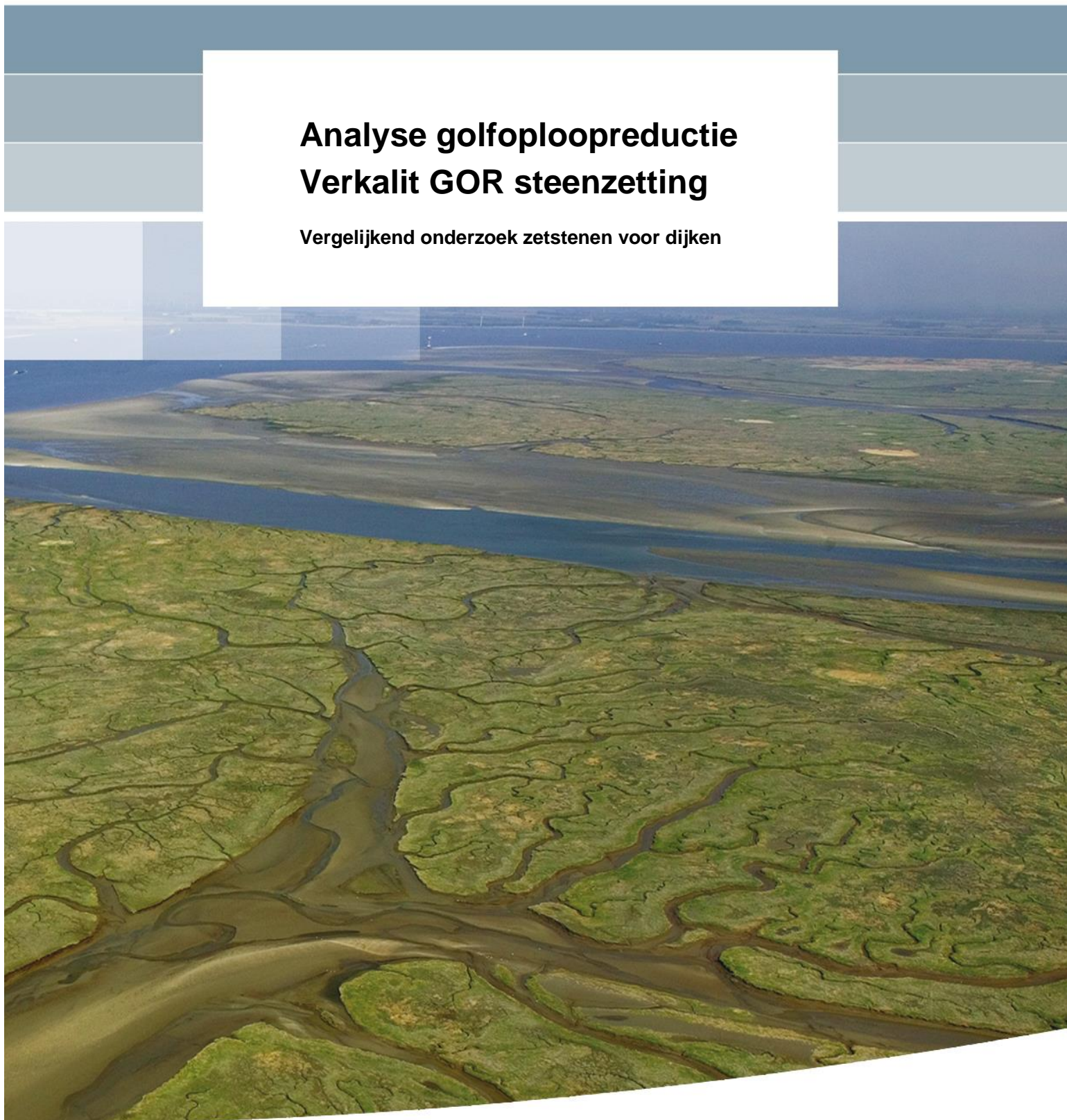


**Analyse golfoploopreductie
Verkalit GOR steenzetting**

Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken



Analyse golfoploopreductie Verkalit GOR steenzetting

Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken

ir. P. van Steeg

1208618-004

Titel

Analyse golfloopreductie Verkalit GOR steenzetting

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat WVL / Berding beton GmbH	1208618-004	1208618-004-HYE-0012	27

Trefwoorden

Verkalit GOR, Deltagoot, invloedsfactor voor ruwheid, golfloop

Samenvatting

In het kader van het "Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken" onderzoeken Rijkswaterstaat, drie noordelijke waterschappen (in Project Overstijgende Verkenning van het Hoogwaterbeschermingsprogramma HWBP) en enkele marktpartijen of zetstenen slimmer ingezet kunnen worden bij dijkversterkingen. Het onderzoek richt zich op twee eigenschappen van zetstenen: de stabiliteit bij hoge golven en van enkele typen ook de golfloopremming. Deltares onderzoekt deze kenmerken met behulp van proeven in de Deltagoot. De zetstenen worden hiervoor op schaal getest.




Om de invloedsfactor voor ruwheid van Verkalit GOR te bepalen zijn grootschalige golfloopproeven uitgevoerd in de Deltagoot (Noordoostpolder) van Deltares. In dit rapport worden deze testen geanalyseerd. Daarnaast wordt een overzicht gegeven van zogenaamde referentietesten met relatief gladde taluds.

Op basis van de metingen is een invloedsfactor voor de ruwheid vastgesteld. Deze waarde is afhankelijk van de significante golfhoogte en het open volume van de hals van Verkalit GOR per eenheid van oppervlak.

Dit rapport is definitief in de zin dat het onderzoek is afgerond en het commentaar van Rijkswaterstaat is verwerkt. De resultaten kunnen echter nog niet in de praktijk gebruikt worden, omdat het nog moet worden beoordeeld door de Klankbordgroep Steenbekledingen en ENW.

Referenties

- RWS opdracht voor het project "Vergelijkend Onderzoek Zetsteen", zaak 31087167, 29.11.2013.
- BERDING BETON GmbH: overeenkomst, door Dhr. G.S. Berding toegestuurd op 18 februari 2014.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
v1	mrt. 2015	ir. P. van Steeg		ir. M. Klein Breteler		ir. W.M.K. Tilmans	
v2	sep. 2015	ir. P. van Steeg		ir. M. Klein Breteler		ir. K.J. Bos	
v3	okt. 2015	ir. P. van Steeg		ir. M. Klein Breteler		Dr. ir. M.R.A. van Gent	
v4	nov. 2015	ir. P. van Steeg		ir. M. Klein Breteler		Dr. ir. M.R.A. van Gent	

Status

definitief

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Kader	1
1.2	Opdracht	1
1.3	Onderliggende onderzoeken in de Deltagoot	1
2	Modelopstelling en proevenprogramma	3
2.1	Modelfaciliteit	3
2.2	Schaling	3
2.3	Metingen	3
	2.3.1 Golfhoogtemetingen	4
	2.3.2 Golfoploopmetingen	4
2.4	Beschrijving geteste Verkalit GOR	4
2.5	Overzicht modelproeven	4
3	Analyse	9
3.1	Inleiding	9
3.2	Aanpak	11
3.3	Stap 1: Aanpassing TAW formulering	11
	3.3.1 Bepaling invloed waterstand	13
3.4	Samenvatting en conclusie m.b.t. aanpassen TAW formulering	14
3.5	Stap 2: Vergelijking Verkalit GOR en aangepaste TAW formulering	15
	3.5.1 Beschouwing proeven met SWL = 3,1 m	15
	3.5.2 Beschouwing proeven met SWL = 4,7 m	16
	3.5.3 Beschouwing proeven met SWL = 5,4 m	17
3.6	Stap 3: Bepaling invloedsfactor voor Verkalit GOR	17
4	Discussie	19
4.1	Aanbeveling m.b.t. de te hanteren waarde van de invloedsfactor voor ruwheid van Verkalit GOR	19
4.2	Spreiding in resultaten	20
4.3	Toepassingsgebied van invloedsfactoren voor ruwheid	21
	4.3.1 Grote waarden van de parameter $\gamma_b \xi_{m-1,0}$	21
	4.3.2 Voorwaarden m.b.t. het golfoverslagdebiet	21
4.4	Invloed van de waterdiepte	22
5	Conclusies en aanbevelingen	25
6	Literatuur	27

Bijlage(n)

A Tabellen	A-1
B Beschrijving modelopstellingen	B-1
B.1 Beschrijving modelopstelling Subset 7 (Basalton)	B-1
B.2 Beschrijving modelopstelling Subset 8 (Hydroblocks)	B-1
B.3 Beschrijving modelopstelling Subset 9 en Subset 11 (RONA [®] ton)	B-2
C Aanpassing van bestaande TAW formulering	C-1
C.1 Algemene procedure per test	C-1
C.2 Voorbeeld	C-2
D Beschouwing toepassingsgebied van invloedsfactor voor ruwheid	D-1
D.1 Inleiding	D-1
D.2 Bergend volume in de steenzetting	D-1
D.3 Overslagvolume per golf	D-2
D.4 Opzet model (voorbeeld)	D-2
D.5 Uitwerking voor verschillende cases	D-5
D.6 Analogie met ribbels (Capel, 2015)	D-6
D.7 Voorbeeld	D-7
E Bepaling volumes open ruimte in Verkalit GOR	E-1
E.1 Inleiding	E-1
E.2 Meetmethode	E-1
E.3 Resultaten	E-1

