/f_h \approx 6$ à 10 en $f_h/H_{m0} \approx 0,08$ à 0,19:
 - Ribben en damborden hebben een vergelijkbare ruwheid als ze een vergelijkbare geometrie hebben (hoogte en hart-op-hart afstand van het patroon)
 - De ruwheidscoëfficiënt van een volledig bezet talud is ongeveer 0,73 (iets lager dan de ribben van het onderzoek uit 1993, om goed in verhouding uit te komen met de huidige proeven met ribben boven SWL).
 - Als de ribben/dambord alleen boven SWL aanwezig zijn, dan is de ruwheidscoëfficiënt 0,77 (iets hoger dan de waarde uit het huidige onderzoek, om goed in verhouding uit te komen met de proeven uit 1993 met een volledig bezet talud)
 - Als de ribben/dambord alleen rond SWL aanwezig zijn, dan is de ruwheidscoëfficiënt 0,83 (deze waarde volgt uit het huidige onderzoek)
 - als de ruwheidshoogte een factor 1,5 hoger wordt, gaat de ruwheidscoëfficiënt met 0,03 omlaag (zie Tabel 3.2).
 - Als het dambordpatroon 40% overlap heeft, in plaats van 20%, gaat de ruwheidscoëfficiënt met 0,03 omhoog (zie Tabel 3.2).
- Ruwheidsblokken op een glad talud of op een steenzetting (resultaten uit Van der Meer en de Waal (1993) en TAW (2002)), als het totale oppervlak door blokken is bedekt en als de hoogte $f_h/H_{m0} \approx 0,11$ à 0,19:
 - Brede ruwheidsblokken op het hele talud met bedekt oppervlak van 1/4 van totaal: 0,80
 - Vierkante ruwheidsblokken met bedekt oppervlak 1/25 van totaal: 0,85
 - Vierkante ruwheidsblokken met bedekt oppervlak 1/9 van totaal: 0,80
 - Als de ruwheid alleen boven SWL is aangebracht, dan is de ruwheidscoëfficiënt ongeveer 0,05 hoger (gemeten bij 1/25 bedekking).

In het volgende hoofdstuk worden de proefparen (met en zonder ruwheid) geanalyseerd, hetgeen nieuwe inzichten geeft ten aanzien van de parameters die invloed hebben op de ruwheid, maar waarbij het lastiger is om de trends te onderscheiden van de natuurlijke spreiding in de proeven.

4 Analyse van proefparen

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk is de analyse gericht op de ruwheidscoëfficiënt die afgeleid kan worden uit een vergelijking van de uitgevoerde proeven met en zonder ruwheid. Deze zogenaamde proef waren zijn uitgevoerd met identieke golfcondities (dezelfde stuurfile voor het golfschot en dezelfde waterdiepte), waardoor het verschil in golfoverslag alleen veroorzaakt is door het verschil in ruwheid. Dit stelt ons in staat om nieuwe trends te identificeren, die nog niet naar voren waren gekomen in de TAW (2002).

Deze wijze van analyseren heeft echter wel een keerzijde. Er is het gevaar dat trends geïdentificeerd worden die eigenlijk veroorzaakt zijn door spreiding in de metingen. Bij de interpretatie van de analyseresultaten moet hier goed op gelet worden.

De ruwheidscoëfficiënt is voor elke proef bepaald met formule (3.3) en (3.4).

De zo verkregen ruwheidscoëfficiënten van de proeven is stapsgewijs geanalyseerd. Er is daarbij gezocht naar een formule voor de ruwheidscoëfficiënt van het ruwe talud met de volgende vorm:

$$1 - \gamma_f = (\text{invloed 1}) \cdot (\text{invloed 2}) \cdot (\text{invloed 3}) \cdot (\text{etc.})$$

De verschillende invloeden, zoals golfsteilheid of nokhoogte, zijn één voor één gekwantificeerd en als term aan de formule toegevoegd. Daarbij is steeds ook gekeken of het op deze wijze splitsen van alle invloeden in afzonderlijke termen in de formule tot bevredigende resultaten leidt.

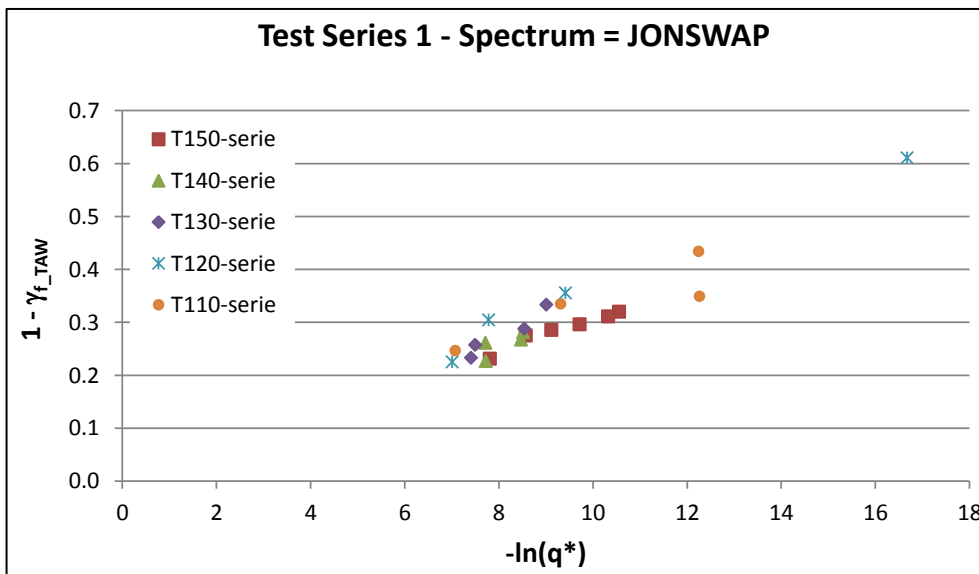
4.2 Golfoverslagvolume

Allereerst is in Figuur 4.1 te zien dat de ruwheid van het talud afneemt bij grotere overslaghoeveelheden. Grotere overslaghoeveelheden gaan gepaard met een grotere waterlaagdikte boven de ruwheidselementen (dikte watertong in de oploop). De dikte van de waterlaag is in principe de bepalende factor voor het effect van de ruwheidselementen. Hoe groter de waterlaagdikte, hoe minder effect er is van het patroon. De gemiddelde waterlaagdikte is afhankelijk van de relatieve golfoploop in verhouding tot de relatieve kruinhoogte. Deze waterlaagdikte neemt toe bij bijvoorbeeld een lagere kruin of grotere golf. In beide gevallen zal dit leiden tot een groter overslagdebiet. Om praktische redenen wordt gekozen om hier een relatie af te leiden waarin het dimensieloze overslagdebiet wordt gebruikt. Dit is mogelijk omdat dit een maat is voor de gemiddelde waterlaagdikte. In Figuur 4.1 is de ruwheid geplot op de y-as als $1 - \gamma_f$. Hoe groter $(1 - \gamma_f)$, hoe groter de ruwheid en hoe kleiner de overslag. Horizontaal is de natuurlijke logaritme van het dimensieloze overslagdebiet

$$q^* \text{ uitgezet: } q^* = \left(\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_s^3}} \right).$$

De volgende relatie volgt uit de metingen:

$$1 - \gamma_{f_TAW} = -0,033 \cdot \ln(q^*) \quad (4.1)$$



Figuur 4.1: ruwheidsparameter als functie van het dimensieloos overslagvolume

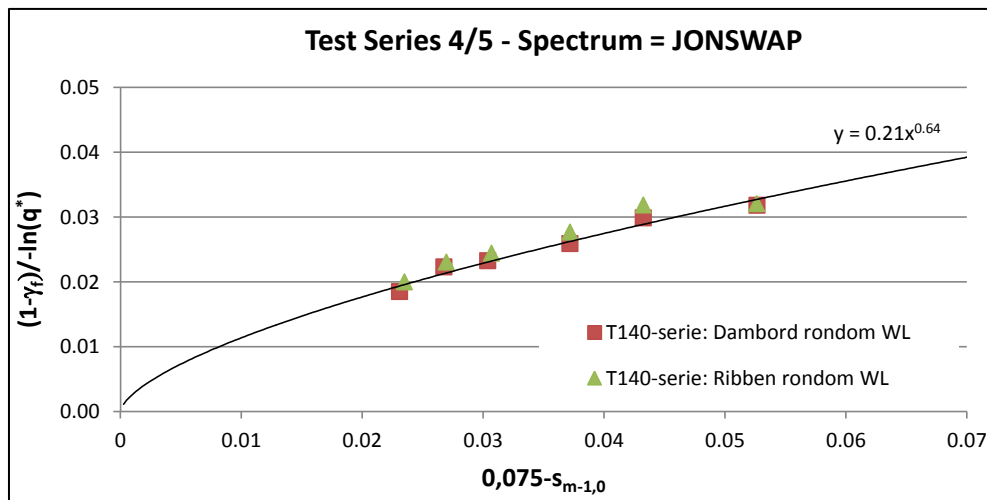
4.3 Golfsteilheid

In de volgende stap is eerst de ruwheid gecorrigeerd voor de overslaghoeveelheid op basis van het resultaat in de vorige paragraaf. Dit is bereikt door $1 - \gamma_f$ te delen door $-\ln(q^*)$ gezien de vastgestelde lineaire relatie. Daarmee is een nieuwe ruwheidsparameter verkregen, die niet beïnvloed wordt door de overslaghoeveelheid, namelijk: $(1 - \gamma_f)/(-\ln(q^*))$.

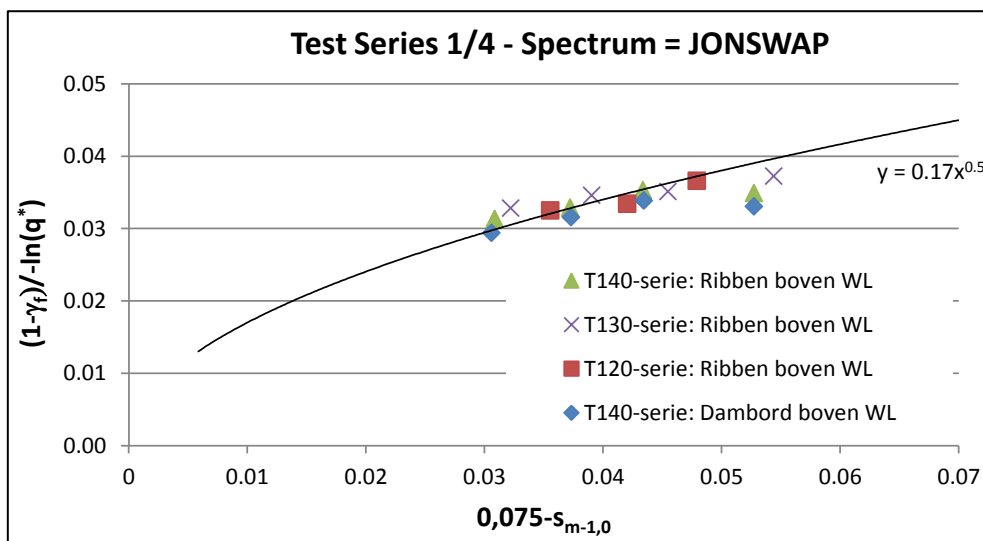
Deze waarde is vervolgens vergeleken met de invloed van de golfsteilheid. De beste fit wordt verkregen door te werken met een golfsteilheid waarbij de golflengte is afgeleid op basis van de waterdiepte aan de teen van de constructie. Naast de lokale waterdiepte wordt de $T_{m-1,0}$ gebruikt om de golfsteilheid te bepalen. In Figuur 4.2 is deze op de horizontale as uitgezet als "0,075 - $s_{m-1,0}$ ". De waarde 0,075 wordt hier gezien als maximale golfsteilheid.

Twee series worden gebruikt in Figuur 4.2 waarbij de golfsteilheden varieerden tussen de 2% en 5%. De ruwheidselementen lagen rondom de waterlijn en niet tot aan de kruin. Zowel het dambordpatroon als het ribbenpatroon is hier uitgezet. Er wordt een relatie gevonden evenredig met de wortel van de golfsteilheid. Ruwheidselementen gedragen zich iets ruwer bij lange golven dan bij steile golven. Daarnaast varieert de verhouding $H_{2\%}/H_s$ van ongeveer 1,4 voor korte golven (4-5% golfsteilheid) tot 1,3 voor lange golven (2% golfsteilheid). Doordat de hoogste golven bij lange golven kleiner zijn dan bij korte golven zal het overslagdebiet ook kleiner zijn. Automatisch wordt dan voor lange golven een ruwere waarde voor de ruwheidselementen gevonden.

Een vergelijkbare figuur (Figuur 4.3) is gemaakt voor wanneer het patroon boven de waterlijn is aangebracht. De datapunten liggen redelijk rondom de trendlijn. De golfsteilheden varieerden hier ongeveer tussen de 2% en 4%. In deze figuur is wederom zowel een dambordpatroon als een ribbenpatroon gebruikt. Daarnaast zijn meerder series met het ribbenpatroon (verschillende relatieve kruinhoogten) gebruikt.



Figuur 4.2: Voor overslag gecorrigeerde ruwheidsparameter ten opzichte van de lokale golfsteilheid-ruwheid rondom waterlijn (WL = waterlijn)



Figuur 4.3: Voor overslag gecorrigeerde ruwheidsparameter ten opzichte van de lokale golfsteilheid-ruwheid boven waterlijn

4.4 Nokhoogte

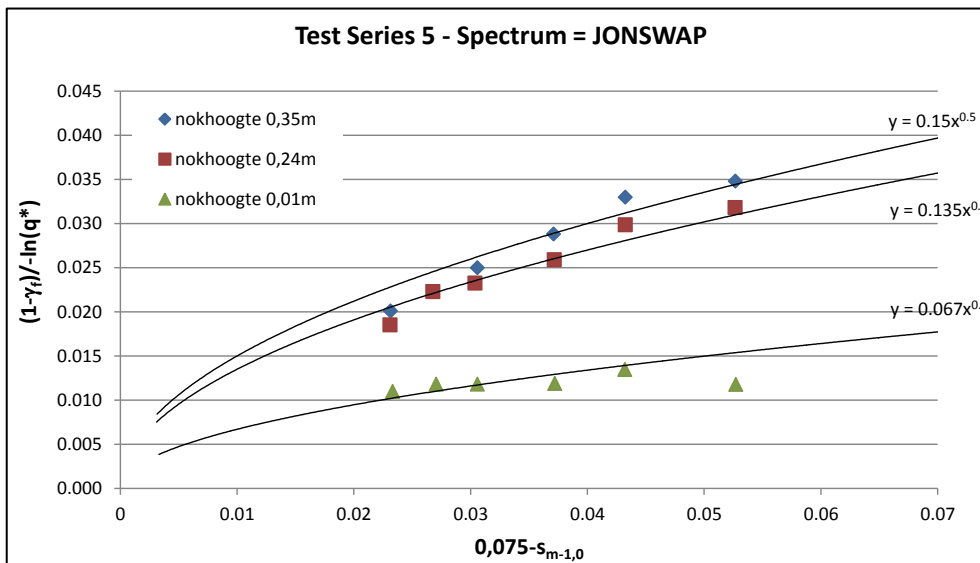
In de derde stap wordt de voor overslag verdisconteerde ruwheid wederom uitgezet tegen de golfsteilheid, zoals hierboven. Dit wordt gedaan voor de drie testseries waarin gevarieerd is met de nokhoogten. In deze stap wordt de nokhoogte eerst als individuele parameter beschouwd. In paragraaf 4.7 zal de variatie in nokhoogte uiteindelijk worden samengevoegd met de variatie in ruwheidsbreedte (ruwheidsbreedte = totale lengte aan ruwheidselementen per m dijklengthe), die samen in de vorm van een ruwheidsdichtheid worden toegepast.

De meeste proeven zijn gedaan met een nokhoogte van 0,24m. Daarnaast is er een serie beproefd met een nokhoogte van 0,35m en een serie met een nokhoogte van ongeveer 0,01m, oftewel een relatief glad talud. Deze laatste nokhoogte is een geschatte gemiddelde waarde aangezien dit in het model een nokhoogte van 0,5mm betekende. Dit patroon wordt beschouwd als een standaard steenzetting. In Figuur 4.4 zijn deze series geplott. De gemiddelde trendlijn die door de punten loopt, komt vrij goed overeen met de formulering $y = c_1 \cdot \sqrt{(0,075 - s_{m-1,0})}$. De constante c_1 varieert logischerwijs voor de 3 nokhoogtes. In Figuur 4.4

zijn de lijnen getekend met c_1 van respectievelijk 0,150, 0,135 en 0,067. Deze waarden van c_1 sluiten goed aan op de volgende formule: $c_1 = 0,194 \cdot (h_{nok})^{0,25}$.

De formulering $y = c_1 \cdot \sqrt{(0,075 - s_{m-1,0})}$ is dan echter niet meer dimensieloos omdat c_1 nu niet dimensieloos is.

In eerder onderzoek met ruwheidselementen op een dijkbekleding werd een dimensieloze nokhoogte gebruikt door de nokhoogte te delen door de significante golfhoogte. In het TR Golfploop en Golfoverslag bij dijken (TAW 2002) staat deze formulering als formule (15) weergegeven. Deze dimensieloze grootheid bleek echter niet bruikbaar op deze dataset van het dambord-ribbenpatroononderzoek.



Figuur 4.4: Voor overslag gecorrigeerde ruwheidsparemeten ten opzichte van de lokale golfsteilheid: drie verschillende nokhoogtes

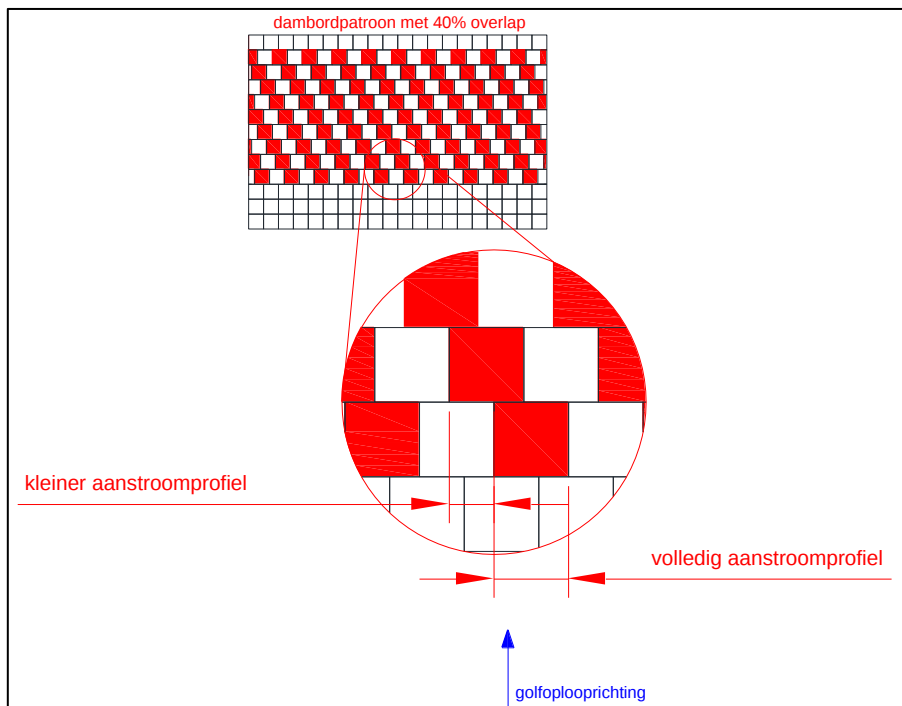
Om de formulering toch dimensieloos te maken wordt hier gekozen om de nokhoogte relatief te maken ten opzichte van referentienokhoogte van 0,20m. Een nokhoogte van 0,20m wordt hier gezien als een waarde waarbij ruwheidselementen een significant verschil kunnen uitmaken in het beperken van de golfploophoogte. De coëfficiënt c_1 wordt dan bepaald met de formule $c_1 = 0,13 \cdot (h_{nok}/h_{refnok})^{0,25}$. De formulering wordt daarmee:

$$\frac{1 - \gamma_f}{-\ln(q^*)} = 0,13 \cdot \left(\frac{h_{nok}}{h_{refnok}} \right)^{0,25} \cdot \sqrt{0,075 - s_{m-1,0}} \quad (4.2)$$

4.5 Ruwheidsdichtheid talud

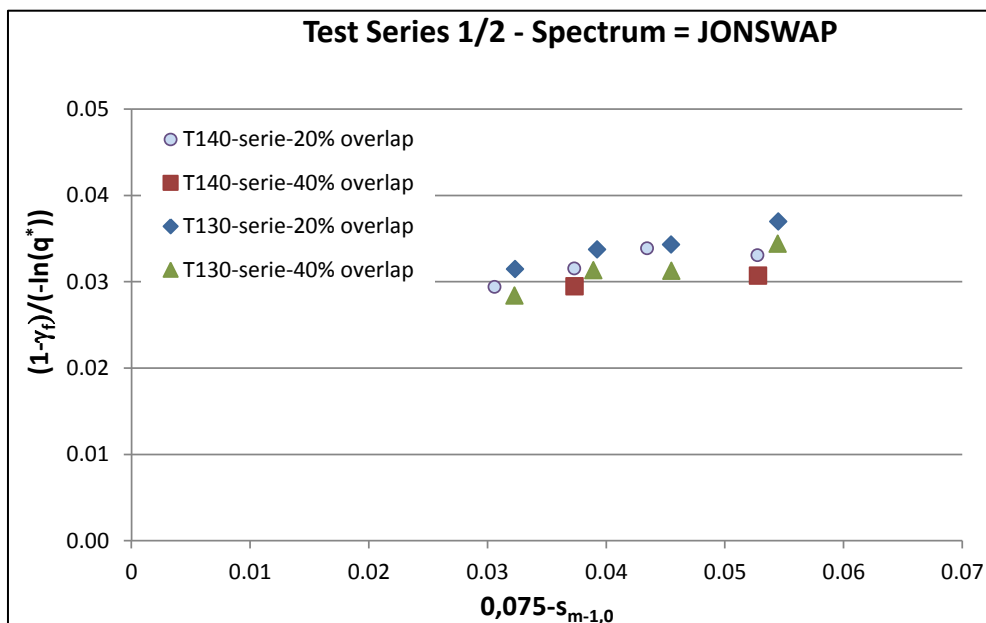
In de vierde stap wordt de voor overslag verdisconteerde ruwheid wederom uitgezet tegen de golfsteilheid, zoals hierboven. Dit wordt allereerst gedaan voor de testseries met het dambordpatroon waarin gevarieerd is met de grootte van overlap. In deze stap wordt een ruwheidsdichtheid van het talud gedefinieerd. In paragraaf 4.7 zal uiteindelijk gekozen worden om de variatie in ruwheidsdichtheid samen te voegen met de variatie in nokhoogte.

Het dambordpatroon van testserie 1 had een overlap van 20%. Het dambordpatroon van testserie 2 had een overlap van 40%. Het aanstroomprofiel, dat gedefinieerd wordt als het oppervlak dat de golfploop direct blokkeert, zie Figuur 4.5, was kleiner bij een dambordoverlap van 40% dan bij 20%.



Figuur 4.5: definitie aanstroombroef, rode kubussen steken uit boven witte

In Figuur 4.6 is te zien dat de datapunten van de testseries met 40% overlap lager liggen dan die met 20% overlap. Dat betekent dus dat het dambordpatroon met 40% relatief gezien gladder is en dus een hogere waarde van de ruwheidscoëfficiënt heeft. Het verschil in aanstroombroef blijkt dus een maat te zijn die verband heeft met het gevonden verschil in overslag. Het verschil in aanstroombroef wordt verdisconteerd in een parameter die de ruwheidsdichtheid voorstelt.



Figuur 4.6: Voor overslag gecorrigeerde ruwheidsparameter ten opzichte van de lokale golfsteilheid; dambord met verschillende grootte overlap

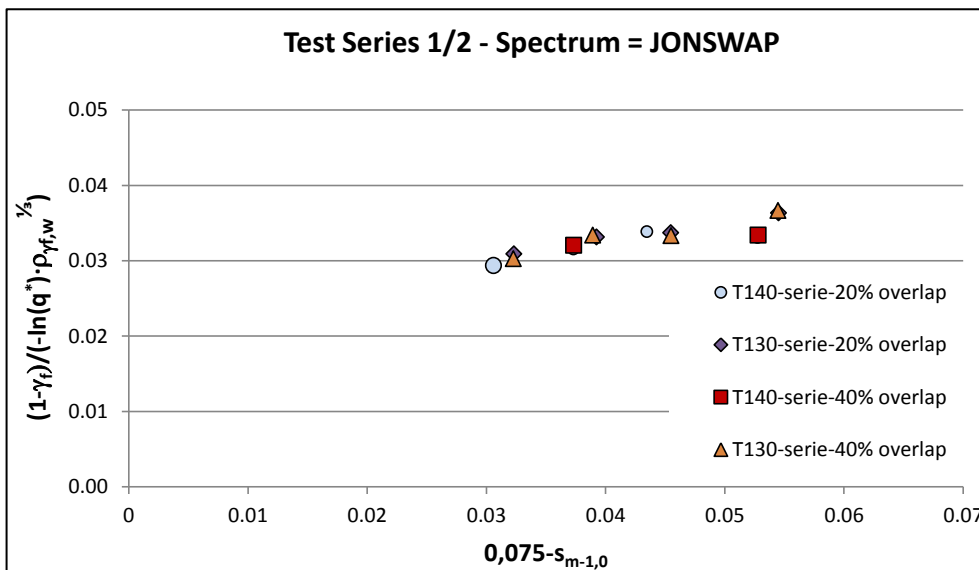
Om de lineaire ruwheidsdichtheid te bepalen wordt het aantal meters ruwheidselement dat aangestroomd wordt per constructie bepaald. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen het aantal meters onder de waterlijn en boven de waterlijn. Het eerste dambordpatroon uit testserie 1 had 16 rijen met gemiddeld 10 elementen die voor 80% aangestroomd konden worden en 1 rij (de onderste) met 10 elementen die voor 100% aangestroomd konden worden. In totaal dus 138 elementen van 1,10m breed. Aangezien de goot een breedte voorstelde van 22m, leverde dit 6,9m ruwheidsbreedte op per meter dijk. Dit aantal meters was verdeeld over een zekere hoogte. De relatieve kruinhoogte h_k bedroeg voor het eerste dambordpatroon 6,5m. Door deze ruwheidsbreedte te delen door de relatieve kruinhoogte wordt een ruwheidsdichtheid gevonden van $\rho_{\gamma_{f,w}} = \frac{\gamma_{f,w}}{h_k} = \frac{6,9}{6,5} = 1,062$ per m.

waarbij:

$\rho_{\gamma_{f,w}}$ = lineaire ruwheidsdichtheid [1 / m]

$\gamma_{f,w}$ = ruwheidsbreedte per meter dijk [–]

Op deze manier wordt het verschil in aanstroomprofiel tussen het dambord met 40% overlap en het dambord met 20% overlap in de vorm van een lineaire ruwheidsdichtheid gekenmerkt. In Figuur 4.7 is de voor overslag gecorrigeerde ruwheidsparameter tevens gecorrigeerd voor het verschil in lineaire ruwheidsdichtheid. Het blijkt dat de ruwheidsdichtheid tot de macht $\frac{1}{3}$ de beste overeenkomst oplevert tussen de individuele punten van de configuratie met 20% overlap en de configuratie met 40% overlap.



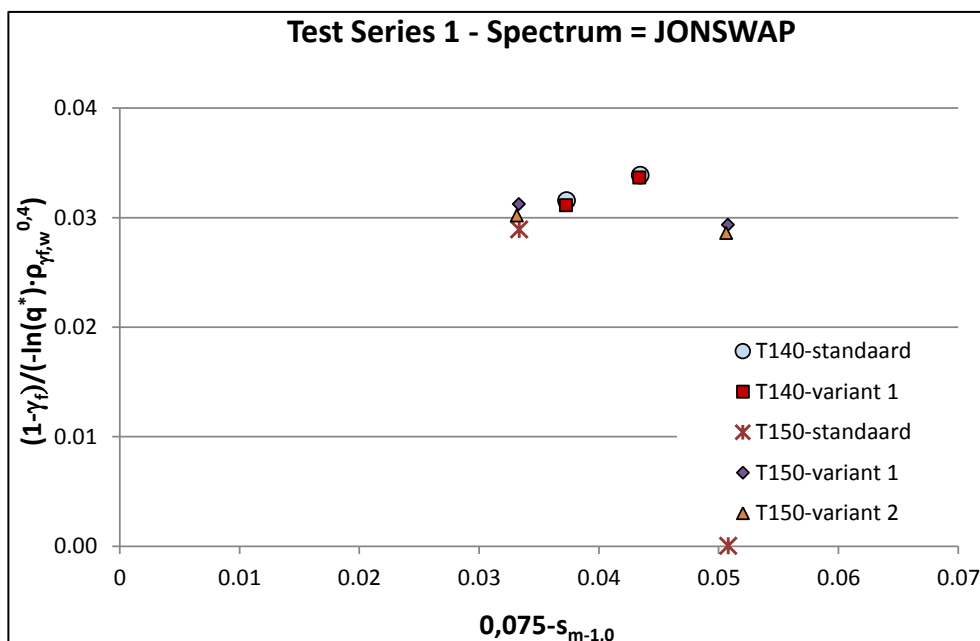
Figuur 4.7: Voor overslag en ruwheidsdichtheid gecorrigeerde ruwheidsparameter ten opzichte van de lokale golfsteilheid; dambord met verschillende grootte overlap

Een lineaire ruwheidsdichtheid kan ook voor het ribbenpatroon berekend worden. Bij het eerste ribbenpatroon van testserie 4 waren er 6 rijen met 17 elementen per rij die volledig aangestroomd konden worden. In totaal dus 102 elementen van 1,10m breed. Dit levert dan een ruwheidsbreedte $\gamma_{f,w}$ op van 5,1m per meter dijk. De relatieve kruinhoogte h_k bedroeg 4,5m. De lineaire ruwheidsdichtheid $\rho_{\gamma_{f,w}}$ kwam daarmee neer op 1,133. Op deze manier kan dus voor iedere constructie een lineaire ruwheidsdichtheid worden bepaald, zo ook voor de “specials” uit testserie 1.

De “specials” uit testserie 1 bestonden uit een situatie waarbij het dambord doorliep onder water (T140-variant 1) en twee situaties waarbij de waterstand ver onder de onderste rij van het patroon lag (T150-variant 1 en T150-variant 2).

Twee testcondities (T153 en T156) die gebruikt zijn bij het eerste dambordconfiguratie (T150-serie) zijn herhaald voor het tweede (T150-variant 1) en vierde dambordconfiguratie (T150-variant 2), waarbij de relatieve kruinhoogte van het eerste dambordconfiguratie is gebruikt om daarmee een waterstand tot ver onder de onderste rij van het patroon te verkrijgen. Hierdoor waren er in plaats van 17 rijen dambord (standaard case) boven de waterlijn, 11 rijen (T150-variant 1) en 6 rijen (T150-variant 2) dambord boven de waterlijn. De overslag nam hierdoor toe en daarmee werd de berekende ruwheid van het talud logischerwijs kleiner. Dit kan alleen toegeschreven worden aan het aantal meters ruwheid en daarmee dus aan de lineaire ruwheidsdichtheid van het talud. In Figuur 4.8 zijn deze T150-testen uitgezet, waarbij de ruwheidsdichtheid op de verticale as is meegenomen. In plaats van een coëfficiënt $\frac{1}{3}$ wordt de beste match hier verkregen met de factor 0,4.

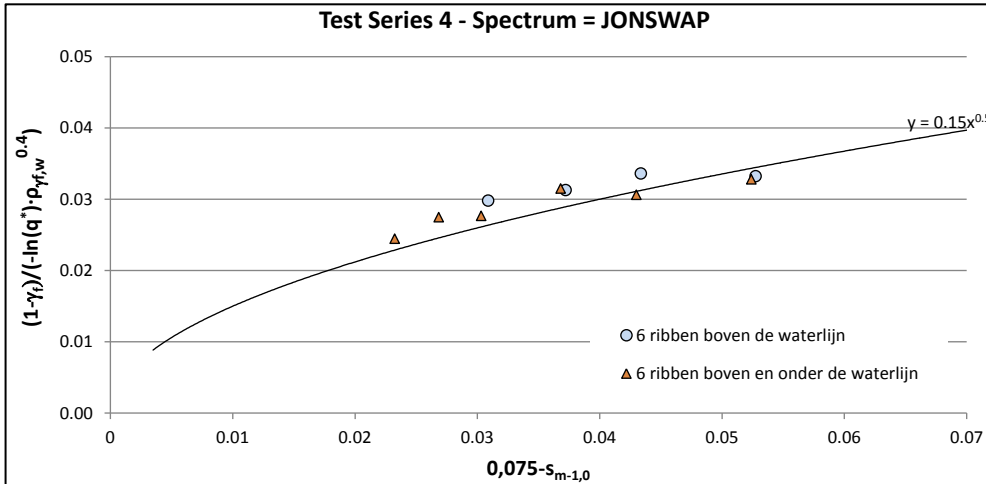
In Figuur 4.8 is ook de standaard case en de variant geplot waarbij twee condities uit de T140-serie zijn beproefd op het dambordpatroon uit de eerste serie. Het dambordpatroon liep voor deze variant 1 dus door onder de waterlijn. Het effect van ruwheidselementen onder de waterlijn blijkt niet een evenredige bijdrage te hebben als de ruwheidselementen boven water. Om een passende match te vinden zijn slechts 2 van de 5 rijen onder water in de ruwheidsbreedte meegenomen. De lineaire ruwheidsdichtheid wordt voor deze T140-variant 1 dus berekend door de ruwheidsbreedte boven water op te tellen met ongeveer 50% van de ruwheidsbreedte onder water (per meter dijk) en deze te delen door de kruinhoogte ten opzichte van de waterlijn.



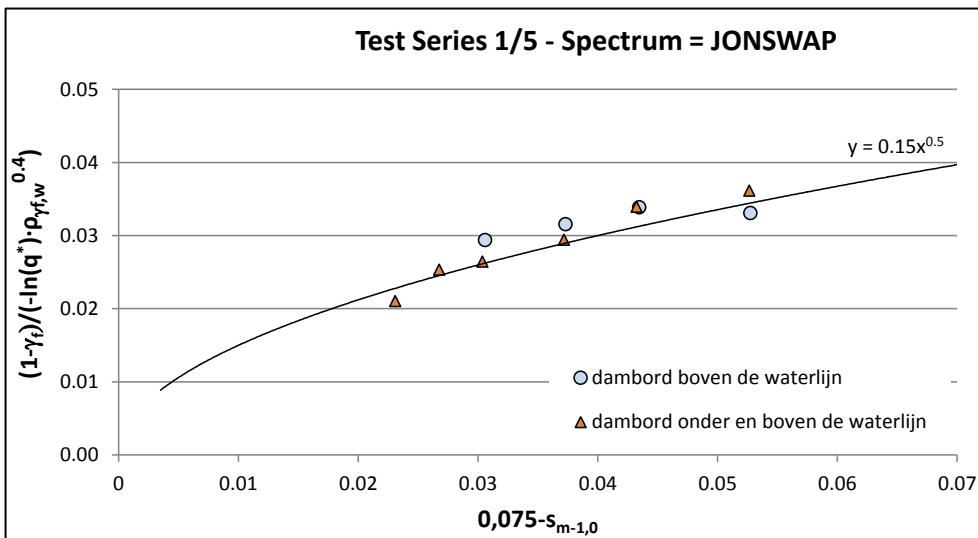
Figuur 4.8: Voor overslag en ruwheidsdichtheid gecorrigeerde ruwheidsparameter ten opzichte van de lokale golfsteilheid; “specials”

Deze lineaire ruwheidsdichtheid waarbij slechts 50% van de ruwheidsbreedte onder water wordt meegenomen is ook toegepast voor de vergelijking tussen 6 ribben boven de waterlijn (case 4a) en 6 ribben rondom de waterlijn. In Figuur 4.9 zijn deze twee series weergegeven. Twee testcondities komen perfect uit en twee iets minder.

Figuur 4.10 laat een vergelijkbare plot zien waarbij twee series met het dambordpatroon gebruikt zijn. De spreiding rondom de lijn is hier groter. Alleen het meest rechtse punt heeft een perfect match. Hoe steiler de golf, hoe groter de afwijking wordt.



Figuur 4.9: Voor overslag en ruwheidsdichtheid gecorrigeerde ruwheids-parameter ten opzichte van de lokale golfsteilheid; ribbenpatroon alleen boven en zowel boven als onder de waterlijn

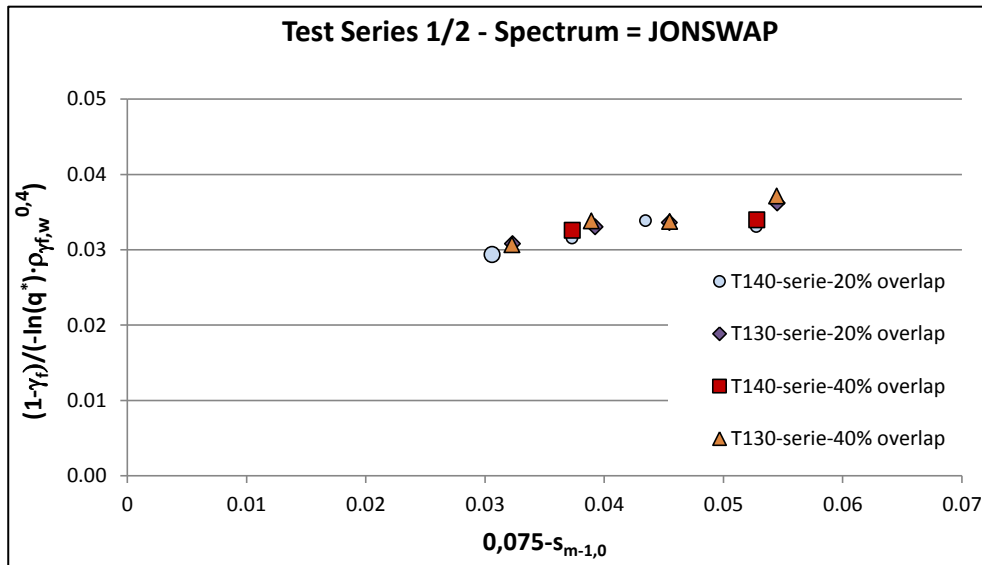


Figuur 4.10: Voor overslag en ruwheidsdichtheid gecorrigeerde ruwheids-parameter ten opzichte van de lokale golfsteilheid; dambordpatroon alleen boven en zowel boven als onder de waterlijn

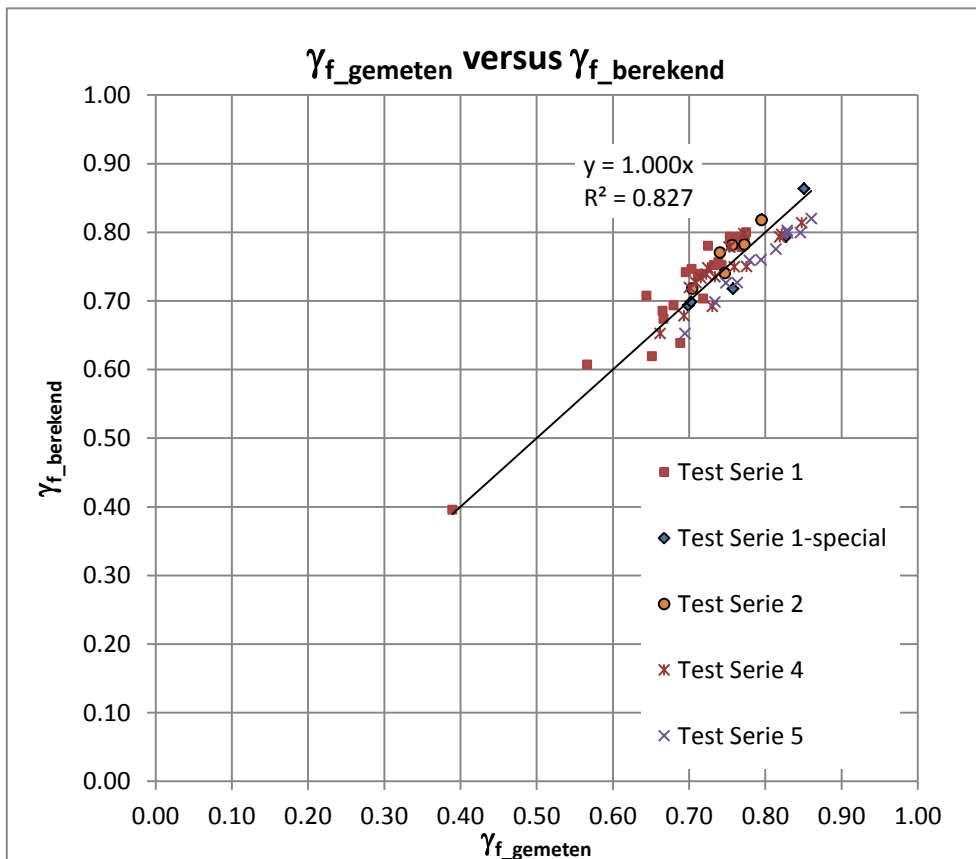
In Figuur 4.11 is het dambordpatroon nogmaals geplot waarbij de overlap in testserie 1 kleiner was dan in testserie 2. In Figuur 4.7 was deze geplot waarbij de lineaire ruwheidsdichtheid een exponent had van $\frac{1}{3}$. In Figuur 4.11 is deze aangepast tot 0,4 om daarmee aan te sluiten op de vorige grafieken. De match is ook voor deze macht nog steeds goed.