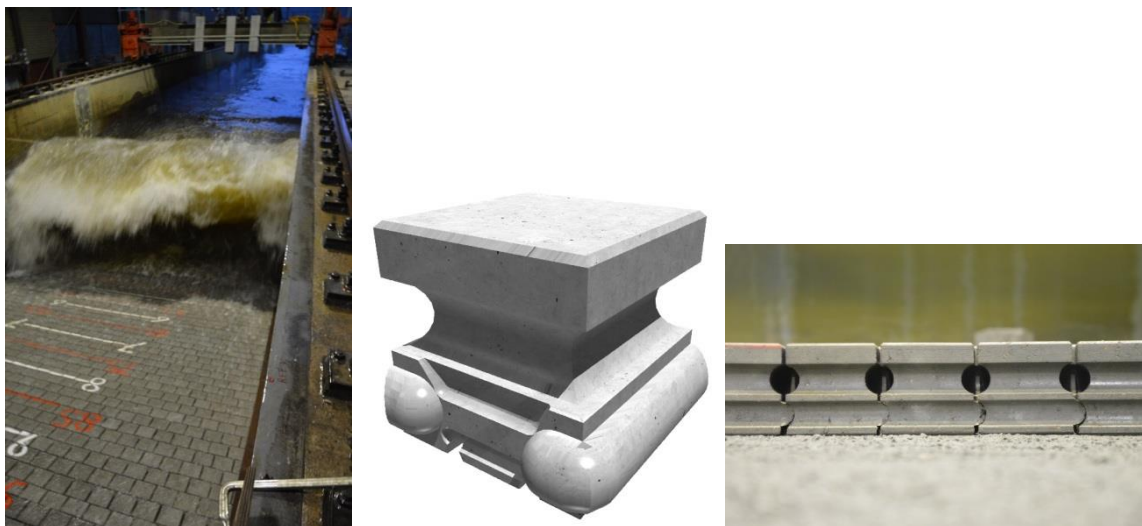
1 Inleiding

1.1 Kader

In het kader van het “Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken” onderzoeken Rijkswaterstaat, drie noordelijke waterschappen (in Project Overstijgende Verkenning van het Hoogwaterbeschermingsprogramma HWBP) en enkele marktpartijen of zetstenen slimmer ingezet kunnen worden bij dijkversterkingen. Er zijn verschillende soorten zetstenen op de markt, waarvan uit eerder onderzoek is gebleken dat ze voldoen aan alle (veiligheids)eisen. Doordat de zetstenen verschillen in vorm, hebben ze ieder specifieke kwaliteiten. Ze zijn bijvoorbeeld extra stabiel of remmen de golfloop goed. Er is echter nog te weinig kennis over hun unieke eigenschappen om de stenen optimaal te benutten en te vergelijken. Daarom is Deltares gevraagd dit te onderzoeken.

Het onderzoek richt zich op twee eigenschappen van zetstenen: de stabiliteit bij hoge golven en van enkele typen ook de golfloopremming. Deltares onderzoekt deze kenmerken met behulp van proeven in de Deltagoot. De zetstenen worden hiervoor op schaal getest.

Verkalit GOR is een nieuw type steenzetting dat op een filterlaag kan worden toegepast om dijken en oevers te beschermen tegen golfaanval en stromingsbelasting. Dit rapport beschrijft de reducerende werking met betrekking tot golfloop van zetstenen van het Verkalit GOR. De stabiliteit van Verkalit GOR is beschreven in Kaste (2014). Figuur 1.1 geeft een indruk van de vorm van Verkalit GOR en het uiterlijk op een dijk.



Figuur 1.1 Indruk van Verkalit GOR

1.2 Opdracht

Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving en BERDING BETON GmbH hebben Deltares verzocht onderzoek te doen naar de stabiliteit en golfloopreductie. Deze opdracht is vastgelegd in een overeenkomst tussen Rijkswaterstaat en Deltares (29 november 2013 met kenmerk RWS-2013-59441, zaaknummer 31087167) en een overeenkomst tussen BERDING BETON GmbH en Deltares (18 februari 2014).

1.3 Onderliggende onderzoeken in de Deltagoot

Als basis voor het voorliggende rapport is gebruik gemaakt van data welke is verkregen met behulp van fysiek model onderzoek dat is uitgevoerd in de Deltagoot (Marknesse) van

Deltares. Dit onderzoek is uitgevoerd in 2014. In dit onderzoek was zowel de stabiliteit als de golfoploop onderwerp van het onderzoek. Het onderzoek is in twee delen gerapporteerd; het aspect stabiliteit is gerapporteerd door Kaste (2015b), het aspect oploop is onderdeel van de voorliggende rapportage.

Daarnaast zijn er nog een aantal referentieproeven uitgevoerd met ander type zetstenen. Ook deze oploopmetingen worden in dit rapport beschreven. De referentieproeven zijn uitgevoerd om de TAW formulering (2002a) met betrekking tot een glad talud aan te scherpen, zodat het dienst kan doen als referentie voor de oploopmetingen met Verkalit GOR. Dit is in meer detail beschreven in Paragraaf 3.3.

2 Modelopstelling en proevenprogramma

2.1 Modelfaciliteit

Alle in dit rapport beschreven proeven zijn uitgevoerd in de Deltagoot (Noordoostpolder) van Deltares. De Deltagoot in de Noordoostpolder heeft een lengte van 230 m, een breedte van 5 m en een diepte van 7 m. De goot is voorzien van een golfschot waarmee zowel regelmatige als onregelmatige golven kunnen worden opgewekt. Tevens is het golfschot voorzien van een systeem dat gereflecteerde golven compenseert zodat deze niet opnieuw bij het golfschot in de richting van de constructie reflecteren.

Afhankelijk van de waterdiepte en golfperiode kan het golfschot onregelmatige golven opwekken tot ongeveer $H_s = 1,6$ m. Met deze golfhoogte is het mogelijk de maximale golfcondities op beschutte locaties in estuaria en binnenwateren op volle schaal te reproduceren. Op veel plaatsen langs de Nederlandse kust zijn de maatgevende golven echter tot wel tweemaal zo hoog. Daarom is het onderhavige onderzoek uitgevoerd op schaal. Gekozen is voor een geometrische schaal van 1:2. Bij deze schaling is de maximale significante golfhoogte die kan worden geproduceerd op prototype schaal gelijk aan circa $H_s = 3,2$ m.

2.2 Schaling

Over het algemeen wordt voor het schalen van waterbouwkundige constructies de zogenaamde Froude schaling toegepast. Deze schaling geldt voor processen waarin traagheid en zwaartekracht een dominante rol spelen. Dit is tevens het geval in dit model. De schaling schrijft voor dat het Froude getal hetzelfde is in het model en in de werkelijkheid. Het Froude getal wordt als volgt berekend:

$$Fr^2 = \frac{u^2}{gL} \quad (2.1)$$

Met:

u	=	snellheid	(m/s)
g	=	versnelling als gevolg van de zwaartekracht	(m/s ²)
L	=	lengte	(m)

In deze paragraaf wordt de schaling verder uitgewerkt voor het geval dat de lengteschaal ($n_L = L_{\text{prototype}} / L_{\text{model}}$) in dit model gelijk is aan 2. Uit de bovenstaande schaalregel zijn dan de volgende verbanden te leggen:

- Tijdschaal : $n_t = \sqrt{n_L}$ in dit geval dus $\sqrt{2} \approx 1,41$
- Golfhoogte : $n_H = n_L$ in dit geval dus 2

De Froude schaling is gebruikt om de hydraulische randvoorwaarden te bepalen.

2.3 Metingen

Gedurende het project zijn een aantal metingen uitgevoerd waarvan de volgende metingen relevant zijn voor de golfploophoogte:

- Golfhoogtemetingen
- Golfoploopmetingen

Bovengenoemde metingen worden in onderstaande paragrafen toegelicht.

2.3.1 Golfhoogtemetingen

De golven zijn gemeten met drie golfhoogtemeters. Deze golfhoogtemeters (weerstandstype) bestaan uit twee parallel aan elkaar, verticaal gespannen draden, waarvan de onderlinge weerstand verandert met de oppervlakte-uitwijking van de waterspiegel. De golfhoogtemeters hingen op respectievelijk 80 m, 85 m en 87 m van het golfschot.

Door het toepassen van drie golfhoogtemeters op bepaalde afstanden van elkaar kunnen de inkomende en de door de constructie gereflecteerde golven worden bepaald met de methode van Mansard en Funke (1980). Dit gebeurt met het standaard Deltares software pakket voor golfanalyse: AUKE-PC. Deze uitwerking geeft vervolgens aan welke golfcondities tijdens de proef zijn bereikt. De overschrijdingskrommen van de inkomende golven zijn bepaald door de gemiddelde waarden van de totale overschrijdingskromme per golfhoogtemeter te nemen en deze te corrigeren met de gemeten reflectiecoëfficiënt C_r .

$$H_i = \frac{H_t}{\sqrt{1 + C_r^2}} \quad (2.2)$$

Waarbij

H_i	=	inkomende golfhoogte (m)
H_t	=	totale golfhoogte (m)
C_r	=	reflectiecoëfficiënt (-)

2.3.2 Golfoploopmetingen

Tijdens alle testen zijn er golfoploopmetingen uitgevoerd. De oploophoogten voor iedere golfoploop is visueel waargenomen en vastgelegd op video. Hiertoe zijn horizontale strepen op het talud aangebracht. Het resultaat is een overschrijdingscurve voor de golfoploop (z_u). Op basis van deze overschrijdingscurve kan de 2% waarde ($z_{2\%}$) worden bepaald; dit is de oploophoogte ten opzichte van de stilwaterlijn welke door 2% van de golven wordt overschreden. Hierbij wordt opgemerkt dat het overschrijdingspercentage is gedefinieerd als het aantal oplopen gedeeld door het aantal inkomende golven (en niet het aantal golfoplopen). Het is gebruikelijk om de oploophoogte dimensieloos te maken met de significante golfhoogte; dit is de dimensieloze golfoploophoogte $z_{2\%}/H_{m0}$.

2.4 Beschrijving geteste Verkalit GOR

Er is 1 type Verkalit GOR getest. Dit blok had een hoogte van 0,15 m. Tekeningen en verdere details zijn gegeven door Kaste (2015b). Tevens zijn er metingen uitgevoerd om het percentage open ruimte te bepalen. Hoe dit is gedaan en de resultaten hiervan zijn weergegeven in Bijlage E.

2.5 Overzicht modelproeven

In de Deltagoot (Noordoostpolder) van Deltares is een dijk met een 1:3 buitentalud opgebouwd. Op deze dijk zijn verschillende typen steenzettingen aangebracht. Deze steenzettingen zijn op een laagje steenslag aangebracht, zoals dat ook op een werkelijke dijk gebouwd zou worden. De afmetingen van de dijk en de dijkbekleding zijn echter aangepast

aangezien de Deltagoot een beperkte capaciteit heeft met betrekking tot de golfcondities. Daarom is een schaalmodel gebouwd waarbij alle afmetingen zijn gehalveerd. Dit betekent dat de afmetingen van de steenzettingen en de golfhoogte en golflengte zijn gehalveerd. De taludhelling is gelijk aan de taludhelling in werkelijkheid.