De ruwheid is zoals hierboven beschreven afhankelijk van de hoeveelheid overslag, de (lokale) golfsteilheid, de nokhoogte en de lineaire ruwheidsdichtheid van het talud. In formulevorm ziet dat er als volgt uit:

$$1 - \gamma_f = C \cdot \sqrt{0,075 - s_{m-1,0}} \cdot \rho_{\gamma f,w}^{0,4} \cdot \left(\frac{h_{nok}}{h_{refnok}} \right)^{0,25} \cdot \left(-\ln \left(\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_s^3}} \right) \right) \quad (4.3)$$



Figuur 4.11: Voor overslag en ruwheidsdichtheid gecorrigeerde ruwheids-parameter ten opzichte van de lokale golfsteilheid; dambordpatroon met 20% en 40% overlap



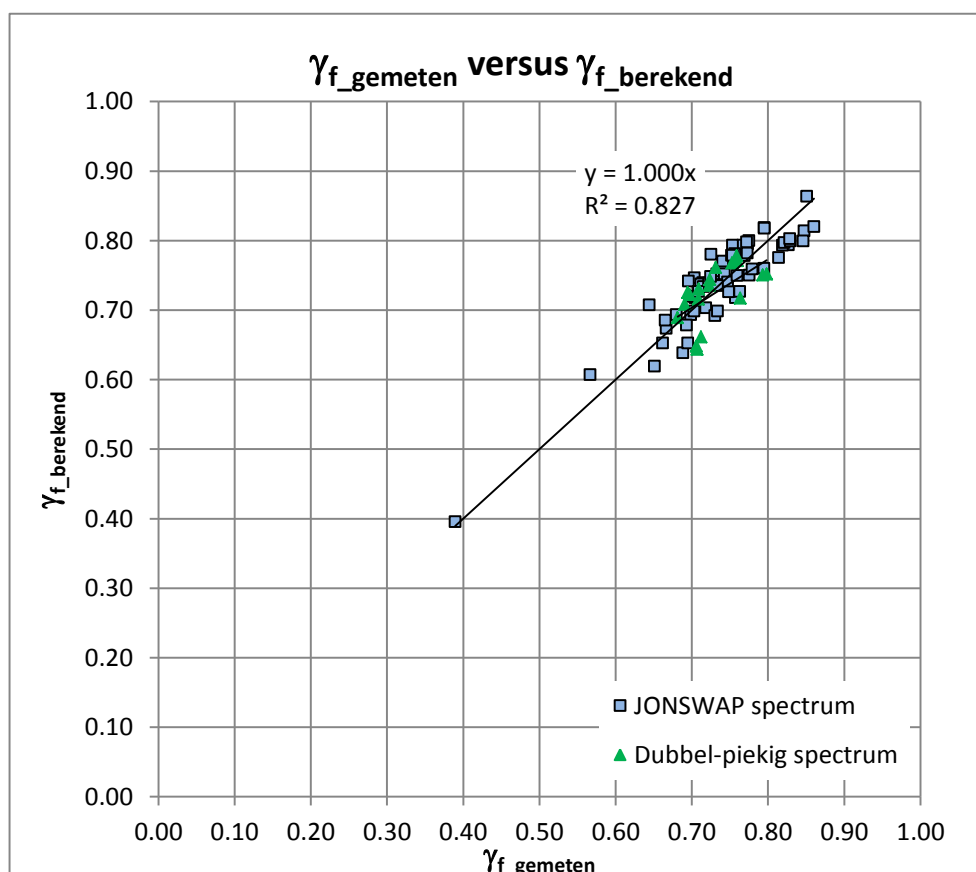
Figuur 4.12: Vergelijking gemeten γ_f versus berekende γ_f

In Figuur 4.12 is voor alle condities met JONSWAP spectrum de ruwheid γ_f berekend en uitgezet tegen de gemeten ruwheid. Met de gemeten ruwheid wordt hier en in het vervolg bedoeld de waarde die bepaald is met de TAW formule 24 door de gemeten overslagdebieten

van het referentietalud te vergelijken met die van het ruwe talud en deze te vertalen in een ruwheidscoëfficiënt die daarmee $\gamma_{f_gemeten}$ heet. De coëfficiënt C is hier gekalibreerd tot 0,145. Er is hier nog geen rekening gehouden met een reductie van de lineaire ruwheidsdichtheid voor patronen onder water. De grootste afwijkingen treden op voor golfsteilheden van 2% en voor condities met overslagdebieten kleiner dan 0,5 l/s/m. Voor deze laatste groep, wordt verwacht dat dit mede komt door schaaleffecten die verwaarloosbaar worden geacht voor condities groter dan ongeveer 0,5 l/s/m tot 1,0 l/s/m. In paragraaf 4.9 wordt later ingegaan op eventuele schaaleffecten. Dan zal ook blijken dat het punt bij $\gamma_{f_gemeten} = 0,39$ (overslag < 0,01 l/s/m) waarschijnlijk te maken heeft met schaaleffecten en hier dus toevallig rond de lijn ligt.

4.6 Spectrumvorm

In bovenstaande analyse is steeds gebruik gemaakt van een JONSWAP spectrum. Als variant hierop is nog gekeken naar dubbelpiekgige spectra. De dubbelpiekgige spectra hadden lange golven (deining) met piekperiode die tweemaal zo groot was als de korte golven. Twee varianten zijn bekeken waarvan de eerste deininggolven had ter grootte van 10% van de totale golfenergie en de tweede 30% van de totale golfenergie. In Figuur 4.13 zijn de datapunten van alle JONSWAP proeven en dubbelpiekgige proeven geplot. De puntenwolk van de dubbelpiekgige spectra past goed op de trendlijn.



Figuur 4.13: Vergelijking gemeten γ_f versus berekende γ_f ; JONSWAP spectra versus Dubbel-piekgig

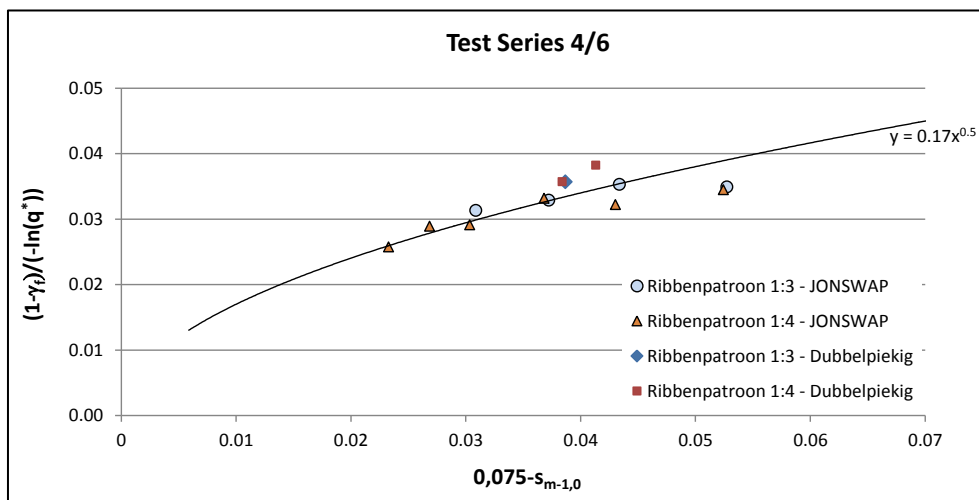
De twee punten die het meest afwijken (gemeten ruwheid van 0.7 en berekend van ongeveer 0,63) zijn wederom twee condities (10% en 30% variant) waarbij de golfsteilheid op basis van de $T_{m-1,0}$ ongeveer 2% bedroeg. Het verschil tussen 10% en 30% deininggolven is verwaarloosbaar zolang het spectrum dezelfde $T_{m-1,0}$ en H_{m0} heeft.

4.7 Taludhelling

Test Serie T140 is herhaald voor een taludhelling 1:4. Ten opzichte van het 1:3 talud is de helling verflauwd door te draaien rondom het snijpunt van de waterlijn met het 1:3 talud. Hierdoor is de relatieve kruinhoogte kleiner geworden, maar is het aantal ribben gelijk gebleven. Ook de afstand van de waterlijn tot de kruin langs het talud is gelijk gebleven.

In Figuur 4.14 is de voor overslag gecorrigeerde ruwheid uitgezet tegen de golfsteilheid. Hieruit volgt dat de data goed op elkaar past. Drie condities vallen vrijwel precies op elkaar en twee liggen vlakbij elkaar. Op basis van deze data is er dus geen invloed van de taludhelling op de ruwheidscoëfficiënt terug te zien. Het aantal ruwheidselementen uitgedrukt in de ruwheidsbreedte en de nokhoogte is in beide proevenseries hetzelfde (ruwheidsbreedte = totale lengte aan ruwheidselementen per m dijk lengte). Echter, de relatieve kruinhoogte is wel anders. De lineaire ruwheidsdichtheid was uitgedrukt als de ruwheidsbreedte gedeeld door de relatieve kruinhoogte tot de macht 0,4. De ruwheidsdichtheid zou dus op basis van deze formulering groter zijn bij het 1:4 talud dan bij het 1:3 talud. Echter op basis van Figuur 4.14 wordt nu geconcludeerd dat er geen verschil in ruwheid aanwezig kan zijn aangezien de testcondities tot eenzelfde ruwheidscoëfficiënt leiden voor beide taludhellingen. Omdat de lengte langs het talud waarover de ruwheid is toegepast niet veranderd is tussen beide constructies, wordt geconcludeerd dat niet de relatieve kruinhoogte maar de lengte langs het talud bepalend is voor de lineaire ruwheidsdichtheid. In plaats van het gebruik van relatieve kruinhoogte h_k in de formule voor de ruwheidsdichtheid, moet dus gebruik worden gemaakt

van oplooptengete boven de waterstand $\sqrt{(\cot^2 \alpha + 1)} \cdot h_k$ wat gelijk is aan $\frac{h_k}{\sin \alpha}$.



Figuur 4.14: Voor overslag gecorrigeerde ruwheidsparemeter ten opzichte van de lokale golfsteilheid; taludhelling 1:3 en 1:4

Om de eerdere grafieken niet opnieuw aan te moeten passen definiëren we tijdelijk de lineaire ruwheidsdichtheid als volgt. De factor $\sqrt{10}$ zal later worden verdisconteerd in de eerder gekalibreerde coëfficiënt C .

$$\rho_{\gamma_{f,w}} = \sqrt{10} \cdot \frac{\gamma_{f,w} \cdot \sin \alpha}{h_k}$$

In paragraaf 4.4 is de invloed van de nokhoogte beschouwd. Om deze factor dimensieloos te maken hebben we een referentienokhoogte van 0,20m moeten definiëren. In paragraaf 4.5 is

daarna de invloed van de ruwheidsbreedte bekeken. Deze ruwheidsbreedte werd vervolgens in een lineaire ruwheidsdichtheid verdisconteerd. In deze paragraaf hebben we gezien dat de ruwheidsdichtheid niet zozeer afhankelijk is van de relatieve kruinhoogte maar afhankelijk is van de relatieve oplooptengte. De lineaire ruwheidsdichtheid heeft echter momenteel de dimensie [1/m]. We kunnen nu in plaats van te kijken naar een ruwheidsbreedte een ruwheidsfront beschouwen. Het ruwheidsfront wordt dan gedefinieerd als de ruwheidsbreedte keer de nokhoogte. Om tot een dimensieloze ruwheidsdichtheid te komen dient dan door de werkende breedte en oplooptengte gedeeld te worden. In formulevorm:

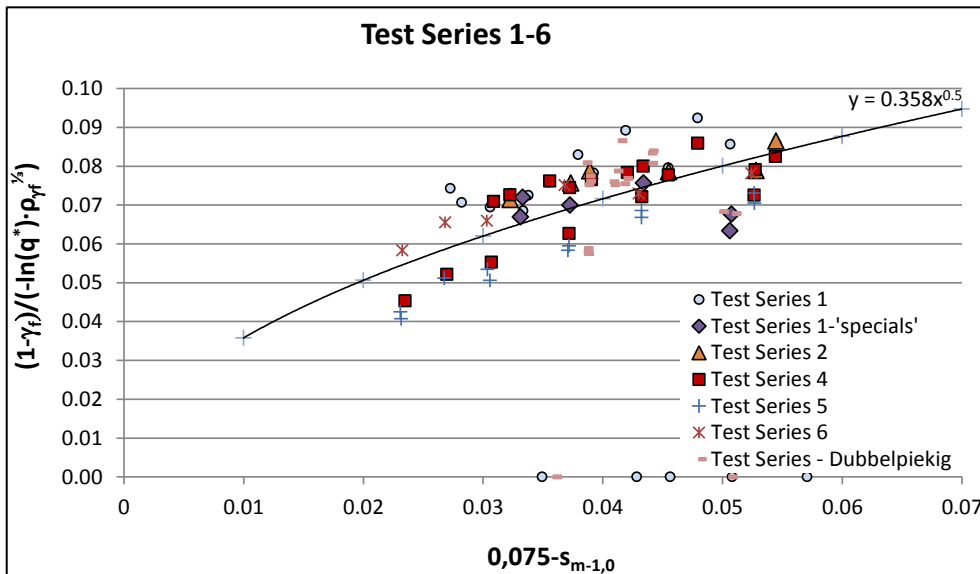
$$\rho_{\gamma_f} = \frac{\gamma_{f,w} \cdot \sin \alpha \cdot h_{nok}}{h_k}.$$

Omdat de nieuwe definitie van de ruwheidsdichtheid een dimensieloze parameter is vervalt de noodzaak om de nokhoogte te delen door een vaste referentienokhoogte van 0,20m. De macht van deze parameter dient wel weer opnieuw bepaald te worden. Voorheen had de lineaire ruwheidsdichtheid een macht van 0,4 en de nokhoogte een macht van 0,25. Door deze 2 parameters min of meer samen te voegen zal er een macht gekozen moeten worden die het beste bij de dataset past. De spreiding zal daardoor iets toenemen. De macht van de dimensieloze ruwheidsdichtheid die het beste past bij de dataset is $\frac{1}{3}$. Dit leidt dan tot de volgende formule:

$$1 - \gamma_f = 0,358 \cdot \sqrt{0,075 - s_{m-1,0}} \cdot \rho_{\gamma_f}^{1/3} \cdot \left(-\ln \left(\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_s^3}} \right) \right) \quad (4.4)$$

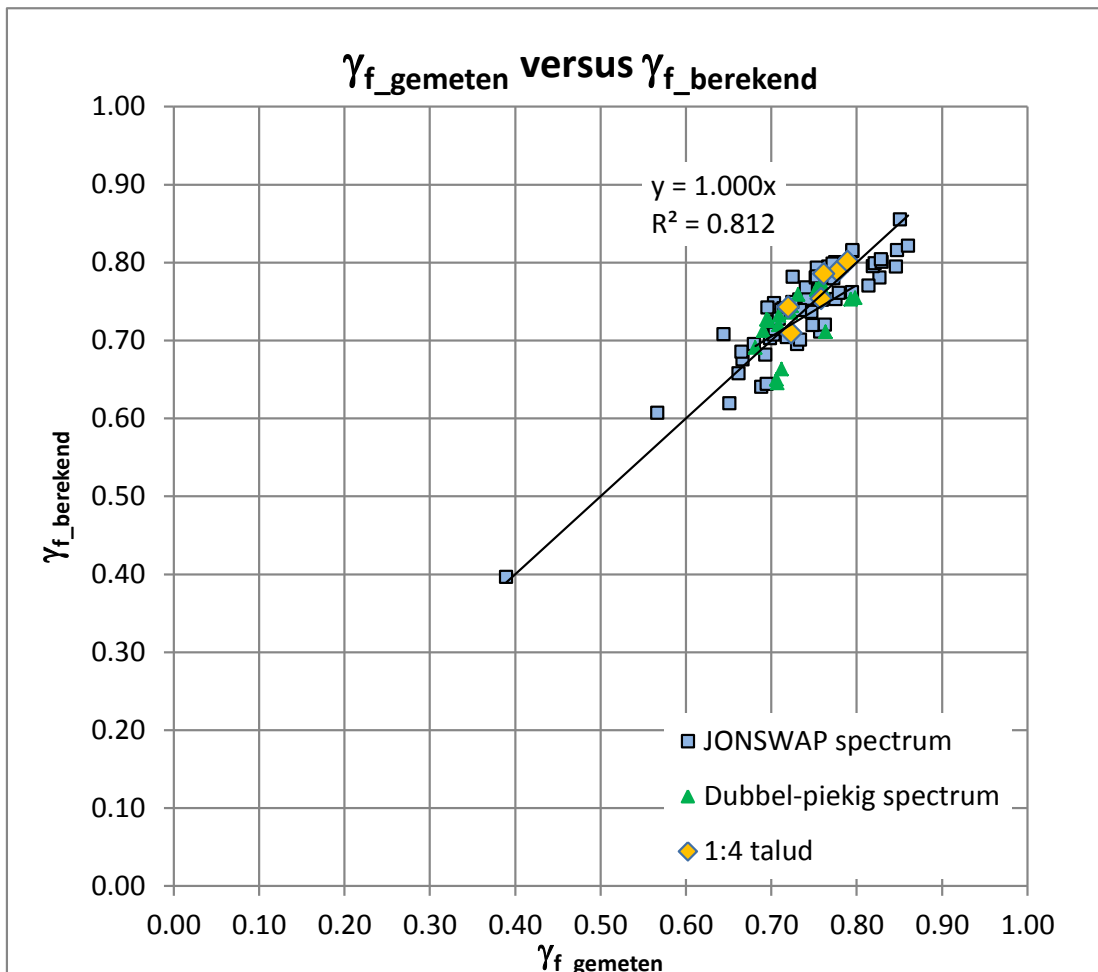
met:

ρ_{γ_f} = ruwheidsdichtheid (ruwheidsbreedte maal nokhoogte, gedeeld door de oplooptengte, waarbij de oplooptengte gelijk is aan 2% oploophoogte of kruinhoogte gedeeld door $\sin \alpha$) (-)



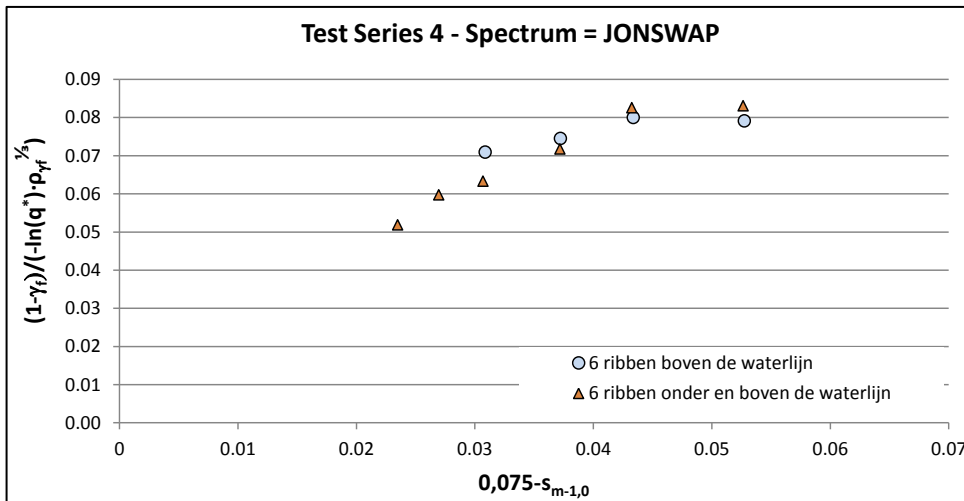
Figuur 4.15: Voor overslag en ruwheidsdichtheid gecorrigeerde ruwheidsparameter ten opzichte van de lokale golfsteilheid; Testseries 1-6 + specials + dubbelpiekgige spectra

Wanneer we met behulp van de afgeleide formule alle ruwheden berekenen en deze uitzetten tegen de gemeten ruwheden, dan ontstaat Figuur 4.16.

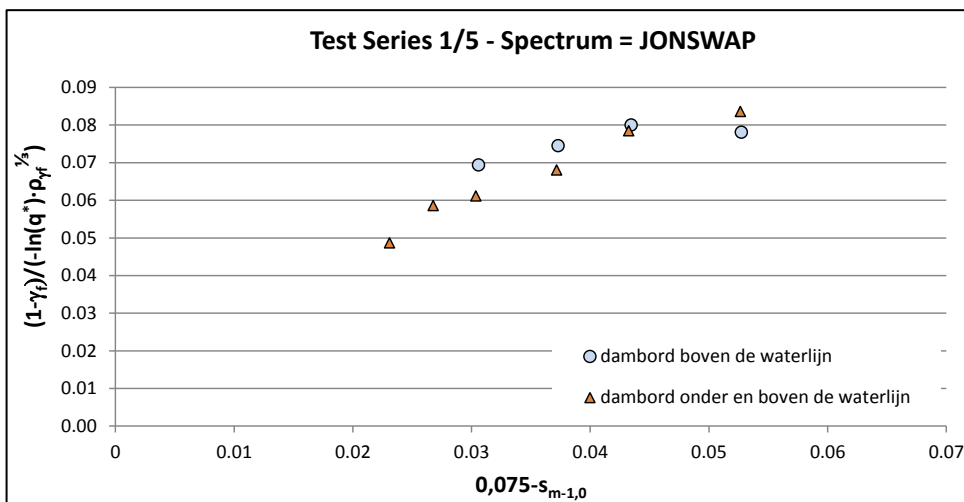


Figuur 4.16: Vergelijking gemeten γ_f versus berekende γ_f ; JONSWAP spectra versus Dubbel-piekige spectra en 1:4 taludhelling

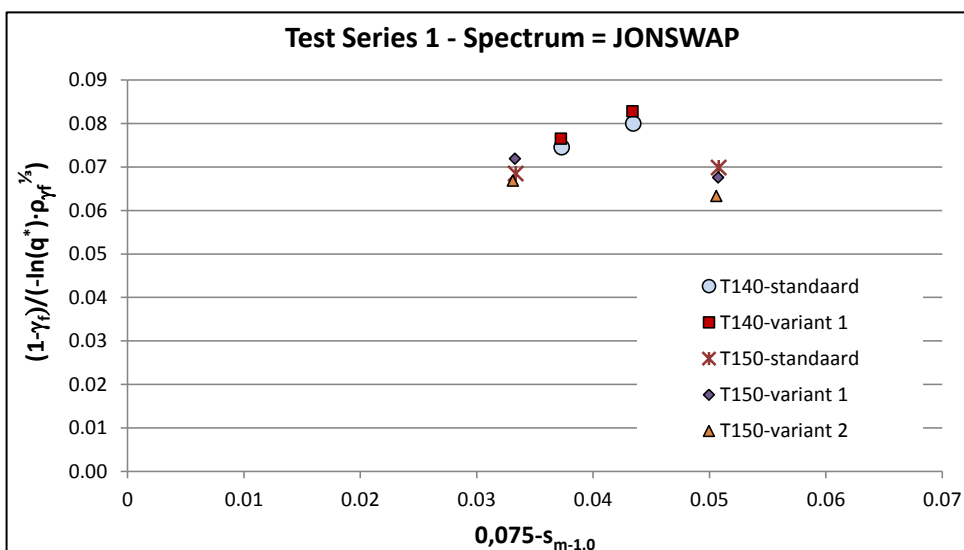
Wat opvalt in Figuur 4.15 is dat vrijwel alle punten van testserie 5 onder de lijn liggen. Dit komt doordat de ruwheidsdichtheid van een dambord rond de waterlijn nog gelijk is behandeld als een dambord van dezelfde afmetingen boven de waterlijn. Hetzelfde geldt ook voor het ribbenpatroon uit testserie 4. Ruwheidselementen onder water blijken minder effectief te zijn. Reeds bij het overslagvolume kwam al naar voren dat een groter gemiddeld overslagvolume zorgt voor een grotere waterlaagdikte boven de ruwheidselementen waardoor deze minder invloed uitoefenen. Ditzelfde geldt ook voor de ruwheidselementen onder water. Door slechts 4 van de 6 ribben en 8 van de 12 dambordrijen te tellen komen de datapunten van de series bij elkaar te liggen, zie Figuur 4.17 en Figuur 4.18. Dit betekent dat alle ruwheidselementen lager dan 0,37m onder water niet zijn meegeteld. Hetzelfde wordt gedaan voor de special uit testserie 1. Door ook de elementen lager dan 0,37m onder water niet meer mee te tellen worden slecht 13 van de 17 rijen in de ruwheidsdichtheid meegenomen. Ook hier komen de datapunten (T140-punten) beter bij elkaar te liggen, zie Figuur 4.19.



Figuur 4.17: ruwheidsdichtheid correctie ribben onder water

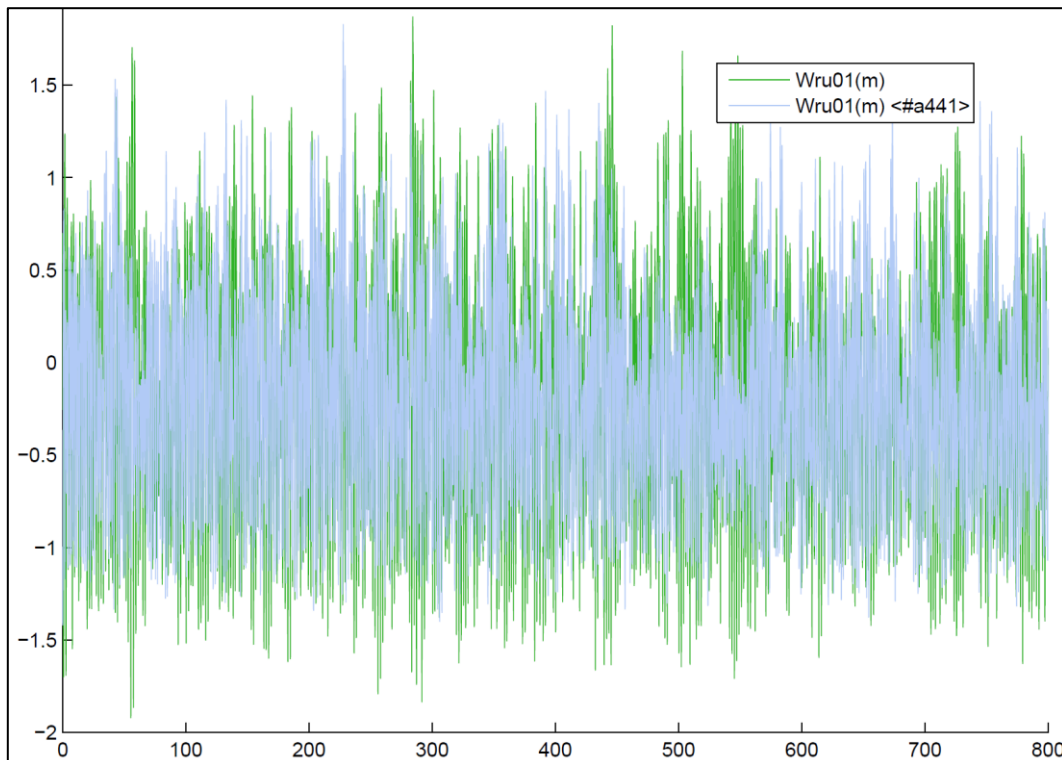


Figuur 4.18: ruwheidsdichtheid correctie dambord onder water



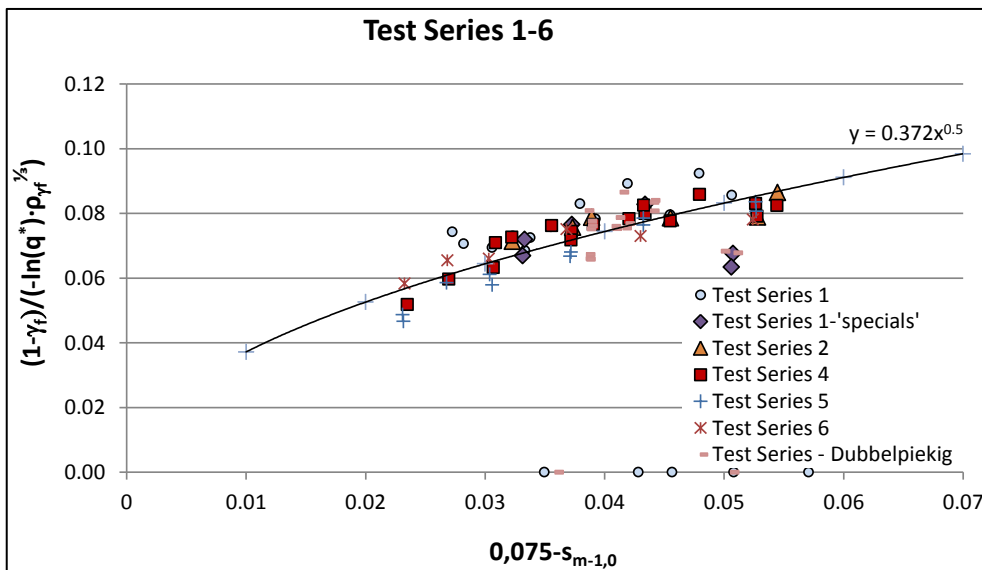
Figuur 4.19: ruwheidsdichtheid correctie 'specials'

Wanneer we nog meer in detail kijken naar de individuele punten van bijvoorbeeld testserie 4 met het ribbenpatroon onder en boven de waterlijn, dan blijkt dat de beste match verkregen wordt wanneer 5 van de 6 rijen worden meegenomen bij een golfsteilheid van 2%, 4 van de 6 rijen bij een golfsteilheid van 3% en 3 van de 6 rijen, dus alleen het deel boven water, bij golfsteilheden van rond de 4%. Het lijkt er daarmee op dat het aanbrengen van ruwheid onder water alleen een positieve bijdrage heeft in de reductie voor overslag op een 1:3 talud bij golven met een golfsteilheid kleiner dan 2,5%. Wanneer we de twee tijdsignalen bekijken van de oplooppeter (Figuur 4.20), waarbij het groene signaal hoort bij de proeven met golfsteilheid van 2% en het blauwe signaal bij die met 4%, dan zien we ook dat het golfdal dieper ligt bij de 2% golfsteilheid dan bij de 4% golfsteilheid. De golfloop tijdens het breken van de golf begint dus lager bij een 2% golfsteilheid. Het is daarmee wel te verklaren dat ruwheidselementen onder water met name alleen bijdragen bij golfcondities met een kleine golfsteilheid.



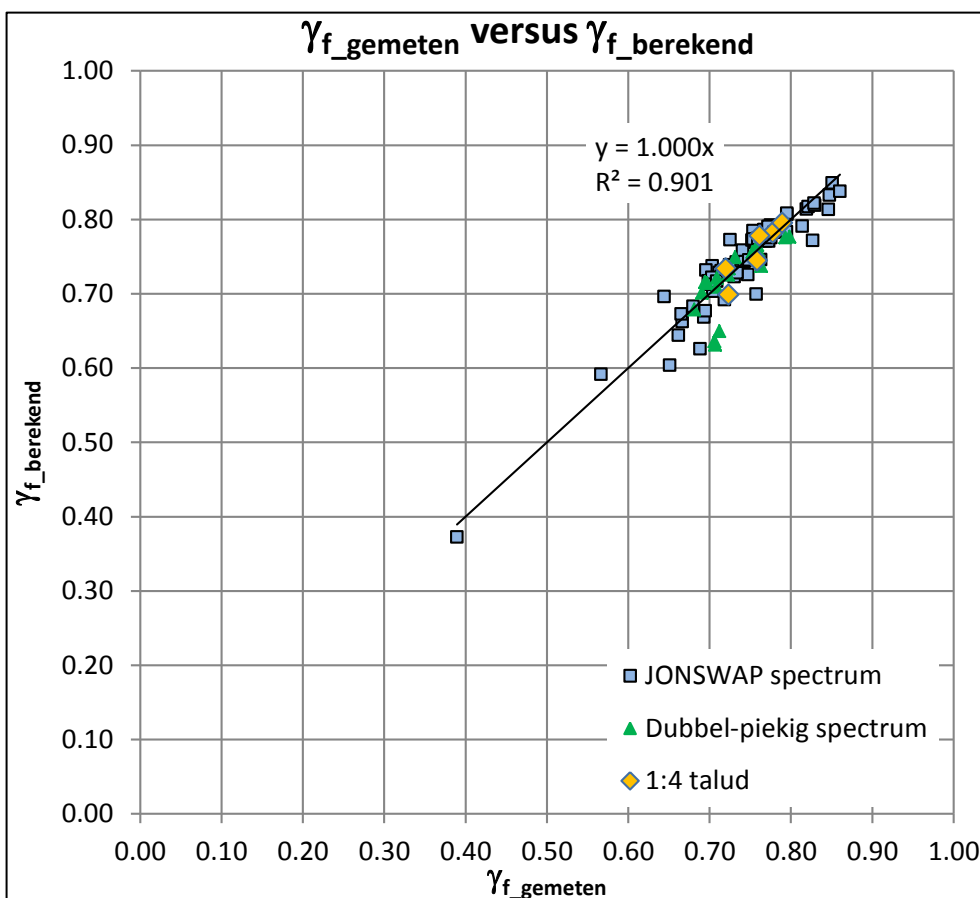
Figuur 4.20: Golfoplooppeter bij proeven met golfsteilheid van 2% en 4%

Ondanks het feit dat voor een golfconditie met kleine golfsteilheid een grotere ruwheidsbreedte mag worden meegenomen, beperken we ons in de analyse tot het meenemen van de ruwheidselementen die hoger liggen dan 0,5m onder water. De spreiding wordt dan natuurlijk iets groter, maar een rekenmethode om het aantal ruwheidselementen onder water te bepalen dat meedoet in de ruwheidsdichtheid levert waarschijnlijk momenteel te veel onzekerheid op. Een eerste schatting zou kunnen zijn dat de diepte ongeveer gelijk is aan de grootte van de golftop ($\frac{2}{3} H_s$) maal de reflectie van het talud. De reflectiecoëfficiënt van het talud voor steile golven ($s_0=4-5\%$) is ongeveer 0,25 en voor lange golven ($s_0=2\%$) ongeveer 0,4. Door de verminderde ruwheidsdichtheid voor een patroon met ribben of dambord onder water toe te passen wordt Figuur 4.21 verkregen. De spreiding rond de lijn wordt daardoor kleiner.



Figuur 4.21: Voor overslag en nieuwe ruwheidsdichtheid gecorrigeerde ruwheidsparameter ten opzichte van de lokale golfsteilheid; Testseries 1-6 + specials + dubbelpiekgige spectra

In Figuur 4.22 is dit ook terug te zien. De R^2 -waarde, een maat voor de spreiding, is al een stuk dichterbij 1.



Figuur 4.22: Vergelijking gemeten γ_f versus berekende γ_f

Wanneer we dus de ruwheidselementen onder water beperkt meenemen in de ruwheidsdichtheid dan kan de ruwheidscoëfficiënt berekend worden met formule .

$$1 - \gamma_f = 0,372 \cdot \sqrt{0,075 - s_{m-1,0}} \cdot \rho_{\gamma_f}^{1/3} \cdot \left[-\ln \left(\frac{q}{\sqrt{g} \cdot H_s^3} \right) \right] \quad (4.5)$$

4.8 Extreem grote overslag

In het kader van het ontwerp voor overslagbestendige dijken waarbij overslaghoeveelheden van 100 tot 200 l/s/m kunnen worden geaccepteerd, zijn er extra testen gedraaid op het 1:4 talud met een ribbenpatroon van 6 ribben. De proefopstelling was echter ingericht om overslaghoeveelheden tot ongeveer 10 l/s/m te kunnen meten. Het overslaande water terugpompen tijdens de proef, dat normaal gesproken een oplossing is wanneer er teveel water in de overslagbakken terecht komt, was in dit geval niet mogelijk, omdat er dan namelijk continu gepompt moest worden en er daardoor geen meting uitgevoerd kon worden. Er is daarom gekozen om de proef op te knippen in een aantal korte deelproeven. De deelproef stopt om het moment dat de overslagbak vol is. In sommige proeven was dit al na 60 seconden. Een totale tijdsduur van minimaal 10 minuten, dat in werkelijkheid neerkomt op iets meer dan 3 kwartier stormduur, is gedraaid voor 3 verschillende proefcondities. Iedere proefconditie bestond uit een serie van stuurfiles van vaak minimaal 1 tot vaak maximaal 3 minuten. Iedere stuurfile was met een ander 'seedingnummer' aangemaakt waardoor niet dezelfde golf uitgestuurd werd per stuurfile. Door de meetfiles van de individuele proeven aan elkaar te plakken is een proefconditie gevormd. Voor het gladde talud bestond een proefconditie uit meer stuurfiles dan voor het talud met ribbenpatroon. Hierdoor zijn de tijdseries en daarvan afgeleide golfcondities (H_s , $T_{m-1,0}$) fractioneel anders. Desondanks is de gekalibreerde raaklijnconstante in de TAW formule (afhankelijk van H_s , $T_{m-1,0}$) van het gladde referentie talud gebruikt in de bepaling van de ruwheidscoëfficiënt in de TAW formule in het geval van het ribbenpatroontalud bij extreme overslag.

De op basis van de TAW 'gemeten' ruwheidscoëfficiënt bedroeg voor de 3 proeven (met extreem grote overslag) voor het talud met ribbenpatroon 0,91 – 0,96 – 0,91. Het kubussen talud zonder ruwheid (nokhoogte = 0), vergelijkbaar met een standaard steenzetting, leverde ruwheidscoëfficiënten op variërend van 0,92-0,95 bij kleinere overslaghoeveelheden (10-20 l/s/m). De verwachting is dat de ruwheidscoëfficiënt voor een standaard steenzetting groter zal worden en daarmee richting 1,0 gaat bij extreem grote overslagdebieten. Het beproefde ribbenpatroon heeft ruwheidscoëfficiënten kleiner dan 1 waardoor geconcludeerd wordt dat ondanks de extreem grote overslag het ribbenpatroon een bijdrage lijkt te hebben geleverd in het verminderen van de overslag ten opzicht van een standaard steenzetting zonder uitstekende sets.

Wanneer we de gemeten waarden vergelijken met de berekende waarde volgens formule (4.5) dan zien we nog wel een afwijking. De berekende ruwheidscoëfficiënten zijn namelijk voor de 3 testcondities 0,84 – 0,84 – 0,85 in plaats van de gemeten waarden 0,91-0,96-0,91. Het feit dat de modelopstelling gladder is geweest zou wellicht verklaard kunnen worden doordat de drainage capaciteit van de constructie te klein was. Hierdoor bleef er te veel water tussen de ribben staan. Het is echter ook de vraag of in de praktijk deze hoeveelheid water wel snel genoeg weg kan stromen.

Voor de invloed van de drainage is het waterbergend vermogen van de steenzetting ten opzichte van de dikte van de oplooptong relevant. Dit is in het huidige onderzoek niet nader onderzocht.

4.9 Schaalears

In Wouters et al (1994) is een onderzoek beschreven waarbij met ruwheidselementen in de Deltagoot is gewerkt. Het onderzoek naar ruwheidselementen in de Deltagoot is vergeleken met het onderzoek in de Scheldegoot, waarbij dus op een kleinere schaal is gewerkt. Het verschil in gevonden ruwheid is toen toegeschreven aan mogelijke schaalears. Een verschil tussen het oude onderzoek in de Deltagoot en het huidige onderzoek in de Oosterscheldegoot is dat we nu kijken naar grotere hoeveelheden overslag. Destijds is er in het Deltagootonderzoek alleen gekeken naar het oplooptniveau met overschrijdingsfrequentie van 2%: $z_{2\%}$. In het huidige onderzoek in de Oosterscheldegoot liggen die niveaus in vrijwel alle gevallen boven de kruin. De $z_{2\%}$ komt namelijk redelijk overeen met een overslagdebiet van 0,1 l/s/m. Bij dit soort kleine overslaghoeveelheden is het inderdaad de verwachting dat er schaalears zullen zijn. De voorzijde van de golfoplooptong ondervindt meer ruwheid op een kleinere schaal. Wanneer echter grote hoeveelheden overslag optreden dan zal de bijdrage van de voorzijde van de tong klein zijn in het totale overslagvolume en zullen potentiële schaalears dus minder en naar verwachting niet zichtbaar zijn in de resultaten.

Om beter inzicht te krijgen in potentiële schaalears is er een extra testserie beproefd voor een schaal die 2x groter is. Alle maten van het dambord zijn met een factor 2 vergroot, net als de golfcondities. De constructie kon niet geheel op basis van Froude verschaald worden. De relatieve kruinhoogte moest gelijk blijven, wat impliceerde dat de waterdiepte aan de teen van de constructie veranderde. Hierdoor waren de golven diepte-gelimiteerd, wat neerkwam op een $H_{2\%}/H_s$ verhouding variërend van 1,18-1,25. Ook de lokale golfenlge was zo'n 40% kleiner dan de fictieve diepwatereolfenlge. De overslagdebieten zijn daardoor niet helemaal vergelijkbaar met de proeven op de originele schaal. Dezelfde 6 golfcondities zijn daarom ook uitgevoerd op een glad houten talud om zodoende toch ook een vergelijking tussen ruw en glad te kunnen maken.

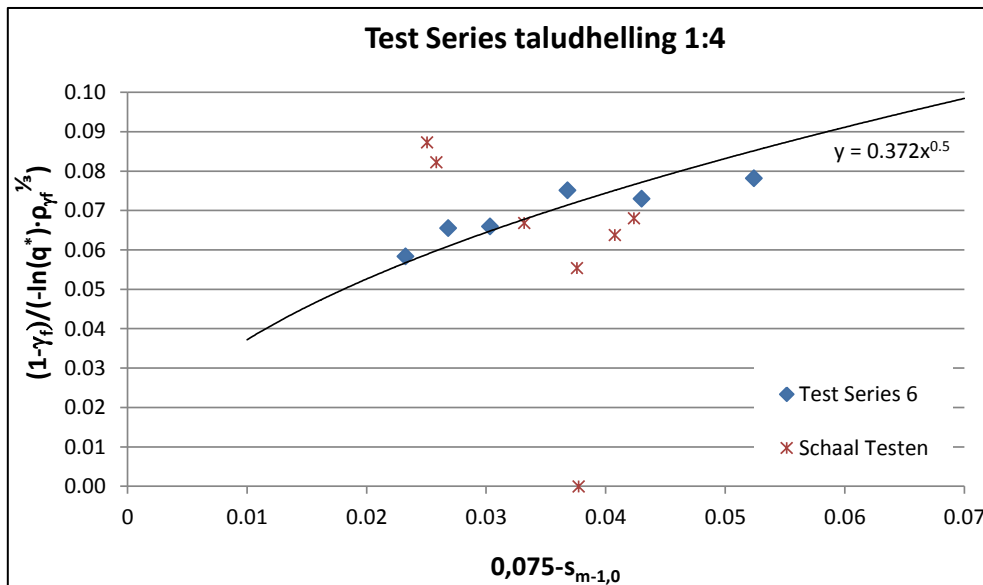
Gedurende dit testprogramma bleek dat drie van de zes condities resulteerden in overslagdebieten kleiner dan 1 l/s/m. Dit werd mede veroorzaakt door de kleine lokale golfenlge. Grotere overslaghoeveelheden waren alleen mogelijk bij gebruik van grote golfperiodes. Dit leverde een set met datapunten op dat een wisselend beeld geeft. In Figuur 4.24 zijn deze datapunten geplot. Slechts 1 datapunt ligt op de lijn die past bij formule (4.5). Wanneer we nu in plaats van de H_s de $H_{2\%}$ gaan gebruiken in de formule dan volgt Figuur 4.25. De dataset wordt niet beter door het gebruik van $H_{2\%}$ in plaats van H_s .



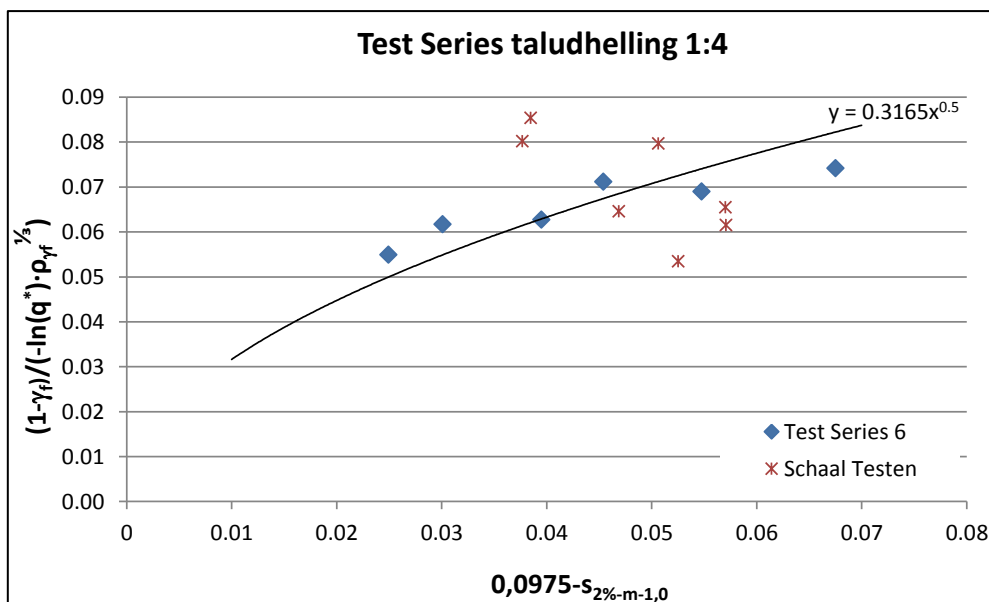
Figuur 4.23: Inkomende golf tijdens de schaalproeftesten. Het water op het talud is nog niet volledig weggestroomd door onder andere onvoldoende drainage op het moment dat de nieuwe golf er weer aankomt.