In dit rapport worden twee verschillende datasets onderscheiden:

- Proeven met Verkalit GOR
 - o Subset 10, Subset 12, Subset 14, Subset 15
- Referentieproeven (relatief glad talud)
 - o Subset 7, Subset 8, Subset 9 en Subset 11

De referentieproeven zijn uitgevoerd zodat er een zo goed mogelijke inschatting gemaakt kan worden van een glad talud. Dit is nodig om de golfremmende werking van Verkalit GOR te bepalen. Hoe dit precies is gedaan, is verder uitgewerkt in Hoofdstuk 3.

De verschillende subsets welke in dit rapport worden beschouwd zijn samengevat in Tabel 2.1. In Bijlage B zijn de verschillende referentie subsets gedetailleerd beschreven. De proeven met Verkalit GOR en Verkalit zijn in detail beschreven in Kaste (2014a,b).

Tabel 2.1 Overzicht uitgevoerde proeven met Verkalit GOR en referentieproeven

Naam	jaar	Type blok	Hoogte blok D (m)	Positie op talud Z (m)*	spectrum	Waterstand h (m)
<i>Verkalit GOR</i>						
Subset 10	2014	Verkalit GOR	0,15	2,0 - 8,3	JONSWAP	4,70
Subset 12	2014	Verkalit GOR	0,15	5,5 – 8,3	JONSWAP	5,40
Subset 14	2014	Verkalit GOR	0,15	5,5 – 8,3	JONSWAP	4,70
Subset 15	2014	Verkalit GOR	0,15	2,0 – 8,3	JONSWAP	3,10
<i>Referentietaluds</i>						
Subset 7	2014	Basalton	0,15	2,0 – 5,5	Pierson M.	4,70
Subset 8	2014	Hydroblock	0,17	2,0 – 5,5	JONSWAP	4,70
Subset 9	2014	RONA [®] ton	0,15	2,0 – 5,5	JONSWAP	3,10
Subset 11	2014	RONA [®] ton	0,15	2,0 – 5,5	JONSWAP	4,70
Subset 13	2014	Verkalit	0,15	2,0 – 5,5	JONSWAP	4,70

Het uitgevoerde proevenprogramma en de gemeten golfoploophoogte zijn weergegeven in Tabel 2.2 (Verkalit GOR) en Tabel 2.3 (referentieproeven).

Tabel 2.2 Proevenprogramma en resultaten Subset 10, Subset 12, Subset 14 en Subset 15 (Testen met Verkalit GOR, gemeten waarden)

Sub-set	Proef	type block	Waterstand h (m)	Spec-trum	dikte blok D (m)	Golf-hoogte H _{m0} (m)	Golfperiode		Golf-steilheid s _{m-1.0} (-)	breker parameter ξ _{m-1.0} (-)	golfploophoogte	
							T _p (s)	T _{m-1.0} (s)			z _{2%} (m)	z _{2%} /H _{m0} (-)
10	V25	Verkalit GOR	4.7	JONSWAP	0.15	0.86	5.16	4.76	0.024	2.12	2.75	3.21
	V26		4.7			0.99	5.63	5.28	0.023	2.18	3.20	3.22
	V27		4.7			1.14	6.09	5.74	0.022	2.21	3.45	3.02
	V28		4.7			1.32	6.64	6.13	0.023	2.20	*	*
	V29		4.7			1.56	7.02	6.38	0.024	2.11	*	*
	V30		4.7			0.84	3.69	3.47	0.044	1.57	1.95	2.34
	V31		4.7			0.85	3.69	3.46	0.046	1.54	2.30	2.69
	V32		4.7			1.01	3.98	3.77	0.045	1.55	2.60	2.59
	V33		4.7			1.15	4.28	4.09	0.044	1.57	3.10	2.69
	V34		4.7			1.36	4.65	4.75	0.039	1.68	3.50	2.58
	V35		4.7			1.45	4.95	4.84	0.040	1.66	*	*
12	11	Verkalit (glad) / Verkalit GOR	5.4	JONSWAP	0.15	0.58	6.19	5.70	0.011	3.09	1.9	3.29
	12		5.4			0.60	3.53	3.31	0.035	1.76	1.75	2.90
	13		5.4			0.60	2.79	2.71	0.052	1.45	1.35	2.26
	14		5.4			0.88	7.37	6.73	0.012	2.96	2.75	3.13
	15		5.4			0.89	4.20	3.94	0.037	1.73	2.6	2.94
	16		5.4			0.88	3.28	3.19	0.056	1.40	2.15	2.44
	17		5.4			1.05	5.57	5.25	0.025	2.11	*	*
	18		5.4			1.01	4.04	3.78	0.045	1.55	2.75	2.73
14	V19	Verkalit / Verkalit GOR	4.7	JS	0.15	0.82	5.22	4.79	0.023	2.18	2.60	3.16
	V20		4.7			1.18	6.14	5.76	0.023	2.19	3.80	3.23
	V21		4.7			1.35	6.62	6.13	0.023	2.18	*	*
	V22		4.7			1.52	6.98	6.31	0.024	2.11	*	*
15	V25_LW	Verkalit GOR	3.1	JS	0.15	0.87	5.20	4.91	0.023	2.17	2.55	2.93
	V26_LW		3.1			0.98	5.65	5.46	0.021	2.27	2.80	2.86
	V27_LW		3.1			1.11	6.06	5.77	0.021	2.26	3.20	2.90

Tabel 2.3 Proevenprogramma en resultaten Subset 7, Subset 8, Subset 9 en Subset 11 (testen met referentieproeven, gemeten waarden)

Sub-set	Proef	type block	Water-stand h (m)	Spec-trum	dikte blok D (m)	Golf-hoogte H _{m0} (m)	Golfperiode		Golf-steilheid s _{m-1.0} (-)	breker parameter ξ _{m-1.0} (-)	golfploophoogte	
							T _p (s)	T _{m-1.0} (s)			z _{2%} (m)	z _{2%} /H _{m0} (-)
7	P2	Basalton + glad	4.70	Pierson Mosk.	0.15	0.89	5.29	4.78	0.025	2.09	2.95	3.31
	P3		4.70			1.12	6.00	5.28	0.026	2.06	3.65	3.26
	P5		4.70			0.71	3.61	3.16	0.046	1.55	1.95	2.75
	P6		4.70			0.98	4.01	3.83	0.043	1.59	2.90	2.96
8	H02	Hydroblock /glad	4.70	JONSWAP	0.17	0.91	5.48	4.95	0.024	2.14	2.75	3.02
	H03		4.70			1.05	5.79	5.43	0.023	2.18	3.15	3.00
	H04		4.70			1.21	6.09	5.71	0.024	2.14	*	*
	H05		4.70			1.34	6.68	6.10	0.023	2.17	*	*
	H06		4.70			1.51	6.97	6.35	0.024	2.13	*	*
	H08		4.70			1.01	3.96	3.78	0.045	1.55	2.63	2.60
	H09		4.70			1.16	4.29	4.10	0.044	1.57	3.05	2.63
	H10		4.70			1.29	4.80	4.36	0.044	1.58	3.50	2.71
9	T116	RONA® - ton	3.10	JONSW.	0.15	0.67	3.37	3.16	0.043	1.60	1.63	2.45
	T116a		3.10			0.73	3.37	3.19	0.046	1.54	1.74	2.39
	T117		3.10			0.79	4.50	4.28	0.028	1.98	2.16	2.72
11	P01	RONA® ton + glad	4.55	JONSWAP	0.15	0.60	4.41	4.01	0.024	2.14	1.90	3.17
	P02		4.70			0.69	4.71	4.36	0.023	2.16	2.25	3.25
	P03		4.70			0.83	5.23	4.82	0.023	2.19	2.70	3.27
	P04		4.70			1.00	5.64	5.30	0.023	2.19	3.20	3.21
	P05		4.70			1.20	6.21	5.74	0.023	2.16	3.90	3.25
	P06		4.70			1.40	6.72	6.24	0.023	2.17	4.60	3.28
	P07+P07a		4.70			1.50	6.96	6.37	0.024	2.14	4.90	3.26
	P08		4.70			0.95	3.99	3.76	0.043	1.59	2.70	2.83
	P09		4.70			1.19	4.39	4.20	0.043	1.58	3.30	2.76
	P10		4.70			1.39	4.78	4.54	0.043	1.59	3.80	2.73
	P11		4.55			0.62	3.29	3.07	0.042	1.61	1.70	2.74
	P12		4.55			0.78	3.56	3.39	0.043	1.58	2.10	2.70
	P13		4.70			1.07	4.17	4.02	0.042	1.60	3.00	2.81

3 Analyse

3.1 Inleiding

Teneinde de invloedsfactor voor ruwheid (γ_f) ten aanzien van de golfploop te bepalen is er een vergelijking nodig tussen (1) een talud bestaande uit Verkalit GOR en (2) een glad talud.