De drie datapunten boven de $y=0,08$ in Figuur 4.24 behoren tot de datapunten waar een kleine overslaghoeveelheid is gemeten. Van deze punten wordt verwacht dat hier nog schaalears inzitten. De andere 3 punten vertonen juist een gladder gedrag dan de voorspelling op basis

van formule (4.5) wat ook zou kunnen duiden op schaafeffecten. De berekende ruwheden van de 3 punten vallen echter niet buiten de bestaande spreiding wanneer we ze plotten in Figuur 4.31. Dat is voor twee van de drie punten met weinig overslag wel het geval, waarvoor dus schaafeffecten werden verwacht.



Figuur 4.24: Schaaltest 1:11 vs 1:22 o.b.v. H_s (niet geheel Froude schaling)



Figuur 4.25: Schaaltest 1:11 vs 1:22 o.b.v. $H_{2\%}$ (niet geheel Froude schaling)

Het feit dat drie metingen een hoger overslagvolume gaven, en daarmee dus een gladder talud hadden, heeft hoogstwaarschijnlijk te maken met onder andere het ontbreken van voldoende drainage in de modelopzet. Hoewel de ribben en de openingen in de ribben met een factor 2 waren vergroot, waren de kieren tussen de kubussen gelijk gebleven. Hierdoor kon het water niet voldoende snel zakken en afstromen. Figuur 4.23 geeft een voorbeeld hiervan. Ook de bergingscapaciteit bij de oploop was door de kleine kieren gereduceerd wat tezamen resulteerde in meer overslag en dus een gladder talud in de metingen, dan op basis van de

berekende waarde met formule (4.5). De twee datapunten, die in Figuur 4.24 ten opzichte van de horizontale as liggen op 0,033 en 0,042 en daarmee relatief dichtbij de trendlijn, hadden ook kleinere overslagdebieten (van 3,5 en 2,8 l/s/m) dan de andere twee punten onder de trendlijn (die overslagdebieten hadden van ongeveer 15 en 6,5 l/s/m). Wanneer er voldoende drainagecapaciteit in het model was geweest, zouden met name deze laatste twee punten veel dichter bij de trendlijn hebben gelegen.

In bovenstaande analyse wordt het gehele oppervlak van iedere nok meegenomen in de ruwheidsdichtheid. Bij kleine overslagdebieten zal echter de oplooptong dun zijn en zal niet het gehele oppervlak van de nok aangestroomd worden (zie ook Figuur 4.26). In de ruwheidsdichtheid dient dus eigenlijk alleen het effectieve oppervlak van de nok meegenomen te worden. Dit effectieve oppervlak kan bepaald worden door allereerst de 2% golfoploophoogte te berekenen en vervolgens de laagdikte van deze oplooptong langs het talud. In Schüttrumpf en Oumeraci (2005) is de methode beschreven voor het bepalen van de dikte van de oplooptong langs het talud. Dit is een lineaire functie en luidt:

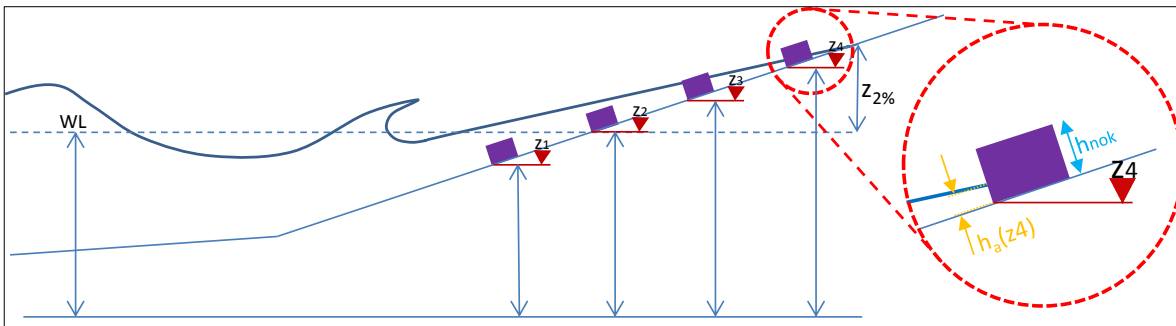
$$h_a(z) = 0.216 \cdot (z_{2\%} - z) \quad (4.6)$$

waarin:

h_a = oplooptong laagdikte op locatiehoogte z

z = golfoploophoogte, verticaal gemeten ten opzichte van de stilwaterlijn (bv z_4 -WL)

$z_{2\%}$ = golfoploophoogte die door 2% van de inkomende golven wordt overschreden

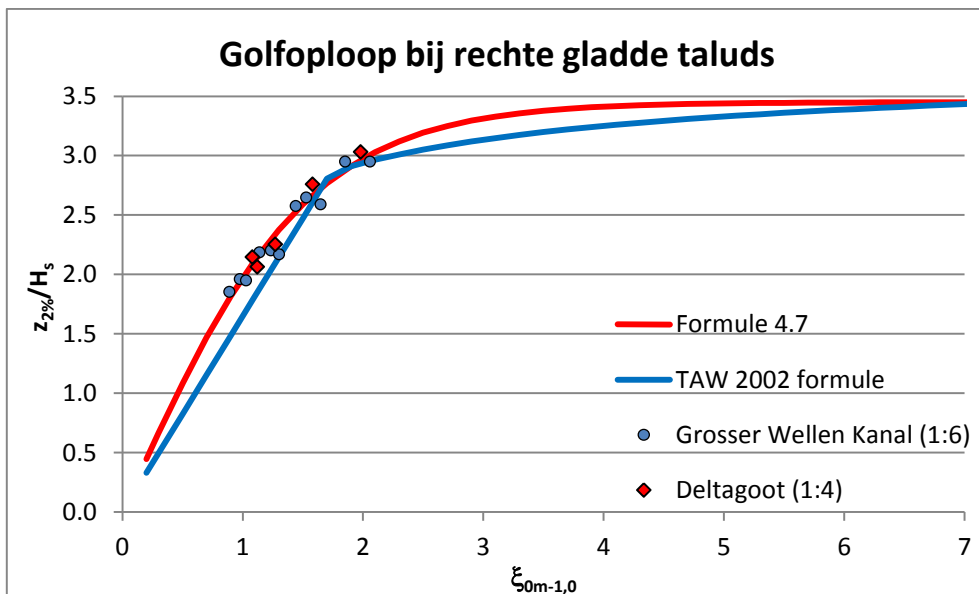


Figuur 4.26: Definitie effectieve nokhoogte, hier bv $h_{nok\text{-}effectief} = h_a(z_4)$

De oploophoogte wordt berekend met de formule die zowel geldig is voor brekende (plunging) en niet-brekende golven (surging). Deze formulevorm is in Schüttrumpf (2001) gegeven. De formulevorm is hier aangepast voor gebruik met $T_{m-1,0}$ in plaats van T_m . Dit is gedaan door de olopdata uit Wouters et al (1994) voor gladde taluds (Deltagoot) en Führböter et al (1989) (Grosser Wellen Kanal) te kalibreren. Aangezien de beschreven testen uitgaan van een piekperiode en een Pierson-Moskowitz spectrum is voor de bepaling van $T_{m-1,0}$ de T_p gedeeld door de factor 1,167. Met de volgende opnieuw gekalibreerde formule dient de golfoploophoogte berekend te worden.

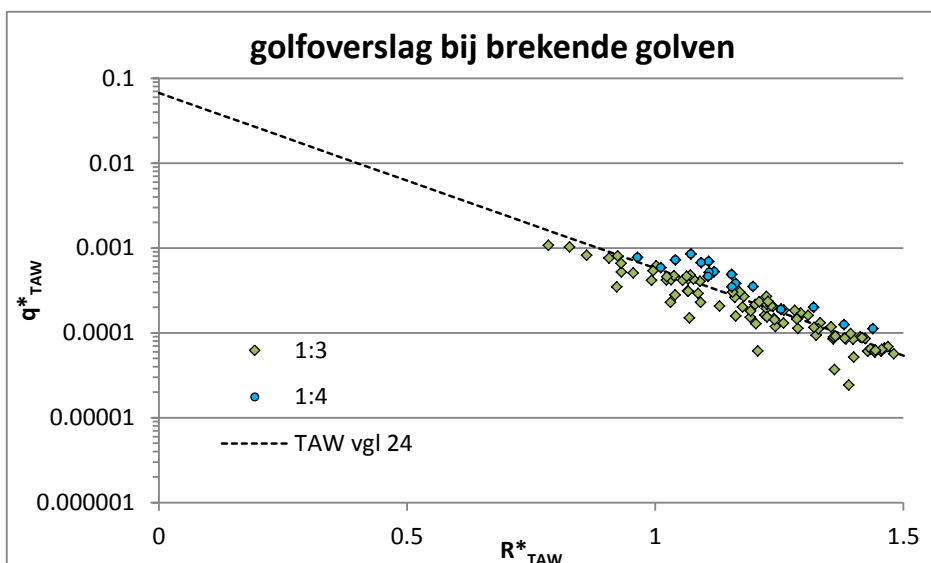
$$z_{2\%} = 3,45 \cdot \tanh\left(0,65 \cdot \xi_{0m-1,0}\right) \cdot \gamma_f \cdot H_s \quad (4.7)$$

In Figuur 4.27 is deze formule geplot.



Figuur 4.27: Golfloop bij rechte gladde taluds; data fit formule 4.7

In Wouters et al (1994) zijn op grote schaal ruwheidselementen getest op een talud van 1:4. Deze elementen zijn daar aangeduid als elementen die dan wel 1/9 dan wel 1/25 van het oppervlak vullen. Ook de nokhoogte is gevarieerd in een serie. Om deze data te kunnen meenemen in de analyse, dient de gemeten 2% oploophoogte omgerekend te worden naar een overslagdebiet. Ditzelfde geldt voor het onderzoek van Führböter et al (1989) waarin de ruwheid van elementen (1/25 van het oppervlak) op een taludhelling van 1:6 is beschouwd in de vorm van de oploophoogte reductie. In dit laatste onderzoek is voor iedere conditie zowel de golfloop beschouwd op een glad (beton) talud en op het ruwe talud. In het Deltagoot onderzoek zijn alleen een vijftal condities op een glad talud beschouwd en werd hieruit geconcludeerd dat de theoretische olopformule voldoende nauwkeurig was om een vergelijking ten aanzien van de ruwheid te maken. De ruwheidscoëfficiënten uit het Deltagoot onderzoek zijn nu wederom bepaald, door de gemeten oploophoogte te vergelijking met de theoretisch oploophoogte van een glad talud volgens formule (4.7), omdat deze ook beter aansluit bij de data, zie Figuur 4.27.



Figuur 4.28 Golfoverslag bij brekende golven op basis van TAW formule.

Om de 2% oploophoogte om te rekenen naar een overslagdebiet dat hoort bij een kruinhoogte gelijk aan de 2% oploophoogte dient een overslagformule te worden toegepast. De TAW 2002 overslagformule wordt hier nu niet gebruikt omdat deze gemiddeld genomen een onderschatting geeft voor 1:4 taluds en een overschatting van 1:3 taluds, zoals te zien is in Figuur 4.28. De datapunten die hier geplot zijn, zijn gebaseerd op brekende golven. De data van de proeven met extreem grote overslagdebiet zijn hier niet toegevoegd. Daarnaast zijn de gekalibreerde ruwheden gebruikt.

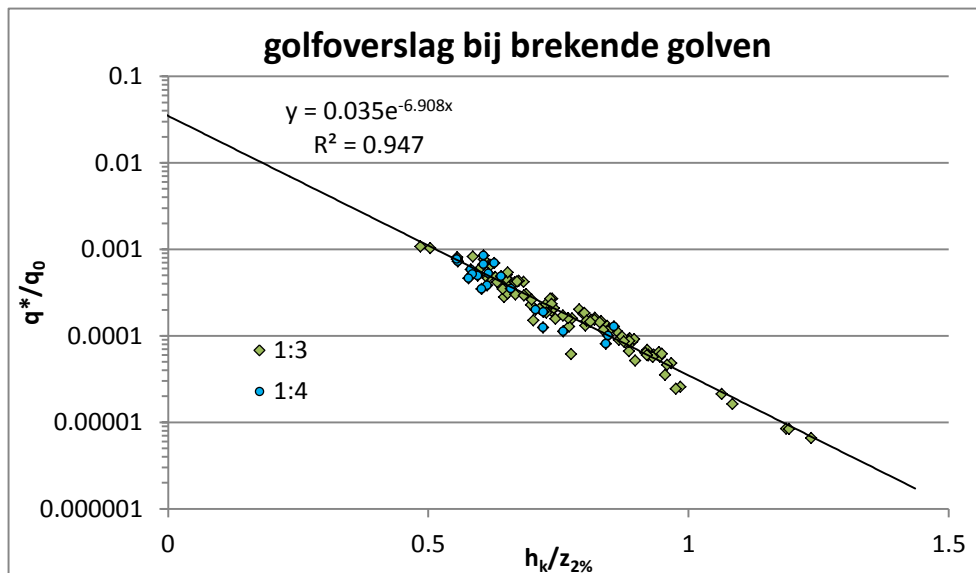
Om de invloed van het talud beter mee te nemen is een nieuwe formule ontwikkeld die alleen gebaseerd is op de uitgevoerde proeven en verder geen rekening houdt met data afkomstig van bijvoorbeeld bermenonderzoek of scheve golfinval.

In Figuur 4.29 wordt op de y-as q^*/q_0 uitgezet en op de x-as $h_k/z_{2\%}$. Voor de overloopcoëfficiënt q_0 wordt hier dezelfde omschrijving gekozen als voor de TAW formule namelijk:

$$q_0 = \frac{c^*}{\sqrt{\tan \alpha}} \cdot \xi_{0m-1,0} \quad (4.8)$$

Voor de x-as wordt nu de gekalibreerde golfoploopformule toegepast. De volgende formule wordt gevonden waarbij beide taludhellingen goed worden gerepresenteerd:

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_s^3}} = \frac{0,035}{\sqrt{\tan \alpha}} \cdot \xi_{0m-1,0} \cdot \exp \left(-6,9 \cdot \frac{h_k}{3,45 \cdot \tanh(0,65 \cdot \xi_{0m-1,0}) \cdot \gamma_f \cdot H_s} \right) \quad (4.9)$$



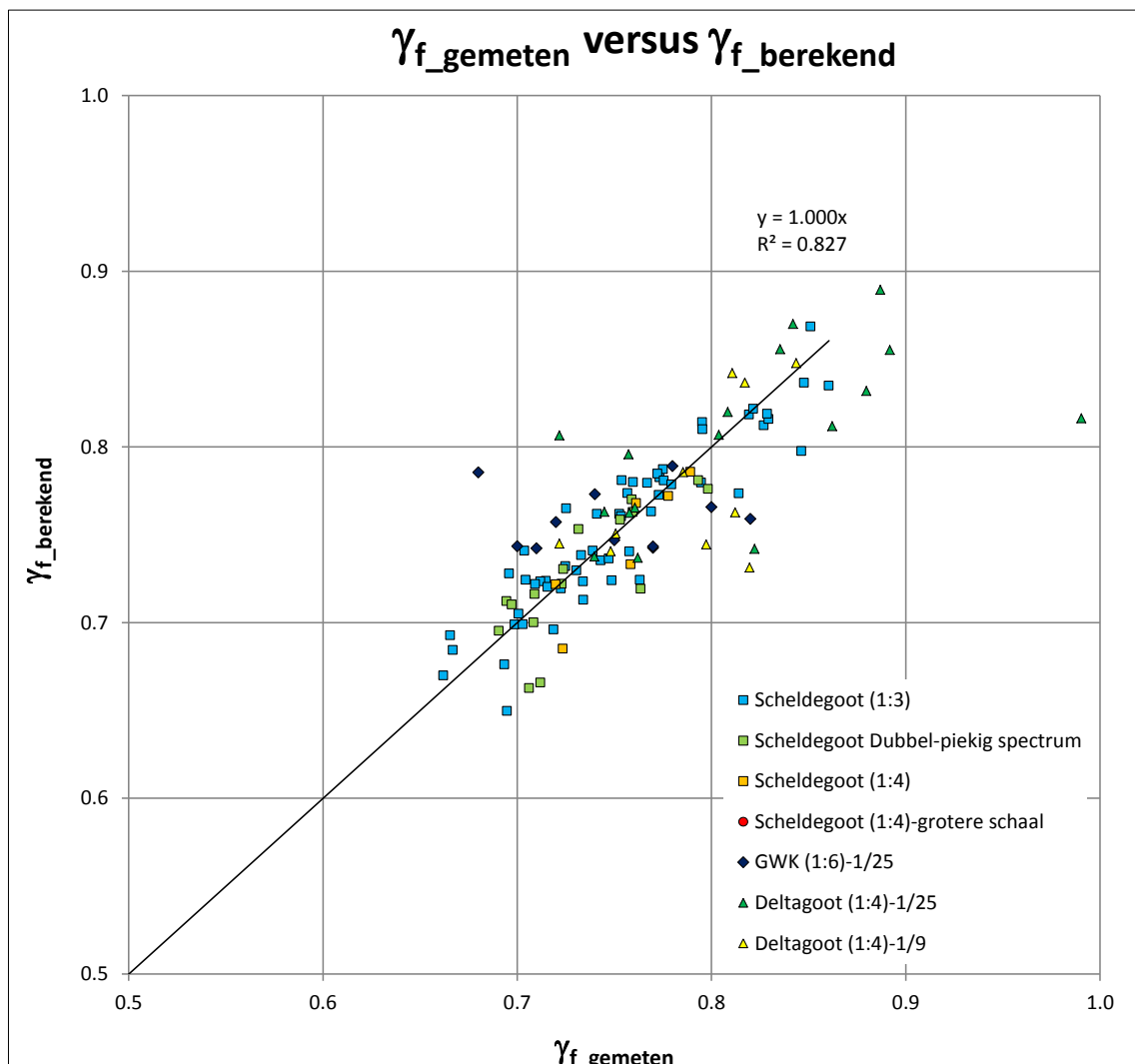
Figuur 4.29 Golfverslag bij brekende golven op basis nieuwe overslag formule.

Met behulp van formule (4.9) is vervolgens het overslagdebiet berekend behorende bij een kruinhoogte gelijk aan de 2% oploophoogte voor de twee oude onderzoeken. De effectieve nokhoogte is hier bepaald door voor iedere locatie van een nok op het talud de laagdikte te bepalen van de 2%-oplooptong. De nokhoogte die wordt meegenomen in de ruwheidsdichtheid is vervolgens per rij gecorrigeerd wanneer de laagdikte kleiner was dan de nokhoogte. Hiervoor is dan de berekende laagdikte aangehouden. Hiermee zijn alle benodigde gegevens bekend om een ruwheidscoëfficiënt uit te kunnen rekenen. Dit zou met afgeleide formule (4.5) kunnen. Echter in de dataset die gebruikt is, was geen rekening gehouden met de effectieve

nokhoogte. Bovendien treden er hoogstwaarschijnlijk schaafeffecten op bij kleine overslagdebieten. De condities waar een overslag van minder dan 0,5 l/s/m is gemeten wordt daarom uit de dataset gehaald. Van de overgebleven condities wordt ook de effectieve nokhoogte in de ruwheidsdichtheid meegenomen. Hierdoor ontstaat de volgende formule:

$$1 - \gamma_f = 0,585 \cdot \sqrt{0,075 - s_{m-1,0}} \cdot \rho_{\gamma_f}^{1/2} \cdot \left(-\ln \left(\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_s^3}} \right) \right) \quad (4.10)$$

Met formule (4.10) zijn de ook de ruwheidscoëfficiënten berekend van de Deltagoot en GWK proeven. Deze zijn net als de eerdere dataset geplot in Figuur 4.30.



Figuur 4.30: Vergelijking gemeten γ_f versus berekende γ_f voor formule (4.10) (grootschalige en kleinschalige proeven)

De ruwheidscoëfficiënten van de GWK testen en de Deltagoot testen met ruwheidsoppervlak van 1/9 vallen binnen de spreiding van de kleinschalige testen. De Deltagoot testen met ruwheidsoppervlak van 1/25 leveren iets meer spreiding op, maar laten nog steeds een redelijk goede match zien.

Er kan daarom geconcludeerd worden dat er geen schalingseffecten zitten in de testresultaten wanneer het overslagdebiet groter was dan 0,5 l/s/m.

4.10 Ruwheidscoëfficiënt

In de vorige paragrafen hebben we gezien dat de ruwheidscoëfficiënt afhankelijk is van het overslagdebiet, de lokale golfsteilheid bij de teen van de constructie en het gemiddelde ruwheidsoppervlak in de oplooptzone. Dit ruwheidsoppervlak wordt berekend met de effectieve nokhoogte en de som van de ruwheidslengte van alle ribben dan wel dambordsets die direct worden aangevallen door de inkomende golf. Ruwheidslengte onder de stilwaterlijn heeft een zeer geringe bijdrage. De invloed van ruwheidslengte die lager ligt dan 0,5m onder water, is in de metingen al niet meer te zien en dient dus niet in het totale ruwheidsoppervlak te worden meegenomen. Deze diepte is ongeveer gelijk aan de grootte van de golftop ($^{2/3} H_s$) maal de reflectie van het talud. Het niveau vanaf waar de ruwheidselementen effect hebben op de golfoploop is SWL- d_{ruw} , waarbij d_{ruw} als volgt berekend kan worden:

$$\frac{d_{ruw}}{H_{m0}} = \min \left(0,35 ; 0,24 \cdot \xi_{om}^{1/3} \right) \quad (4.11)$$

Met:

- d_{ruw} = diepte onder de stilwaterlijn vanaf waar de ruwheid meetelt (m)
- ξ_{om} = $\tan \alpha / \sqrt{s_{om}}$ = brekerparameter op basis van $T_{m-1,0}$ (-)
- s_{om} = $H_{m0} / (g T_{m-1,0}^2 / (2\pi))$ = golfsteilheid op basis van $T_{m-1,0}$ (-)
- H_{m0} = significante golfhoogte berekend uit het spectrum ($\approx H_s$) (m)
- $T_{m-1,0}$ = spectrale golfperiode (-)

De effectieve nokhoogte wordt bepaald door de laagdikte van de oplooptong behorende bij de 2% oploophoogte (zie formule (4.6) en (4.7)) langs het talud te vergelijken met de aangebrachte nokhoogte. Wanneer deze laagdikte kleiner is dan de nokhoogte dan wordt de nokhoogte gelijk gesteld aan de laagdikte. Rijen met nokken die boven het 2%-golfoplooptniveau liggen, tellen niet mee als ruwheid. Als ze boven de dikte van de golfoplooptong uitsteken, tellen ze slechts deels mee.

Met het berekende ruwheidsoppervlak wordt vervolgens een dichtheid bepaald door het oppervlak te delen door de breedte en de lengte langs het talud tussen de waterstand en de kruin van de dijk. De beste fit door al deze datapunten levert een formule op, namelijk formule (4.10), waarmee de ruwheidscoëfficiënt van een willekeurig profiel bepaald kan worden.

Voor het ontwerp of toetsen van bijvoorbeeld een dijk dient de ruwheidscoëfficiënt bepaald te worden. Het overslagdebiet dat in de formule ingevuld moet worden, dient gelijk gesteld te worden aan het maximaal toegestane overslagdebiet van bijvoorbeeld 0,1 of 1 l/s/m. Voor situaties waarin er geen overslagdebiet bekend is, kan de formule ook omgeschreven worden. In formule (4.10) zit namelijk de term $\ln(q^*)$. Dit is gelijk aan de linker term van formule (4.9). We kunnen in formule (4.10) dus $\ln(q^*)$ vervangen door de rechter term van formule (4.9). Daarmee wordt verkregen:

$$1 - \gamma_f = 0,585 \cdot \sqrt{0,075 - s_{m-1,0}} \cdot \rho_{\gamma_f}^{1/2} \cdot \left[6,9 \cdot \frac{h_k}{z_{2\%}} - \ln(q_0) \right] \quad (4.12)$$

met $z_{2\%}$ zoals afgeleid in formule (4.7)

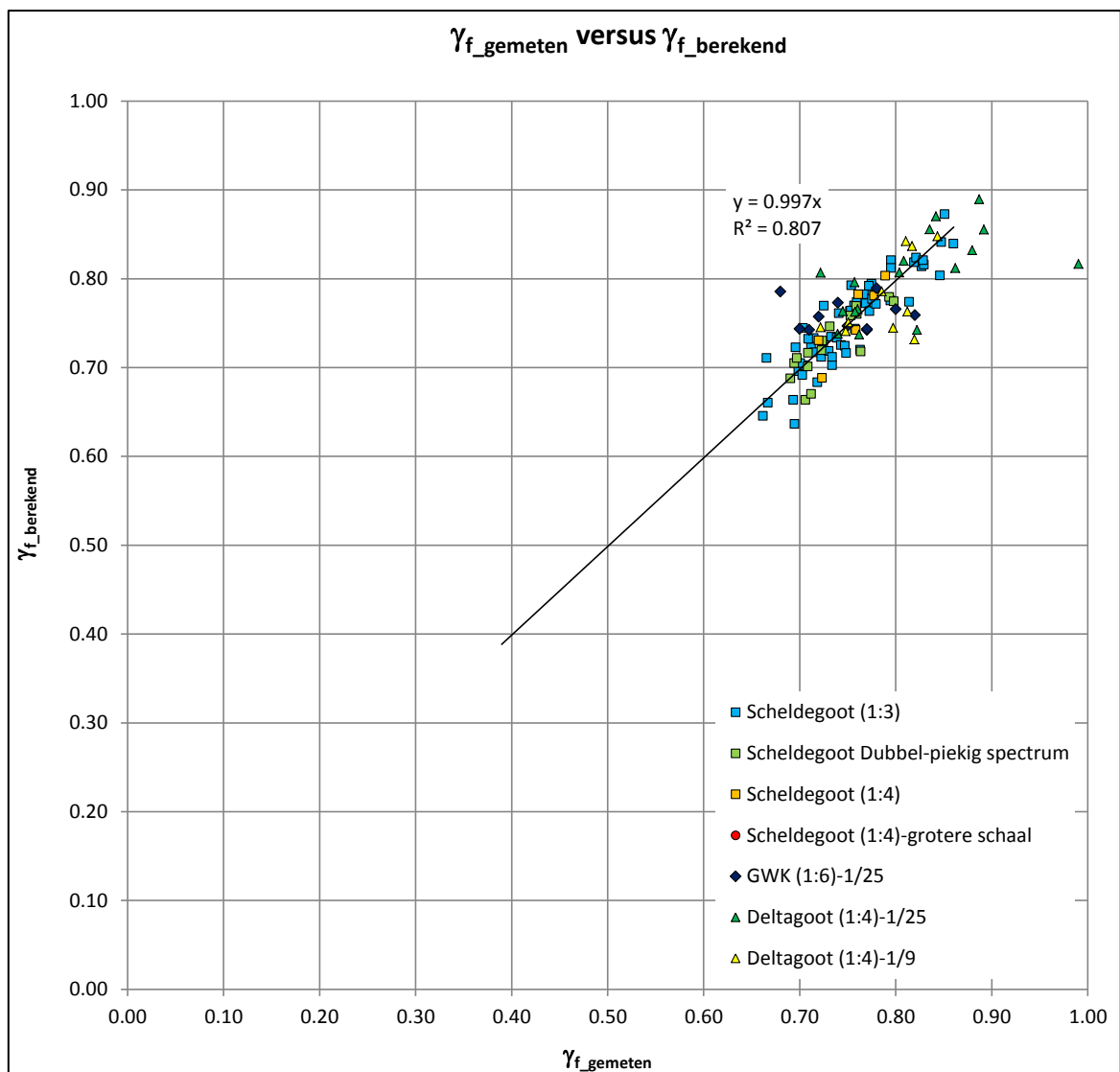
$$z_{2\%} = 3,45 \cdot \tanh(0,65 \cdot \xi_{0m-1,0}) \cdot \gamma_f \cdot H_s \quad (4.13)$$

en

$$q_0 = \frac{0,035}{\sqrt{\tan \alpha}} \cdot \xi_{0m-1,0} \quad (4.14)$$

Omdat de ruwheidscoëfficiënt ook in de golfloop zit (zie formule(4.13)) dient deze op iteratieve wijze bepaald te worden. Vervolgens kan dan het overslagdebiet berekend worden.

In Figuur 4.31 zijn de berekende en gemeten ruwheidscoëfficiënten, nu op basis van formule (4.12) tegen elkaar uitgezet. Een vrijwel identiek beeld wordt verkregen als in Figuur 4.30.



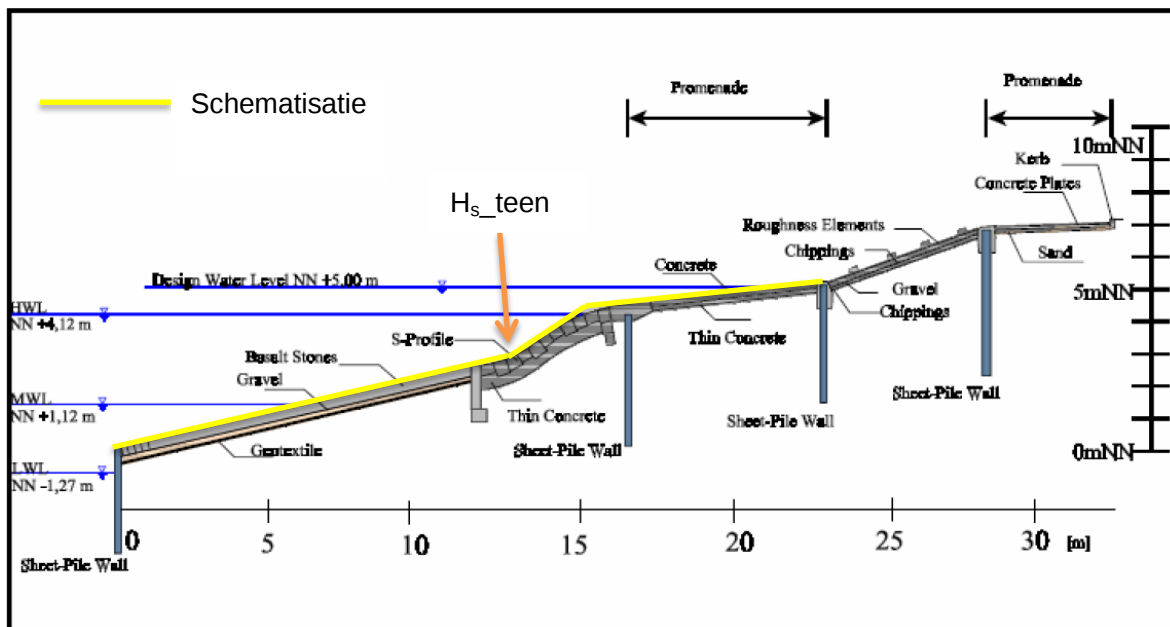
Figuur 4.31: Vergelijking gemeten γ_f versus berekende γ_f voor formule (4.12) (grootschalige en kleinschalige proeven)

Met behulp van bovenstaande afgeleide formules wordt in paragraaf 4.11 een case uitgewerkt.

De afgeleide formules om de reductiecoëfficiënt voor golfloop en golfoverslag als gevolg van ruwheid te bepalen gelden voor loodrecht invallende golven, net zoals de factoren genoemd in hoofdstuk 3. In Appendix F wordt als variant op bovenstaande een analyse gegeven waarbij niet de golfloop of golfoverslag wordt gebruikt, maar het golfoverslagvolume.

4.11 Voorbeeld

Als voorbeeld beschouwen we hier het profiel zoals afgebeeld in Figuur 4.32. Het profiel is vrij complex en wordt daarom geschematiseerd tot de gele lijn. Normaal gesproken wordt de golfhoogte gebruikt die berekend is aan de teen van de constructie. De doorsnede hier is echter een stuk ingewikkelder. In het eerste deel van het profiel ligt een taludhelling van 1:4,5 bestaande uit basalt stenen. Hier zal veel breking optreden door de geringe waterdiepte. De teen van de constructie wordt hier dan ook gedefinieerd bij het knikpunt met het geschematiseerd S-profiel en het eerste deel wordt gezien als 'voorland'. Het knikpunt ligt op een niveau van NN +2,7m. Door het steile 'voorland' wordt hier een significante golfhoogte aangehouden gelijk aan de waterdiepte. Bij een waterstand van NN +5,0m betekent dit dus een H_s van 2,3m. De volgende randvoorwaarden worden verder gebruikt:



Figuur 4.32: Dwarsdoorsnede kustbescherming Voorbeeld Case

Geometrie

- Helling bovenbeloop met ruwheidselementen 1:3;
- Ruwheidselementen: 5 rijen met nokhoogte 20cm (schatting). 3 rijen van 4 stenen breed met nok en 2 stenen breed zonder nok en 2 rijen van 3 stenen breed met nok en 3 stenen breed zonder nok; De doorsnede tekening laat maar 4 rijen zien terwijl de foto er 5 laat zien. De foto wordt aangehouden als maatgevend. De voorzijde van de rijen met nok wordt gedefinieerd op hoogten NN+5,3m; NN+6,3m; NN +7,3m; NN+8,3m en NN +9,3m;
- Kruinhoogte: NN +10,0m;
- Teenniveau: NN +2,7m;
- Voorland: de helling met basaltstenen tussen de voorste damwand en het knikpunt wordt hier als gevolg van significante golfbreking aangemerkt als voorland.

Hydraulische randvoorwaarden:

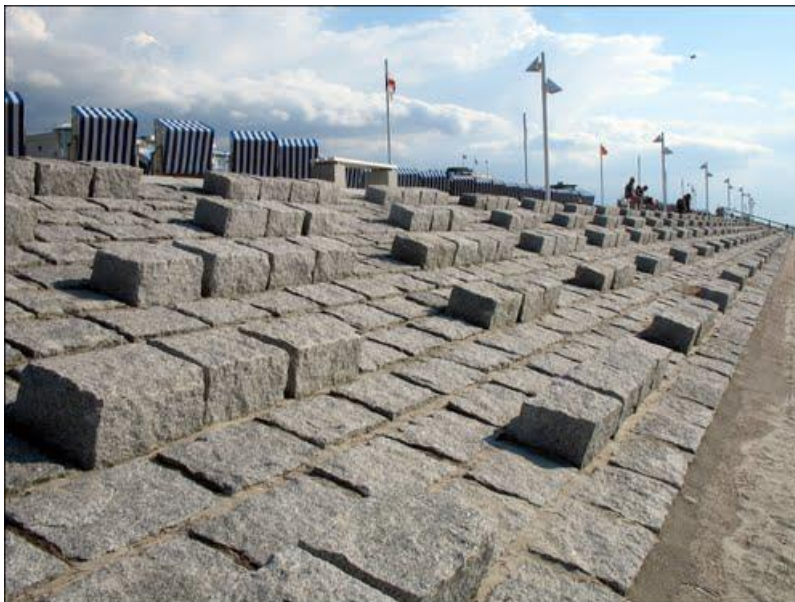
- Ontwerpwaterstand: NN +5,0m;
- Golfhoogte: deze wordt hier gedefinieerd als 1,0 keer de waterdiepte ter plaatse van de het knikpunt, $H_s = 2,3m$;

- Golfperiode: $T_p = 15\text{s}$, $T_{m-1,0} = T_p/1,1 = 13,6\text{s}$.

De ruwheidsbreedte $\gamma_{f,w}$ die we voor de 5 rijen in eerste instantie gaan gebruiken is $4/6+3/6+4/6+3/6+4/6=3,0$. De ruwheidsdichtheid $\rho_{f,f}$ wordt dan 0,038. Omdat we het maximale overslagdebiet niet kennen gebruiken we formule (4.12) waarin de 2% oploophoogte wordt gebruikt in plaats van het maximale toegestane overslagdebiet. De 2% oploophoogte wordt berekend met formule (4.13). De reductiefactor voor de berm is ongeveer 0,7. Hiermee berekenen we een oploophoogte van 4,3m. De ruwheidscoëfficiënt γ_f wordt daarmee 0,786. Het gemiddelde golfoverslagdebiet wordt dan berekend met formule (4.9) en is 0,85 l/s/m.

We controleren nu de effectiviteit van de nokken. We bereken daarvoor de laagdikte van de 2% golfoploop ter plaatse van iedere rij. Voor de onderste rij tot en met de bovenste rij is de waterlaagdikte respectievelijk: 0,86m; 0,65m; 0,43m; 0,21m en 0m. De hoogste rij is dus niet effectief in de huidige berekening. We dienen daarom de ruwheidsbreedte aan te passen naar 2,33. De ruwheidsdichtheid wordt dan kleiner, nl. 0,0295. Hierdoor zal de ruwheidscoëfficiënt groter worden en daarmee de 2% golfoploophoogte ook met als gevolg dat de laagdikte ter plaatse van iedere rij ook toe neemt. De effectiviteit van de bovenste rij wordt dan dus weer groter dan 0. Dit levert dus weer een grotere ruwheidsbreedte op. Al itererend blijkt dat voor de bovenste rij nokken 12% van de nokhoogte mag worden meegenomen in de ruwheidsbreedte. Deze wordt daarmee 2,415 met een bijbehorende ruwheidsdichtheid van 0,0305. De ruwheidscoëfficiënt γ_f van de ribben wordt dan 0,813. Het gemiddelde overslagdebiet is dan 1,06 l/s/m.

Als controle gebruiken we nu dit berekende overslagdebiet in formule (4.10). Eenzelfde ruwheidscoëfficiënt γ_f van 0,813 wordt hier ook gevonden.



Figuur 4.33: Foto ruwheidselementen voorbeeld case (bron: Google Earth)

In Bijlage C is de gehele procedure voor het bepalen van de reductiefactor voor golfoploop en golfoverslag (ruwheidscoëfficiënt) beschreven. In Bijlage D zijn daarna nog een drietal voorbeelden uitgewerkt.

5 Vergelijking van de twee analysemethoden

De metingen van de ruwheid ten aanzien van golfoverslag zijn op twee manieren in dit onderzoek geanalyseerd:

- 1 Analyse van meting in relatie tot het TAW-Technisch Rapport “Golfoploop en Overslag bij Dijken” (TAW 2002). Dat Technisch Rapport is de huidige standaard die gebruikt wordt voor het toetsen en ontwerpen van dijken in Nederland. Deze analyse is beschreven in hoofdstuk 3.
- 2 Analyse van proefparen.
De proeven zijn steeds paarsgewijs uitgevoerd, waarbij steeds een proef is uitgevoerd zonder ruwheid en een met ruwheid. Deze analyse is beschreven in hoofdstuk 4.

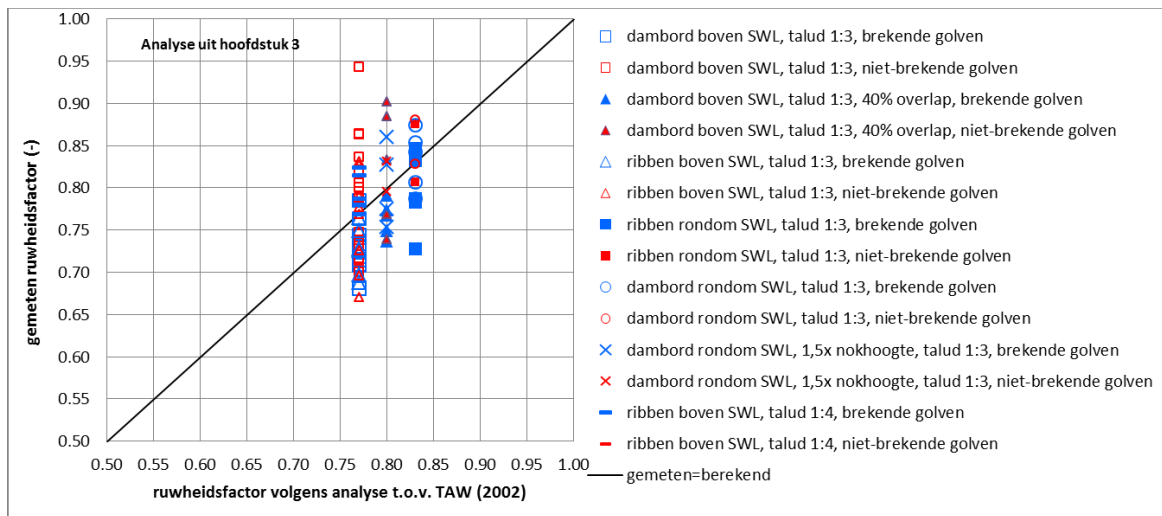
Onderstaand worden de resultaten van deze methodes onderling vergeleken.

5.1 Analyse van resultaten ten opzichte van TAW (2002)

In hoofdstuk 3 is de volgende conclusie getrokken ten aanzien van de ruwheid van steenzettingen met een dambordpatroon of ribben:

- Ribben en damborden met $f_L/f_h \approx 6$ à 10 en $f_h/H_{m0} \approx 0,08$ à $0,19$ (met f_h = hoogte van de ruwheidselementen en f_L = hard op hart afstand):
 - Ribben en damborden hebben een vergelijkbare ruwheid als ze een vergelijkbare geometrie hebben (hoogte en hart-op-hart afstand van het patroon)
 - De ruwheid van een volledig bezet talud is ongeveer 0,73.
 - Als de ribben/dambord alleen boven SWL aanwezig zijn: 0,77 (iets hoger dan de waarde uit het huidige onderzoek, om goed in verhouding uit te komen met de proeven uit 1993 met een volledig bezet talud)
 - Als de ribben/dambord alleen rond SWL aanwezig zijn: 0,83
 - als de ruwheidshoogte een factor 1,5 hoger wordt, gaat de ruwheidscoëfficiënt met 0,03 omlaag.
 - Als het dambordpatroon 40% overlap heeft, in plaats van 20%, gaat de ruwheidscoëfficiënt met 0,03 omhoog.
- Ruwheidsblokken op een glad talud of op een steenzetting (resultaten uit Van der Meer en de Waal (1993) en TAW (2002)), als bovendien het totale oppervlak door blokken is bedekt en als de hoogte $f_h/H_{m0} \approx 0,11$ à $0,19$:
 - Brede ruwheidsblokken op het hele talud: 0,80
 - Vierkante ruwheidsblokken met bedekt oppervlak 1/25 van totaal: 0,85
 - Vierkante ruwheidsblokken met bedekt oppervlak 1/9 van totaal: 0,80
 - Als de ruwheid alleen boven SWL is aangebracht, dan is de ruwheidscoëfficiënt ongeveer 0,05 hoger.

In Figuur 5.1 zijn de gemeten ruwheidscoëfficiënten volgens bovenstaande conclusie vergeleken met de gemeten ruwheidcoëfficiënten tijdens dit onderzoek. In de figuur is te zien dat gemiddeld de berekende ruwheidcoëfficiënten goed overeenkomt met de gemeten ruwheidcoëfficiënten, want de lijn gaat mooi door het hart van de puntenwolk. Er is echter een behoorlijke spreiding.