Indien er geen directe vergelijking met een meting op een glad talud mogelijk is, wordt er doorgaans gebruik gemaakt van de golfploopformule uit TAW (2002a):

$$\frac{z_{u2\%}}{H_{m0}} = \min \left[1.65 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \xi_{m-1,0}; \gamma_f \cdot \gamma_\beta \left(4.0 - \frac{1.5}{\sqrt{\xi_{m-1,0}}} \right) \right] \quad (3.1)$$

Met:

$z_{u2\%}$	=	golfploopniveau, verticaal gemeten ten opzichte van de stilwaterlijn, waarbij het aantal oplopen dat dit niveau overschrijdt 2% is van het aantal inkomende golven (m)
H_{m0}	=	significante golfhoogte gebaseerd op het golfspectrum (m)
γ_b	=	invloedsfactor voor een berm (-)
γ_f	=	invloedsfactor voor de ruwheid van het talud (-)
γ_β	=	invloedsfactor voor scheve golfaanval (-)
$\xi_{m-1,0}$	=	brekerparameter (-) gebaseerd op de spectrale periodemaat $T_{m-1,0}$

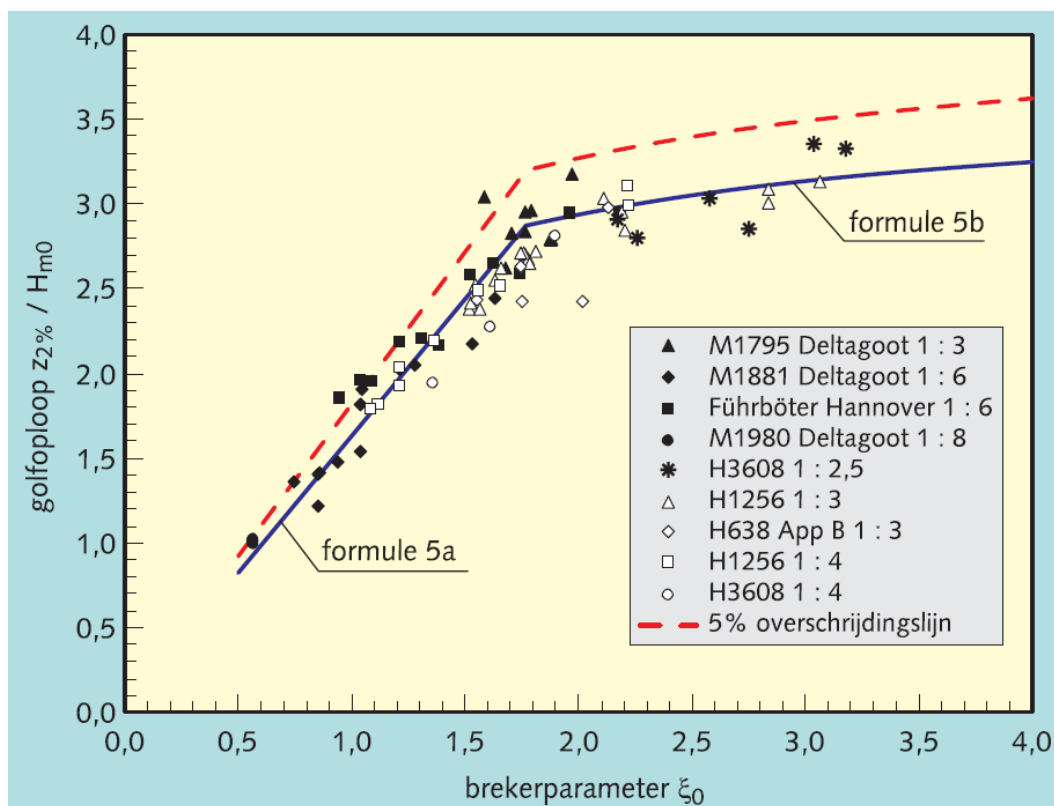
In dit onderzoek is er geen sprake van bermen of scheve golfaanval zodat de parameters γ_b en γ_β gelijk zijn aan 1,0. Vergelijking (3.1) kan worden vereenvoudigd tot:

$$\frac{z_{u2\%}}{H_{m0}} = \min \left[1.65 \cdot \gamma_f \cdot \xi_{m-1,0}; \gamma_f \cdot \left(4.0 - \frac{1.5}{\sqrt{\xi_{m-1,0}}} \right) \right] \quad (3.2)$$

Bovenstaande formule sluit aan op het hart van de puntenwolk van de metingen waar deze formule op gebaseerd is. Het is niet de veilige formule die gebruikt wordt in het ontwerp. In TAW (2002a) wordt aangegeven dat de gegeven formule statistisch gezien geen perfecte verwachtingswaarde betreft. Er wordt daarom in dit rapport, conform de definitie in TAW (2002), gesproken over een 'gemiddelde'. Rondom het gemiddelde ligt een spreiding, welke wordt beschreven met een variatiecoëfficiënt (standaardafwijking, gedeeld door het gemiddelde) ten opzicht van het gemiddelde en bedraagt: $V = \sigma / \mu = 0,07$ waarbij:

V	=	variatiecoëfficiënt
σ	=	standaardafwijking bij normale verdeling
μ	=	gemiddelde bij normale verdeling

De formule uit TAW (2002a) is gebaseerd op verschillende onderzoeken welke zijn uitgevoerd sinds de jaren 80 van vorige eeuw. Deze onderzoeken waren zowel grootschalig als kleinschalig. Een overzicht van de onderzoeksresultaten met een glad talud is weergegeven in Figuur 3.1.



Figuur 3.1 Overzicht golfploop voor een glad recht talud op relatief diep water met meetpunten. Bron: TAW (2002)

De in Figuur 3.1 gegeven Formule 5a en Formule 5b komen overeen met de hierboven gegeven formule. In de grafiek zijn verschillende datasets te zien. De dataset welke het meest overeen lijkt te komen met de huidige testen zijn de proeven 'M1795 Deltagoot 1:3'. Deze proeven zijn in de grafiek aangegeven met de gesloten zwarte driehoeken. Dit zijn proeven op grote schaal en met dezelfde taludhelling als de testen in het onderhavige onderzoek. De overige testen hebben of een significant andere taludhelling of zijn op basis van kleinschalig modelonderzoek. Er valt duidelijk te zien dat de testen 'M1795 Deltagoot 1:3' een hoger oplooptniveau hebben dan de oplooptniveaus conform de formule (soms zelfs hoger dan de 5% overschrijdingslijn).

De invloedsfactor voor ruwheid van Verkaliit GOR wordt bepaald door de oploopeigenschappen van een talud bestaande uit Verkaliit GOR te vergelijken met de oploopeigenschappen van een glad talud. Zoals hierboven is aangetoond, is het echter, gezien de relatief grote spreiding van eerdere metingen met een glad talud, lastig aan te geven wat de golfploop eigenschappen van een glad talud zijn.

Om deze reden is er voor gekozen om aanvullende golfploopmetingen uit te voeren met relatief gladde taluds (RONA[®]ton, Hydroblock, Basalton en Verkaliit). Met behulp van deze aanvullende data is de TAW (2002) formulering waar nodig aangepast. Deze aanpassing heeft niet tot doel om de TAW formulering te verbeteren, maar is slechts bedoeld om een goede referentie te verkrijgen ten opzichte waarvan de huidige proeven met Verkaliit GOR kunnen worden geanalyseerd.

3.2 Aanpak

De aanpak voor het bepalen van de invloedsfactor voor ruwheid van Verkalit GOR is als volgt:

- Stap 1: De bestaande TAW formulering wordt aangepast op basis van de metingen met het relatief gladde talud. Hierin wordt de (relatief kleine) ruwheid van de referentietaluds verdisconteerd.
- Stap 2: De meting van de Verkalit GOR wordt vergeleken met de aangepaste TAW formulering.
- Stap 3: De invloedsfactor voor ruwheid wordt bepaald.

De drie bovenstaande stappen worden in de volgende drie paragrafen uitgewerkt.

3.3 Stap 1: Aanpassing TAW formulering

De TAW formulering wordt aangepast op basis van de referentiemetingen. Hoe dit precies is gedaan, is beschreven in Bijlage C. Hierbij wordt een vergelijking gemaakt met de referentiemetingen waarbij wordt aangenomen dat de aangebrachte steenzetting van het referentietalud een ruwheidssfactor heeft met een waarde van $\gamma_f = 0,9$. Deze waarde is voor de gebruikte bekledingen gekozen conform TAW (2002a). Vervolgens is met behulp van PC Overslag, welke gebaseerd is op TAW (2002a), de invloedsfactor voor ruwheid van het gehele talud bepaald (wat veelal een samenstelling was van een steenzetting en een talud van glad beton).

De aanpassing resulteert in een correctiefactor C waarmee Vergelijking (3.2) als volgt dient te worden aangepast:

$$\frac{z_{u2\%}}{H_{m0}} = C \cdot \min \left[1.65 \cdot \gamma_f \cdot \xi_{m-1.0}; \gamma_f \cdot \left(4.0 - \frac{1.5}{\sqrt{\xi_{m-1.0}}} \right) \right] \quad (3.3)$$

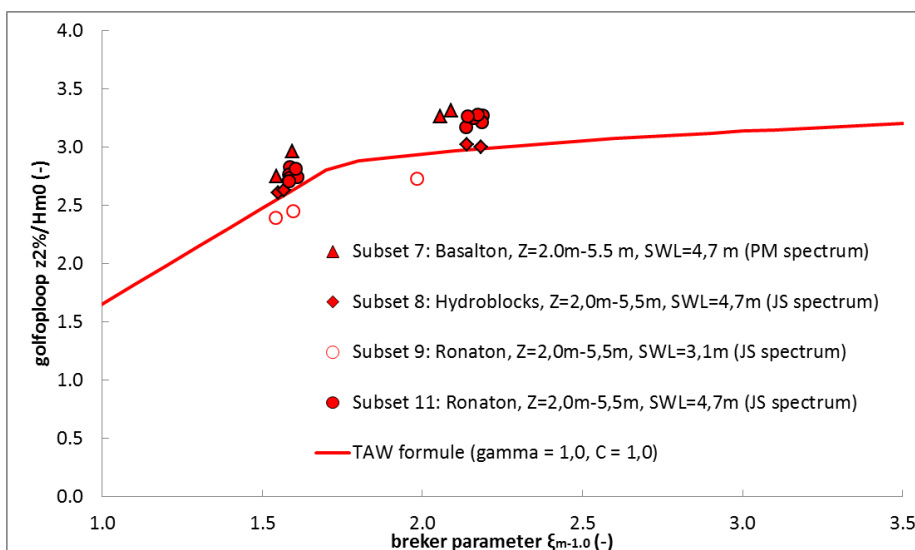
De waarden van de correctiefactor C zijn per proef bepaald, conform de procedure uit Bijlage C, en zijn weergegeven in Tabel 3.1.

Op basis van Tabel 3.1 en Figuur 3.2 vallen de volgende conclusies te trekken:

- De correctiefactoren hebben een waarde welke varieert tussen 1,03 en 1,21. In alle gevallen zou het gemiddelde volgens de TAW dus een onderschatting zijn van het werkelijke testresultaat (aannemende dat de gebruikte invloedsfactoren voor ruwheid ($\gamma = 0,9$) correct zijn).
- De verschillen tussen de correctiefactoren binnen een subset zijn relatief klein. Om de analyse enigszins te vereenvoudigen worden de gemiddelde waarden per subset aangehouden. Deze zijn weergegeven in Tabel 3.2.
- De verschillen tussen de gemiddelde correctiefactoren van de verschillende subsets zijn wat groter. Het lijkt niet waarschijnlijk dat dit een gevolg is van het verschil in de ruwheid van de verschillende steenzettingen, omdat de geometrie van de oppervlakteruwheid van deze steenzettingen zeer vergelijkbaar is.
- De correctiefactor is lager bij een lagere waterstand (Subset 9 waarbij de waterstand gelijk is aan 3,1 m in plaats van 4,7 m).

Tabel 3.1 Correctiefactoren per referentietest (zie ook Figuur 3.2)

Subset	Proef	bekleding	SWL	C
7	P2	Basalton/ glad	4.70	1.20
	P3		4.70	1.18
	P5		4.70	1.19
	P6		4.70	1.21
gemiddeld				1.20
8	H02	Hydroblock /glad	4.70	1.09
	H03		4.70	1.07
	H08		4.70	1.10
	H09		4.70	1.09
	H10		4.70	1.11
gemiddeld				1.09
9	T116	RONA®ton	3.1	1.03
	T116a		3.1	1.05
	T117		3.1	1.03
gemiddeld				1.04
11	P01	RONA® ton + glad	4.55	1.17
	P02		4.7	1.18
	P03		4.7	1.18
	P04		4.7	1.15
	P05		4.7	1.16
	P06		4.7	1.16
	P07+P07a		4.7	1.16
	P08		4.7	1.17
	P09		4.7	1.13
	P10		4.7	1.11
	P11		4.55	1.14
	P12		4.55	1.13
	P13		4.7	1.15
gemiddeld				1.15



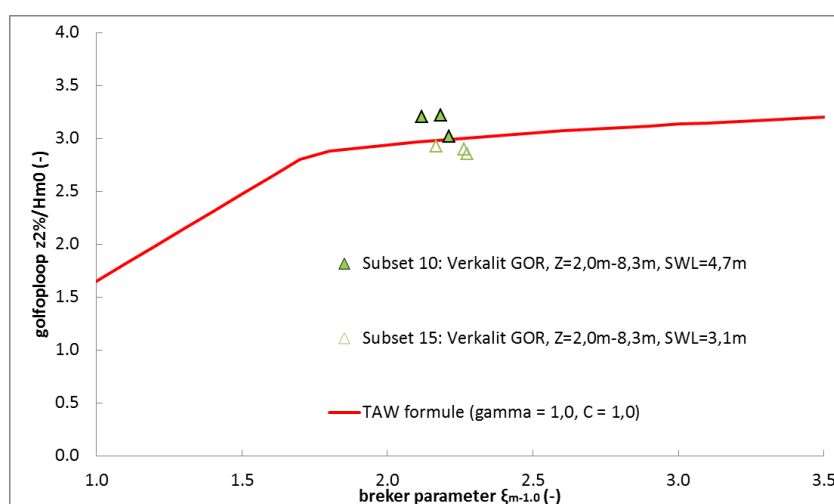
Figuur 3.2 Gemeten dimensieloze golffloop in vergelijking tot TAW-formule (De positie van de bekleding is aangegeven met de Z- waarde: dit is de verticale afstand vanaf de bodem van de goot).

Tabel 3.2 Gemiddelde correctiefactoren per subset (SWL = waterdiepte (m))

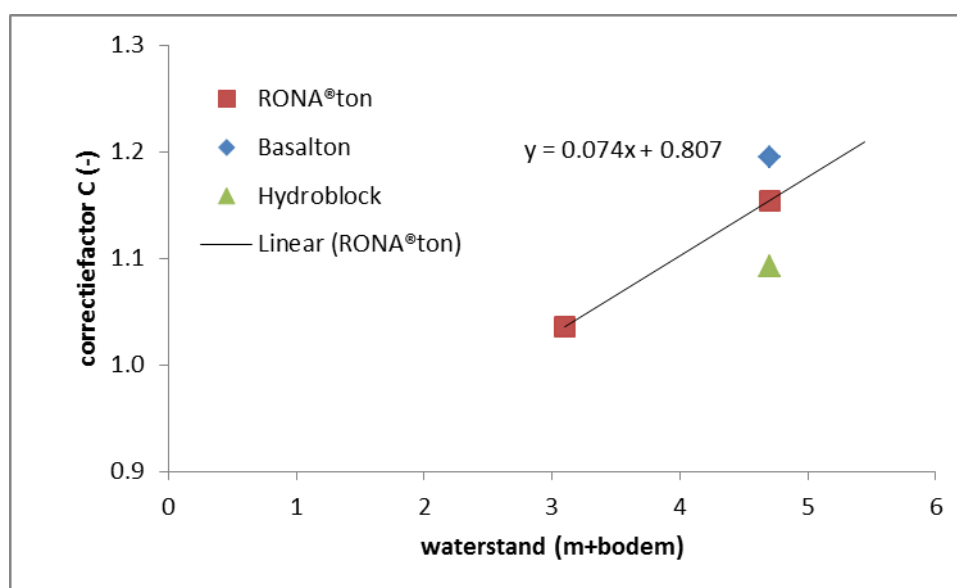
Subset	Bekleding	SWL	C
7	Basalton / glad	4.7	1.20
8	Hydroblock / glad	4.7	1.09
9	RONA [®] ton	3.1	1.04
11	RONA [®] ton / glad	4.7	1.15

3.3.1 Bepaling invloed waterstand

In de vorige paragraaf is een overzicht gegeven van de correctiefactoren. Het valt daarbij op dat de correctiefactor lager is bij een lagere waterstand (vergelijk Subset 9 en Subset 11). Om deze reden is een aanvullende proevenserie uitgevoerd met Verkalit GOR (subset 15). Met deze testserie zijn drie testen herhaald met een lagere waterstand. De resultaten van deze proef zijn gevisualiseerd in Figuur 3.3.



Figuur 3.3 Resultaten proeven met Verkalit GOR waarbij 2 verschillende waterstanden zijn gehanteerd (De positie van de bekleding is aangegeven met de Z- waarde: dit is de verticale afstand vanaf de bodem van de goot).



Figuur 3.4 Correctiefactor C als functie van de waterstand. De vier gegeven punten zijn gebaseerd op Tabel 3.2.

Uit Figuur 3.3 valt te concluderen dat de waterstand van invloed is op de golfploophoogte. Dit vertaalt zich in een andere waarde van de correctiefactor C . Nu kan, op basis van de waarden zoals gegeven in Tabel 3.2, een inschatting worden gemaakt van de correctiefactor als functie van de waterstand. Dit is grafisch weergegeven in Figuur 3.4.

Op basis van Figuur 3.4 is een lineaire vergelijking opgesteld waarmee de correctiefactor als functie van de waterstand kan worden bepaald. De vergelijking is alleen gebaseerd op de data van Subset 9 en Subset 11 aangezien dit dezelfde toplaag (RONA[®]ton) betrof. Hierbij wordt opgemerkt dat dit nogal grofstoffelijk is gebeurd. Om de invloed van de waterdiepte op golfploop te bepalen is aanvullend onderzoek nodig. Er wordt echter ingeschat dat de in dit rapport gehanteerde methode afdoende is om de huidige data goed te kunnen analyseren. De correctiefactor kan worden bepaald met de volgende vergelijking:

$$C = 0.074 \cdot d + 0.81 \quad (3.4)$$

Waarbij d de waterdiepte is. Dezelfde vergelijking wordt verkregen wanneer alle data zoals weergegeven in Figuur 3.4 wordt beschouwd. De gradiënt van de gegeven lijn in Figuur 3.4 is overigens vrijwel gelijk aan de gradiënt van de lijn behorende bij Verkalit GOR. Deze twee gegevens geven vertrouwen in de gehanteerde methode. Op basis van Vergelijking (3.4) worden de correctiefactoren gehanteerd welke zijn weergegeven in Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Correctiefactor C als functie van waterdiepte D (alleen toepasbaar voor de geteste situatie)

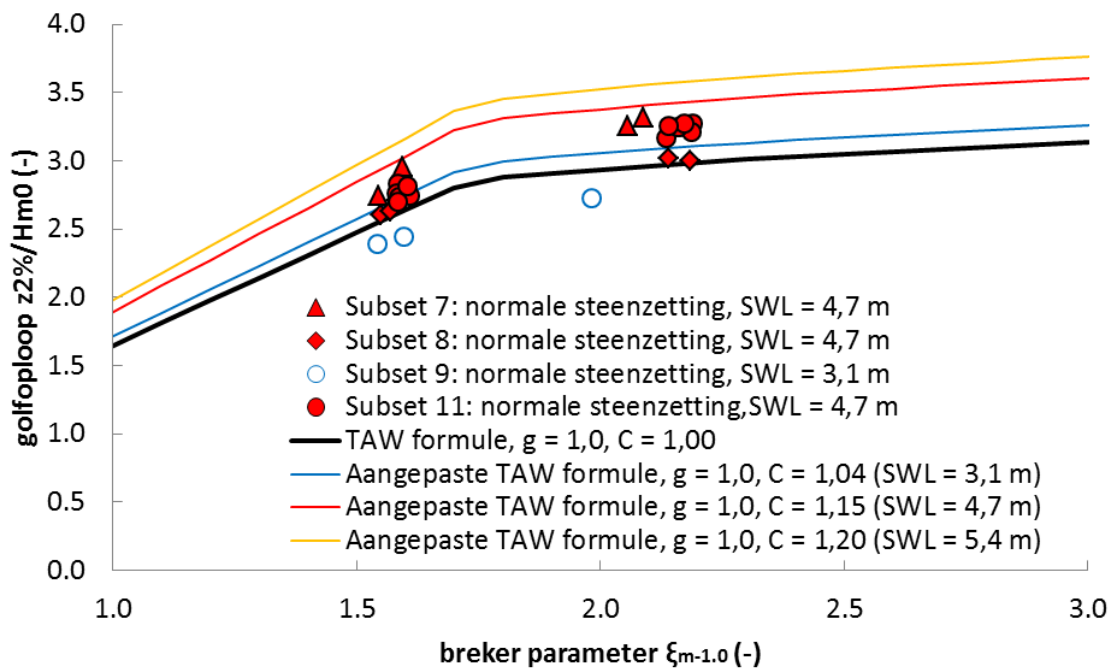
Waterdiepte d (m)	Correctiefactor C (-)
3,1	1,04
4,7	1,15
5,4	1,20