Figuur 5.1 Vergelijking tussen berekende en gemeten ruwheidsfactor, gebaseerd op de analyse ten opzichte van TAW (2002) uit hoofdstuk 3

5.2 Analyse op basis van proefparen

De methode om de ruwheidscoëfficiënt te bepalen met de methode uit hoofdstuk 4 is een stuk gecompliceerder dan die uit de vorige paragraaf. De methode verloopt in een twee stappen:

1 Ruwheidsdichtheid bepalen met de volgende formule:

$$\delta_{ruw} = \frac{A_{nok} \cdot \sin \alpha}{\min(h_k; z_{2\%})} \quad (5.1)$$

Met:

δ_{ruw} = ρ_f = ruwheidsdichtheid: het gemiddelde aanstroomoppervlak van de uit het talud stekende nokken per m² oploophoogte tot de kruin, maar niet hoger dan de golfoploophoogte $z_{2\%}$ (-)

A_{nok} = het gemiddelde aanstroomoppervlak van de uit het talud stekende nokken per meter dijk, zie Figuur 5.2 (m)

h_k = kruinhoogte ten opzichte van de stilwaterlijn (m)

$z_{2\%}$ = golfoploophoogte ten opzichte van de stilwaterlijn die door 2% van de golven wordt overschreden (ter indicatie: $z_{2\%} \approx 1,5H_s$ à $3H_s$) (m)

α = taludhelling (°)

In Figuur 5.2 is nader toegelicht hoe A_{nok} moet worden berekend. Daarvoor moet een representatief stukje dijk worden beschouwd, dat in dit voorbeeld 8 m lang is. Vervolgens worden alle aanstroomoppervlakken van de ruwheid opgeteld in de zone vanaf net onder de stilwaterlijn tot de kruin- of het oploophoogte (h_k of $z_{2\%}$). Dat oppervlak wordt gedeeld door de lengte van de beschouwde stukje dijk en de lengte van het taludoppervlak in de oploophoogte (tot maximaal de kruinhoogte, h_k , of oploophoogte, $z_{2\%}$). Dat levert de dimensieloze ruwheidsdichtheid δ_{ruw} .

Aanstroomoppervlakken die te diep onder water zitten, tellen niet mee. Doorgaans ligt deze grens bij ongeveer $0,35H_s$ onder water en kan berekend worden met de volgende formule:

$$\frac{d_{ruw}}{H_{m0}} = \min \left(0,35; 0,24 \cdot \xi_{om}^{1/3} \right) \quad (5.2)$$

Met:

d_{ruw} = diepte onder de stilwaterlijn vanaf waar de ruwheid meetelt (m)

ξ_{om} = $\tan \alpha / \sqrt{s_{om}}$ = brekerparameter op basis van $T_{m-1,0}$ (-)

s_{om} = $H_{m0} / (g T_{m-1,0}^2 / (2\pi))$ = golfsteilheid op basis van $T_{m-1,0}$ (-)

H_{m0} = significante golfhoogte berekend uit het spectrum ($\approx H_s$) (m)

$T_{m-1,0}$ = spectrale golfperiode (-)

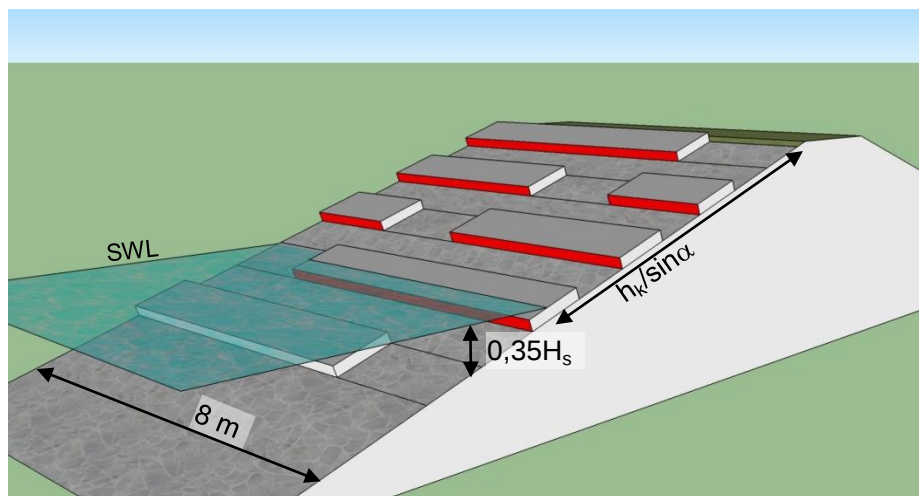
Ook aanstroomoppervlakken die hoger boven de waterlijn zitten dan $z_{2\%}$ (golfploopniveau dat door 2% van golven wordt overschreden) tellen niet mee. In de buurt van dat golfploopniveau is de waterlaagdikte in de golfplooptong mogelijk dunner dan de nokhoogte. Dan telt het deel dat boven de golfplooptong uitsteekt ook niet mee. De dikte van de golfplooptong kan als volgt berekend worden:

$$d_{tong} = 0,216 \cdot (z_{2\%} - z) \quad (5.3)$$

Met:

d_{tong} = dikte van de golfplooptong ter hoogte van z boven SWL (m)

z = niveau boven de stilwaterlijn (m)



Figuur 5.2 Kwantificering van gemiddelde aanstroomoppervlak van de uit het talud stekende nokken per meter dijk (de rode oppervlakken tellen mee en worden door de representatieve dijk lengte gedeeld om A_{nok} te verkrijgen)

2 Ruwheidscoëfficiënt bepalen met de volgende formule:

$$\gamma_f = 1 + 0,585 \cdot \sqrt{0,075 - s_{om}} \cdot \sqrt{\delta_{ruw}} \cdot \ln \left(\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} \right) \quad (5.4)$$

Met:

γ_f = ruwheidscoëfficiënt die toegepast kan worden in golfploop- en golfoverslagformules (-)

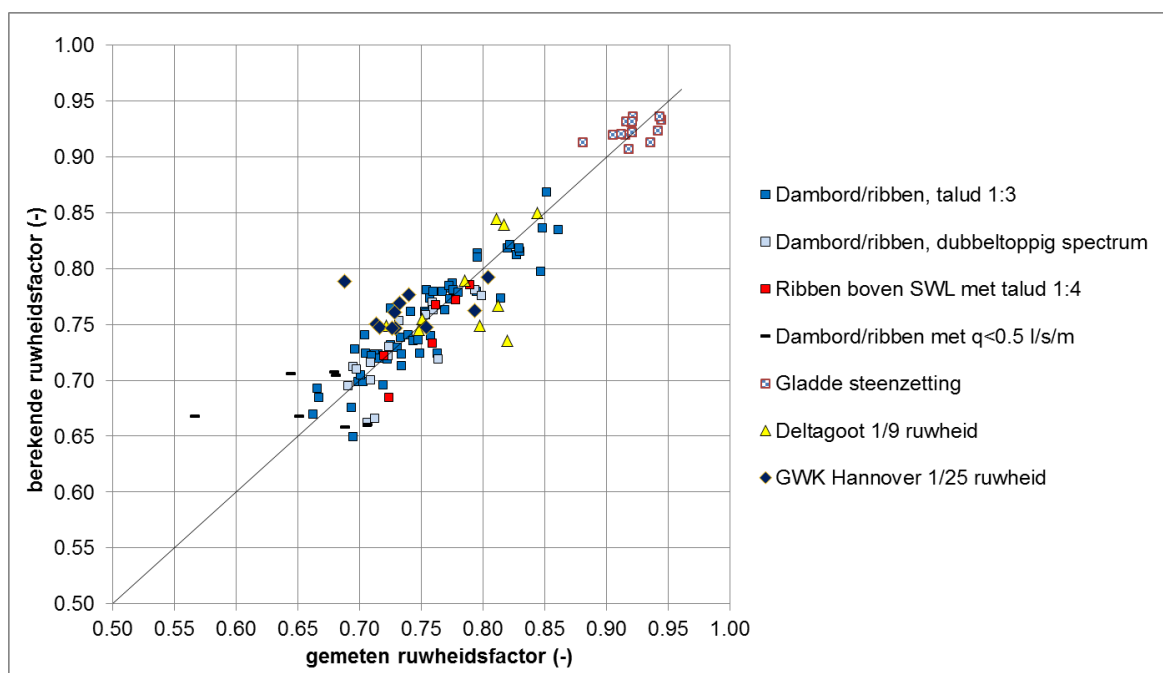
g = versnelling als gevolg van de zwaartekracht (m/s^2)

α = taludhelling ($^\circ$)

q = gemiddelde golfoverslagdebiet ($m^3/m/s$)

Een nadeel van deze methode is dat het overslagdebiet bekend moet zijn. Bij een ontwerp is dit meestal geen probleem, want dan kan het toelaatbare overslagdebiet gebruikt worden. In geval van een toetsing is dit echter niet bekend en kan gebruikgemaakt worden van formule (4.12).

In Figuur 5.3 zijn de gemeten ruwheidscoëfficiënten volgens bovenstaande conclusie vergeleken met de gemeten ruwheidcoëfficiënten tijdens dit onderzoek. Tevens zijn in deze figuur resultaten van grootschalig onderzoek in de Deltagoot en GWK-Hannover opgenomen. In de figuur is te zien dat gemiddeld de berekende ruwheidcoëfficiënten goed overeenkomen met de gemeten ruwheidcoëfficiënten, net als in de vorige paragraaf. De spreiding is nu echter een stuk kleiner.



Figuur 5.3 Vergelijking van gemeten ruwheidscoëfficiënt en de berekende waarde volgens de methoden uit hoofdstuk 4

6 Conclusie

Dit rapport beschrijft het modelonderzoek naar het gedrag van ruwheidspatronen in een dijkbekleding ten aanzien van de golfoplooppremmende eigenschappen.

Meer dan 160 testen zijn uitgevoerd waarbij verschillende patroonconfiguraties zijn getest. Zowel een dambordpatroon als een ribbenpatroon is gebruikt en de positie van dit patroon op het dijktafvlak is gevarieerd. Er zijn zowel een gemakkelijk toe te passen set ruwheidscoëfficiënten als een formule ontwikkeld waarmee de ruwheidscoëfficiënt bepaald kan worden voor loodrecht invallende golven. De onderstaande tabel geeft de range van karakteristieke parameters die zijn gebruikt om dit resultaat af te leiden op basis van het huidige onderzoek en die van de vergelijking met het grootschalige onderzoek (referentie onderzoek) om daarmee het toepassingsgebied van de formule te definiëren.

Tabel 6.1 karakteristieke onderzoeksparameters

	Huidig onderzoek	Referentie onderzoek
$H_s/h(-)$	0,04 - 0,25	0,08 - 0,25
$h_{nok}/H_s(-)$	0,048 - 0,307	0,054 - 0,215
$s_0 = H_s/L_{m0}(-)$	1,8% - 5,0%	0,7% - 5,9%
$s_{m-1,0} = H_s/L_{m-1,0}(-)$	1,8% - 5,2%	1,3% - 6,0%
$kh = 2\pi/L_{m-1,0} h(-)$	1,0 - 5,3	0,5 - 4,0
$\xi_{0m-1,0}(-)$	1,1 - 2,5	0,9 - 2,2
$h_k/H_s(-)$	1,2 - 2,7	0,07 - 0,2
$q (l/s/m)$	0,5 - 40	0,1 - 0,5
$\tan \alpha (-)$	1:3 - 1:4	1:4 - 1:6
$\rho_f(-)$	0,022 - 0,094	0,015 - 0,051

De analyse van de proefresultaten is op twee manieren uitgevoerd:

- 1 Analyse van de metingen in relatie tot het TAW-Technisch Rapport "Golfoploop en Overslag bij Dijken" (TAW 2002), zie hoofdstuk 3. Dat Technisch Rapport is de huidige standaard die gebruikt wordt voor het toetsen en ontwerpen van dijken in Nederland. Door hiervan uit te gaan ontstaat echter het gevaar dat nog niet eerder geconstateerde trends over het hoofd gezien worden.
- 2 Analyse van proefparen, zie hoofdstuk 4. De proeven zijn steeds paarsgewijs uitgevoerd, waarbij steeds een proef is uitgevoerd zonder ruwheid en een met ruwheid. Door deze paarsgewijs te analyseren kunnen nieuwe trends ontdekt worden, maar is het moeilijker om trends en spreiding van elkaar te onderscheiden.

De eerste methode heeft geleid tot een gemakkelijk toepasbare set ruwheidscoëfficiënten voor een brede range aan ruwheidselementen:

- Ribben en damborden met $f_L/f_h \approx 6$ à 10 en $f_h/H_{m0} \approx 0,08$ à 0,19 (met f_h = hoogte van de ruwheidselementen en f_L = hard op hart afstand):
 - Ribben en damborden hebben een vergelijkbare ruwheid als ze een vergelijkbare geometrie hebben (hoogte en hart-op-hart afstand van het patroon)
 - De ruwheid van een volledig bezet talud is ongeveer 0,73.
 - Als de ribben/dambord alleen boven SWL aanwezig zijn: 0,77 (iets hoger dan de waarde uit het huidige onderzoek, om goed in verhouding uit te komen met de proeven uit 1993 met een volledig bezet talud)

- Als de ribben/dambord alleen rond SWL aanwezig zijn: 0,83
- als de ruwheidshoogte een factor 1,5 hoger wordt, gaat de ruwheidscoëfficiënt met 0,03 omlaag.
- Als het dambordpatroon 40% overlap heeft, in plaats van 20%, gaat de ruwheidscoëfficiënt met 0,03 omhoog.
- Ruwheidsblokken op een glad talud of op een steenzetting (resultaten uit Van der Meer en de Waal (1993) en TAW (2002)), als $5 < f_L/f_b < 8$ en als bovendien het totale oppervlak door blokken is bedekt en als de hoogte $f_h/H_{m0} \approx 0,11$ à $0,19$:
 - Brede ruwheidsblokken op het hele talud: 0,80
 - Vierkante ruwheidsblokken met bedekt oppervlak 1/25 van totaal: 0,85
 - Vierkante ruwheidsblokken met bedekt oppervlak 1/9 van totaal: 0,80
 - Als de ruwheid alleen boven SWL is aangebracht, dan is de ruwheidscoëfficiënt ongeveer 0,05 hoger.

Uit de analyse volgens de tweede methode, waarbij de proefparen onderling zijn vergeleken om de ruwheid te bepalen, is gebleken dat de ruwheidscoëfficiënt afhankelijk is van een aantal parameters. Bij toenemende golfoverslag wordt de invloed van de ruwheidselementen kleiner. Dit komt door een grotere laagdikte van de oplooptong boven de elementen bij grotere overslagdebieten. Als de volledige oplooptong tegen een opstaande nok in het talud botst heeft dit veel meer effect dan wanneer de oplooptong veel dikker is dan de nokhoogte en dus grotendeels ongestoord kan doorgaan. De ruwheidscoëfficiënt gaat dus richting 1,0 voor grote hoeveelheden overslag.

Steile golven ondervinden daarnaast minder ruwheid dan relatief lange golven. Ruwheidselementen onder water hebben maar een kleine bijdrage in de reductie van de golfoverslag, in het geval dat het overslagdebiet 1 tot 10 l/s/m of groter is. Vanaf ongeveer $0,35H_{m0}$ onder de stilwaterlijn en dieper is geen significante bijdrage meer gevonden (grens ligt op $SWL - \min(0,35H_{m0} ; 0,24\xi_{om}^{2/3})$).

Wanneer de laagdikte namelijk kleiner is dan de nokhoogte dient de bijdrage van deze nok gemaximaliseerd te worden gelijk aan de waterlaagdikte van de oplooptong. Met andere woorden: de plaats waar de ruwheid zich bevindt, wordt meegewogen in de bepaling van de ruwheidscoëfficiënt. De wijze waarop dit kan worden verdisconteerd is beschreven in paragraaf 5.2. Daar is de volledige procedure met formules weergegeven.

Het dambordpatroon presteerde net iets minder dan het ribbenpatroon. Dit valt te verklaren door een net iets grotere ruwheidsdichtheid voor het ribbenpatroon.

De overslagdebieten kleiner dan 0,5 l/s/m zijn door de aanwezigheid van mogelijke schaafeffecten niet meegenomen in de definitieve afleiding van de formule voor het bepalen van de ruwheidscoëfficiënt γ_f . Formule (4.10) en Formule (4.12) kunnen daarvoor gebruikt worden.

Deze formules worden hier nogmaals herhaald als Formule (6.1) en Formule (6.2):

$$\gamma_f = 1 + 0,585 \cdot \sqrt{0,075 - s_{om-1,0}} \cdot \sqrt{\delta_{ruw}} \cdot \ln \left(\frac{q}{\sqrt{g} \cdot H_{m0}^3} \right) \quad (6.1)$$

$$\text{Of: } \gamma_f = 1 - 0,585 \cdot \sqrt{0,075 - s_{om-1,0}} \cdot \sqrt{\delta_{ruw}} \cdot \left(6,9 \frac{h_k}{z_{2\%}} - \ln \left(\frac{0,035\xi_{om-1,0}}{\sqrt{\tan \alpha}} \right) \right) \quad (6.2)$$

waarin:

$$\delta_{ruw} = \frac{A_{nok} \cdot \sin \alpha}{\min(h_k; z_{2\%})} \quad (6.3)$$

Met:

- δ_{ruw} = ρ_f = ruwheidsdichtheid: het gemiddelde aanstroomoppervlak van de uit het talud stekende nokken per m² oplooptzone tot de kruin, maar niet hoger dan de golfoploophoogte $z_{2\%}$ (-)
- A_{nok} = het gemiddelde aanstroomoppervlak van de uit het talud stekende nokken per meter dijk, zie Figuur 5.2, voor zover boven SWL – $\min(0,35H_s; 0,24\xi_{om}^{2/3})$ (m)
- h_k = kruinhoogte ten opzichte van de stilwaterlijn (m)
- $z_{2\%}$ = golfoploophoogte ten opzichte van de stilwaterlijn die door 2% van de golven wordt overschreden (ter indicatie: $z_{2\%} \approx 1,5H_s$ à $3H_s$) (m)
- α = taludhelling (°)
- γ_f = ruwheidscoëfficiënt (-)
- α = taludhelling (°)
- h_k = relatieve kruinhoogte ten opzichte van de stilwaterlijn (m)
- H_{m0} = significante golfhoogte bij de teen van de dijk (m)
- $T_{m-1,0}$ = spectrale golfperiode (s)
- $L_{m-1,0}$ = golflengte bij waterdiepte bij de teen van de dijk op basis van $T_{m-1,0}$ (m)
- $S_{m-1,0}$ = $H_{m0}/L_{m-1,0}$ = golfsteilheid op basis van lokale golflengte (bij waterdiepte bij de teen van de dijk) en $T_{m-1,0}$ (-)
- $\xi_{om-1,0}$ = brekerparameter gebaseerd op $\tan \alpha / \sqrt{[2\pi H_{m0}/(gT_{m-1,0}^2)]}$ (-)
- q = (maximaal toelaatbare) overslagdebiet per m dijk lengte (m³/s/m)
- g = versnelling van de zwaartekracht (9,81 m/s²)
- $z_{2\%}$ = golfoploophoogte die door 2% van de inkomende golven wordt overschreden

De zo berekende waarde van de ruwheid kan direct gebruikt worden voor het bepalen van de overslag of oploop en mag niet vermenigvuldigd worden met de ruwheidscoëfficiënt van de betreffende type steenzetting. De ruwheid van de steenzetting is er namelijk al in verwerkt. De effectiviteit van de ruwheidselementen (nokken) wordt waarschijnlijk minder naarmate ze dichter achterelkaar worden geplaatst (gezien in de richting van de golfoploop). Hoewel dit in het huidige onderzoek niet is onderzocht, wordt aangenomen dat bovenstaande formules slechts toegepast mogen worden als het lage deel tussen de nokken tenminste 3 maal zo breed is als de nokhoogte (in serie 5b was deze verhouding 3,1, terwijl bij alle andere series het groter was).

Het gemiddelde aanstroomoppervlak van de uit het talud stekende nokken per meter dijk, A_{nok} , is hierin het aantal meters ruwheidselementen, dat wordt aangestroomd per meter dijk, voor zover gelegen boven SWL – $\min(0,35H_s; 0,24\xi_{om}^{2/3})$. De effectieve nokhoogte wordt bepaald door de waterlaagdikte van de oplooptong. Wanneer deze waterlaagdikte klein wordt zal niet het gehele oppervlak van de nok aangesproken worden en dient de nokhoogte gereduceerd te worden (zie paragraaf 5.2).

Formule (6.2) is de afgeleide formule van Formule (6.1) met gebruikmaking van Formule (4.9).

Het overslagdebiet q in Formule (6.1) dient bij een ontwerp of toetsing van een dijkbekleding het maximaal toelaatbare debiet te zijn. Wanneer dit debiet niet bekend is, bijvoorbeeld omdat het overslagdebiet van een bestaande dijk wordt berekend, kan Formule (6.2) gebruikt worden. Hier dient echter de ruwheidscoëfficiënt op iteratieve wijze bepaald te worden omdat

deze in de formule ook de grootte van $z_{2\%}$ beïnvloed en dus op twee plaatsen in de formule zit. Eventueel kunnen ook andere reductiefactoren zoals die voor bermen in de golfploopformule (4.7) toegevoegd worden.

Drainage lijkt belangrijk te zijn voor het goed functioneren van een ruwheidselement. Tijdens de proeven met extreem veel golfoverslag was te zien dat het water tussen de ruwheidspatronen in bleef staan waardoor het talud zich gladder ging gedragen. Met behulp van Formule (6.1) en (6.2) wordt een significant hogere ruwheidscoëfficiënt berekend dan gemeten (afgeleid op basis van formule 24 uit TAW 2002). Voor de invloed van de drainage is het waterbergend vermogen van de steenzetting ten opzichte van de dikte van de oplooptong relevant. Dit is in het huidige onderzoek niet nader onderzocht.

De ruwheidscoëfficiënt van een glad talud opgebouwd uit kubussen (nokhoogte = 0m) is in de testen ongeveer 0,92 geweest. Dit komt overeen met een ruwheidscoëfficiënt van een standaard steenzettingselement. De ruwheidscoëfficiënten die voor een willekeurig patroon gelden, gelden dus voor een willekeurig steenzettingspatroon en dient niet vermenigvuldigd te worden met de standaard ruwheid van een steenzettingselement.

Samenvattend heeft het onderzoek een aantal belangrijke aspecten aan het licht gebracht:

- De effectiviteit van de ruwheidselementen is afhankelijk van de dikte van de waterlaag in de golfplooitong. Dit is in de formules ondergebracht door een invloed van de golfoverslaghoeveelheid op te nemen.
- Naarmate de waterlaagdikte toeneemt (bij toenemende hoeveelheid golfoverslag) tendeert de ruwheidsfactor naar 1. Dat betekent dat bij veel golfoverslag het ruw maken van de taludhelling weinig invloed heeft.
- Dit geldt ook voor de ruwheid van de verschillende soorten bekledingen die vermeld zijn in TAW (2002). De daar vermelde vaste waarden voor de ruwheidscoëfficiënt zijn vermoedelijk geldig voor een gemiddeld overslagdebiet van 0,1 l/s/m en zouden eigenlijk afhankelijk moeten worden gemaakt van het overslagdebiet.

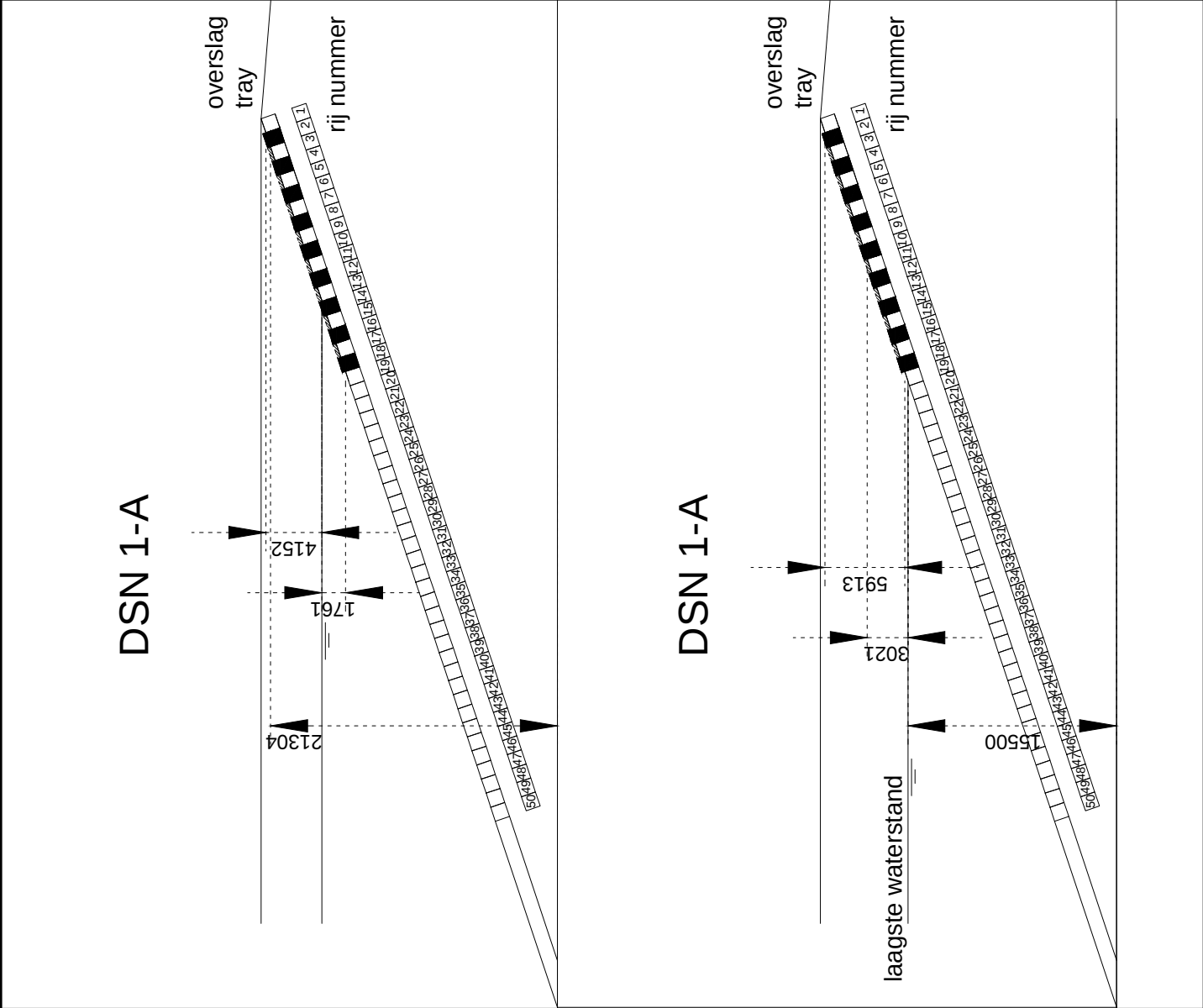
Doordat bovengenoemde aspecten nu goed in de formules zijn opgenomen, zijn de formules voor het verdisconteren van ruwheid helaas wat gecompliceerder geworden.

7 Referenties

- Battjes, J.A. (1974). Surf similarity. Proceedings 14th Coastal Engineering Conference, Volume I, pp 466-480.
- Capel, A. (2015). Wave run-up and overtopping reduction by block revetments with enhanced roughness. Coastal Engineering 104, p76-92. Elsevier
- EurOtop (2007). Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures – Assessment Manual. Eds. Pullen, T., N.W.H Allsop, T. Bruce, A. Kortenhaus, H. Schüttrumpf & J.W. van der Meer. www.overtopping-manual.com
- Führböter, A., U. Sparboom, and H-H Witte (1989). Grosser Wellenkanal Hannover: Versuchsergebnisse über den Wellenaufbau auf glatten und rauhen Deichböschungen mit der Neigung 1:6. Die Küste-Heft 50.
- Hughes, S., C. Thornton, J. van der Meer, and Bryon Scholl (2012). Improvements in describing wave overtopping processes. ASCE, Proc. ICCE 2012, Santander, Spain.
- Meer, J.W. Van der, en J.P. de Waal (1993). Waterbeweging op taluds; Invloed van berm, ruwheid, ondiep voorland en scheve lang- en kortkammige golfaanval
Waterloopkundig Laboratorium, rapport H1256, april 1993
- Schüttrumpf H. and H. Oumeraci (2005). Layer thicknesses and velocities of wave overtopping flow at seadikes. Coastal Engineering 52, p473-495.
- Schüttrumpf, H. (2001). Wellenüberlaufstromung bei Seedeichen – Experimentelle und Theoretische Untersuchungen. PHD-thesis.
- TAW (2002). Technische Rapport Golfoploop en Golfoverslag bij dijken. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. Delft.
- Van Gent, M.R.A. (1999), "Physical model investigations on coastal structures with shallow foreshores; 2D model TCs with single and double peaked wave energy spectra", Delft Hydraulics Report H3608, December 1999, Delft
- Van Gent, M.R.A. (2001), "Wave run-up on dikes with shallow foreshores", ASCE, Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol.127, No 5, pp. 254-262, September/October 2001 issue.
- Van der Meer, J.W., and T. Bruce (2014). New physical insights and design formulae on wave overtopping at sloping and vertical structures. Journal of ASCE, WPC&OE, 2014
- Waterloopkundig Laboratorium (1957). Remmende invloed op golfoploop door ribbels op gesloten dijkbekleding. Verslag Modelonderzoek. Rapport M568. Delft.
- Wouters, J., A. Majers, H.R. Luth, and J.P. de Waal (1994). Open taludbekledingen – Ruwheidselementen op dijkbekledingen. WL|Delft Hydraulics Report H1770_3.
- Zelt and Skjelbreia (1992). Estimating incident and reflected wave fields using an arbitrary number of wave gauges. Proceedings 23rd ICCE, Vol. 1, 777 – 789, Venice, Italy.

Zanuttigh, B., J. van der Meer, T Bruce, and S. Hughes (2013). Statistical Characterisation of Extreme Overtopping Wave Volumes. Proc. ICE, Coasts, Marine Structures and Breakwaters, Edinburgh, UK.

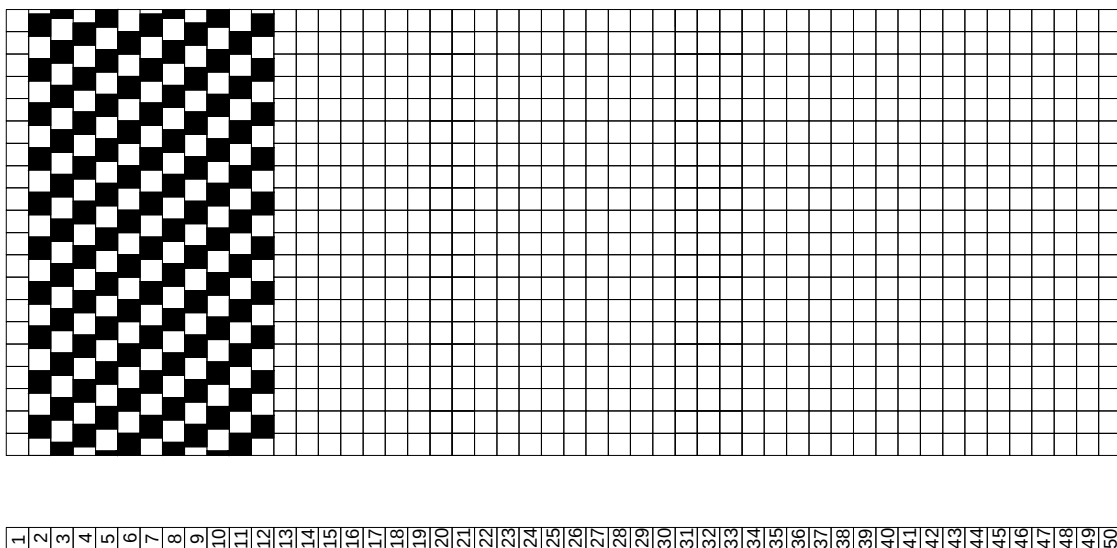
A Dwarsdoorsneden en bovenaanzichten proefopstellingen



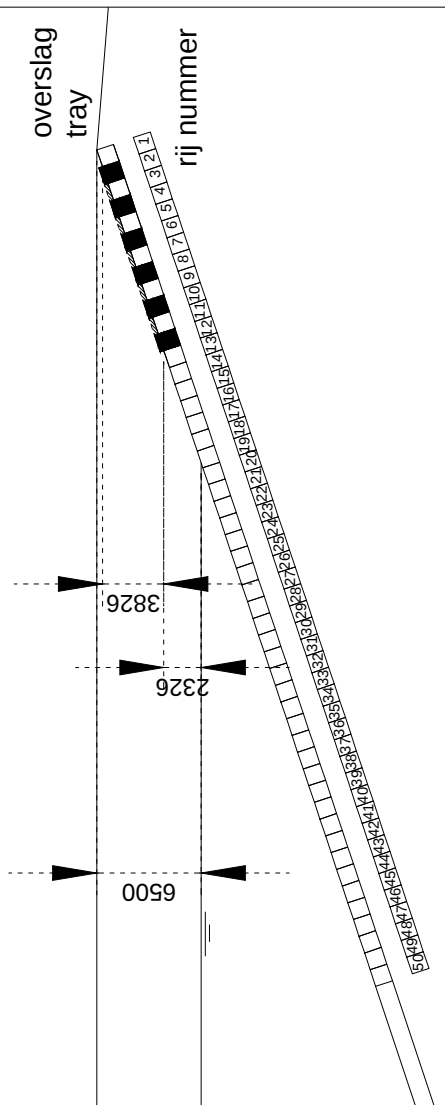
Onderzoek ruwheid speciale steenzettingspatronen Dambordpatroon met 20% overlap en standaard nokhoogte	1208618	DSN. 1-A
	Talud 1:3	
Deltares	Bijlage A	Fig. 1-1

Dimensions in mm prototype

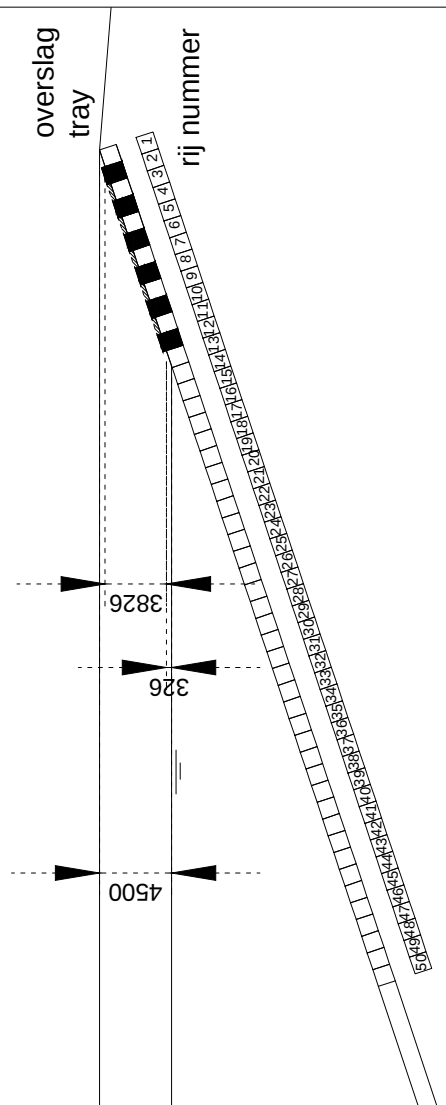
rij nummer



DSN 1-B



DSN 1-B



Onderzoek ruwheid speciale steenzettingspatronen
Dambordpatroon met 20% overlap en standaard nokhoogte

Deltares

1208618

Talud 1:3

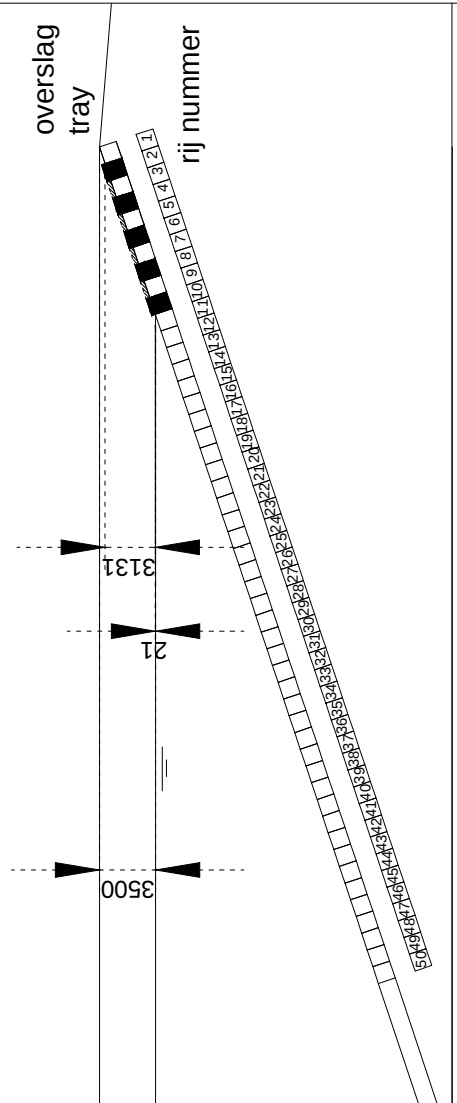
Bijlage A

DSN. 1-B

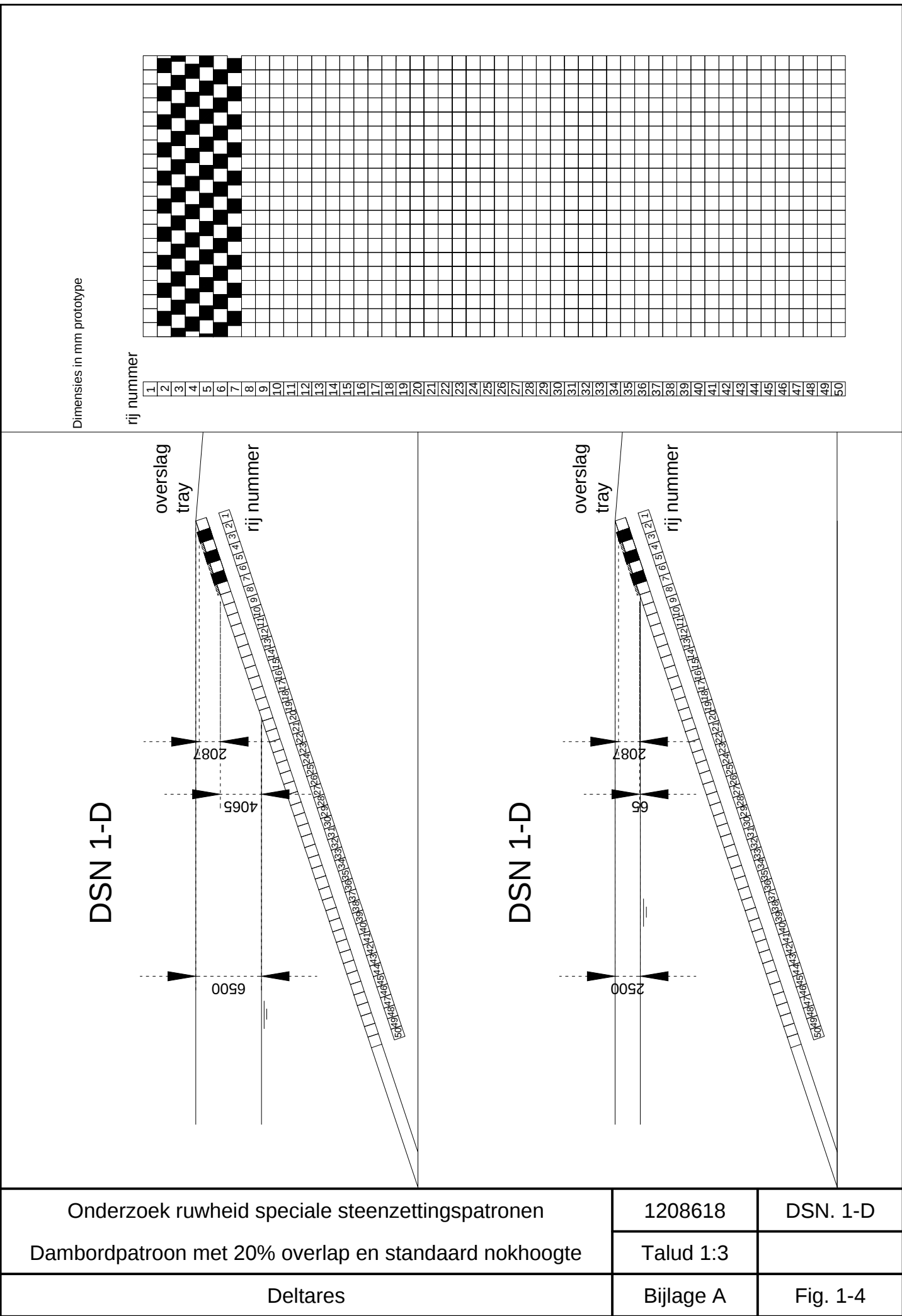
Fig. 1-2

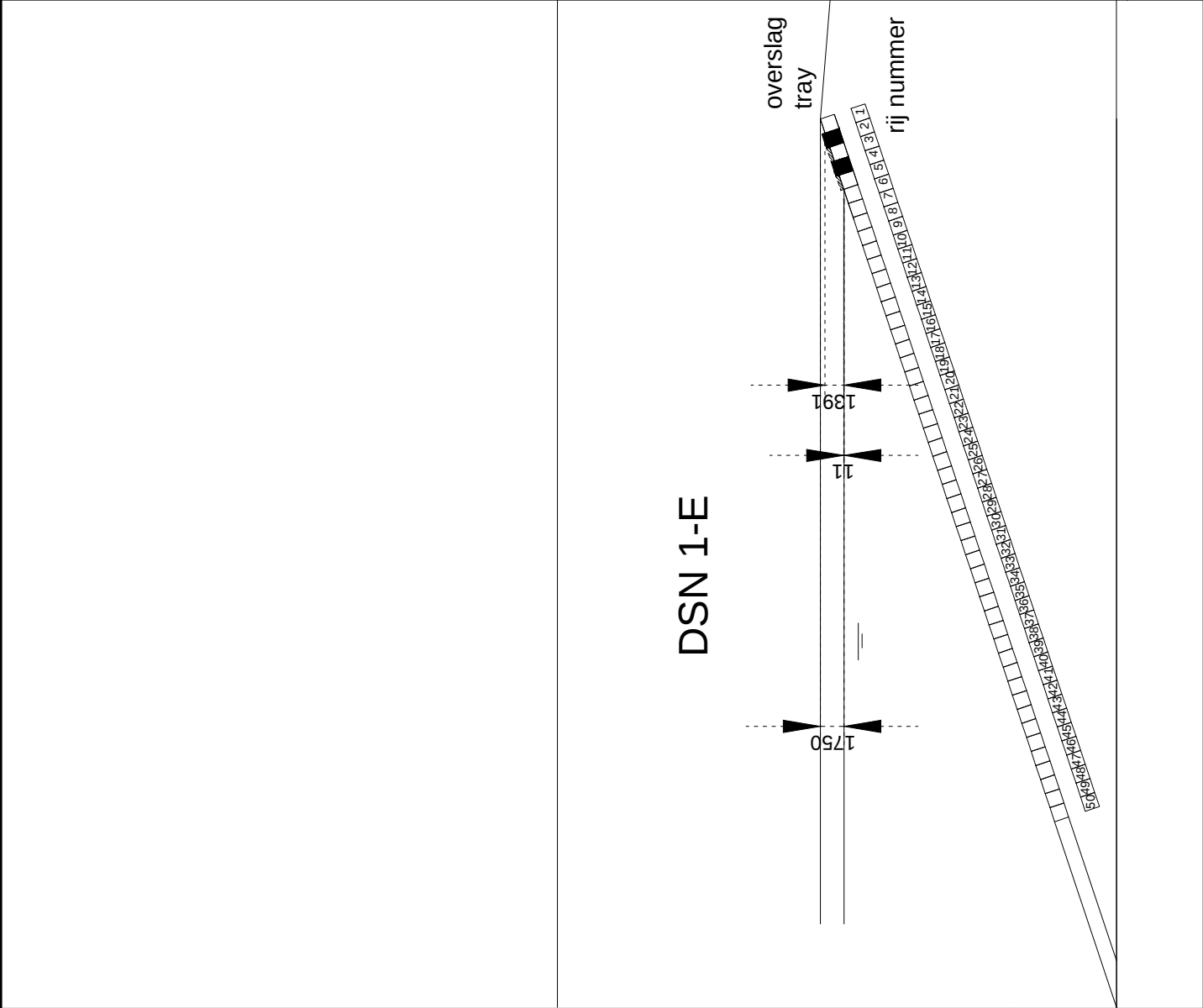
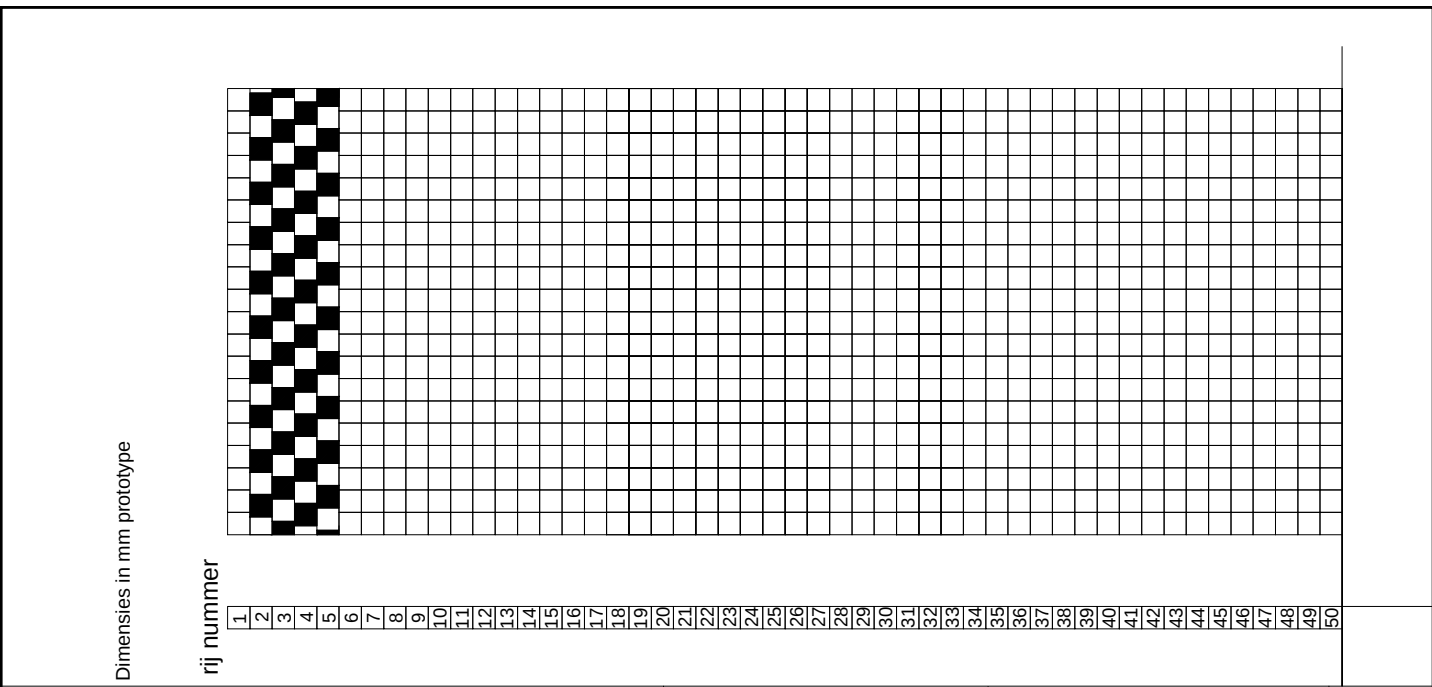
A 20x20 grid. The first 5 columns (columns 1 to 5) contain a checkerboard pattern of black and white squares. The remaining 15 columns (columns 6 to 20) are empty white squares.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----



Onderzoek ruwheid speciale steenzettingspatronen	1208618	DSN. 1-C
Dambordpatroon met 20% overlap en standaard nokhoogte	Talud 1:3	
Deltares	Bijlage A	Fig. 1-3

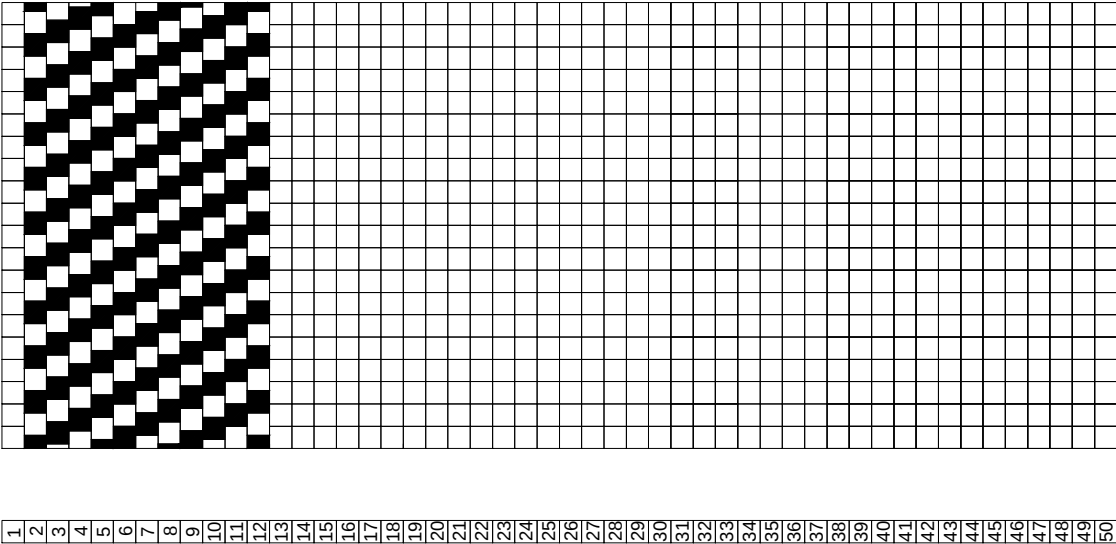




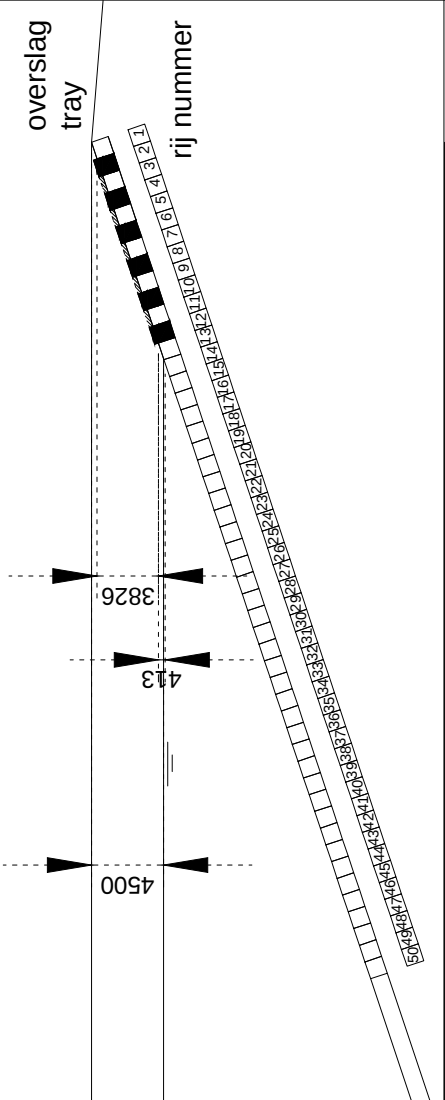
Onderzoek ruwheid speciale steenzettingspatronen Dambordpatroon met 20% overlap en standaard nokhoogte	1208618	DSN. 1-E
	Talud 1:3	
Deltares	Bijlage A	Fig. 1-5

Dimensions in mm prototype

rij nummer



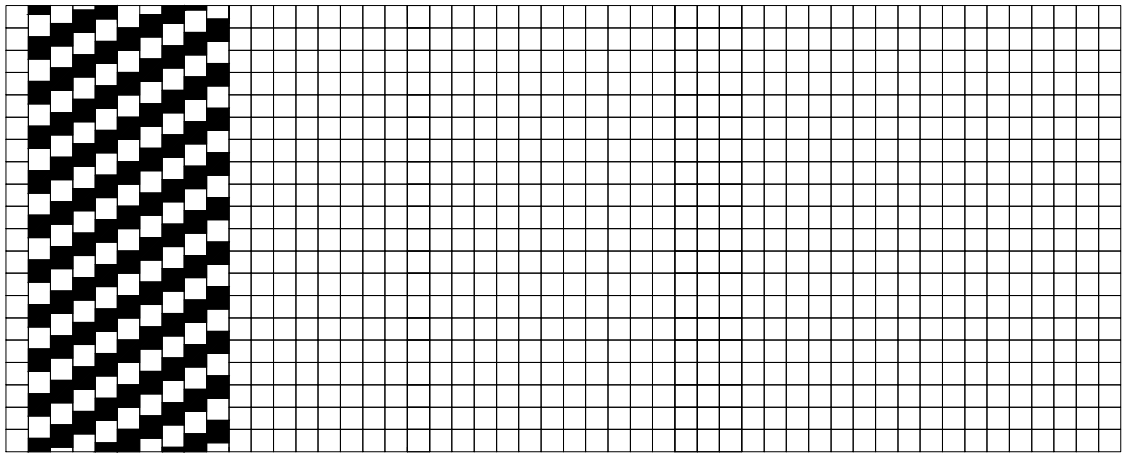
DSN 2-A



Onderzoek ruwheid speciale steenzettingspatronen Dambordpatroon met 40% overlap en standaard nokhoogte	1208618	DSN. 2-A
	Talud 1:3	
Deltares	Bijlage A	Fig. 2-1

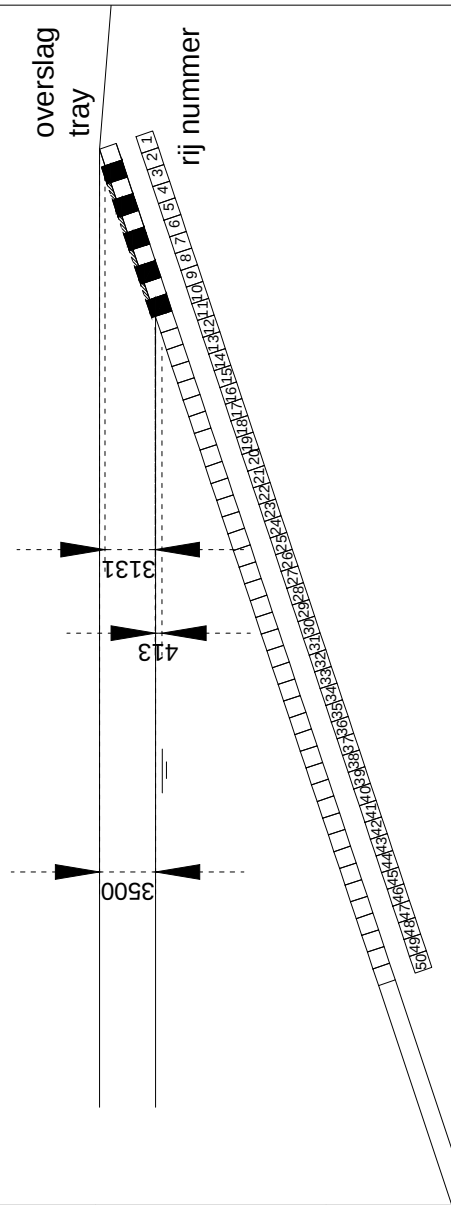
Dimensies in mm prototype

rij nummer



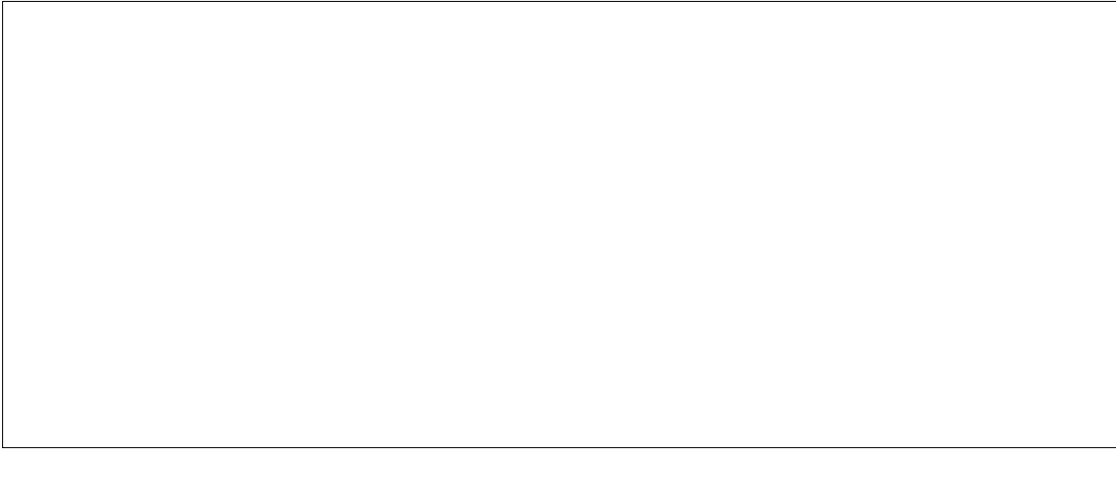
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19
- 20
- 21
- 22
- 23
- 24
- 25
- 26
- 27
- 28
- 29
- 30
- 31
- 32
- 33
- 34
- 35
- 36
- 37
- 38
- 39
- 40
- 41
- 42
- 43
- 44
- 45
- 46
- 47
- 48
- 49
- 50

DSN 2-B

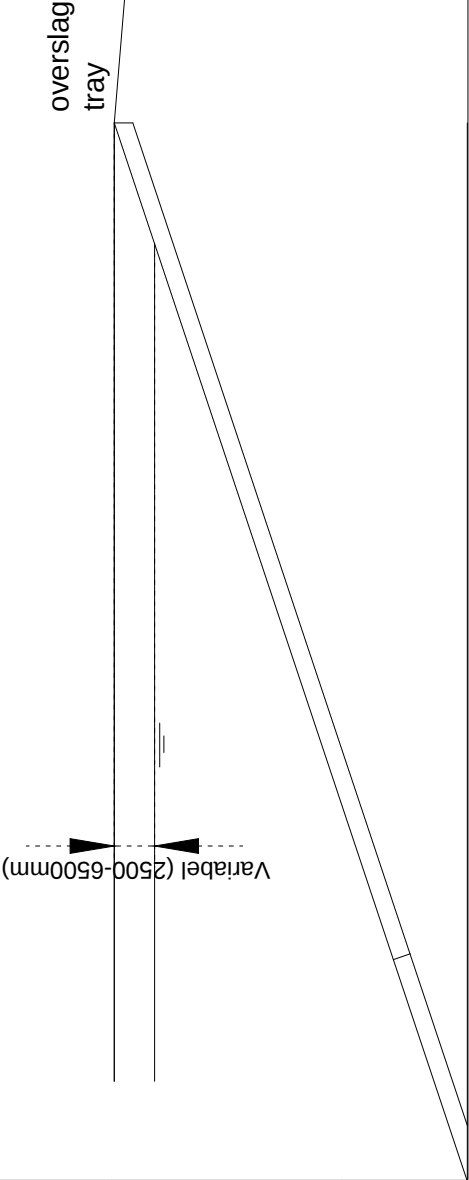


Onderzoek ruwheid speciale steenzettingspatronen Dambordpatroon met 40% overlap en standaard nokhoogte	1208618	DSN. 2-B
	Talud 1:3	
Deltares	Bijlage A	Fig. 2-2

Dimensions in mm prototype



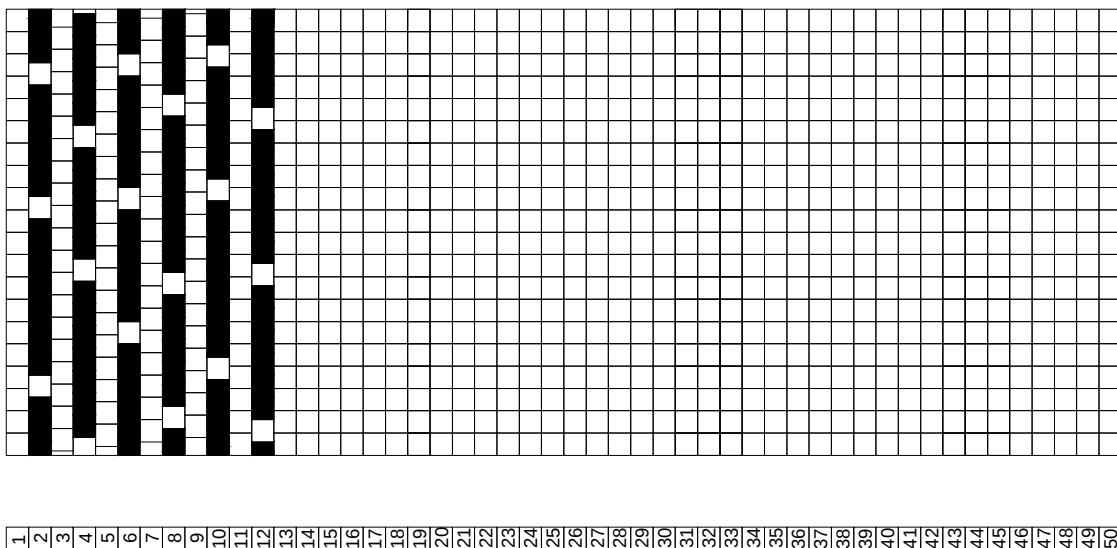
DSN 3



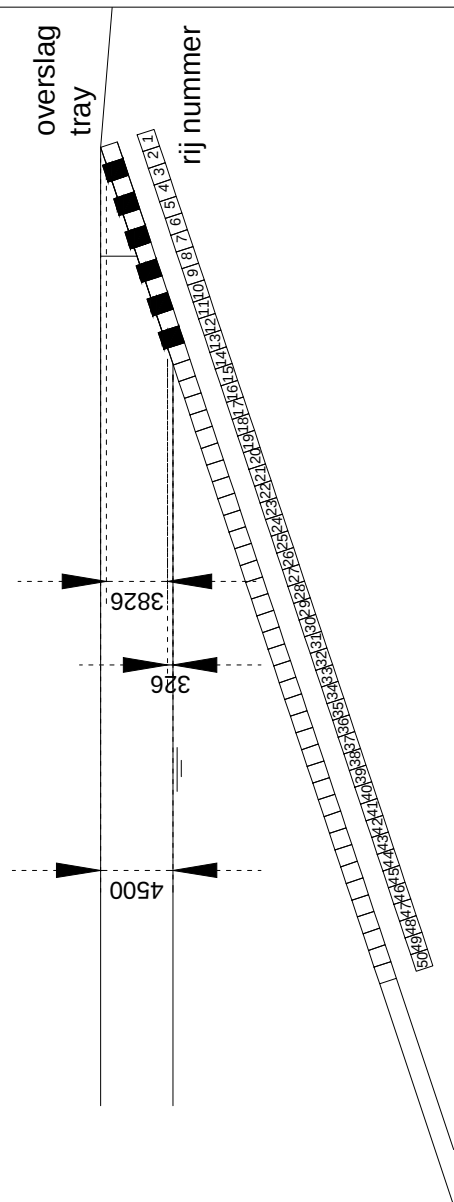
Onderzoek ruwheid speciale steenzettingspatronen Referentie doorsnede met glad houten talud	1208618	DSN. 3
	Talud 1:3	
Deltares	Bijlage A	Fig. 3-1

Dimensions in mm prototype

rij nummer



DSN 4-A



Onderzoek ruwheid speciale steenzettingspatronen
Ribbenpatroon met standaard nokhoogte

1208618

DSN. 4-A

Talud 1:3

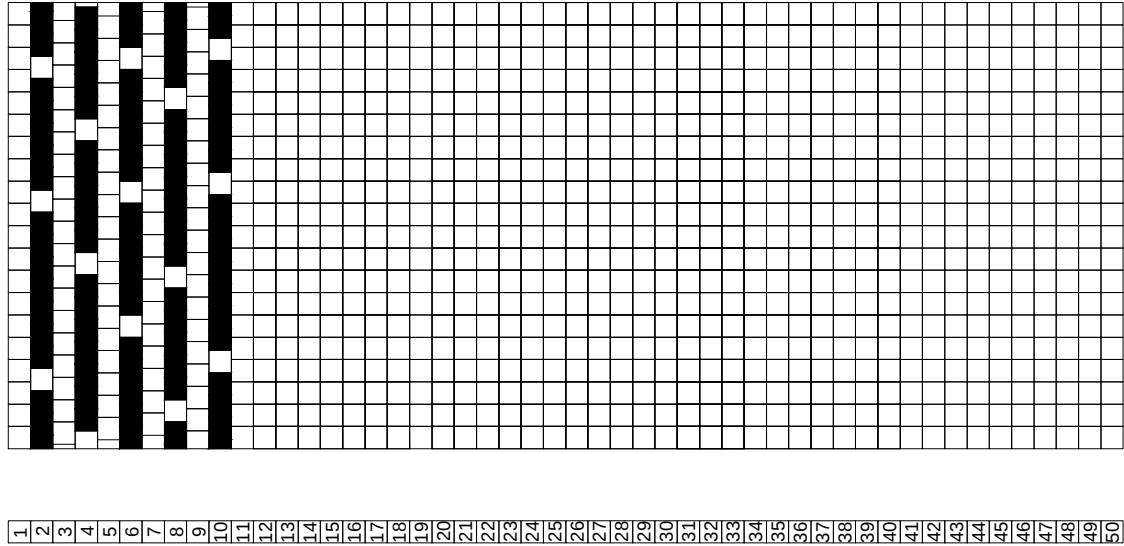
Deltares

Bijlage A

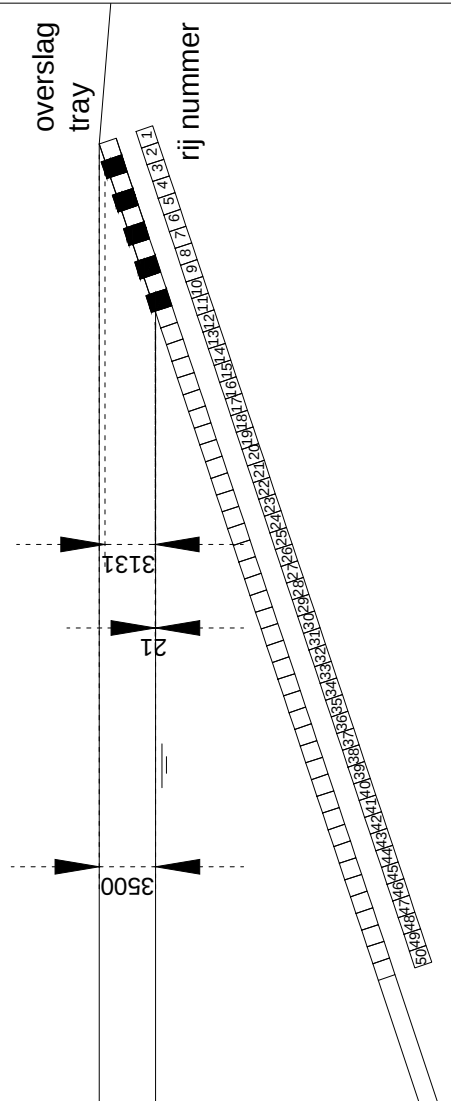
Fig. 4-1

Dimensies in mm prototype

rij nummer



DSN 4-B



Onderzoek ruwheid speciale steenzettingspatronen
Ribbenpatroon met standaard nokhoogte

1208618

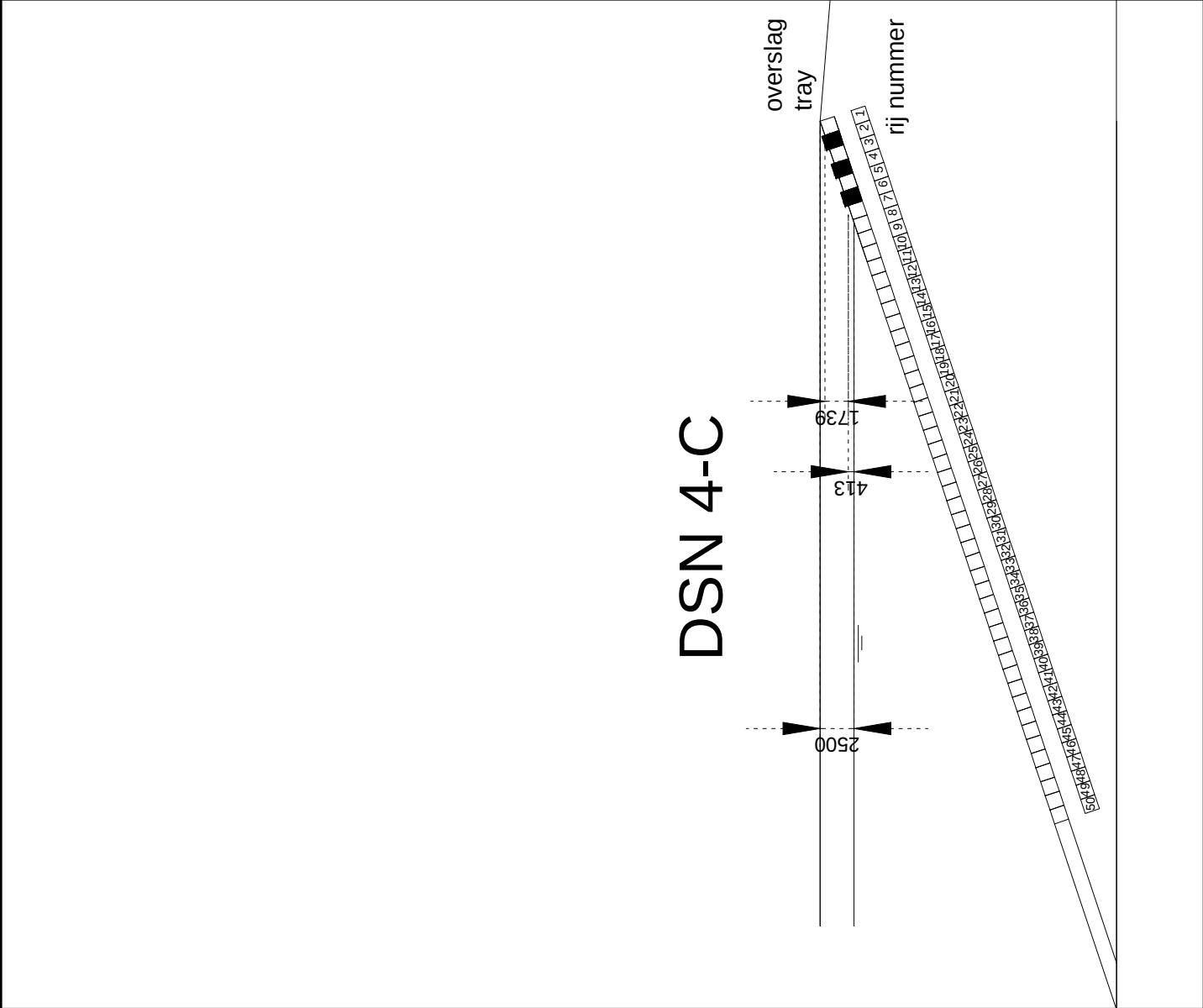
DSN. 4-B

Talud 1:3

Deltares

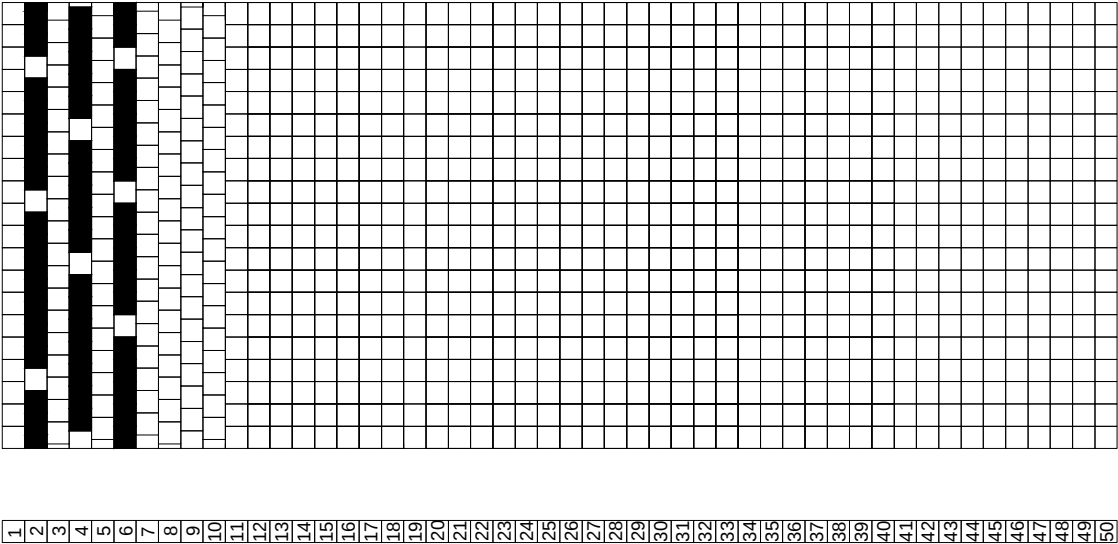
Bijlage A

Fig. 4-2



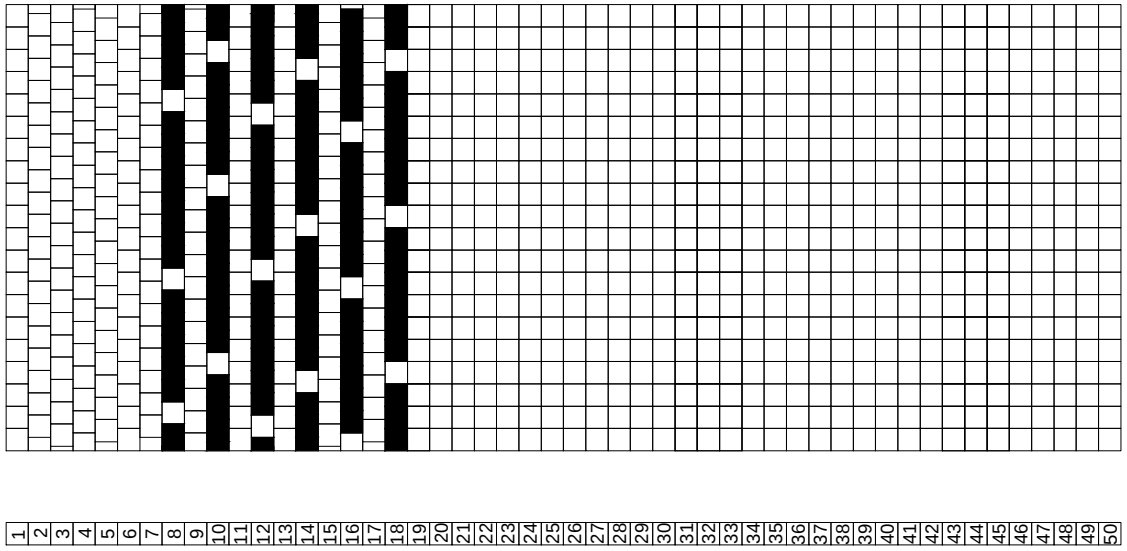
Dimensions in mm prototype

rij nummer

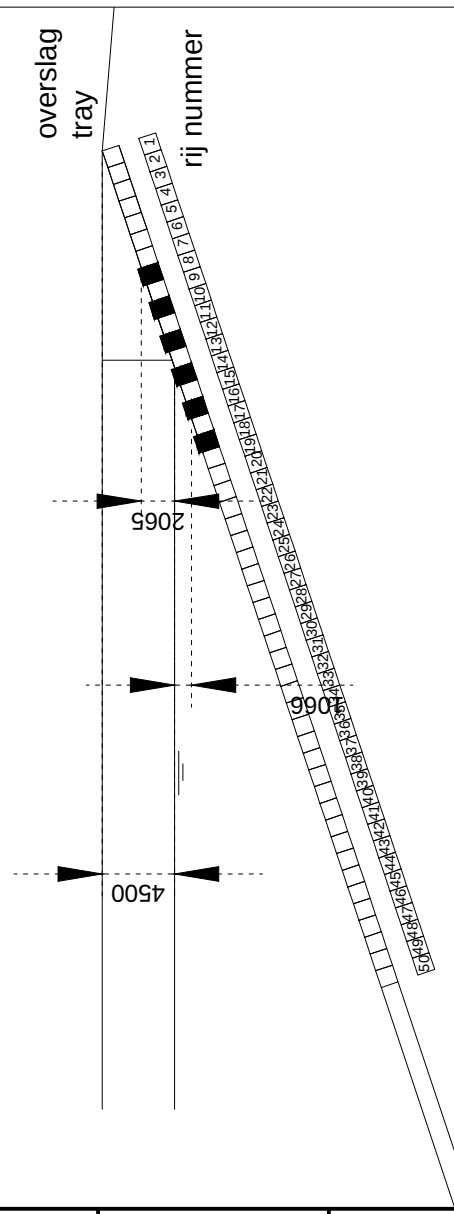


Dimensions in mm prototype

rij nummer



DSN 4-D



Onderzoek ruwheid speciale steenzettingspatronen
Ribbenpatroon met standaard nokhoogte

1208618
Talud 1:3

DSN. 4-D

Deltares

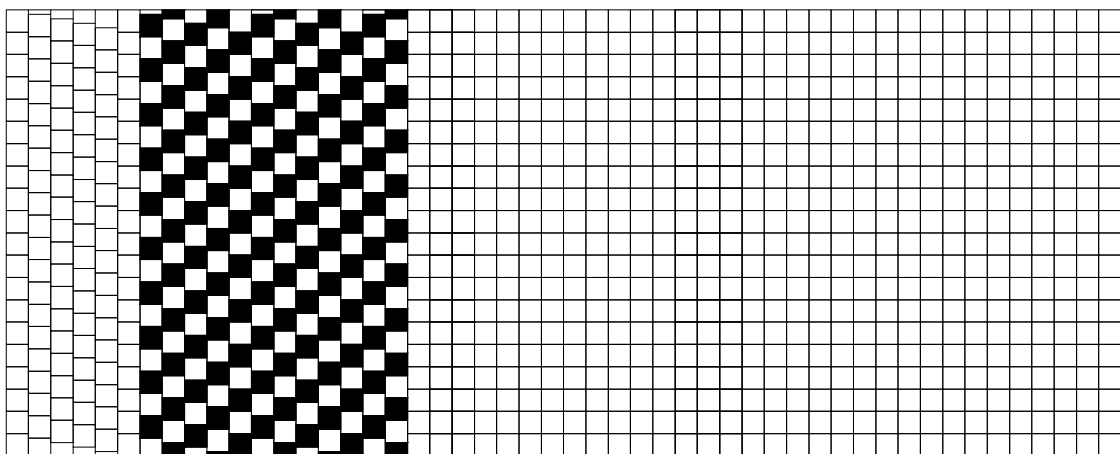
Bijlage A

Fig. 4-4

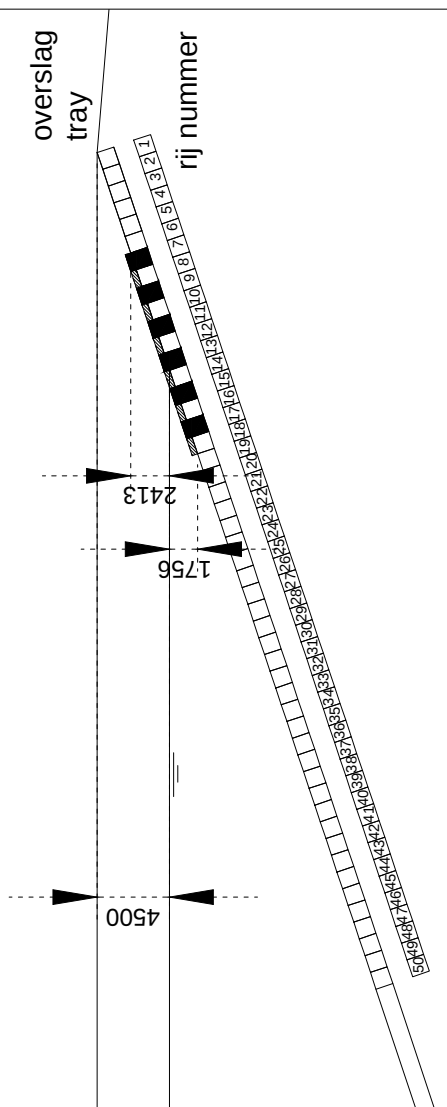
Dimensions in mm prototype

rij nummer

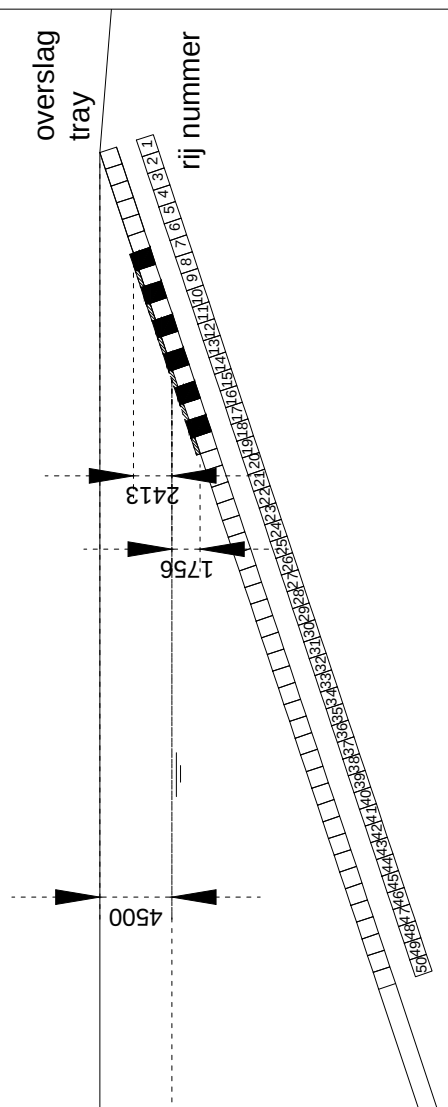
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50



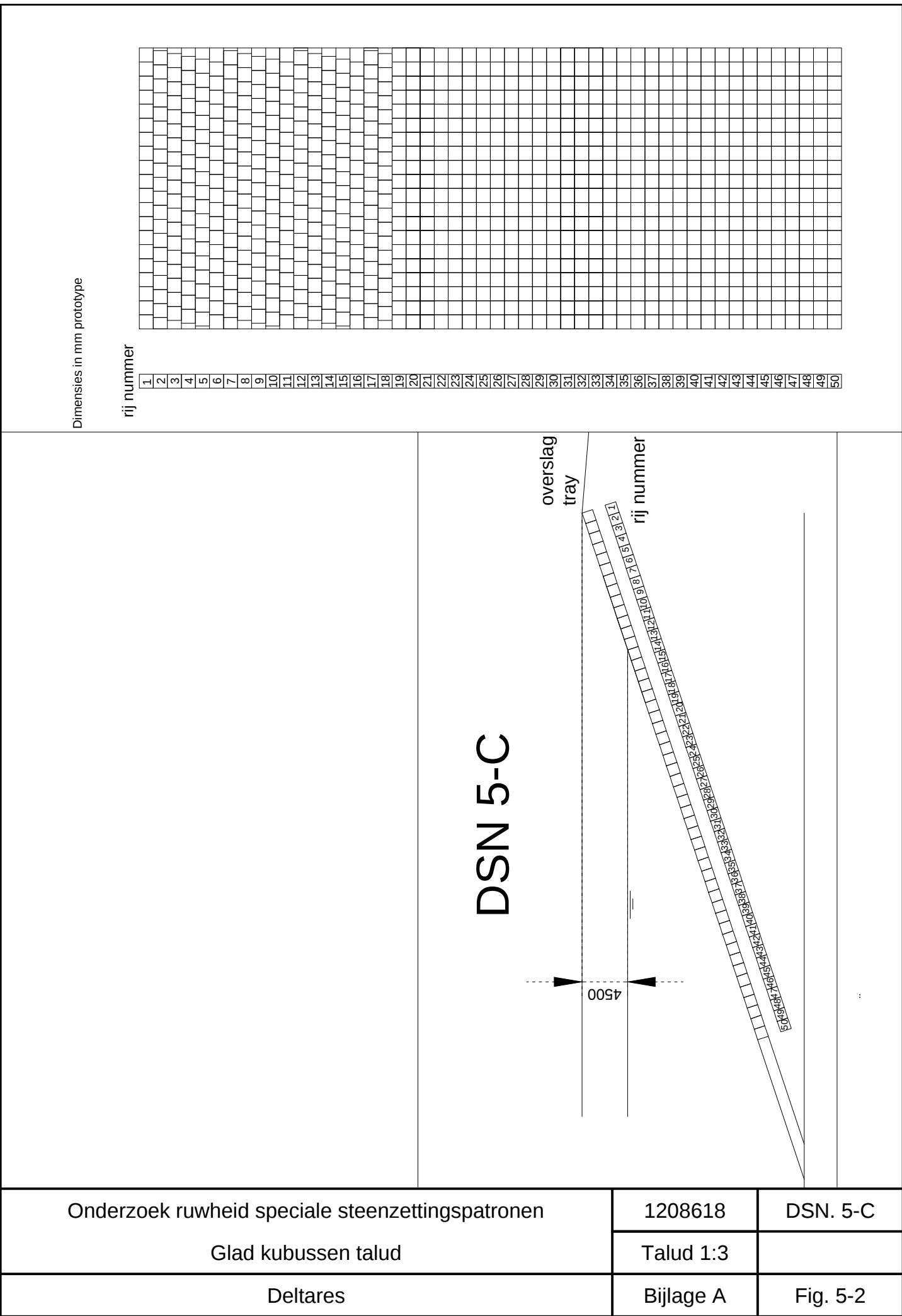
DSN 5-B



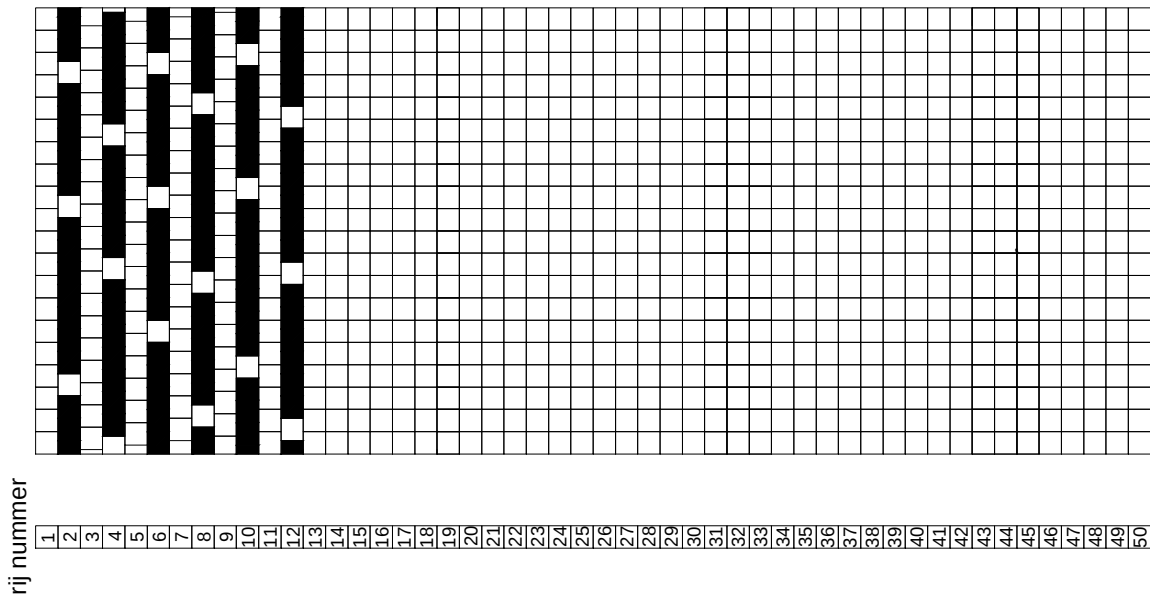
DSN 5-A



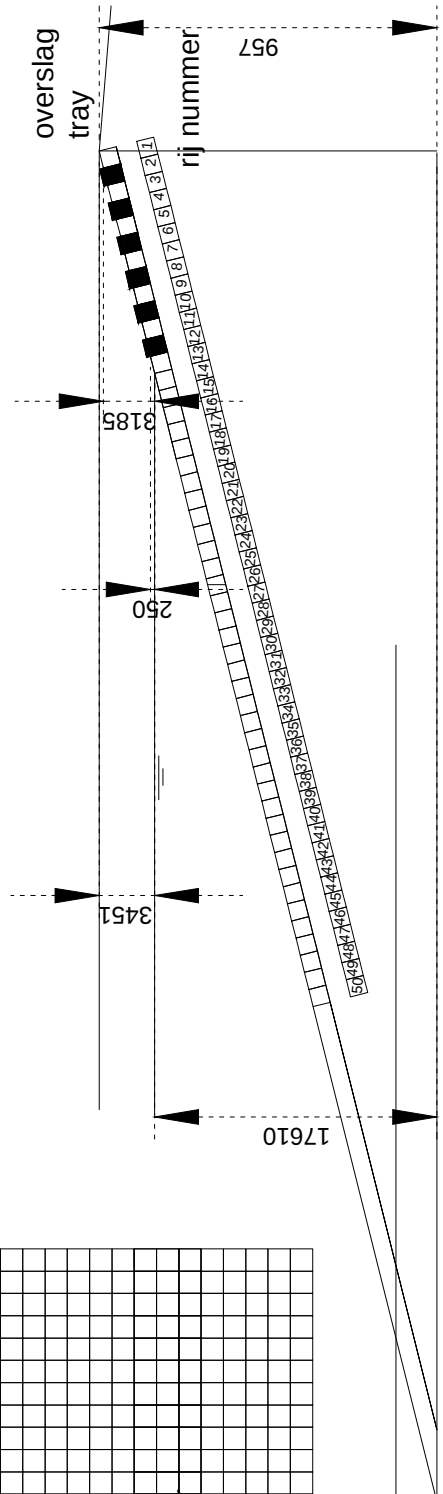
Onderzoek ruwheid speciale steenzettingspatronen Dambordpatroon met 20% overlap en variatie in nokhoogte	1208618	DSN.
	Talud 1:3	5-A & 5-B
Deltares	Bijlage A	Fig. 5-1