3.4 Samenvatting en conclusie m.b.t. aanpassen TAW formulering

Op basis van de testen met verschillende referentiesecties met een relatief glad talud is de TAW formule aangepast. Om de ruwheid van Verkalit GOR te bepalen dient de volgende formule te worden gebruikt als referentie:

$$\frac{z_{u2\%}}{H_{m0}} = C \cdot \min \left[1.65 \cdot \gamma_f \cdot \xi_{m-1,0}; \gamma_f \cdot \left(4.0 - \frac{1.5}{\sqrt{\xi_{m-1,0}}} \right) \right] \quad (3.5)$$

Waarbij C een correctiefactor is welke is gebaseerd op de referentiemetingen. Deze waarde dient te worden gebruikt omdat de oorspronkelijke formule niet een geheel correcte waarde geeft voor de gehanteerde condities. De waarde van C is afhankelijk van de waterstand en kan worden afgelezen uit Tabel 3.3. Een visualisatie van de aanpak is weergegeven in Figuur 3.5. In deze figuur hoort de blauwe lijn (aangepaste TAW formule, $\gamma_f = 1,0$) bij de blauwe cirkels (referentieproeven waarbij $0,9 < \gamma_f < 1,0$), dit betreft een waterstand van 3,1 m. De rode lijn (aangepaste TAW formule, $\gamma_f = 1,0$) behoort bij de rode cirkels (referentieproeven met $0,9 < \gamma_f < 1,0$), dit betreft een waterstand van 4,7 m. De oranje lijn betreft een waterstand van 5,4 m. Bij de laatstgenoemde waterstand zijn geen referentieproeven uitgevoerd, deze lijn is bepaald op basis van extrapolatie. De zwarte lijn is de oorspronkelijke TAW formule. De gekleurde lijnen representeren de voorgestelde aangepaste TAW formule, welke afhankelijke is van de waterstand. Hierbij is de invloedfactor voor ruwheid gelijk aan $\gamma_f = 1,0$.

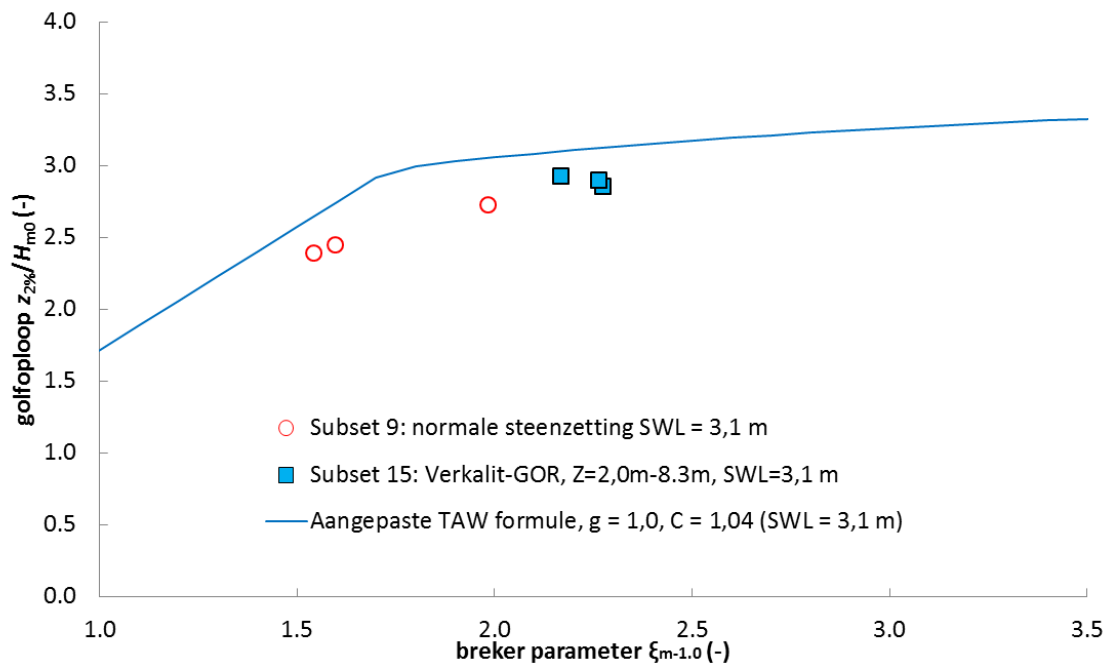


Figuur 3.5 Visualisatie aanpassing TAW formule. Opgemerkt wordt dat de referentieproeven een invloedsfactor voor ruwheid hebben welke tussen 0,9 en 1,0 ligt. De (gecorrigeerde) TAW lijnen hebben een invloedsfactor voor ruwheid van $g = \gamma_r = 1,0$. (De positie van de bekleding is aangegeven met de Z- waarde: dit is de verticale afstand vanaf de bodem van de goot).

3.5 Stap 2: Vergelijking Verkalit GOR en aangepaste TAW formulering

3.5.1 Beschouwing proeven met SWL = 3,1 m

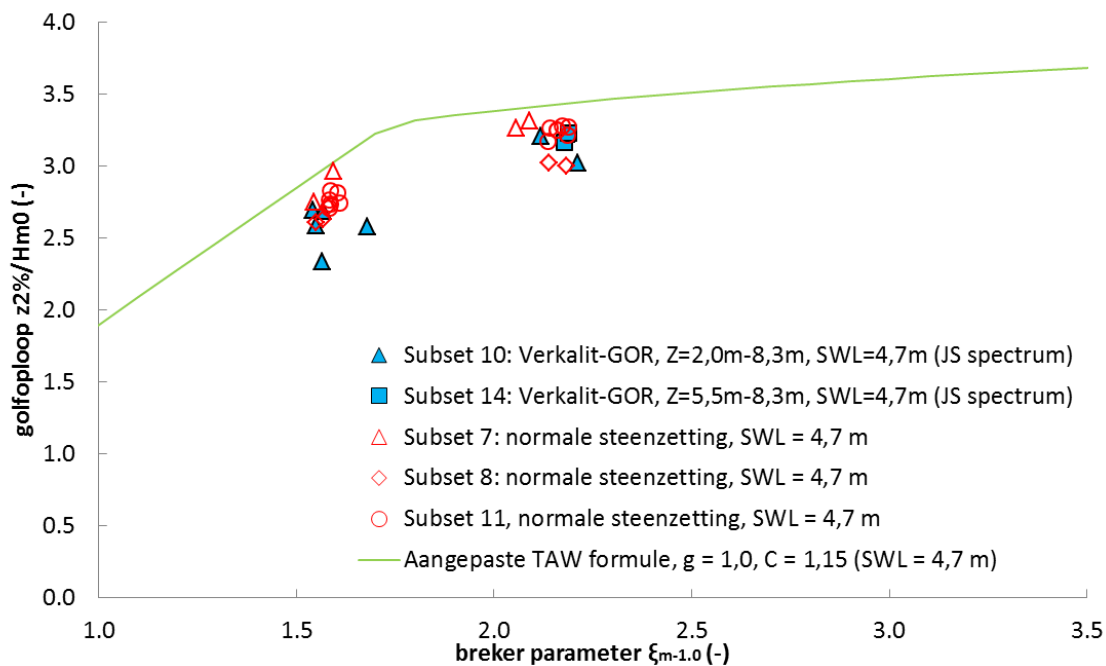
De resultaten van de proeven met Verkalit GOR, waarbij een waterstand van 3,1 m is toegepast, zijn grafisch weergegeven in Figuur 3.6. Ter vergelijking zijn de resultaten met een normale steenzetting (Subset 9) en de afgeleide aangepaste TAW formulering tevens weergegeven.



Figuur 3.6 Resultaten van proeven met SWL = 3,1 m (De positie van de bekleding is aangegeven met de Z-waarde: dit is de verticale afstand vanaf de bodem van de goot)

3.5.2 Beschouwing proeven met SWL = 4,7 m

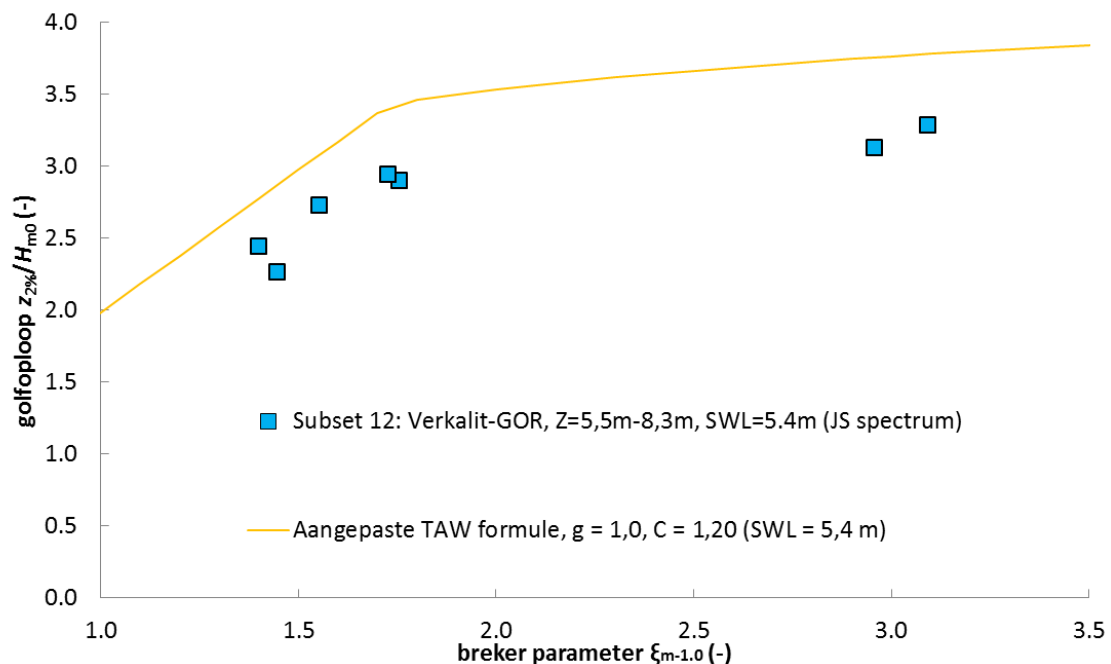
De resultaten van de proeven met Verkalit GOR waarbij een waterstand van 4,7 m is toegepast, zijn grafisch weergegeven in Figuur 3.7. Ter vergelijking zijn tevens de referentieproeven met de normale steenzettingen (Subset 7, Subset 8 en Subset 11) en de afgeleide aangepaste TAW formulering weergegeven.



Figuur 3.7 Resultaten van proeven met SWL = 4,7 m (De positie van de bekleding is aangegeven met de Z-waarde: dit is de verticale afstand vanaf de bodem van de goot).

3.5.3 Beschouwing proeven met SWL = 5,4 m

De resultaten van de proeven met Verkalit GOR, waarbij een waterstand van 5,4 m is toegepast, zijn grafisch weergegeven in Figuur 3.8. Ter vergelijking is de aangepaste TAW formulering tevens weergegeven.



Figuur 3.8 Resultaten van proeven met SWL = 5,4 m (De positie van de bekleding is aangegeven met de Z-waarde: dit is de verticale afstand vanaf de bodem van de goot).

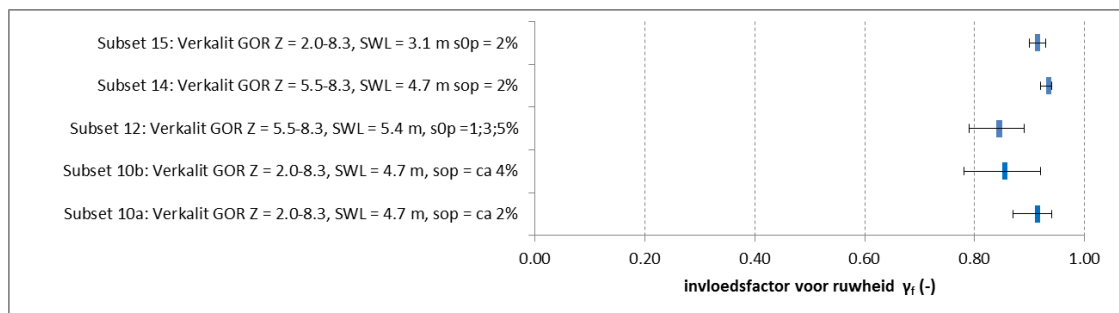
3.6 Stap 3: Bepaling invloedsfactor voor Verkalit GOR

Door de meetpunten te vergelijken met de aangepaste TAW formule is het mogelijk om de invloedsfactor voor ruwheid voor het gehele talud te bepalen. Er wordt dus niet rechtstreeks tussen twee proeven vergeleken (dit is overigens ook niet mogelijk aangezien de hydraulische condities altijd iets afwijken) maar er wordt een vergelijking gemaakt tussen de meting en de aangepaste TAW formule.

Er dient rekening gehouden te worden met de conclusie uit TAW (2002a) dat bij relatief hoge waarden van de brekerparameter $\xi_{m-1,0}$ de ruwheid van een taludbekleding minder effectief is. In TAW (2002a) is aangegeven dat de invloedsfactoren gelden voor $\gamma_b \xi_{m-1,0} < 1,8$. Vanaf $\gamma_b \xi_{m-1,0} = 1,8$ loopt de invloedsfactor lineair op tot 1 voor $\gamma_b \xi_{m-1,0} = 10$. In dit rapport worden dit de 'gecorrigeerde invloedsfactoren' genoemd.

Bij enkele van de uitgevoerde proeven is de parameter $\gamma_b \xi_{m-1,0}$ groter dan 1,8 (bijvoorbeeld bij proef 14, waar de brekerparameter gelijk is aan 2,96, zie Tabel 2.2). In deze gevallen zijn de bepaalde invloedsfactoren voor ruwheid dus de gecorrigeerde invloedsfactoren. De invloed van het feit dat $\gamma_b \xi_{m-1,0} > 1,8$ 'vervuilt' als het ware de bepaalde invloedsfactor. Deze dienen nog terugvertaald te worden naar de ongecorrigeerde invloedsfactoren voor ruwheid waarbij geldt dat $\gamma_b \xi_{m-1,0} < 1,8$. Deze correctie is op de data toegepast.

De resultaten zijn grafisch weergegeven in Figuur 3.9. In deze figuur zijn zowel de gemiddelde (de blauwe streep), de minimale als de maximale waarden (uiteinden van de stokjes) binnen een subset weergegeven.



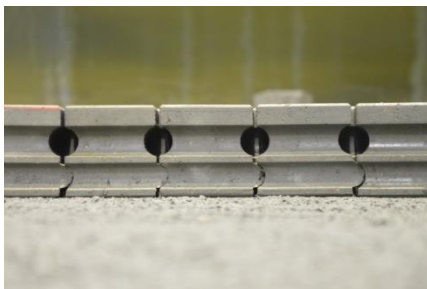
Figuur 3.9 Invloedsfactor voor ruwheid van Verkalit GOR

Nu zijn voor alle subsets de waarden van de invloedsfactor voor ruwheid bepaald. In het volgende hoofdstuk worden deze resultaten bediscussieerd.

4 Discussie

4.1 Aanbeveling m.b.t. de te hanteren waarde van de invloedsfactor voor ruwheid van Verkalit GOR

De golfloopreducerende werking van Verkalit GOR wordt veroorzaakt door het kanaalvormige stelsel in de steenzetting, zie Figuur 4.1. Het ligt daarom voor de hand dat de mate van golfloopreductie toeneemt bij een groter volume van de holtes. In deze analyse wordt het volume van de holtes gedefinieerd als het totale volume van de kanalen per m^2 steenzetting. Het gebruikte symbool is d_{kanaal} , de eenheid is m^3/m^2 . Er wordt benadrukt dat alleen de holle ruimte van de kanalen in rekening wordt gebracht en niet de holle ruimte rondom de teen en de kop van de Verkalit GOR. Een voorwaarde voor de gehanteerde aanpak is dat het open oppervlakte van de kop van de Verkalit GOR voldoende groot is om het water in de kanalen toe te laten. Mogelijk is dit, gezien de relatief kleine open volumes in de kop van Verkalit GOR, niet het geval.



Figuur 4.1 Verkalit GOR. Duidelijk zijn de open kanalen in de steenzetting te zien

Om het volume open ruimte van de kanalen per m^2 dimensieloos te maken wordt de significante golfhoogte H_{m0} gebruikt. De dimensieloze parameter is dan d_{kanaal}/H_{m0} . Een alternatieve procedure zou kunnen zijn om de halshoogte D_{hals} te gebruiken in plaats van het volume open ruimte d_{kanaal} . Er wordt echter ingeschat dat het volume open ruimte een betere representatie van het fysisch proces weergeeft. Daarnaast is gebleken dat de resultaten van de Verkalit GOR beter in overeenstemming zijn met de resultaten van andere typen bekledingen met open kanalen.

De invloedsfactor voor ruwheid als functie van de dimensieloze parameter H_{m0}/d_{kanaal} is weergegeven in Figuur 4.2.

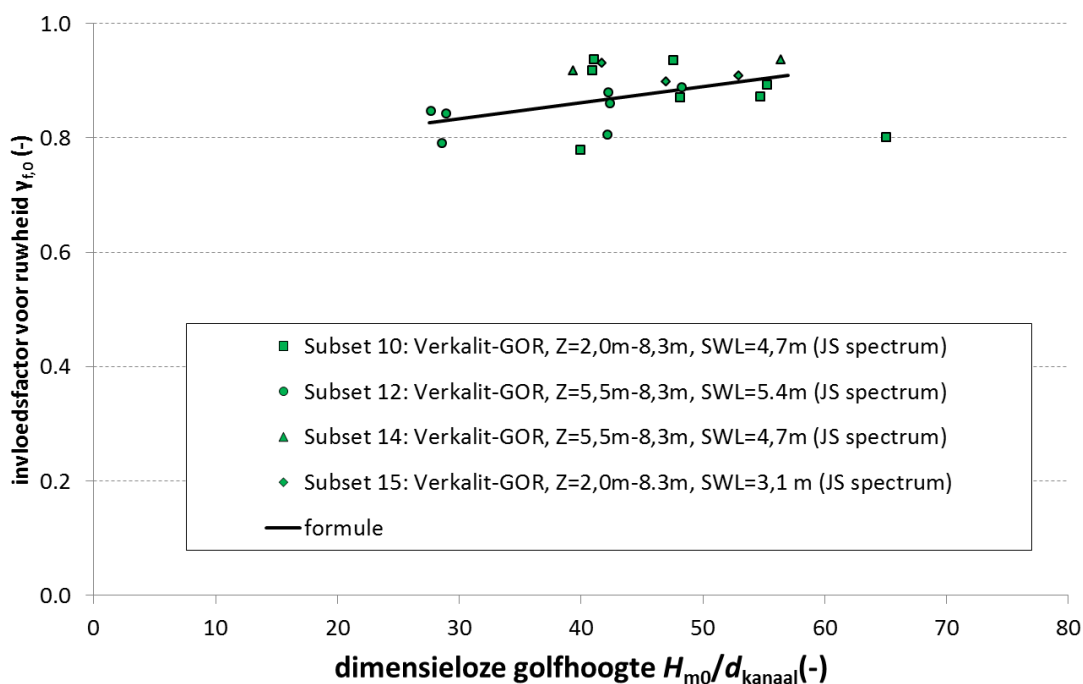
De voorgestelde formule om de invloedsfactor voor ruwheid voor golfloop als functie van de dimensieloze parameter H_{m0}/d_{kanaal} te beschrijven is:

$$\gamma_{f,0} = 0.0028 \frac{H_{m0}}{d_{\text{kanaal}}} + 0.75 \quad (4.1)$$

Vergelijking (4.1) is tot stand gekomen door een integrale beschouwing van alle geteste steenzettingen welke worden gekenmerkt door een kanaalvormige structuur.