Dimensies in mm prototype



DSN 6-A



Onderzoek ruwheid speciale steenzettingspatronen
Ribbenpatroon met standaard nokhoogte

1208618

DSN. 6-A

Talud 1:4

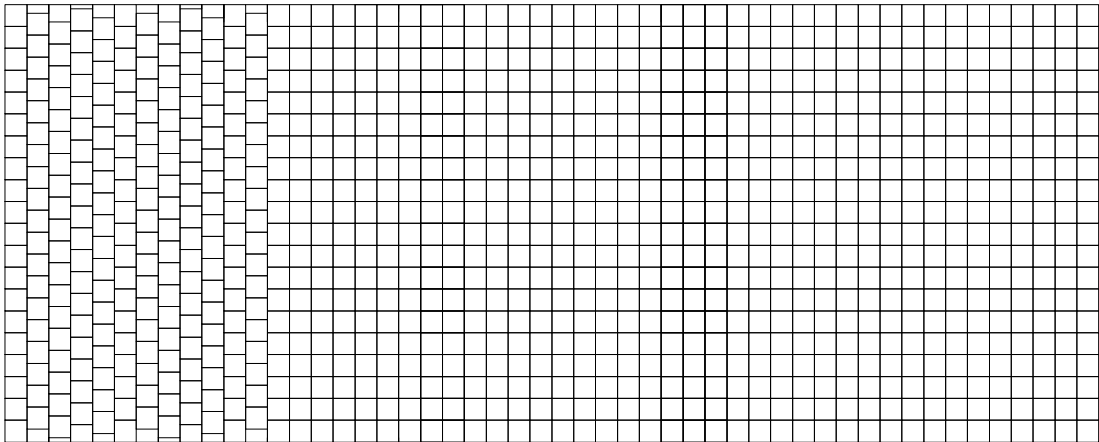
Deltares

Bijlage A

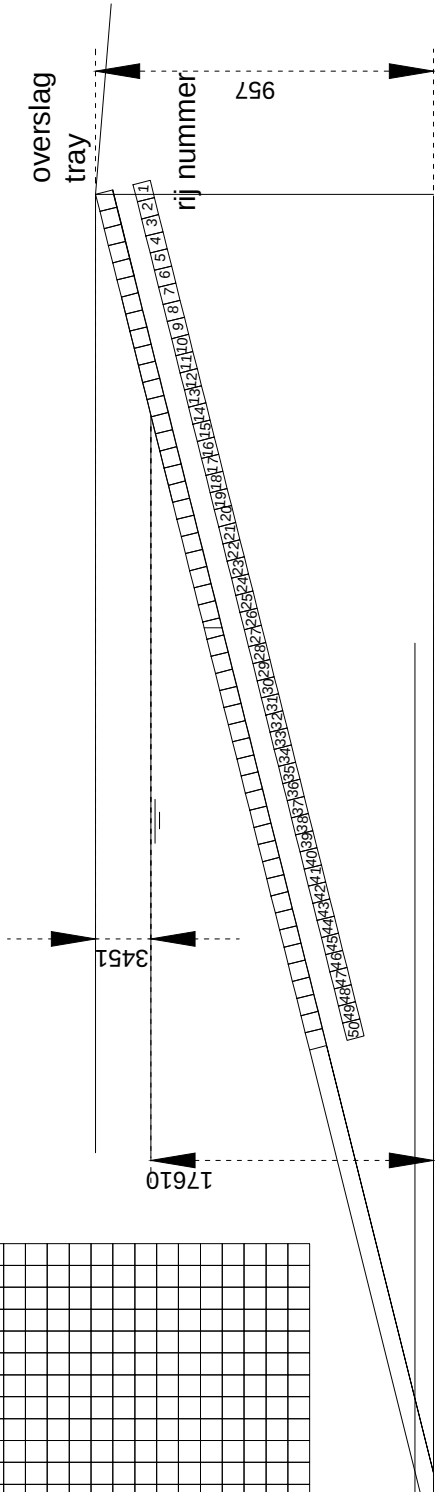
Fig. 6-1

Dimensions in mm prototype

rij nummer

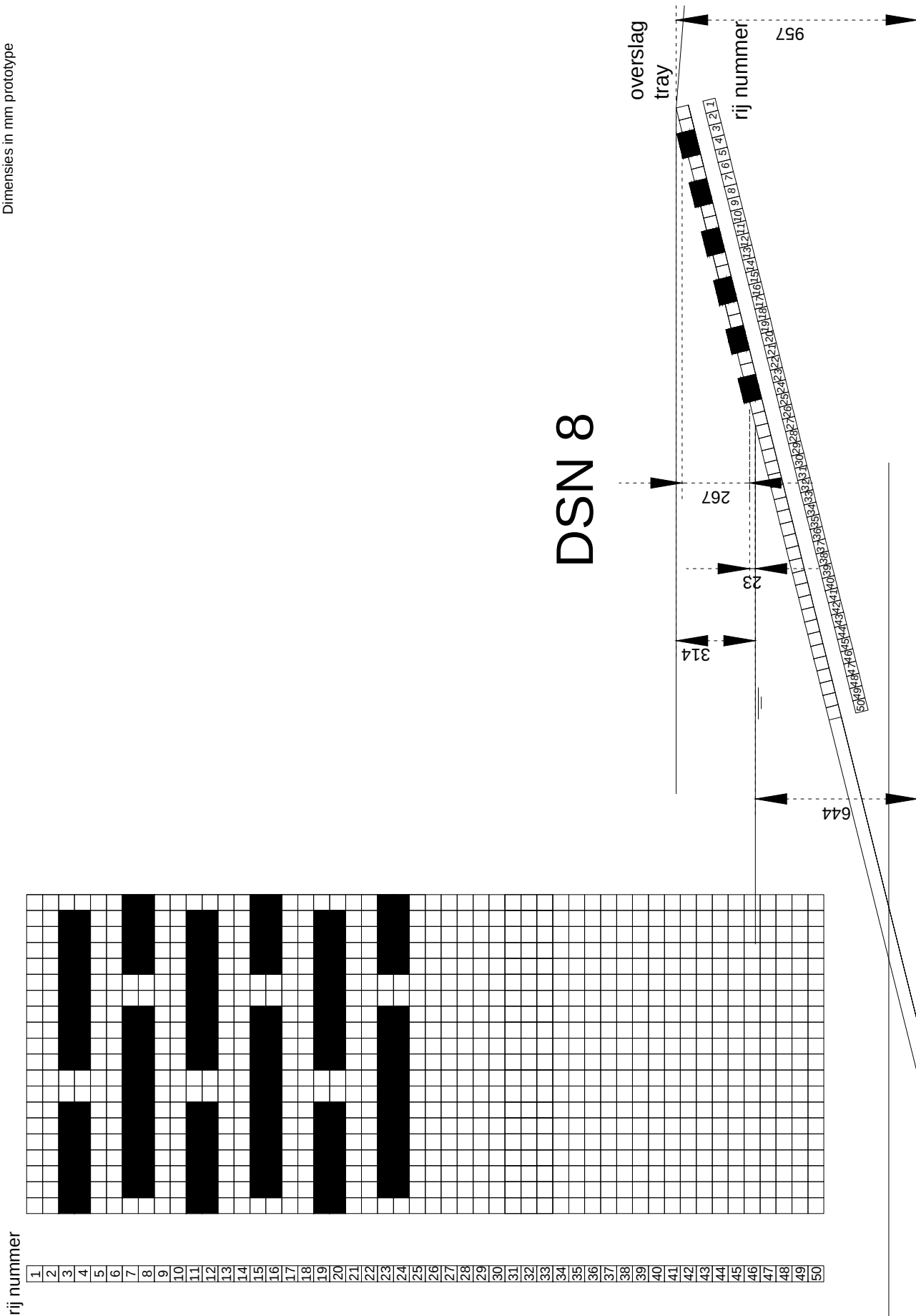


DSN 6-B



Onderzoek ruwheid speciale steenzettingspatronen Glad kubussen talud	1208618	DSN. 6-B
	Talud 1:4	
Deltares	Bijlage A	Fig. 6-1

Dimensions in mm prototype



Onderzoek ruwheid speciale steenzettingspatronen

1208618

DSN. 8

Ribbenpatroon - Schaaltest

Talud 1:4

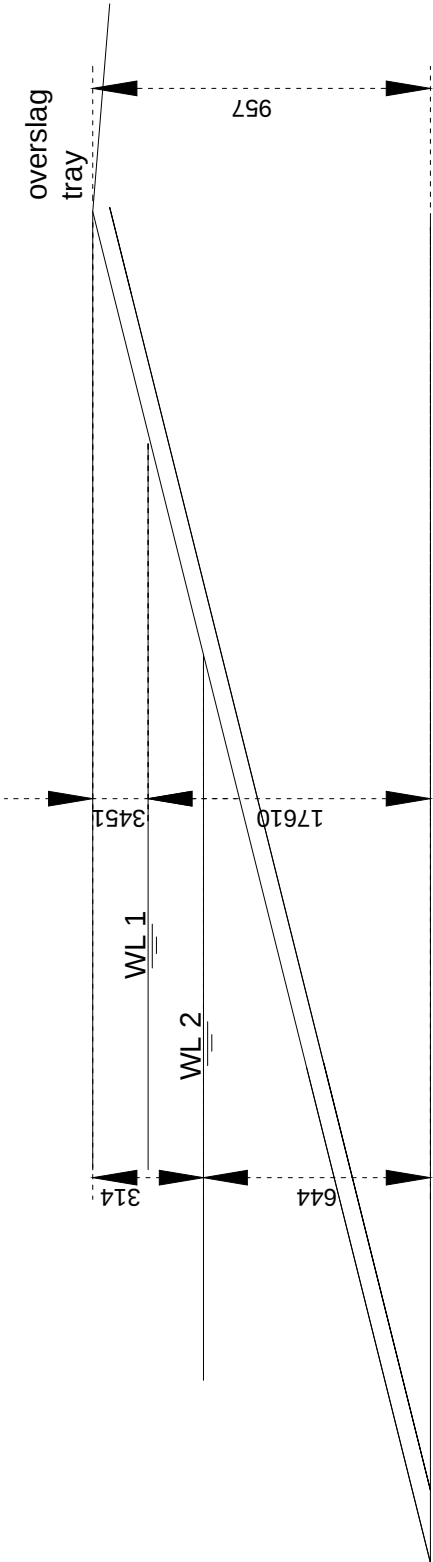
Deltares

Bijlage A

Fig. 8-1

Dimensions in mm prototype

DSN 9



Onderzoek ruwheid speciale steenzettingspatronen Referentie doorsnede met glad houten talud	1208618	DSN. 9
	Talud 1:4	
Deltares	Bijlage A	Fig. 9-1

B Resultaten golfcondities, overslagdebiet, gekalibreerde ruwheidscoëfficiënten

Hieronder is het proevenprogramma in een tabel weergegeven. De waarden zijn in prototype-schaal gegeven op basis van een schaafactor 22, tenzij anders vermeld.

Met:

H_{m0}	=	significante golfhoogte
$T_{m-1,0}$	=	gemiddelde energieperiode
T_p	=	piekperiode
q	=	gemiddeld overslagdebiet per strekkende meter
h	=	lokale waterdiepte aan de teen
h_k	=	relatieve kruinhoogte ten opzichte van de waterstand
γ_{f_TAW}	=	ruwheidscoëfficiënt op basis van TAW formule 24
γ_{f_VDM}	=	ruwheidscoëfficiënt op basis van Van der Meer en Bruce formule
b	=	gradiënt in TAW formule voor brekende golven, zie formule (3.1)

Testserie 1: dambordpatroon 1:3 – 20% overlap									gradiënt	Ruwheids-coëfficiënt		
				Gemeten waarden				<i>b</i> (eq. 24)		γ_{TAW} (eq. 24)	γ_{VDM}	
CS	Test	<i>h</i>	<i>h_k</i>	Spectrum	<i>H_{m0}</i>	<i>T_{m-1,0}</i>	<i>T_p</i>	<i>q</i>		[-]	[-]	[-]
		[m]	[m]	[-]	[m]	[s]	[s]	[l/s/m]				
1a	Test 1a-151	15.61	6.50	JONSWAP	2.85	7.19	7.76	0.4	-4.75	0.680	0.706	
1a	Test 1a-151_1	15.61	6.50	dubbel	2.81	7.24	6.95	0.4	-4.77	0.681	0.708	
1a	Test 1a-152	15.61	6.50	JONSWAP	3.23	7.05	7.28	0.8	-4.61	0.704	0.725	
1a	Test 1a-153	15.61	6.50	JONSWAP	2.45	9.32	9.68	0.4	-5.85	0.689	0.716	
1a	Test 1a-153_1	15.61	6.50	dubbel	2.46	9.35	9.29	0.5	-5.83	0.706	0.731	
1a	Test 1a-153_2	15.61	6.50	dubbel	2.43	9.19	7.89	0.4	-5.80	0.707	0.733	
1a	Test 1a-154	15.61	6.50	JONSWAP	3.35	7.90	8.31	2.1	-5.91	0.715	0.733	
1a	Test 1a-155	15.61	6.50	JONSWAP	3.71	7.64	8.02	4.2	-5.00	0.725	0.739	
1a	Test 1a-156	15.61	6.50	JONSWAP	3.82	8.63	8.77	9.5	-4.73	0.769	0.778	
1b	Test 1b-141	17.61	4.50	JONSWAP	2.36	6.52	6.95	2.4	-5.21	0.733	0.747	
1b	Test 1b-141_1	17.61	4.50	dubbel	2.36	6.67	6.38	2.2	-4.68	0.724	0.738	
1b	Test 1b-141_2	17.61	4.50	dubbel	2.29	6.92	5.36	2.2	-4.82	0.723	0.738	
1b	Test 1b-142	17.61	4.50	JONSWAP	2.77	6.50	6.85	6.4	-4.91	0.773	0.781	
1b	Test 1b-143	17.61	4.50	JONSWAP	1.96	8.16	8.77	1.7	-4.68	0.719	0.735	
1b	Test 1b-144	17.61	4.50	JONSWAP	2.43	7.44	7.89	5.3	-5.51	0.739	0.747	
1c	Test 1c-131	18.61	3.50	JONSWAP	1.89	5.89	6.22	1.6	-4.96	0.712	0.726	
1c	Test 1c-131_1	18.61	3.50	dubbel	1.87	6.01	5.76	1.5	-4.78	0.709	0.724	
1c	Test 1c-131_2	18.61	3.50	dubbel	1.82	6.25	4.97	1.7	-4.87	0.694	0.708	
1c	Test 1c-132	18.61	3.50	JONSWAP	1.47	7.05	7.63	0.7	-4.84	0.667	0.687	
1c	Test 1c-133	18.61	3.50	JONSWAP	2.32	5.98	6.22	6.7	-5.25	0.767	0.772	
1c	Test 1c-134	18.61	3.50	JONSWAP	1.93	6.66	6.95	4.7	-4.78	0.743	0.750	
1d	Test 1d-121	19.61	2.50	JONSWAP	0.94	5.84	6.22	<0.01	-4.93	0.390	0.390	
1d	Test 1d-122	19.61	2.50	JONSWAP	1.37	5.17	5.55	0.4	-5.66	0.645	0.665	
1d	Test 1d-123	19.61	2.50	JONSWAP	1.42	5.84	6.22	2.2	-5.12	0.696	0.704	
1d	Test 1d-124	19.61	2.50	JONSWAP	1.80	5.42	5.62	6.8	-5.10	0.775	0.776	
1e	Test 1e-111	20.36	1.75	JONSWAP	0.78	3.94	4.03	0.01	-5.04	0.651	0.685	
1e	Test 1e-112	20.36	1.75	JONSWAP	0.84	4.29	4.53	0.01	-5.80	0.567	0.603	
1e	Test 1e-113	20.36	1.75	JONSWAP	0.88	4.83	5.13	0.2	-5.70	0.666	0.687	
1e	Test 1e-114	20.36	1.75	JONSWAP	1.29	4.72	4.97	3.9	-5.70	0.754	0.755	

Testserie 1: dambordpatroon 1:3 – 20% overlap - specials											
					Gemeten waarden				gradiënt		Ruwheids-coëfficiënt
CS	Test	h	h_k	Spectrum	H_{m0}	$T_{m-1,0}$	T_p	q	b (eq. 24)	γ_{TAW} (eq. 24)	γ_{VDM}
		[m]	[m]	[-]	[m]	[s]	[s]	[l/s/m]	[-]	[-]	[-]
1a	Test 1a-144	17.61	4.50	JONSWAP	2.44	7.43	7.89	3.8	-4.96	0.703	0.715
1a	Test 1a-141	17.61	4.50	JONSWAP	2.36	6.51	6.95	1.7	-4.68	0.699	0.673
1b	Test 1b-153	15.61	6.50	JONSWAP	2.46	9.33	9.68	0.8	-5.91	0.758	0.769
1b	Test 1b-156	15.61	6.50	JONSWAP	3.83	8.63	8.94	11.8	-5.21	0.795	0.802
1d	Test 1d-153	15.61	6.50	JONSWAP	2.47	9.32	9.68	1.7	-5.91	0.827	0.831
1d	Test 1d-156	15.61	6.50	JONSWAP	3.82	8.60	8.77	16.9	-5.21	0.851	0.856

Testserie 2: dambordpatroon 1:3 – 40% overlap											
					Gemeten waarden				gradiënt		Ruwheids-coëfficiënt
CS	Test	h	h_k	Spectrum	H_{m0}	$T_{m-1,0}$	T_p	q	b (eq. 24)	γ_{TAW} (eq. 24)	γ_{VDM}
		[m]	[m]	[-]	[m]	[s]	[s]	[l/s/m]	[-]	[-]	[-]
2a	Test 2b-241	17.61	4.50	JONSWAP	2.36	6.52	6.95	3.0	-4.68	0.757	0.769
2a	Test 2b-241_1	17.61	4.50	dubbel	2.37	6.67	6.38	3.0	-4.82	0.759	0.771
2a	Test 2b-241_2	17.61	4.50	dubbel	2.30	6.90	5.36	3.1	-4.91	0.760	0.771
2a	Test 2b-243	17.61	4.50	JONSWAP	1.96	8.17	8.94	2.3	-5.51	0.747	0.761
2b	Test 2c-231	18.61	3.50	JONSWAP	1.90	5.88	6.22	2.1	-4.78	0.741	0.753
2b	Test 2c-231_1	18.61	3.50	dubbel	1.88	5.99	5.76	2.3	-4.87	0.753	0.765
2b	Test 2c-231_2	18.61	3.50	dubbel	1.83	6.24	4.97	2.4	-4.84	0.732	0.743
2b	Test 2c-232	18.61	3.50	JONSWAP	1.47	7.04	7.63	1.0	-5.25	0.704	0.721
2b	Test 2c-233	18.61	3.50	JONSWAP	2.32	5.98	6.22	8.2	-4.78	0.795	0.799
2b	Test 2c-234	18.61	3.50	JONSWAP	1.93	6.65	6.95	5.9	-4.93	0.773	0.778

Testserie 3: glad houten talud 1:3 (referentietalud)											
					Gemeten waarden						Ruwheids-coëfficiënt
CS	Test	h	h_k	Spectrum	H_{m0}	$T_{m-1,0}$	T_p	q	b (eq. 24)	$\gamma_{referentie}$	
		[m]	[m]	[-]	[m]	[s]	[s]	[l/s/m]	[-]	[-]	
3a	Test 3-151	15.61	6.50	JONSWAP	2.87	7.16	7.63	6.9	-4.75	1	
3a	Test 3-152	15.61	6.50	JONSWAP	3.26	7.04	7.51	12.2	-4.61	1	
3a	Test 3-153	15.61	6.50	JONSWAP	2.48	9.30	9.68	6.9	-5.85	1	
3a	Test 3-154	15.61	6.50	JONSWAP	3.36	7.84	8.31	17.4	-5.00	1	
3a	Test 3-155	15.61	6.50	JONSWAP	3.71	7.60	8.02	27.4	-4.73	1	
3a	Test 3-156	15.61	6.50	JONSWAP	3.82	8.57	8.77	38.6	-5.21	1	
3a	Test 3-151_1	15.61	6.50	dubbel	2.83	7.22	6.95	6.7	-4.77	1	
3a	Test 3-153_1	15.61	6.50	dubbel	2.47	9.31	9.29	6.9	-5.83	1	
3a	Test 3-153_2	15.61	6.50	dubbel	2.45	9.15	7.63	6.1	-5.80	1	
3b	Test 3-141	17.61	4.50	JONSWAP	2.37	6.51	6.95	15.0	-4.68	1	
3b	Test 3-141_1	17.61	4.50	dubbel	2.38	6.64	6.38	14.8	-4.82	1	
3b	Test 3-141_2	17.61	4.50	dubbel	2.31	6.88	5.36	15.2	-4.91	1	
3b	Test 3-142	17.61	4.50	JONSWAP	2.77	6.48	6.75	24.9	-4.68	1	
3b	Test 3-143	17.61	4.50	JONSWAP	1.97	8.14	8.77	13.3	-5.51	1	
3b	Test 3-144	17.61	4.50	JONSWAP	2.46	7.40	7.89	27.1	-4.96	1	
3b	Test 3-145	17.61	4.50	JONSWAP	2.71	6.12	6.30	18.0	-4.61	1	
3b	Test 3-146	17.61	4.50	JONSWAP	2.84	6.03	6.06	17.9	-4.68	1	

Testserie 3: glad houten talud 1:3 (referentietalud)										
					Gemeten waarden					Ruwheidscoëfficiënt
CS	Test	h	h_k	Spectrum	H_{m0}	$T_{m-1,0}$	T_p	q	b (eq. 24)	$\gamma_{f, \text{referentie}}$
		[m]	[m]	[-]	[m]	[s]	[s]	[l/s/m]	[-]	[-]
3c	Test 3-131	18.61	3.50	JONSWAP	1.91	5.86	6.22	11.9	-4.78	1
3c	Test 3-131_1	18.61	3.50	dubbel	1.89	5.98	5.76	11.7	-4.87	1
3c	Test 3-131_2	18.61	3.50	dubbel	1.83	6.23	4.97	14.0	-4.84	1
3c	Test 3-132	18.61	3.50	JONSWAP	1.48	7.04	7.76	9.1	-5.25	1
3c	Test 3-133	18.61	3.50	JONSWAP	2.33	5.96	6.22	25.3	-4.78	1
3c	Test 3-134	18.61	3.50	JONSWAP	1.95	6.64	6.95	22.3	-4.93	1
3d	Test 3-121	19.61	2.50	JONSWAP	0.94	5.82	6.13	2.0	-5.66	1
3d	Test 3-122	19.61	2.50	JONSWAP	1.38	5.14	5.55	6.7	-5.12	1
3d	Test 3-123	19.61	2.50	JONSWAP	1.43	5.83	6.22	15.5	-5.10	1
3d	Test 3-124	19.61	2.50	JONSWAP	1.81	5.39	5.62	22.7	-5.04	1
3e	Test 3-111	20.36	1.75	JONSWAP	0.79	3.93	4.03	0.4	-5.80	1
3e	Test 3-112	20.36	1.75	JONSWAP	0.85	4.26	4.53	1.2	-5.70	1
3e	Test 3-113	20.36	1.75	JONSWAP	0.90	4.81	5.13	3.4	-5.70	1
3e	Test 3-114	20.36	1.75	JONSWAP	1.30	4.70	4.97	14.8	-5.26	1

Testserie 4: ribbenpatroon i.p.v. dambord 1:3										
					Gemeten waarden				gradient	Ruwheidsc oëfficiënt
CS	Test	h	h_k	Spectrum	H_{m0}	$T_{m-1,0}$	T_p	q	b (eq. 24)	$\gamma_{f, \text{TAW}}$ (eq. 24)
		[m]	[m]	[-]	[m]	[s]	[s]	[l/s/m]	[-]	$\gamma_{f, \text{VDM}}$ (eq. 24)
4a	Test 4a-141	17.61	4.50	JONSWAP	2.36	6.51	6.95	2.0	-4.68	0.716
4a	Test 4a-142	17.61	4.50	JONSWAP	2.75	6.50	6.75	5.3	-4.68	0.753
4a	Test 4a-143	17.61	4.50	JONSWAP	1.96	8.15	8.94	1.3	-5.51	0.693
4a	Test 4a-144	17.61	4.50	JONSWAP	2.44	7.44	7.89	4.6	-4.96	0.723
4a	Test 4a-141_1	17.61	4.50	dubbel	2.36	6.67	6.38	1.6	-4.82	0.697
4b	Test 4b-131	18.61	3.50	JONSWAP	1.90	5.88	6.22	1.4	-4.78	0.701
4b	Test 4b-131_1	18.61	3.50	dubbel	1.88	6.00	5.76	1.5	-4.87	0.708
4b	Test 4b-131_2	18.61	3.50	dubbel	1.82	6.24	4.97	1.6	-4.84	0.691
4b	Test 4b-132	18.61	3.50	JONSWAP	1.47	7.03	7.63	0.6	-5.25	0.662
4b	Test 4b-133	18.61	3.50	JONSWAP	2.32	5.98	6.22	6.1	-4.78	0.753
4b	Test 4b-134	18.61	3.50	JONSWAP	1.93	6.65	6.95	4.3	-4.93	0.734
4c	Test 4c-122	19.61	2.50	JONSWAP	1.37	5.17	5.30	0.8	-5.12	0.709
4c	Test 4c-123	19.61	2.50	JONSWAP	1.42	5.84	6.22	2.9	-5.10	0.725
4c	Test 4c-124	19.61	2.50	JONSWAP	1.80	5.43	5.62	6.8	-5.04	0.772
4d	Test 4d-141	17.61	4.50	JONSWAP	2.36	6.51	6.95	3.4	-4.68	0.775
4d	Test 4d-141_1	17.61	4.50	dubbel	2.37	6.66	6.38	4.0	-4.82	0.793
4d	Test 4d-142	17.61	4.50	JONSWAP	2.75	6.49	6.75	8.7	-4.68	0.819
4d	Test 4d-143	17.61	4.50	JONSWAP	1.97	8.14	8.94	1.9	-5.51	0.731
4d	Test 4d-144	17.61	4.50	JONSWAP	2.44	7.43	7.89	6.3	-4.96	0.760
4d	Test 4d-145	17.61	4.50	JONSWAP	2.70	6.12	6.30	6.0	-4.61	0.821
4d	Test 4d-146	17.61	4.50	JONSWAP	2.83	6.04	6.06	7.4	-4.68	0.848

Testserie 5: dambord patroon van 6 rijen boven en onder water; 1:3 A versie met standaard nokhoogte, B versie met grotere nokhoogte, C versie gladde kubussen										
					Gemeten waarden				gradiënt	Ruwheids- coëfficiënt
CS	Test	h	h_k	Spectrum	H_{m0}	$T_{m-1,0}$	T_p	q	b (eq. 24)	γ_{TAW} (eq. 24)
		[m]	[m]	[-]	[m]	[s]	[s]	[l/s/m]	[-]	γ_{VDM} [-]
5a	Test 5a-141	17.61	4.50	JONSWAP	2.37	6.52	6.95	4.1	-4.68	0.795
5a	Test 5a-141_1	17.61	4.50	dubbel	2.37	6.66	6.38	4.1	-4.82	0.798
5a	Test 5a-142	17.61	4.50	JONSWAP	2.76	6.47	6.75	9.4	-4.68	0.829
5a	Test 5a-143	17.61	4.50	JONSWAP	1.97	8.14	8.94	2.0	-5.51	0.734
5a	Test 5a-144	17.61	4.50	JONSWAP	2.44	7.43	7.89	7.4	-4.96	0.779
5a	Test 5a-145	17.61	4.50	JONSWAP	2.71	6.12	6.30	6.4	-4.61	0.829
5a	Test 5a-146	17.61	4.50	JONSWAP	2.84	6.02	6.06	7.9	-4.68	0.860
5b	Test 5b-141	17.61	4.50	JONSWAP	2.36	6.50	6.95	3.0	-4.68	0.763
5b	Test 5b-141_1	17.61	4.50	dubbel	2.36	6.66	6.38	3.1	-4.82	0.764
5b	Test 5b-142	17.61	4.50	JONSWAP	2.75	6.48	6.75	8.4	-4.68	0.814
5b	Test 5b-143	17.61	4.50	JONSWAP	1.97	8.15	8.94	1.3	-5.51	0.695
5b	Test 5b-144	17.61	4.50	JONSWAP	2.45	7.44	7.89	5.9	-4.96	0.749
5b	Test 5b-146	17.61	4.50	JONSWAP	2.83	6.02	6.06	7.2	-4.68	0.846
5c	Test 5c-141	17.61	4.50	JONSWAP	2.36	6.51	6.95	9.3	-4.68	0.916
5c	Test 5c-142	17.61	4.50	JONSWAP	2.76	6.48	6.75	16.4	-4.68	0.920
5c	Test 5c-143	17.61	4.50	JONSWAP	1.96	8.15	8.77	8.3	-5.51	0.918
5c	Test 5c-144	17.61	4.50	JONSWAP	2.44	7.42	7.89	17.2	-4.96	0.912
5c	Test 5c-145	17.61	4.50	JONSWAP	2.70	6.13	6.30	11.3	-4.61	0.916
5c	Test 5c-146	17.61	4.50	JONSWAP	2.83	6.03	6.06	11.6	-4.68	0.921
5c	Test 5c-122	17.61	2.50	JONSWAP	1.37	5.15	5.55	3.3	-5.12	0.881
5c	Test 5c-123	17.61	2.50	JONSWAP	1.42	5.83	6.22	9.5	-5.10	0.905

Testserie 6: ribbenpatroon van 6 rijen boven water; 1:4 A versie met standaard nokhoogte; B versie gladde kubussen										
					Gemeten waarden				gradiënt	Ruwheids- coëfficiënt
CS	Test	h	h_k	Spectrum	H_{m0}	$T_{m-1,0}$	T_p	q	b (eq. 24)	γ_{TAW} (eq. 24)
		[m]	[m]	[-]	[m]	[s]	[s]	[l/s/m]	[-]	γ_{VDM} [-]
6a	Test 6-141	17.61	3.45	JONSWAP	2.38	6.50	6.95	2.5	-4.39	0.720
6a	Test 6-141_1	17.61	3.45	dubbel	2.37	6.66	6.38	3.1	-4.27	0.707
6a	Test 6-141_2	17.61	3.45	dubbel	2.30	6.88	5.36	4.0	-4.13	0.697
6a	Test 6-142	17.61	3.45	JONSWAP	2.77	6.47	6.75	7.0	-4.41	0.778
6a	Test 6-143	17.61	3.45	JONSWAP	1.97	8.10	8.77	2.9	-4.91	0.723
6a	Test 6-144	17.61	3.45	dubbel	2.45	7.41	7.89	6.7	-4.69	0.758
6a	Test 6-145	17.61	3.45	dubbel	2.71	6.12	6.30	3.6	-4.44	0.761
6a	Test 6-146	17.61	3.45	JONSWAP	2.83	6.02	6.06	4.2	-4.55	0.789
6b	Test 6-141	17.61	3.45	JONSWAP	2.37	6.51	6.95	10.6	-4.39	0.921
6b	Test 6-141_1	17.61	3.45	dubbel	2.37	6.65	6.38	15.0	-4.27	0.934
6b	Test 6-141_2	17.61	3.45	dubbel	2.30	6.88	5.36	21.4	-4.13	0.955
6b	Test 6-142	17.61	3.45	JONSWAP	2.77	6.47	6.75	17.4	-4.41	0.921
6b	Test 6-143	17.61	3.45	JONSWAP	1.97	8.09	8.77	12.8	-4.91	0.936
6b	Test 6-144	17.61	3.45	dubbel	2.45	7.41	7.89	20.8	-4.69	0.942
6b	Test 6-145	17.61	3.45	dubbel	2.71	6.11	6.30	12.4	-4.44	0.945
6b	Test 6-146	17.61	3.45	JONSWAP	2.83	6.02	6.06	11.6	-4.55	0.943

Testserie 7: ribbenpatroon van 6 rijen boven water; 1:4; extreme overslag												
					Gemeten waarden					gradiënt	Ruwheids coëfficiënt	
CS	Test	h	h_k	Spectrum	H_{m0}	$T_{m-1,0}$	T_p	q		b (eq. 24)	γ_{TAW} (eq. 24)	γ_{VDM}
		[m]	[m]	[-]	[m]	[s]	[s]	[l/s/m]		[-]	[-]	[-]
6a	Test 7-251	17.61	3.45	JONSWAP	4.01	8.22	8.45	86.1		-5.32	0.911	0.902
6a	Test 7-252	17.61	3.45	JONSWAP	4.30	8.62	9.08	119.0		-5.77	0.961	0.954
6a	Test 7-253	17.61	3.45	JONSWAP	5.05	9.45	9.00	186.0	-6.16	0.910	0.902	

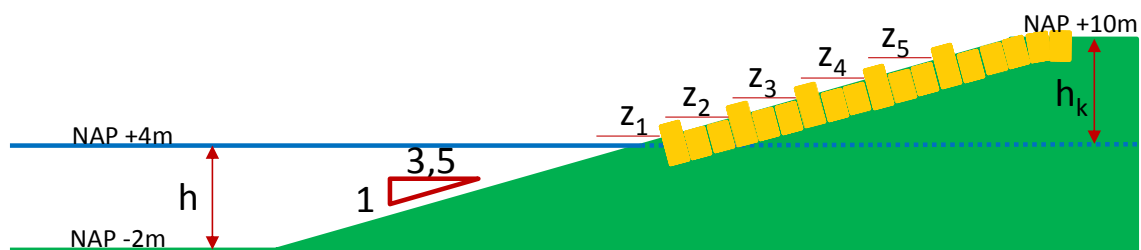
Testserie 8: ribbenpatroon van 6 rijen boven water; 1:4; Schaal 1:11												
					Gemeten waarden					gradiënt	Ruwheids-coëfficiënt	
CS	Test	h	h_k	Spectrum	H_{m0}	$T_{m-1,0}$	T_p	q		b	γ_{TAW}	γ_{VDM}
		[m]	[m]	[-]	[m]	[s]	[s]	[l/s/m]		(eq. 24)	(eq. 24)	
										[-]	[-]	[-]
8	Test 8-341	7.08	3.45	JONSWAP	2.13	8.40	8.40	2.8	-5.64	0.755	0.767	
8	Test 8-342	7.08	3.45	JONSWAP	2.11	7.43	7.46	0.4	-5.32	0.628	0.654	
8	Test 8-343	7.08	3.45	JONSWAP	2.49	8.55	8.40	6.4	-6.05	0.815	0.822	
8	Test 8-344	7.08	3.45	JONSWAP	2.36	6.51	6.44	0.2	-5.06	0.597	0.627	
8	Test 8-345*	7.08	3.45	JONSWAP	2.53	6.78	6.44	0.2	-5.17	0.582	0.610	
8	Test 8-346	7.08	3.45	JONSWAP	2.52	9.36	9.91	14.9	-5.82	0.810	0.812	
8	Test 8-347	7.08	3.45	JONSWAP	2.46	7.69	7.46	3.5	-5.43	0.760	0.771	

* Test afgebroken door golfmachine na 670 golven

Testserie 9: glad houten talud 1:4 (referentietalud) A versie schaal 1:22; B versie schaal 1:11											
					Gemeten waarden					gradiënt	Ruwheids-coëfficiënt
CS	Test	h	h_k	Spectrum	H_{m0}	$T_{m-1,0}$	T_p	q		b (eq. 24)	$\gamma_{\text{referentie}}$
		[m]	[m]	[-]	[m]	[s]	[s]	[l/s/m]		[-]	[-]
9a	Test 9-141	17.61	3.45	JONSWAP	2.37	6.49	6.95	15.8		-4.39	1
9a	Test 9-142	17.61	3.45	JONSWAP	2.37	6.65	6.38	25.4		-4.41	1
9a	Test 9-143	17.61	3.45	JONSWAP	2.30	6.88	5.36	17.7		-4.91	1
9a	Test 9-144	17.61	3.45	JONSWAP	2.76	6.47	6.75	27.4		-4.69	1
9a	Test 9-145	17.61	3.45	JONSWAP	1.98	8.09	8.77	16.8		-4.44	1
9a	Test 9-146	17.61	3.45	JONSWAP	2.45	7.41	7.89	15.4		-4.55	1
9a	Test 9-141_1	17.61	3.45	dubbel	2.71	6.13	6.30	20.7		-4.27	1
9a	Test 9-141_2	17.61	3.45	dubbel	2.83	6.01	6.06	26.3		-4.13	1
9a	Test 9-251	17.61	3.45	JONSWAP	4.13	8.32	8.58	139.3		-5.32	1
9a	Test 9-252	17.61	3.45	JONSWAP	4.48	8.79	9.12	167.9		-5.77	1
9a	Test 9-253	17.61	3.45	JONSWAP	4.99	9.36	9.13	237.1		-6.16	1
9b	Test 9-341	7.08	3.45	JONSWAP	2.12	8.39	8.40	14.4		-5.64	1
9b	Test 9-342	7.08	3.45	JONSWAP	2.10	7.35	7.46	8.1		-5.32	1
9b	Test 9-343	7.08	3.45	JONSWAP	2.48	8.58	8.40	19.8		-6.05	1
9b	Test 9-344	7.08	3.45	JONSWAP	2.36	6.47	6.44	7.2		-5.06	1
9b	Test 9-345*	7.08	3.45	JONSWAP	2.53	6.74	6.50	10.7		-5.17	1
9b	Test 9-346	7.08	3.45	JONSWAP	2.50	9.32	9.91	39.0		-5.82	1
9b	Test 9-347	7.08	3.45	JONSWAP	2.45	7.60	7.46	15.7		-5.43	1

C Procedure bepaling ruwheidscoëfficiënt steenzettingsprofiel met ruwheidspatronen voor golfloop en golfoverslag

Hieronder wordt stap voor stap de procedure behandeld om de ruwheidscoëfficiënt van een bestaand profiel of van een nieuw ontwerp te berekenen. De berekening bestaat uit een aantal stappen. Voor de leesbaarheid worden deze stappen voor het volgende profiel gedaan.



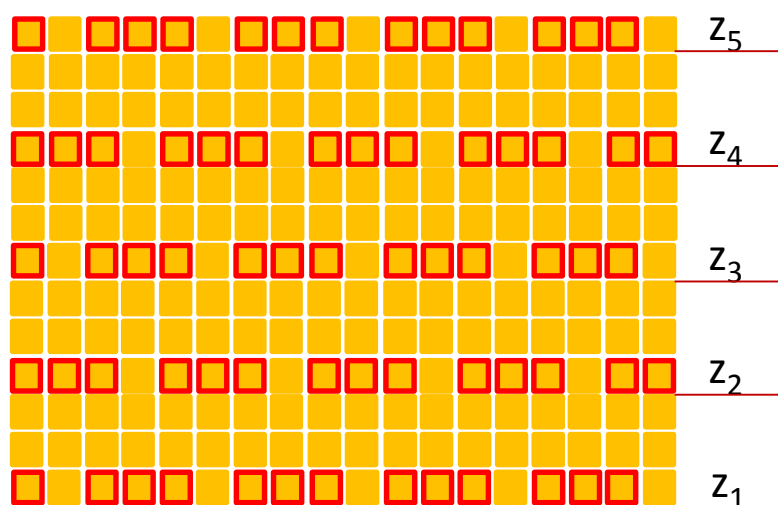
Figuur C.1 Zijaanzicht steenzettingspatroon

Stap 1: dataverzameling

In deze stap worden de hydraulische en geometrische randvoorwaarden verzameld. Onderstaand de lijst voor bovenstaand profiel.

Hydraulische Randvoorwaarden:

Significante Golfhoogte:	$H_s = 2.5\text{-m}$
Gemiddelde Golfperiode, $T_{m-1,0}$:	$T_{m-1,0} = 8\text{-s}$
Waterstand (tov Ref):	$WL = 4\text{-m}$
Maximaal overslagdebiet:	$q = 1 \cdot \frac{1}{\text{s} \cdot \text{m}}$



Figuur C.2 Bovenaanzicht steenzettingspatroon (uitstekende nokken weergegeven door rood omkaderde vakken).

Geometrische randvoorwaarden:

Bodemdiepte (tov Ref)	$d = -2 \cdot \text{m}$
kruinhoogte (tov Ref):	$k_{\text{ruin}} = 10 \cdot \text{m}$
taludhelling	$\alpha = \text{atan}\left(\frac{1}{3.5}\right)$
aantal rijen met nok	$n_{\text{rij}} = 5$
gem. uitstekend nokoppervlak per rij:	$w_0 = \frac{3}{4}$
nokhoogte:	$h_{\text{nok}} = 0.2 \cdot \text{m}$
hoogteligging voorzijde rij 1:	$z_1 = 4.5 \cdot \text{m}$
hoogteligging voorzijde rij 2 :	$z_2 = (z_1 + 1 \cdot \text{m}) = 5.5 \text{m}$
hoogteligging voorzijde rij 3:	$z_3 = (z_2 + 1 \cdot \text{m}) = 6.5 \text{m}$
hoogteligging voorzijde rij 4:	$z_4 = (z_3 + 1 \cdot \text{m}) = 7.5 \text{m}$
hoogteligging voorzijde rij 5:	$z_5 = (z_4 + 1 \cdot \text{m}) = 8.5 \text{m}$
Ruwheidsbreedte:	$\gamma_{f,w} = w_0 \cdot n_{\text{rij}} = 3.75$
Relatieve Waterdiepte:	$h = WL - d = 6 \text{m}$
Relatieve Kruinhoogte:	$h_k = k_{\text{ruin}} - WL = 6 \text{m}$
Reductiefactor voor bermen:	$\gamma_{\text{berm}} = 1$

Stap 2: bereken ruwheidsdichtheid

Voor iedere rij geldt dat 3 hoge elementen worden afgewisseld met 1 laag element. Gemiddeld betekent dat, dat iedere rij $\frac{3}{4}$ aanstroombreedte heeft. De ruwheidsbreedte voor alle 5 rijen wordt dan 3,75. Met behulp van de andere gegevens kan nu de ruwheidsdichtheid berekend worden.

Ruwheidsdichtheid:
$$\rho_{\gamma f} = \frac{\gamma_{f,w} \sin(\alpha) \cdot h_{\text{nok}}}{h_k} = 0.034$$

Stap 3: bereken ruwheidscoëfficiënt

In Stap 3 wordt de ruwheidscoëfficiënt berekend. Dit kan gedaan worden met zowel vergelijking 5.1 als vergelijking 5.2. We kiezen hier vergelijking 5.1 en gebruiken vergelijking 5.2 in de laatste stap als controle. Een aantal parameters dient eerst berekend te worden.

Berekening golfparameters:

$$\text{Fictieve golflengte:} \quad L_0 = \frac{g}{2 \cdot \pi} \cdot T_{m-1,0}^2 = 99.9 \text{ m}$$

$$X = L_0$$

Given

$$X = L_0 \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h}{X}\right)$$

$$L(h) = \text{Find}(X)$$

$$\text{Lokale golflengte:} \quad L_{m-1,0} = L(h) = 57.5 \text{ m}$$

$$\text{Lokale golfsteilheid:} \quad \frac{H_s}{L_{m-1,0}} = 0.043$$

$$\text{Parameter tbv golfoploop:} \quad q_0 = \frac{0.035}{\sqrt{\tan(\alpha)}} \cdot \frac{\tan(\alpha)}{\sqrt{\frac{H_s}{L_0}}} = 0.118$$

Vervolgens kan de vergelijking ingevuld worden:

Reductiefactor ruwheid obv golfoverslag

$$\gamma_f = 1 - \left(0.585 \cdot \sqrt{0.075 - \frac{H_s}{L_{m-1,0}}} \cdot \rho_{\gamma f}^{0.5} \cdot \ln\left(\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_s^3}}\right) \right) = 0.819$$

Stap 4 golfoploophoogte

In Stap 4 wordt deze ruwheidsfactor nu gebruikt om de 2% golfoploop te berekenen:

Golfoploophoogte:

$$z_{2\%} = 3.45 \cdot \tanh\left(0.65 \cdot \frac{\tan(\alpha)}{\sqrt{\frac{H_s}{L_0}}}\right) \cdot \gamma_f \cdot \gamma_{\text{berm}} \cdot H_s = 5.83 \text{ m}$$

Deze waarde is nodig om een aantal controles uit te voeren. Dit wordt gedaan in Stap 5.

Stap 5 controle

In Stap 5 worden twee parameters gecontroleerd. Deze zijn het overslagdebiet q en het aantal effectieve rijen dat volledig aangestroomd wordt.

Met behulp van de golfoploophoogte wordt het daadwerkelijke overslagdebiet berekend:

Golfoverslagdebiet:

$$q = q_0 \cdot \exp\left(-6.9 \cdot \frac{h_k}{z_{2\%}}\right) \cdot \sqrt{g \cdot H_s^3} = 1.205 \cdot \frac{1}{\text{s} \cdot \text{m}}$$

Deze ligt hier iets hoger dan we initieel in de hydraulische randvoorwaarden hadden opgegeven. Dat betekent dat de ruwheidscoëfficiënt iets groter zal zijn dan 0,819. Dit kunnen we ondermeer zien in de controleberekening met vergelijking 5.2.

$$\gamma_{f_controle} = 1 - \left[0.585 \cdot \sqrt{0.075 - \frac{H_s}{L_{m-1,0}}} \cdot \rho_{\gamma f}^{0.5} \left(6.9 \cdot \frac{h_k}{z_{2\%}} - \ln(q_0) \right) \right] = 0.822$$

Het grotere overslagdebiet dient dus aangepast te worden om vervolgens stap 3, 4 en 5 te herhalen.

Voordat we dit doen willen we eerst de effectiviteit van de nokken controleren. Dit doen we met formule (4.6). Om de effectiviteit van de uitstekende nokken per rij te bepalen dient voor iedere rij de waterlaagdikte van de 2% golfploop aan de voorzijde van een nok berekend te worden, zie formule (4.7). Rijen met nokken die boven het 2%-golfploop niveau liggen, tellen niet mee als ruwheid. Als ze boven de dikte van de golfplooptong uitsteken, tellen ze slechts deels mee.

Bepaling waterlaagdikte van 2% golfploop lokaal langs het talud:

$$\text{oplooplaagdikte aan voorzijde rij 1: } ha_{z1} = 0.216[z_{2\%} - (z_1 - WL)] = 1.151\text{m}$$

$$\text{oplooplaagdikte aan voorzijde rij 2 : } ha_{z2} = 0.216[z_{2\%} - (z_2 - WL)] = 0.935\text{m}$$

$$\text{oplooplaagdikte aan voorzijde rij 3: } ha_{z3} = 0.216[z_{2\%} - (z_3 - WL)] = 0.719\text{m}$$

$$\text{oplooplaagdikte aan voorzijde rij 4: } ha_{z4} = 0.216[z_{2\%} - (z_4 - WL)] = 0.503\text{m}$$

$$\text{oplooplaagdikte aan voorzijde rij 5: } ha_{z5} = 0.216[z_{2\%} - (z_5 - WL)] = 0.287\text{m}$$

De dikte van de golfplooptong blijkt voor alle 5 nokken groter te zijn dan de nokhoogte. Als dit voor 1 of meerdere nokken niet het geval was geweest dan zou de effectieve nokhoogte van deze dek gelijk worden gesteld aan de dikte van de golfplooptong. Dit is weergegeven in onderstaande berekening voor alle 5 nokken.

Bepaling effectiviteit nokhoogte:

$$h_{\text{eff}_{\text{nok1}}} = \begin{cases} 0 & \text{if } ha_{z1} < 0 \\ h_{\text{nok}} & \text{if } ha_{z1} \geq h_{\text{nok}} \\ ha_{z1} & \text{otherwise} \end{cases} = 0.2\text{m} \quad h_{\text{eff}_{\text{nok2}}} = \begin{cases} 0 & \text{if } ha_{z2} < 0 \\ h_{\text{nok}} & \text{if } ha_{z2} \geq h_{\text{nok}} \\ ha_{z2} & \text{otherwise} \end{cases} = 0.2\text{m}$$

$$h_{\text{eff}_{\text{nok3}}} = \begin{cases} 0 & \text{if } ha_{z3} < 0 \\ h_{\text{nok}} & \text{if } ha_{z3} \geq h_{\text{nok}} \\ ha_{z3} & \text{otherwise} \end{cases} = 0.2\text{m} \quad h_{\text{eff}_{\text{nok4}}} = \begin{cases} 0 & \text{if } ha_{z4} < 0 \\ h_{\text{nok}} & \text{if } ha_{z4} \geq h_{\text{nok}} \\ ha_{z4} & \text{otherwise} \end{cases} = 0.2\text{m}$$

$$h_{\text{eff}_{\text{nok5}}} = \begin{cases} 0 & \text{if } ha_{z5} < 0 \\ h_{\text{nok}} & \text{if } ha_{z5} \geq h_{\text{nok}} \\ ha_{z5} & \text{otherwise} \end{cases} = 0.2\text{m}$$

Totaal aantal in rekening te brengen rijen (per eenheid van volledige i

$$n_{eff_{nok}} = \frac{h_{eff_{nok1}} + h_{eff_{nok2}} + h_{eff_{nok3}} + h_{eff_{nok4}} + h_{eff_{nok5}}}{h_{nok}} = 5$$

Zoals reeds gezegd, is de waterlaagdikte voor iedere rij groter dan de nokhoogte. Alle 5 de rijen mogen dus worden meegenomen in de ruwheidsbreedte en daarmee ruwheidsdichtheid. De eerste aanname van $n_{rij}=5$ in de ruwheidsbreedte is dus correct. Wanneer één of meerdere rijen te maken krijgt met een kleinere waterlaagdikte dan de nokhoogte, dan wordt een kleinere waarde ($n_{eff_{nok}}$) berekend. De waarde van n_{rij} dient dan aangepast te worden aan de waarde van $n_{eff_{nok}}$. Dit dient dan gedaan te worden in Stap 2, waarna vervolgens stappen 3 tot en met 5 wederom doorlopen moeten worden. We hoeven dat hier nu niet te doen en gaan verder met Stap 3 aangezien de berekende golfoverslag groter was dan de initieel opgegeven waarde. In een paar iteraties van Stap 3 t/m 5 kunnen we tot de eindwaarden komen voor bovenstaande constructie. Deze waarden zijn:

Golfoverslagdebiet:

$$q_{\langle 4 \rangle} = q_0 \cdot \exp\left(-6.9 \cdot \frac{h_k}{z_{2\% \langle 3 \rangle}}\right) \cdot \sqrt{g \cdot H_s^3} = 1.25 \cdot \frac{l}{s \cdot m}$$

Reductiefactor ruwheid obv golfoverslag

$$\gamma_{f \langle 4 \rangle} = 1 - \left(0.585 \cdot \sqrt{0.075 - \frac{H_s}{L_{m-1,0}}} \cdot \rho_{\gamma_{f \langle 4 \rangle}}^{0.5} \cdot \ln\left(\frac{q_{\langle 4 \rangle}}{\sqrt{g \cdot H_s^3}}\right) \right) = 0.823$$

Golfoploophoogte:

$$z_{2\% \langle 4 \rangle} = 3.45 \cdot \tanh\left(0.65 \cdot \frac{\tan(\alpha)}{\sqrt{\frac{H_s}{L_0}}}\right) \cdot \gamma_{f \langle 4 \rangle} \gamma_{berm} H_s = 5.86m$$

Reductiefactor ruwheid obv golfoploop:

$$\gamma_{f_{controle}} = 1 - \left[0.585 \cdot \sqrt{0.075 - \frac{H_s}{L_{m-1,0}}} \cdot \rho_{\gamma_{f \langle 4 \rangle}}^{0.5} \left(6.9 \cdot \frac{h_k}{z_{2\% \langle 4 \rangle}} - \ln(q_0) \right) \right] = 0.823$$

De ruwheidscoëfficiënt van het talud is dus 0,823.

D Voorbeelden Steenzetting met ruwheidspatroon

Inleiding

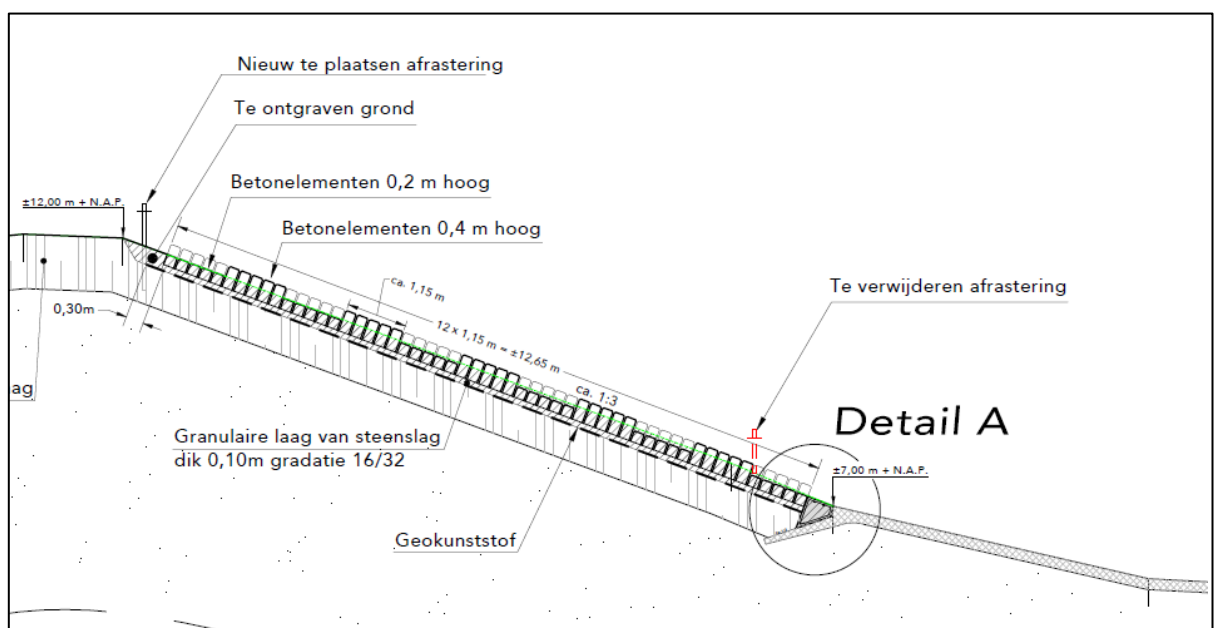
Steenzettingenpatronen in de vorm van een dambordpatroon of een ribbenpatroon in het bovenbeloop van een dijk zijn de laatste jaren enkele malen in Nederland reeds toegepast om daarmee de golfoploop- en golfoverslag te beïnvloeden om vervolgens met een lagere kruin te voldoen aan de toelaatbare golfoverslagdebieten. In Bijlage C is de gehele procedure beschreven om een ruwheidscoëfficiënt van een profiel te bepalen. Dit betrof een recht profiel zonder de bijkomstigheid van een berm rond ontwerp-/ toetspeil. In deze bijlage zullen 3 verschillende dijkbekledingen beschouwd met verschillende meer complexere geometrieën.

Voorbeeld 1: Dambordpatroon

Voor de bepaling van de ruwheidscoëfficiënt van het dambordpatroon (zie Figuur D.1) worden de volgende hydraulische en geometrische randvoorwaarden gehanteerd.



Figuur D.1 Voorbeeld 1: Dambordpatroon



Figuur D.2: Dwarsdoorsnede dambordpatroon voorbeeld 1

Deze waarden zijn:

- Significante Golfhoogte H_s aan de teen van de constructie: 2,9m
- Gemiddelde golfperiode $T_{m-1,0}$: 12,1s
- Waterstand WL: NAP 4,8m
- Kruinhoogte: NAP +12,0m
- Relatieve kruinhoogte h_k wordt dus $12,0-4,8=7,2$ m.
- Waterdiepte $h = 5,8$ m
- Taludhelling 1:3
- Nokhoogte uitstekende zuilen h_{nok} : 0,20m
- Ligging voorzijde uitstekende nokken:
 z_1 :NAP +7,20m ; z_2 :NAP +7,61m; z_3 :NAP +8,02m; z_4 :NAP +8,43m ;
 z_5 :NAP +8,84m; z_6 :NAP +9,25m; z_7 :NAP +9,66m ; z_8 :NAP +10,07m;
 z_9 :NAP +10,48m; z_{10} :NAP +10,89m ; z_{11} :NAP +11,30m;

Van de 11 rijen dambord, worden er hier na controle effectief 8,39 rijen voor de volledige nokhoogte in rekening gebracht. De bovenste vier rijen hebben namelijk een nokhoogte die groter is dan de laagdikte berekend voor de 2% golfoploop op hoogte z_8, z_9, z_{10} en z_{11} , zie annex D1. Voor de 2% golfoploophoogte is ook een reductiefactor voor bermen meegenomen. Deze is hier bepaald op 0,8. De ruwheidsdichtheid $\rho_{\gamma f}$ van het dambord is berekend op basis van een ruwheidsbreedte $\gamma_{f,w}$ afwisselend 1 set hoog en 1 set laag met een overlap van 20%.

$$\gamma_{f,w} := 0.8 \cdot 0.5 \cdot 8.385 = 3.354$$

$$\rho_{\gamma f} := \frac{\gamma_{f,w} \cdot \sin(\alpha) \cdot h_{nok}}{h_k} = 0.029$$

De lokale golf lengte ($L_{m-1,0}$) komt hier neer op 88,8m wat dus een lokale golfsteilheid $s_{m-1,0}$ van 3,3% oplevert. Omdat we het toegestane overslagdebiet niet kennen, bereken we de ruwheid van het dambord op de alternatieve manier, namelijk met de formule waarin gewerkt wordt met de 2% golfoploophoogte. Op iteratieve wijze is de ruwheidscoëfficiënt van het dambord afgeleid:

$$\gamma_f := 1 - \left[0.585 \cdot \sqrt{0.075 - \frac{H_s}{L_{m-1,0}}} \cdot \rho_{\gamma f}^{0.5} \left(6.9 \cdot \frac{h_k}{z_{2\%}} - \ln(q_0) \right) \right] = 0.796$$

De 2% golfoploophoogte $z_{2\%}$ is hierin op iteratieve wijze bepaald waarin rekening is gehouden met de effectiviteit van de uitstekende nokken. De oploophoogte bedraagt:

$$z_{2\%} := 3.45 \cdot \tanh \left(0.65 \cdot \frac{\tan(\alpha)}{\sqrt{\frac{H_s}{L_0}}} \right) \cdot \gamma_f \cdot \gamma_{berm} \cdot H_s = 6.11 \text{m}$$

We kunnen nu ook het overslagdebiet bepalen.

$$q := q_0 \cdot \exp \left(-6.9 \cdot \frac{h_k}{z_{2\%}} \right) \cdot \sqrt{g \cdot H_s^3} = 0.814 \cdot \frac{1}{\text{s} \cdot \text{m}}$$

We controleren de ruwheidscoëfficiënt nog met behulp van de originele ruwheidsformule waarin het overslagdebiet ingevuld moet worden. Deze bedraagt ook 0,8.

$$\gamma_f := 1 - \left(0.585 \cdot \sqrt{0.075 - \frac{H_s}{L_{m-1,0}}} \cdot \rho_{\gamma f}^{0.5} \cdot \ln \left(\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_s^3}} \right) \right) = 0.796$$

Gegeven de afgeleide hydraulische randvoorwaarden wordt een ruwheidscoëfficiënt van 0,80 gevonden voor het dambordpatroon in voorbeeld 1.

Voorbeeld 2: Ribbenpatroon



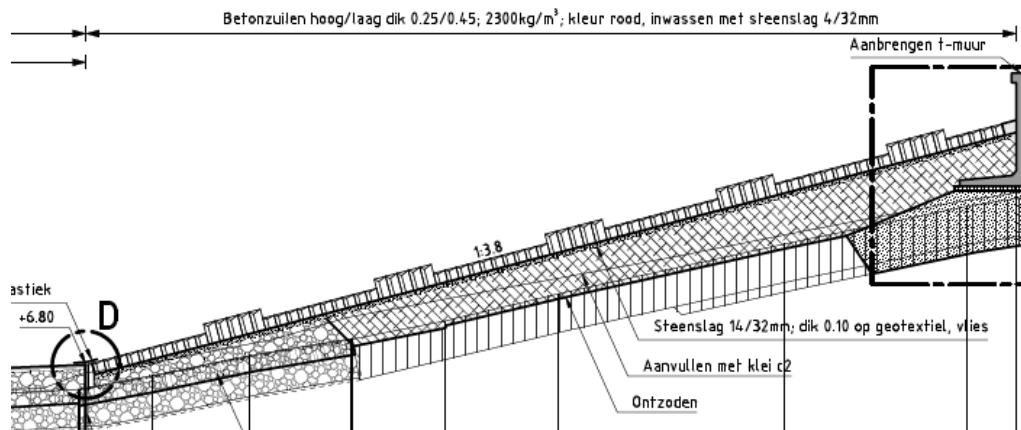
Figuur D.3: Voorbeeld 2: Ribbenpatroon

Voor de bepaling van de ruwheidscoëfficiënt van het ribbenpatroon (zie Figuur D.3) worden de volgende hydraulische en geometrische randvoorwaarden gehanteerd.

- Significante Golfhoogte H_s aan de teen van de constructie: 2,8m
- Gemiddelde golfperiode $T_{m-1,0}$: 11,0s
- Waterstand WL: NAP 5,60m
- Kruinhoogte: NAP +12,0m
- Relatieve kruinhoogte h_k wordt dus $12,0-5,60=6,40$ m.
- Waterdiepte $h=5,6$ m
- Taludhelling 1:3,8
- Nokhoogte uitstekende zuilen h_{nok} : 0,20m
- Ligging voorzijde uitstekende nokken:

z_1 :NAP +7,50m ; z_2 :NAP +8,50m; z_3 :NAP +9,50m;
 z_4 :NAP +10,50m ; z_5 :NAP +11,50m.

Van de 5 rijen, worden er hier na controle slechts effectief 3.14 rijen voor de volledige nokhoogte in rekening gebracht. De bovenste twee rijen hebben namelijk een nokhoogte die groter is dan de laagdikte berekend voor de 2% golfoploop op hoogte z_4 en z_5 , zie annex D2. Voor de 2% golfoploophoogte is ook een reductiefactor voor bermen meegenomen. Deze is hier bepaald op 0,70.



Figuur D.4: Dwarsdoorsnede ribbenpatroon voorbeeld 2

De ruwheidsdichtheid ρ_{rf} van het ribbenpatroon is berekend op basis van een ruwheidsbreedte $\gamma_{f,w}$ van afwisselend 2 sets hoog en 1 set laag in een rij.

$$\gamma_{f,w} = \frac{2}{3} \cdot 3.14 = 2.093$$

$$\rho_{rf} = \frac{\gamma_{f,w} \sin(\alpha) \cdot h_{nok}}{h_k} = 0.017$$

De lokale golfengte ($L_{m-1,0}$) komt hier neer op 79m wat dus een lokale golfsteilheid $s_{m-1,0}$ van 3,5% oplevert. Omdat we het toegestane overslagdebiet niet kennen, bereken we de ruwheid van het dambord op de alternatieve manier, namelijk met de formule waarin gewerkt wordt met de 2% golfoploophoogte. Op iteratieve wijze is de ruwheidscoëfficiënt van het dambord afgeleid:

$$\gamma_f = 1 - \left[0.585 \cdot \sqrt{0.075 - \frac{H_s}{L_{m-1,0}}} \cdot \rho_{rf}^{0.5} \left(6.9 \cdot \frac{h_k}{z_{2\%}} - \ln(q_0) \right) \right] = 0.84$$

De 2% golfoploop $z_{2\%}$ is hierin op iteratieve wijze bepaald waarin rekening is gehouden met de effectiviteit van de uitstekende nokken. De oploophoogte bedraagt:

$$z_{2\%} = 3.45 \cdot \tanh \left(0.65 \cdot \frac{\tan(\alpha)}{\sqrt{\frac{H_s}{L_0}}} \right) \cdot \gamma_f \cdot \gamma_{\text{berm}} \cdot H_s = 5.032\text{m}$$

We kunnen nu ook het overslagdebiet bepalen, waarbij geen rekening is gehouden met de kruinmuur:

$$q = q_0 \cdot \exp \left(-6.9 \cdot \frac{h_k}{z_{2\%}} \right) \cdot \sqrt{g \cdot H_s^3} = 0.334 \frac{1}{\text{s} \cdot \text{m}}$$

We controleren nog met behulp van de originele ruwheidsformule waarin het overslagdebiet ingevuld moet worden de ruwheidscoëfficiënt. Deze bedraagt ook 0,84.

$$\gamma_f = 1 - \left(0.585 \cdot \sqrt{0.075 - \frac{H_s}{L_{m-1,0}}} \cdot \rho_{rf}^{0.5} \cdot \ln \left(\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_s^3}} \right) \right) = 0.839$$

Gegeven de afgeleide hydraulische randvoorwaarden wordt een ruwheidscoëfficiënt van 0,84 gevonden voor het ribbenpatroon van voorbeeld 2.

Voorbeeld 3: Ribbenpatroon

Voor de bepaling van de ruwheidscoëfficiënt van het tweede ribbenpatroon (voorbeeld 3) worden de volgende hydraulische en geometrische randvoorwaarden gebruikt.

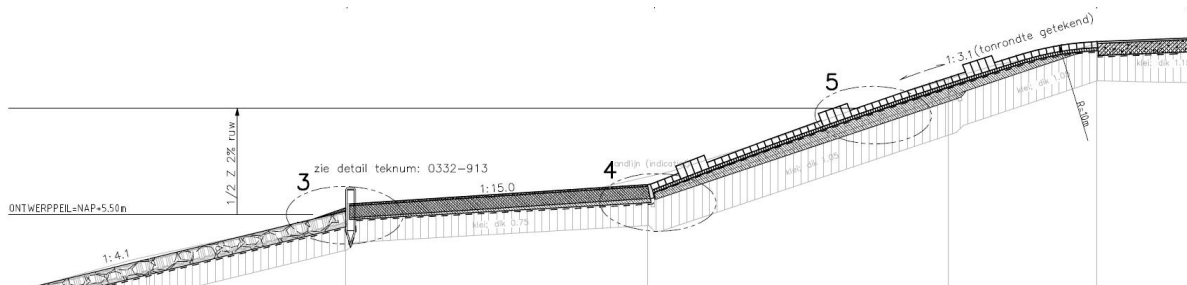
- Significante Golfhoogte H_s aan de teen van de constructie: 2,15m
- Gemiddelde golfperiode $T_{m-1,0}$: 7,1s
- Kruinhoogte: NAP +11,2m
- Waterstand WL: NAP 5,10m
- Relatieve kruinhoogte h_k wordt dus $11,2-5,1=6,1$ m.
- Waterdiepte $h = 6,1$ m.
- Taludhelling 1:2,8
- Nokhoogte uitstekende zuilen h_{nok} : 0,20m
- Ligging voorzijde uitstekende nokken:

z_1 :NAP +6,85m ; z_2 :NAP +8,60m; z_3 :NAP +10,25m;



Figuur D.5: Voorbeeld 3 Ribbenpatroon

Van de 3 rijen, worden er hier na controle slechts effectief 1,55 rijen voor de volledige nokhoogte in rekening gebracht. De bovenste 2 rijen hebben namelijk een nokhoogte die groter is dan de laagdikte berekend voor de 2% golfoploop op hoogte z_2 en z_3 , zie bijlage C. Voor de 2% golfoploophoogte is ook een reductiefactor voor bermen meegenomen. Deze is hier bepaald op 0,71.



Figuur D.6: Dwarsdoorsnede ribbenpatroon voorbeeld 3

De ruwheidsdichtheid $\rho_{\gamma f}$ van het ribbenpatroon is berekend op basis van een ruwheidsbreedte $\gamma_{f,w}$ van afwisselend 2 sets hoog en 1 set laag per rij.

$$\gamma_{f,w} = \frac{2}{3} \cdot 1.55 = 1.033$$

$$\rho_{\gamma f} = \frac{\gamma_{f,w} \sin(\alpha) \cdot h_{nok}}{h_k} = 0.011$$

De lokale golfenlengte ($L_{m-1,0}$) komt hier neer op 50,4m wat dus een lokale golfsteilheid $s_{m-1,0}$ van 4,3% oplevert. Omdat we het toegestane overslagdebiët niet kennen, bereken we de ruwheid van het dambord op de alternatieve manier, namelijk met de formule waarin gewerkt wordt met de 2% golfoploophoogte. Op iteratieve wijze is de ruwheidscoëfficiënt van het dambord afgeleid:

$$\gamma_f = 1 - \left[0.585 \cdot \sqrt{0.075 - \frac{H_s}{L_{m-1,0}}} \cdot \rho_{\gamma f}^{0.5} \left(6.9 \cdot \frac{h_k}{z_{2\%}} - \ln(q_0) \right) \right] = 0.859$$

De 2% golfoploophoogte $z_{2\%}$ is hierin op iteratieve wijze bepaald waarin rekening is gehouden met de effectiviteit van de uitstekende nokken. De oploophoogte bedraagt:

$$z_{2\%} = 3.45 \cdot \tanh \left(0.65 \cdot \frac{\tan(\alpha)}{\sqrt{\frac{H_s}{L_0}}} \right) \cdot \gamma_f \cdot \gamma_{\text{berm}} \cdot H_s = 4.01 \text{m}$$

We kunnen nu ook het overslagdebiët bepalen:

$$q = q_0 \cdot \exp \left(-6.9 \cdot \frac{h_k}{z_{2\%}} \right) \cdot \sqrt{g \cdot H_s^3} = 0.034 \frac{\text{l}}{\text{s} \cdot \text{m}}$$

We controleren nog met behulp van de originele ruwheidsformule waarin het overslagdebiët ingevuld moet worden de ruwheidscoëfficiënt. Deze bedraagt ook 0,86.

$$\gamma_f = 1 - \left(0.585 \cdot \sqrt{0.075 - \frac{H_s}{L_{m-1,0}}} \cdot \rho_{\gamma f}^{0.5} \cdot \ln \left(\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_s^3}} \right) \right) = 0.859$$

Gegeven de afgeleide hydraulische randvoorwaarden wordt een ruwheidscoëfficiënt van 0,86 gevonden voor het ribbenpatroon van voorbeeld 3.

Samenvattend

In deze bijlage zijn 3 verschillende voorbeelden van steenzettingsbekledingen beschouwd waarin gebruikt is gemaakt van een dambord- of ribbenpatroon. Gegeven de verschillende hydraulische en geometrische randvoorwaarden worden de volgende ruwheidscoëfficiënten berekend:

Voorbeeld 1: $\gamma_f = 0,80$

Voorbeeld 2: $\gamma_f = 0,84$

Voorbeeld 3: $\gamma_f = 0,86$

Annex D1: bepaling effectieve nokhoogte per rij dambordpatroon voorbeeld 1

$$\begin{aligned}
 z_1 &:= 7.2\text{m} & ha_{z1} &:= 0.216[R_{u2\%} - (z_1 - WL)] = 0.801\text{m} \\
 z_2 &:= (z_1 + .41\text{m}) = 7.61\text{m} & ha_{z2} &:= 0.216[R_{u2\%} - (z_2 - WL)] = 0.712\text{m} \\
 z_3 &:= (z_2 + .41\text{m}) = 8.02\text{m} & ha_{z3} &:= 0.216[R_{u2\%} - (z_3 - WL)] = 0.624\text{m} \\
 z_4 &:= (z_3 + .41\text{m}) = 8.43\text{m} & ha_{z4} &:= 0.216[R_{u2\%} - (z_4 - WL)] = 0.535\text{m} \\
 z_5 &:= (z_4 + .41\text{m}) = 8.84\text{m} & ha_{z5} &:= 0.216[R_{u2\%} - (z_5 - WL)] = 0.447\text{m} \\
 z_6 &:= (z_5 + .41\text{m}) = 9.25\text{m} & ha_{z6} &:= 0.216[R_{u2\%} - (z_6 - WL)] = 0.358\text{m} \\
 z_7 &:= (z_6 + .41\text{m}) = 9.66\text{m} & ha_{z7} &:= 0.216[R_{u2\%} - (z_7 - WL)] = 0.27\text{m} \\
 z_8 &:= (z_7 + .41\text{m}) = 10.07\text{m} & ha_{z8} &:= 0.216[R_{u2\%} - (z_8 - WL)] = 0.181\text{m} \\
 z_9 &:= (z_8 + .41\text{m}) = 10.48\text{m} & ha_{z9} &:= 0.216[R_{u2\%} - (z_9 - WL)] = 0.092\text{m} \\
 z_{10} &:= (z_9 + .41\text{m}) = 10.89\text{m} & ha_{z10} &:= 0.216[R_{u2\%} - (z_{10} - WL)] = 0.004\text{m} \\
 z_{11} &:= (z_{10} + .41\text{m}) = 11.3\text{m} & ha_{z11} &:= 0.216[R_{u2\%} - (z_{11} - WL)] = -0.085\text{m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 h_{\text{eff}_{\text{nok}1}} &:= \begin{cases} 0 & \text{if } ha_{z1} < 0 \\ h_{\text{nok}} & \text{if } ha_{z1} \geq h_{\text{nok}} \\ ha_{z1} & \text{otherwise} \end{cases} = 0.2\text{m} & h_{\text{eff}_{\text{nok}2}} &:= \begin{cases} 0 & \text{if } ha_{z2} < 0 \\ h_{\text{nok}} & \text{if } ha_{z2} \geq h_{\text{nok}} \\ ha_{z2} & \text{otherwise} \end{cases} = 0.2\text{m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 h_{\text{eff}_{\text{nok}3}} &:= \begin{cases} 0 & \text{if } ha_{z3} < 0 \\ h_{\text{nok}} & \text{if } ha_{z3} \geq h_{\text{nok}} \\ ha_{z3} & \text{otherwise} \end{cases} = 0.2\text{m} & h_{\text{eff}_{\text{nok}4}} &:= \begin{cases} 0 & \text{if } ha_{z4} < 0 \\ h_{\text{nok}} & \text{if } ha_{z4} \geq h_{\text{nok}} \\ ha_{z4} & \text{otherwise} \end{cases} = 0.2\text{m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 h_{\text{eff}_{\text{nok}5}} &:= \begin{cases} 0 & \text{if } ha_{z5} < 0 \\ h_{\text{nok}} & \text{if } ha_{z5} \geq h_{\text{nok}} \\ ha_{z5} & \text{otherwise} \end{cases} = 0.2\text{m} & h_{\text{eff}_{\text{nok}6}} &:= \begin{cases} 0 & \text{if } ha_{z6} < 0 \\ h_{\text{nok}} & \text{if } ha_{z6} \geq h_{\text{nok}} \\ ha_{z6} & \text{otherwise} \end{cases} = 0.2\text{m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 h_{\text{eff}_{\text{nok}7}} &:= \begin{cases} 0 & \text{if } ha_{z7} < 0 \\ h_{\text{nok}} & \text{if } ha_{z7} \geq h_{\text{nok}} \\ ha_{z7} & \text{otherwise} \end{cases} = 0.2\text{m} & h_{\text{eff}_{\text{nok}8}} &:= \begin{cases} 0 & \text{if } ha_{z8} < 0 \\ h_{\text{nok}} & \text{if } ha_{z8} \geq h_{\text{nok}} \\ ha_{z8} & \text{otherwise} \end{cases} = 0.181\text{m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 h_{\text{eff}_{\text{nok}9}} &:= \begin{cases} 0 & \text{if } ha_{z9} < 0 \\ h_{\text{nok}} & \text{if } ha_{z9} \geq h_{\text{nok}} \\ ha_{z9} & \text{otherwise} \end{cases} = 0.092\text{m} & h_{\text{eff}_{\text{nok}10}} &:= \begin{cases} 0 & \text{if } ha_{z10} < 0 \\ h_{\text{nok}} & \text{if } ha_{z10} \geq h_{\text{nok}} \\ ha_{z10} & \text{otherwise} \end{cases} = 0.004\text{m}
 \end{aligned}$$

$$h_{\text{eff}_{\text{nok}11}} := \begin{cases} 0 & \text{if } ha_{z11} < 0 \\ h_{\text{nok}} & \text{if } ha_{z11} \geq h_{\text{nok}} \\ ha_{z11} & \text{otherwise} \end{cases} = 0\text{m}$$

$$n_{\text{eff}_{\text{nok}}} := \frac{h_{\text{eff}_{\text{nok}1}} + h_{\text{eff}_{\text{nok}2}} + h_{\text{eff}_{\text{nok}3}} + h_{\text{eff}_{\text{nok}4}} + h_{\text{eff}_{\text{nok}5}} + h_{\text{eff}_{\text{nok}6}} + h_{\text{eff}_{\text{nok}7}} + h_{\text{eff}_{\text{nok}8}} + h_{\text{eff}_{\text{nok}9}} + h_{\text{eff}_{\text{nok}10}} + h_{\text{eff}_{\text{nok}11}}}{h_{\text{nok}}} = 8.39$$

Annex D2: bepaling effectieve nokhoogte per rij ribben patroon voorbeeld 2

$$z_1 := 7.5\text{-m} \quad ha_{z1} := 0.216 \left[R_{u2\%} - (z_1 - WL) \right] = 0.676\text{m}$$

$$z_2 := 8.5\text{-m} \quad ha_{z2} := 0.216 \left[R_{u2\%} - (z_2 - WL) \right] = 0.46\text{m}$$

$$z_3 := 9.5\text{-m} \quad ha_{z3} := 0.216 \left[R_{u2\%} - (z_3 - WL) \right] = 0.244\text{m}$$

$$z_4 := 10.5\text{-m} \quad ha_{z4} := 0.216 \left[R_{u2\%} - (z_4 - WL) \right] = 0.028\text{m}$$

$$z_5 := 11.5\text{-m} \quad ha_{z5} := 0.216 \left[R_{u2\%} - (z_5 - WL) \right] = -0.188\text{m}$$

$$h_{\text{eff}_{\text{nok1}}} := \begin{cases} 0 & \text{if } ha_{z1} < 0 & = 0.2\text{m} \\ h_{\text{nok}} & \text{if } ha_{z1} \geq h_{\text{nok}} \\ ha_{z1} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$h_{\text{eff}_{\text{nok2}}} := \begin{cases} 0 & \text{if } ha_{z2} < 0 & = 0.2\text{m} \\ h_{\text{nok}} & \text{if } ha_{z2} \geq h_{\text{nok}} \\ ha_{z2} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$h_{\text{eff}_{\text{nok3}}} := \begin{cases} 0 & \text{if } ha_{z3} < 0 & = 0.2\text{m} \\ h_{\text{nok}} & \text{if } ha_{z3} \geq h_{\text{nok}} \\ ha_{z3} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$h_{\text{eff}_{\text{nok4}}} := \begin{cases} 0 & \text{if } ha_{z4} < 0 & = 0.028\text{m} \\ h_{\text{nok}} & \text{if } ha_{z4} \geq h_{\text{nok}} \\ ha_{z4} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$h_{\text{eff}_{\text{nok5}}} := \begin{cases} 0 & \text{if } ha_{z5} < 0 & = 0\text{m} \\ h_{\text{nok}} & \text{if } ha_{z5} \geq h_{\text{nok}} \\ ha_{z5} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$n_{\text{eff}_{\text{nok}}} := \frac{h_{\text{eff}_{\text{nok1}}} + h_{\text{eff}_{\text{nok2}}} + h_{\text{eff}_{\text{nok3}}} + h_{\text{eff}_{\text{nok4}}} + h_{\text{eff}_{\text{nok5}}}{h_{\text{nok}}} = 3.14$$

Annex D3: bepaling effectieve nokhoogte per rij ribbenpatroon voorbeeld 3

$$z_1 := 6.85\text{-m} \quad ha_{z1} := 0.216 \cdot [R_{u2\%} - (z_1 - WL)] = 0.488\text{m}$$

$$z_2 := 8.60\text{-m} \quad ha_{z2} := 0.216 \cdot [R_{u2\%} - (z_2 - WL)] = 0.11\text{m}$$

$$z_3 := 10.25\text{-m} \quad ha_{z3} := 0.216 \cdot [R_{u2\%} - (z_3 - WL)] = -0.246\text{m}$$

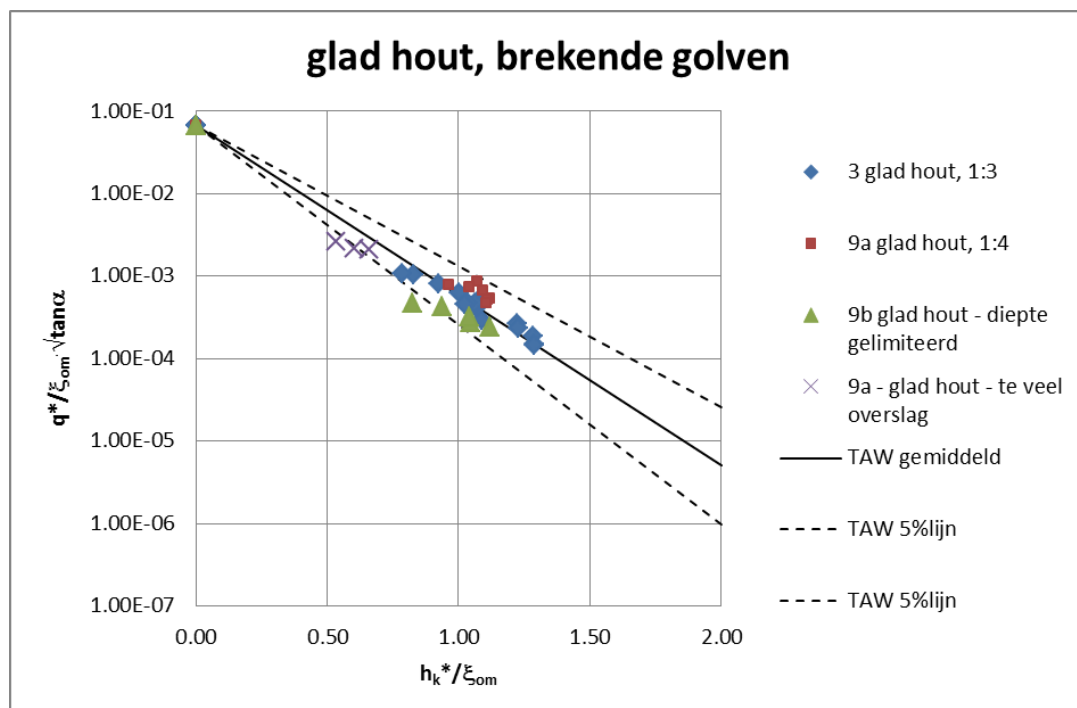
$$h_{\text{eff}_{\text{nok1}}} := \begin{cases} 0 & \text{if } ha_{z1} < 0 \\ h_{\text{nok}} & \text{if } ha_{z1} \geq h_{\text{nok}} \\ ha_{z1} & \text{otherwise} \end{cases} = 0.2\text{m}$$

$$h_{\text{eff}_{\text{nok2}}} := \begin{cases} 0 & \text{if } ha_{z2} < 0 \\ h_{\text{nok}} & \text{if } ha_{z2} \geq h_{\text{nok}} \\ ha_{z2} & \text{otherwise} \end{cases} = 0.11\text{m}$$

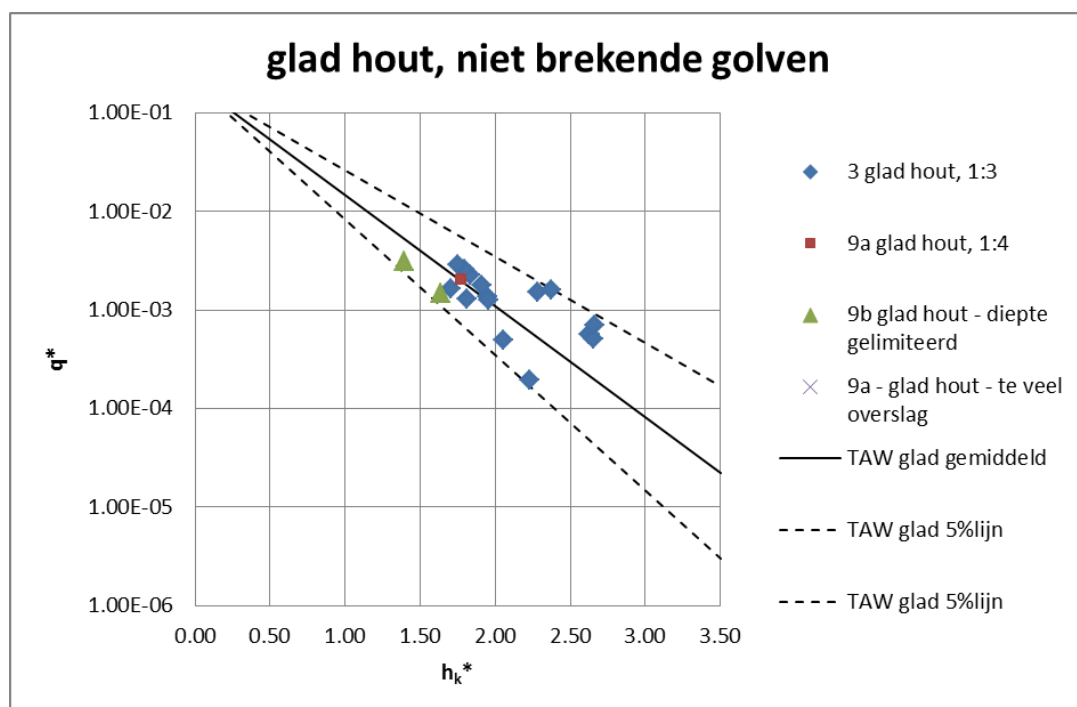
$$h_{\text{eff}_{\text{nok3}}} := \begin{cases} 0 & \text{if } ha_{z3} < 0 \\ h_{\text{nok}} & \text{if } ha_{z3} \geq h_{\text{nok}} \\ ha_{z3} & \text{otherwise} \end{cases} = 0\text{m}$$

$$n_{\text{eff}_{\text{nok}}} := \frac{h_{\text{eff}_{\text{nok1}}} + h_{\text{eff}_{\text{nok2}}} + h_{\text{eff}_{\text{nok3}}}{h_{\text{nok}}} = 1.55$$

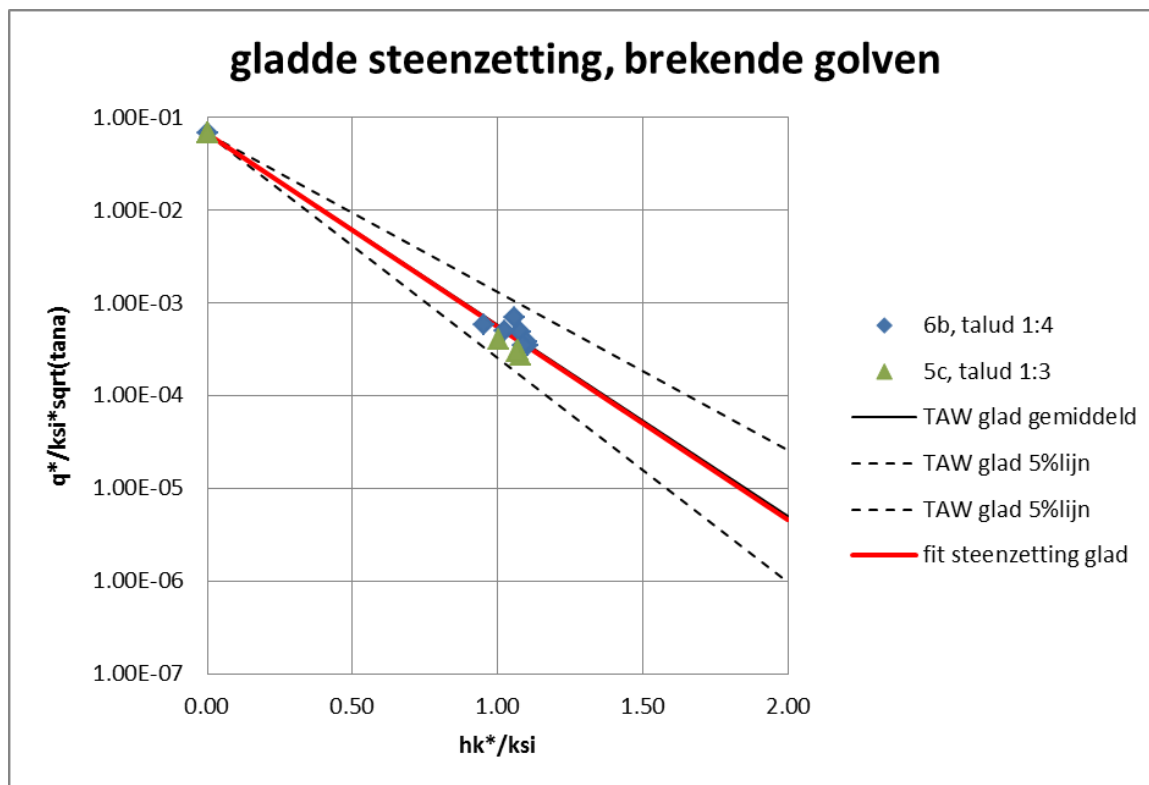
E Figuren bij hoofdstuk 3



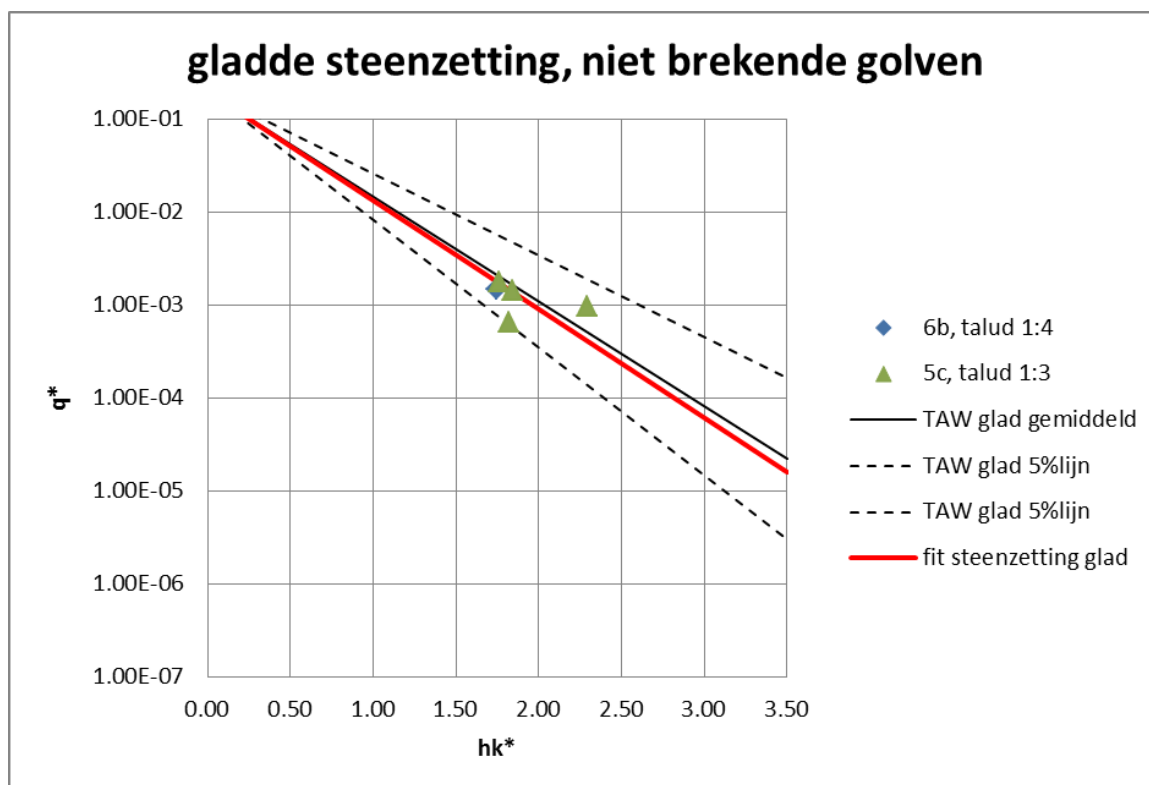
Figuur 7.1 Metingen t.o.v. TAW (2002) voor talud van glad hout met brekende golven



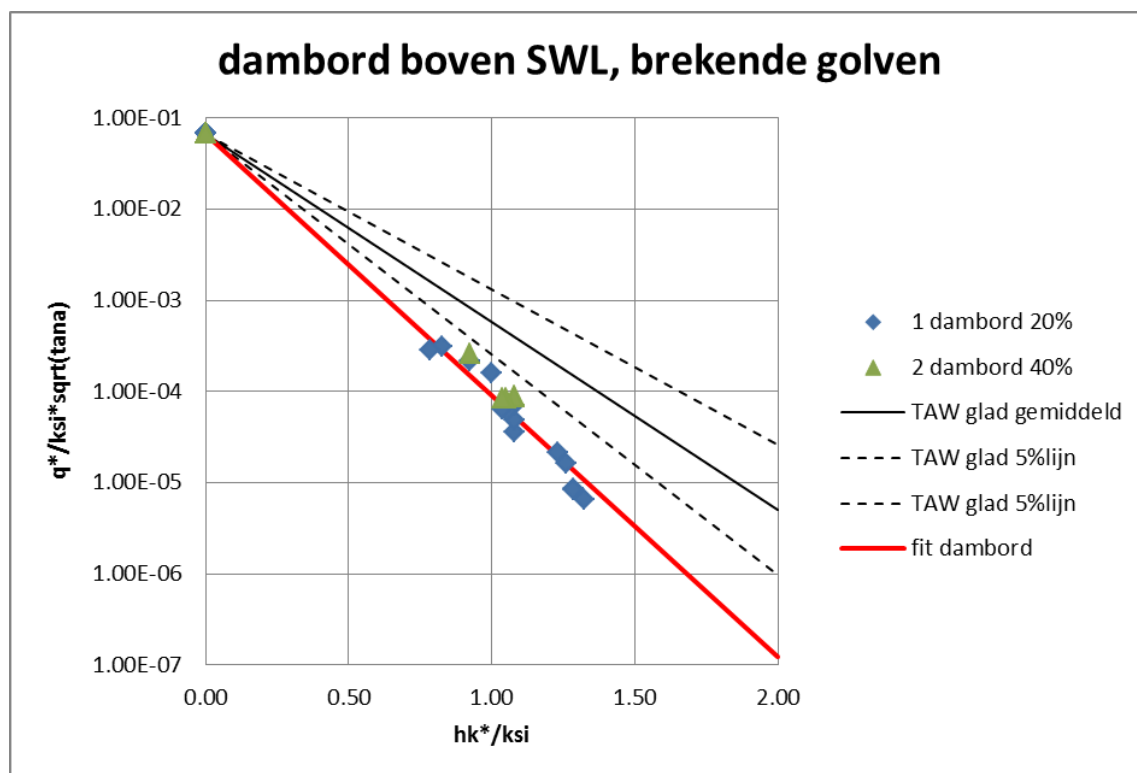
Figuur 7.2 Metingen t.o.v. TAW (2002) voor talud van glad hout met niet-brekende golven



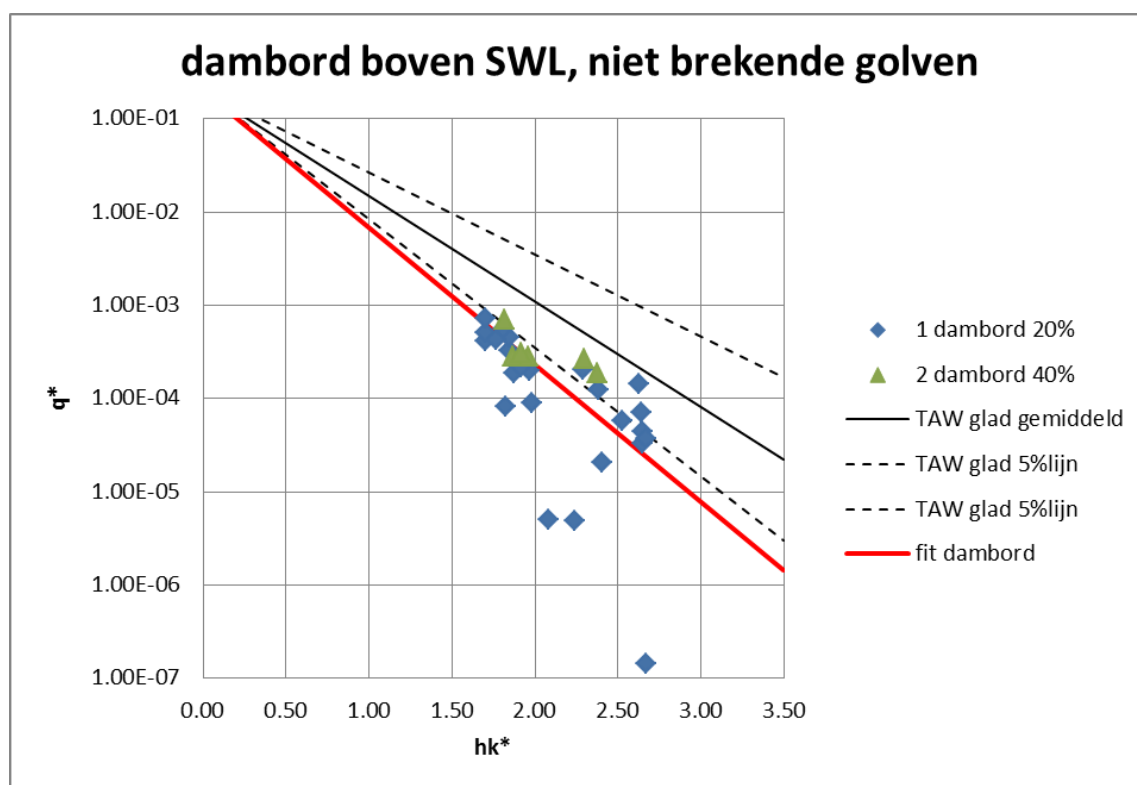
Figuur 7.3 Metingen t.o.v. TAW (2002) voor talud met gladde steenzetting met brekende golven



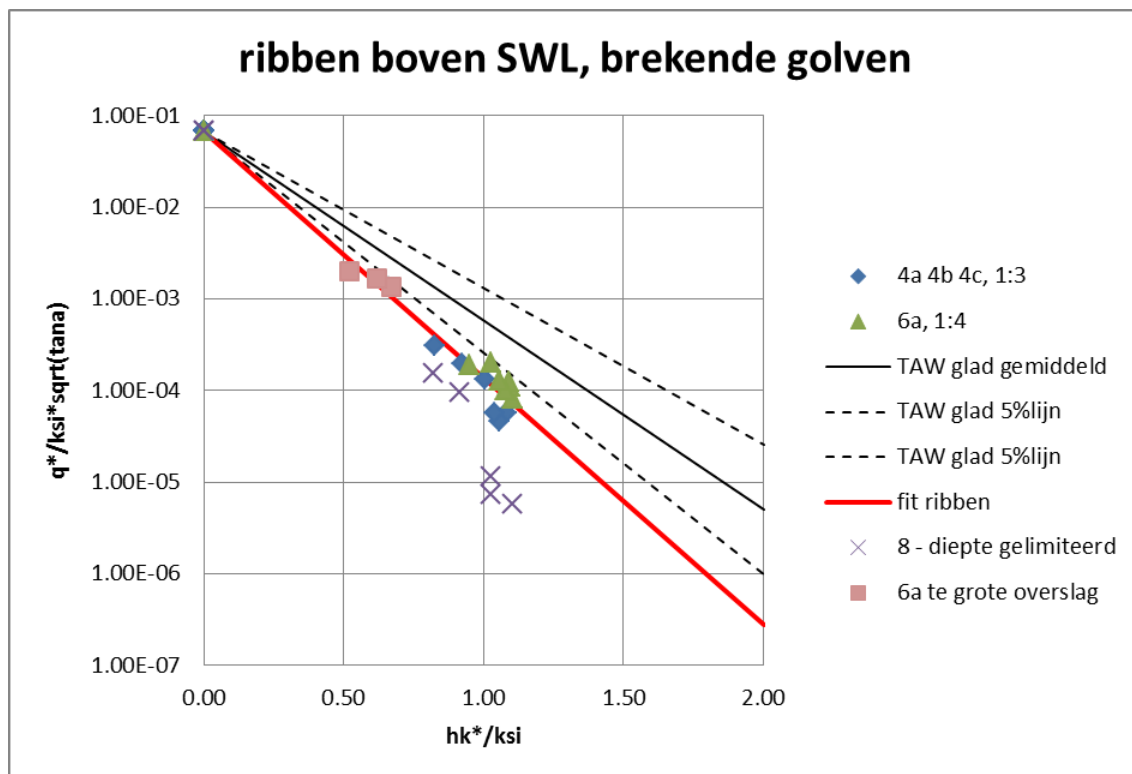
Figuur 7.4 Metingen t.o.v. TAW (2002) voor talud met gladde steenzetting met niet-brekende golven



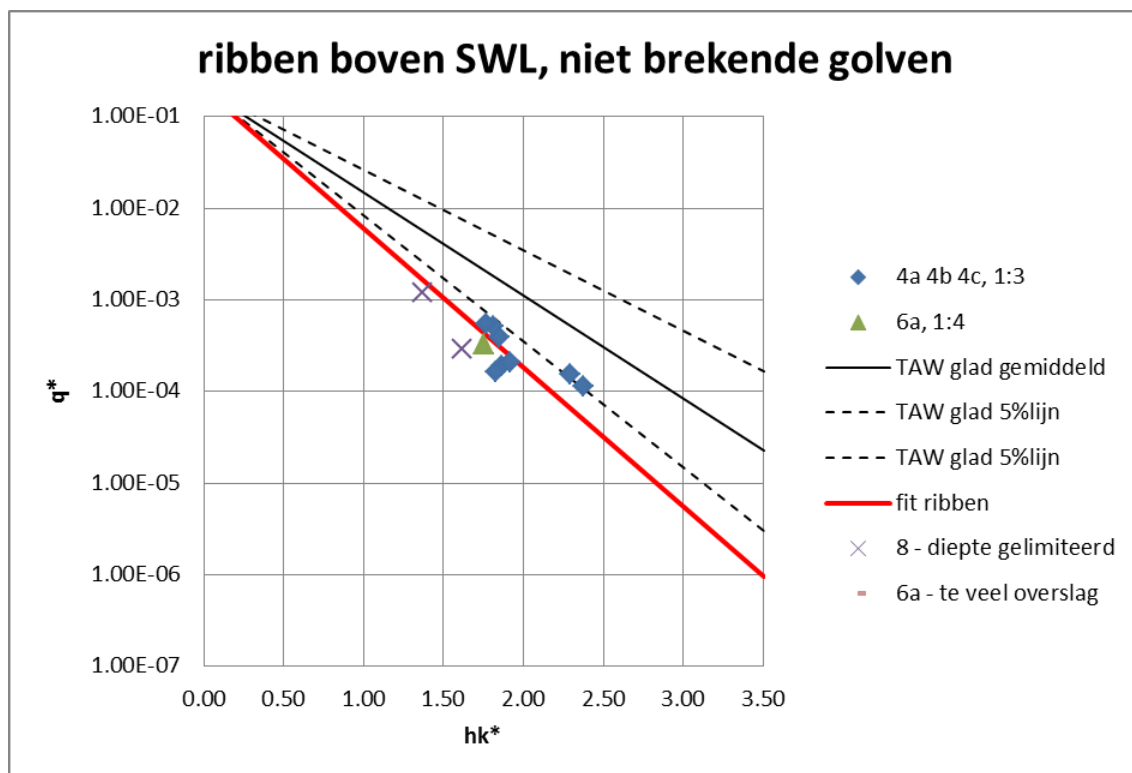
Figuur 7.5 Metingen t.o.v. TAW (2002) voor talud met dambord boven SWL en met brekende golven



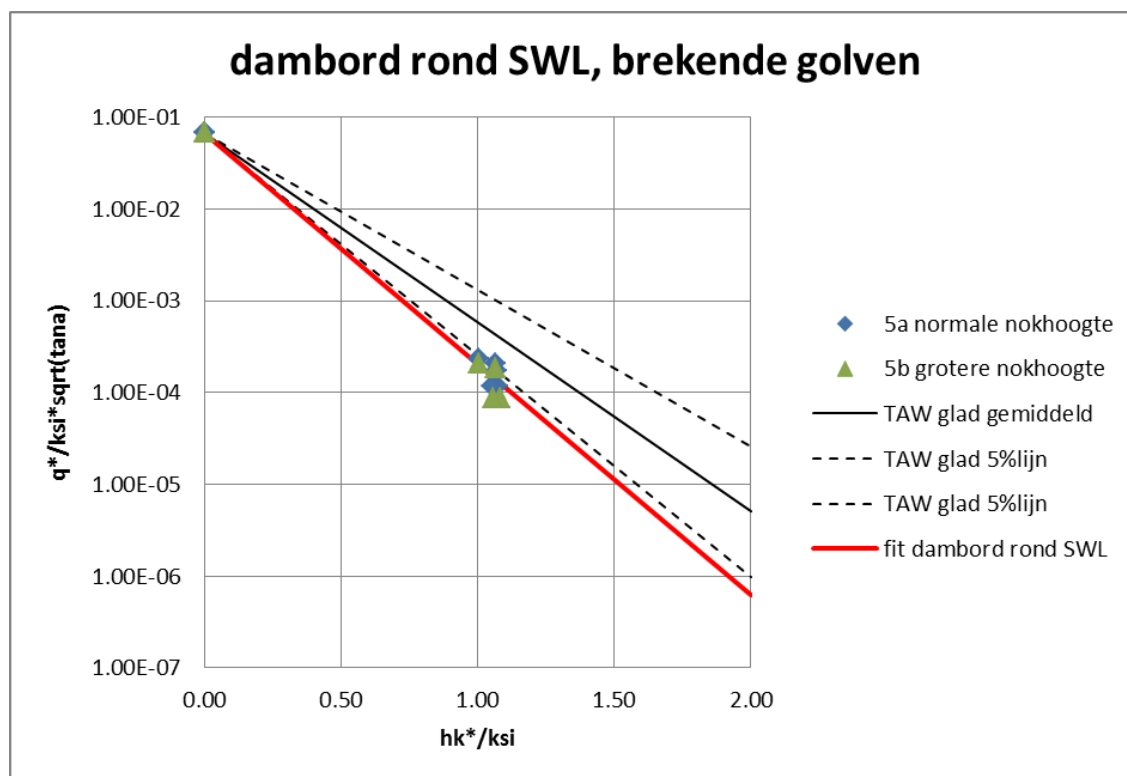
Figuur 7.6 Metingen t.o.v. TAW (2002) voor talud met dambord boven SWL en met niet-brekende golven



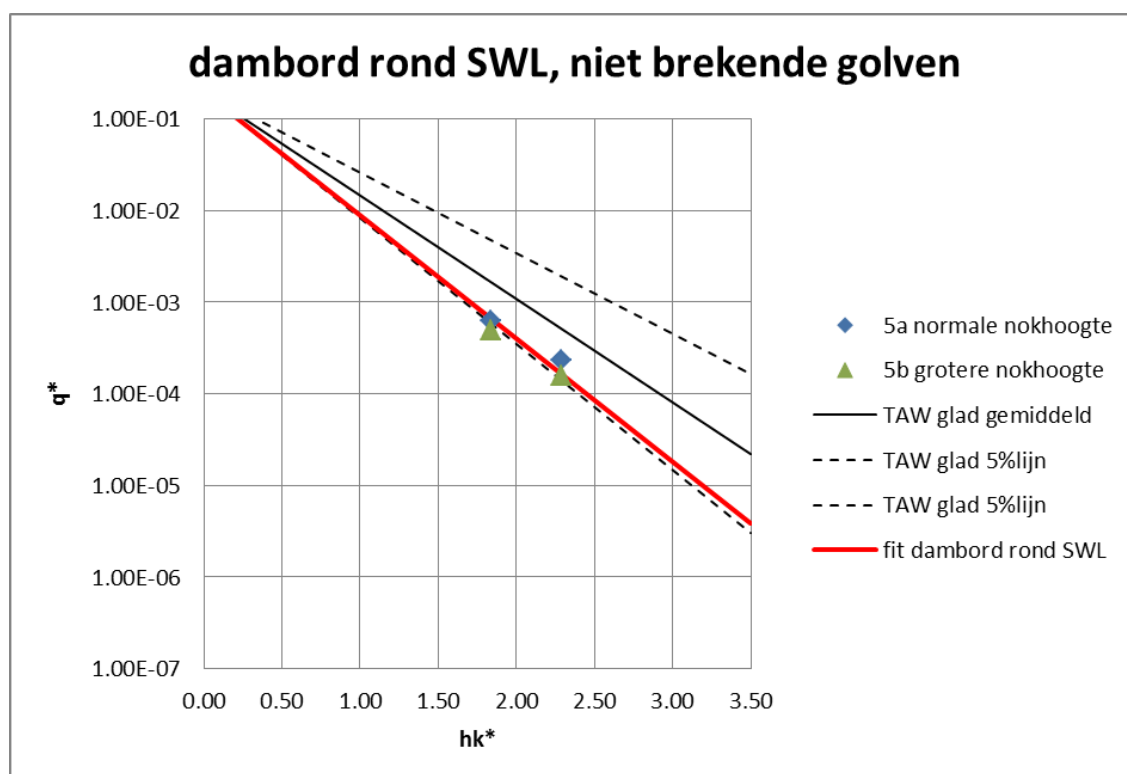
Figuur 7.7 Metingen t.o.v. TAW (2002) voor talud met ribben boven SWL en met brekende golven



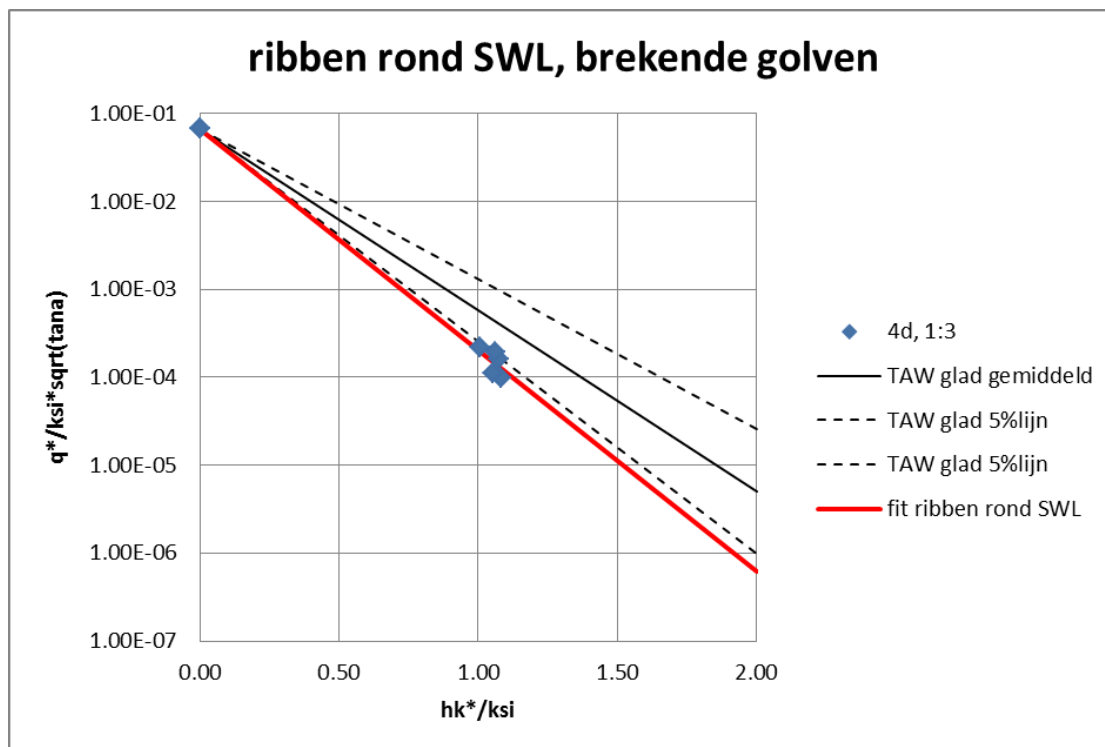
Figuur 7.8 Metingen t.o.v. TAW (2002) voor talud met ribben boven SWL en met niet-brekende golven



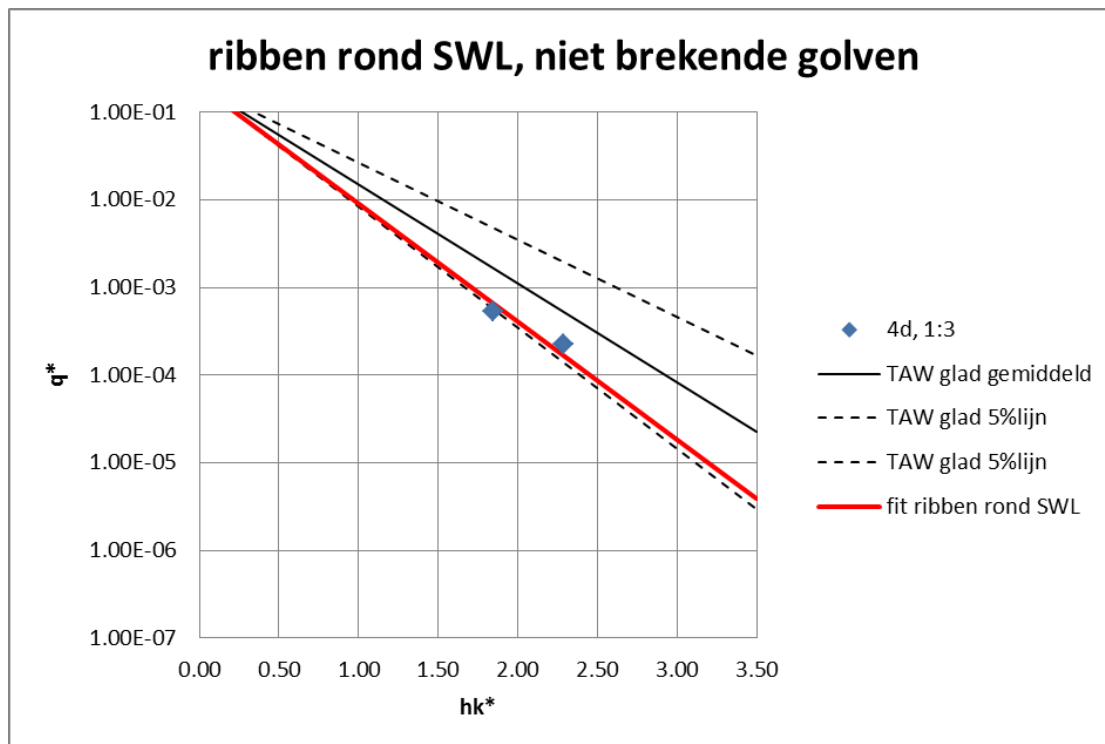
Figuur 7.9 Metingen t.o.v. TAW (2002) voor talud met dambord rond SWL en met brekende golven



Figuur 7.10 Metingen t.o.v. TAW (2002) voor talud met dambord rond SWL en met niet-brekende golven



Figuur 7.11 Metingen t.o.v. TAW (2002) voor talud met ribben rond SWL en met brekende golven



Figuur 7.12 Metingen t.o.v. TAW (2002) voor talud met ribben rond SWL en met niet-brekende golven

F Overslagvolume

In dit rapport is een analyse gemaakt naar de ruwheidscoëfficiënt van een steenzettingstalud voor verschillende zettingspatronen. Hierbij is een formule ontwikkeld waarbij de ruwheidscoëfficiënt afhangt van onder meer het gemiddelde golfoverslagdebiet. Het golfoverslagdebiet q is namelijk afhankelijk van de laagdikte van de oplooptong h vermenigvuldigd met de snelheid van deze oplooptong v . Bij toenemende laagdikte worden de zettingspatronen minder voelbaar en de golfoverslag wordt dan minder afgeremd. Dit geeft dan gemiddeld genomen gladdere taluds.

Uit onderzoek naar de stabiliteit van binnentaluds weten we echter dat niet het gemiddelde overslagdebiet maar het individuele overslagvolume van een golf maatgevend is voor de stabiliteit. Dit effect wordt eveneens zichtbaar wanneer we rivierdijken en zeedijken apart beschouwen. Het gemiddelde overslagdebiet in een storm bij een rivierdijk kenmerkt zich door veel golven met een klein overslagvolume terwijl ditzelfde gemiddelde debiet bij een zeedijk het gevolg is van een paar golven met een groot overslagvolume. Bij een rivierdijk is de laagdikte van de golfoploop dus veel kleiner en ruwheid op het talud is daarmee zeer effectief. Dit effect komt ook naar voren in de huidige afgeleide formule, formule (6.1).

In de toekomst zullen we wellicht bij het toetsen dan wel ontwerpen overgaan naar een maximaal toelaatbaar overslagvolume in plaats van een maximaal toelaatbaar gemiddelde overslagdebiet. In deze appendix is de ruwheid afhankelijk gemaakt van een relatief overslagvolume in plaats van een gemiddeld overslagdebiet.

Het overslagvolume is afhankelijk van onder andere het gemiddelde overslagdebiet via de coëfficiënt a en b in de volgende formule (EurOtop, 2007).

$$P_{v\%} = P(V_j \geq V) = \exp\left(-\left(\frac{V}{a}\right)^b\right) \quad (F.1)$$

De coëfficiënt a is daarbij een speciale coëfficiënt doordat hierin een speciale functie, namelijk de gammafunctie Γ wordt gebruikt om deze te bepalen. {In MS Excel kan de gammafunctie als volgt worden uitgerekend: GAMMA.DIST(1;(1+(1/b));1;FALSE)}. De formule voor a (EurOtop 2007) is als volgt:

$$a = \left(\frac{1}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)}\right) \cdot \left(\frac{q \cdot T_m}{P_{ov}}\right) \quad (F.2)$$

Ook in de coëfficiënt b is het overslagdebiet verwerkt. De formule voor b (Zanuttigh et al, 2013) voor gladde taluds is:

$$b = 0.73 + 55 \cdot \left(\frac{q}{g \cdot H_s \cdot T_{m-1,0}}\right)^{0.8} \quad (F.3)$$

Uit Zanuttigh et al (2013) blijkt dat op basis van de data voor golfbrekers met een lage kruin, dus data met ruwheid, de waarde van b groter wordt ten opzichte van gladde taluds. Dit effect wordt hier nog niet meegenomen.

De kans op overslag wordt berekend door gebruik te maken van de verhouding tussen de relatieve kruinhoogte en de 2% golfoploophoogte via formule (F.4).

$$P_{ov} = \exp\left(-\left(\sqrt{-\ln 0,02} \cdot \frac{h_k}{z_{2\%}}\right)^2\right) \quad (F.4)$$

Wanneer h_k gelijk is aan $z_{2\%}$ dan zal dus 2% van de golven tot overslag leiden. Wanneer h_k kleiner is dan $z_{2\%}$ zal dat percentage groter zijn. Het bijbehorende overslagvolume wordt vervolgens bepaald door:

$$V_{ov} = a \cdot (-\ln(P_{ov}))^{\frac{1}{b}} \quad (F.5)$$

Het maximale overslagvolume behorende bij een duur van 1000 golven kan berekend worden door:

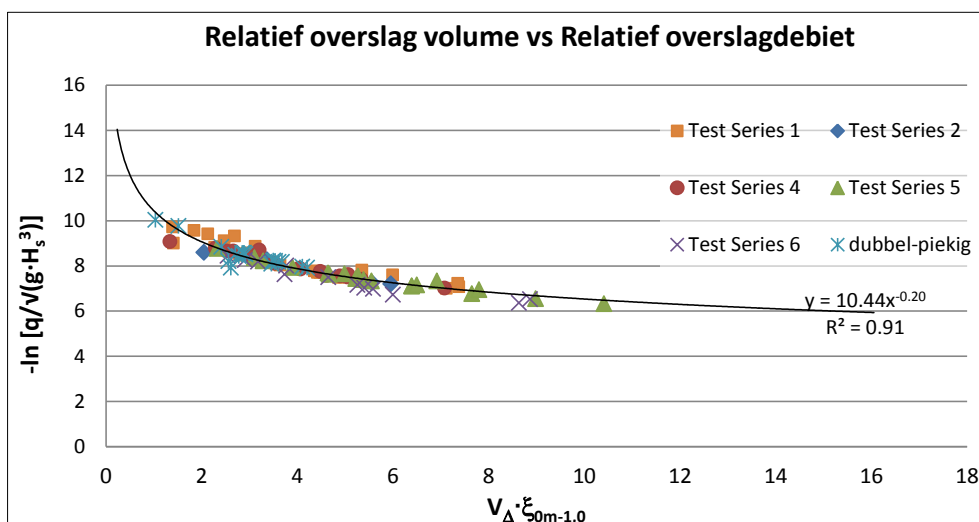
$$V_{0,1\%} = a \cdot (\ln(1000))^{\frac{1}{b}} \quad (F.6)$$

We definiëren nu een relatief golfoverslagvolume V_{Δ} . Deze parameter is een verhouding tussen het maximale overslagvolume en het overslagvolume behorende bij de kruinhoogte en is als volgt:

$$V_{\Delta} = \frac{V_{0,1\%} - V_{ov}}{V_{ov}} \quad (F.7)$$

Deze grootheid is onafhankelijk van de waarde van de coëfficiënt a die met Formule (F.2) berekend wordt. Daarmee vervalt de afhankelijkheid van het gemiddelde overslagdebiet q via de coëfficiënt a . Dit willen we ook bereiken voor de coëfficiënt b . In plaats van de formule (F.3) gebruiken we daarom de formulering van Hughes et al (2012):

$$b = \left(\exp\left(-0,6 \cdot \frac{h_k}{H_s}\right) \right)^{1,8} + 0,64 \quad (F.8)$$



Figuur F.1 Relatief overslagvolume vs relatief overslagdebiet

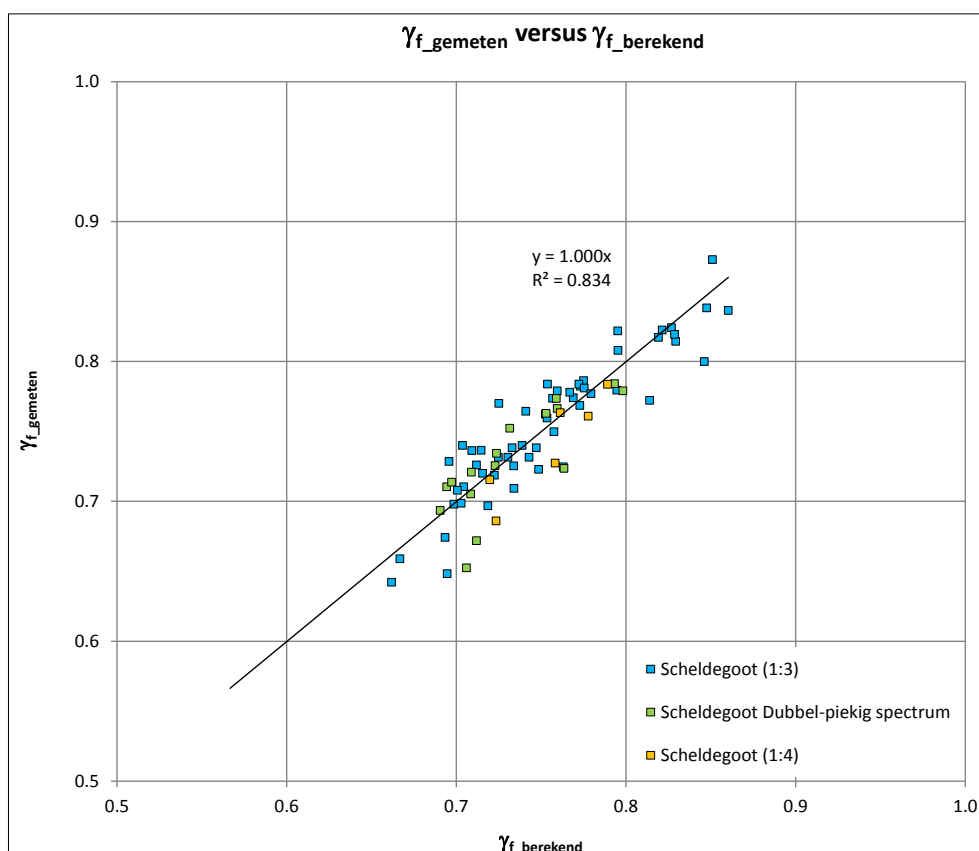
Wanneer we nu het relatief golfoverslagvolume V_{Δ} vermenigvuldigd met de brekerparameter uitzetten tegen de natuurlijke logaritme van het relatief overslagdebiat q^* dan verkrijgen we Figuur F.1.

Zoals uit Figuur F.1 blijkt, is er een goede match gevonden tussen de grootheden op de verticale en horizontale assen. We kunnen nu de term $-\ln(q^*)$ uit formule (6.1) vervangen door de term $10,4 \cdot (V_{\Delta} \cdot \xi_{0m-1,0})^{-0,2}$.

Formule (F.9) wordt hierbij verkregen.

$$\gamma_f = 1 - \left\{ 6,1 \cdot \sqrt{0,075 - s_{m-1,0}} \cdot \rho_{\gamma_f}^{1/2} \cdot (V_{\Delta} \cdot \xi_{0m-1,0})^{-0,2} \right\} \quad (\text{F.9})$$

Wanneer we nu in Figuur F.2 de met formule (F.9) berekende ruwheidscoëfficiënt uitzetten tegen de gemeten ruwheidscoëfficiënt dan vinden we een vergelijkbare betrouwbaarheid als formule (6.1), zie ook Figuur 4.30.



Figuur F.2 Vergelijking gemeten γ_f versus berekende γ_f voor formule (F.9)

Formule (F.9) is dus een goed alternatief voor formule (6.1). Echter ook hierbij geldt dat de formule iteratief is, omdat in de bepaling van het golfoverslagvolume de golfploophoogte benodigd is. De golfploophoogte is echter afhankelijk van de ruwheid van het talud, die we ook willen uitrekenen.