Bovenstaande vergelijking is uitgewerkt voor vier verschillende golfhoogten en twee verschillende afmetingen van Verkalit GOR. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 4.1. Bij de tabel worden de volgende nuances gemaakt:

- Er dient nagegaan te worden of de Verkalit GOR stabiel is onder de gegeven belasting;
- De vorm van de Verkalit GOR dient gelijkwaardig te zijn aan de vorm van de Verkalit GOR zoals deze is getest.
- Het geteste bereik van de parameter (H_{m0}/d_{kanaal}) is kleiner dan het bereik wat is weergegeven in Tabel 4.1.



Figuur 4.2 Invloedsfactor voor ruwheid als functie van het relatieve kanaalvolume

Tabel 4.1 Resulterende invloedsfactor voor ruwheid bij golfloop als functie van de golfhoogte H_s , hoogte en bijbehorende kanaalvolume per m^2 van Verkalit GOR

D (m)	0,30	0,50
d_{kanaal}	0,042	0,070
H_s (m)	γ_f (-)	
1	0,82	0,79
2	0,88	0,83
3	0,95	0,87
4	1,00	0,91

4.2 Spreiding in resultaten

De resultaten geven een spreiding weer. Dit bleek ook het geval te zijn in de grootschalige modelonderzoeken waarop de invloedsfactoren voor ruwheid van andere bekledingstypen in TAW (2002a) zijn gebaseerd. In TAW (2002b) is aangegeven dat die onderzoeken met behulp van zogenaamde oplopmeters zijn uitgevoerd en dat dit vrij moeilijk blijkt te zijn. Tevens wordt in TAW (2002b) gesteld dat daarom niet direct verklaarbare resultaten zijn verkregen.

Conform TAW (2002b) wordt het gemiddelde van de meetpunten aangehouden als uiteindelijk resultaat. Eventuele spreiding wordt verondersteld meegenomen te worden in de totale spreiding rondom de golfoploopformules. Deze procedure is ook gehanteerd voor andere typen steenzettingen waarvan de invloedsfactor voor ruwheid is weergegeven in TAW (2002a).

4.3 Toepassingsgebied van invloedsfactoren voor ruwheid

De invloedsfactoren voor ruwheid hebben een beperkt toepassingsgebied. Buiten dit toepassingsgebied zijn de gegeven waarden mogelijk niet van toepassing. In deze paragraaf worden twee beperkende voorwaarden beschreven:

- Voorwaarde met betrekking tot grote waarden van de parameter $\gamma_b \xi_{m-1,0}$;
- Voorwaarde bij toepassing met betrekking tot het bepalen van het golfoverslagdebiet.

4.3.1 Grote waarden van de parameter $\gamma_b \xi_{m-1,0}$

In TAW (2002b) wordt gesteld dat de invloedsfactoren gelden voor $\gamma_b \xi_{m-1,0} < 1,8$. Hierbij is γ_b een factor welke de invloed van de aanwezigheid van een berm representeert. Vanaf $\gamma_b \xi_{m-1,0} = 1,8$ loopt de invloedsfactor lineair op tot 1 voor $\gamma_b \xi_{m-1,0} = 10$. Voor grotere waarden blijft de invloedsfactor gelijk aan 1. Er wordt aanbevolen om deze methode, net als bij alle andere bekledingstypen, ook voor Verkalit GOR te hanteren.

4.3.2 Voorwaarden m.b.t. het golfoverslagdebiet

De invloedsfactor voor ruwheid van Verkalit GOR met betrekking tot golfoploop is bepaald door de golfoploophoogte te meten en deze te vergelijken met de golfoploophoogte van een glad talud. Dit is tot nog toe een gangbare manier geweest om de invloedsfactor voor ruwheid in grootschalig fysiek modelonderzoek te bepalen. Vrijwel alle invloedsfactoren voor ruwheid van de verschillende typen dijkbekledingen, zoals gegeven in TAW (2002a), zijn op deze manier bepaald. Daarnaast is deze methode praktisch uitvoerbaar bij grootschalig modelonderzoek.

In de dagelijkse praktijk wordt de golfoploophoogte echter niet meer gehanteerd in het ontwerp en toetsing van dijken. Wel wordt het gemiddelde golfoverslagdebiet (q) gehanteerd. Het gemiddelde golfoverslagdebiet is de gemiddelde hoeveelheid water wat per tijdseenheid en per strekkende meter dijk over de kruin slaat. De meest gebruikte eenheid is 'liter per seconde per strekkende meter dijk' (l/s/m). In de procedure om de golfoverslag te bepalen mag volgens TAW (2002a,b) dezelfde invloedsfactor voor ruwheid worden gebruikt als welke wordt gebruikt voor golfoploop. Hiervoor is in de genoemde documenten echter geen onderbouwing gevonden. In TAW (2002a) wordt een lijst met invloedsfactoren gehanteerd welke grotendeels zijn gebaseerd op golfoploopmetingen en voor zover bekend niet zijn gevalideerd met golfoverslagmetingen. Recent onderzoek (Capel, 2015) laat zien dat er een belangrijk verschil kan zitten tussen de ruwheidsfactor bij golfoploop en die bij golfoverslag, waarbij dit verschil toeneemt naarmate de golfoverslag toeneemt. Deze nieuwe kennis is meegewogen bij het bepalen van de toepasbaarheid van bovenstaande formule en het bepalen van de ruwheidsfactor voor overslag.

Een eerste aanzet met betrekking tot de toepassing van de invloedsfactor voor ruwheid op het golfoverslagdebiet is weergegeven in Bijlage D. De aldaar gegeven theorie is alleen van toepassing op steenzettingen met een bergend volume (kanalen) zoals Verkalit GOR. Op basis van de analyse in Bijlage D wordt de volgende correctiefactor voorgesteld voor toepassing in de bepaling van het golfoverslagdebiet:

$$\gamma_f = \min\{1; \gamma_{f,0} + C\} \quad (4.2)$$

Met

$$C = \max\left\{0; 0.27 + 0.0333 \cdot \ln\left(\frac{q_{glad}}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}}\right)\right\} \quad (4.3)$$

Waarbij:

- γ_f = invloedsfactor met betrekking tot ruwheid buitentalud voor golfoverslag (-)
- $\gamma_{f,0}$ = invloedsfactor met betrekking tot ruwheid buitentalud voor golfoploop (-)
- C = correctiefactor voor relatief hoog overslagdebiet (-)
- q_{glad} = overslagdebiet bij een glad talud ($m^3/s/m$)
- g = versnelling als gevolg van de zwaartekracht (m/s^2)
- H_{m0} = significante golfhoogte (m)

Er wordt benadrukt dat deze theorie niet is gevalideerd door middel van metingen en louter een theoretische benadering is. In Capel (2015) wordt een alternatieve procedure beschreven om de invloed van ruwheidselementen te bepalen. Deze procedure is gebaseerd op een grote hoeveelheid kleinschalige proeven met een steenzetting met een dambordpatroon en ribbenpatroon. De analyse in Bijlage D laat een vergelijkbare trend zien als de trend welke door Capel (2015) is gevonden (zie Bijlage D.6).

Het is denkbaar dat volgens de bovenstaande theorie bij relatief grote overslagdebieten Verkalit GOR minder goed fungeren dan standaard betonnen zuilen conform de huidige theorie zoals beschreven in TAW (2002). Dit komt doordat de reducerende werking van standaard betonnen zuilen volgens de TAW aanpak niet afhankelijk is van het golfoverslagdebiet. Het is echter aannemelijk dat in werkelijkheid ook de standaard betonnen zuilen minder goed zullen fungeren bij relatief hoge overslagdebieten dan nu wordt verwacht op basis van de TAW (2002).

Om de invloedsfactor voor ruwheid voor grotere overslagdebieten te bepalen wordt aanbevolen om aanvullend onderzoek uit te voeren. Deze aanbeveling is niet alleen van toepassing op Verkalit GOR maar op alle bekledingstypen.

4.4 Invloed van de waterdiepte

In de bepaling van de golfoploop en de golfoverslag is er volgens de procedure van TAW (2002a) geen invloed van de waterdiepte (met uitzondering van zeer ondiepe voorlanden). De testresultaten en de analyse in dit rapport geven een indicatie dat de waterdiepte wel een invloed heeft op de golfoploophoogte. In de bepaling met betrekking tot de invloedsfactoren voor ruwheid van Verkalit GOR is hier voor verdisconteerd wat heeft geleid tot een lagere waarde van de invloedsfactor voor ruwheid (Verkalit GOR remt de golven volgens deze aangepaste procedure dus beter dan wanneer deze methode niet zou zijn toegepast).

In Szymkiewicz et al (1994) is ook opgemerkt dat de golfoploop groter is bij grotere dieptes.

In de praktijk zijn er waterdieptes in de range van circa $d = 3$ m tot 8 m en golfhoogten van $H_s = 1,5$ tot 2,5 m. Dit geeft een range van de relatieve waterdiepte van $d/H_s = 1,2$ tot 5,3. De verwachting is dat in deze range de waterdiepte een invloed heeft. Overigens zullen bij kleine waarden van d/H_s er tevens golven breken waardoor de golfhoogte niet meer Rayleigh is verdeeld. Ook dit zal invloed hebben op de golfoploophoogte. Dit is echter niet de invloed

welke hier wordt bedoeld. Bovenstaande stelling is gebaseerd op expert judgement en dient in toekomstige studies nog onderbouwd te worden.

Er zijn drie hypothesen opgesteld voor het feit dat de golfoploop groter is bij grotere waterdiepten:

- De vorm van de golf wijkt af. In ondiep water wordt de top hoger en het dal langer. Deze vorm is afhankelijk van de Ursell parameter.
- De momentum flux (een maat welke representatief is voor de energie) in een golf is bij grotere waterdieptes groter. De momentum flux als bruikbare parameter ten behoeve van golfoploop is verder uitgewerkt in Hughes (2004a,b).
- De lokale golflengte aan de teen van de dijk karakteriseert de golfcondities beter dan de diepwater golflengte.

Het verdient aanbeveling om op basis van de bovenstaande hypothesen gericht onderzoek te doen naar de invloed van de waterdiepte op golfoploop en golfoverslag.

5 Conclusies en aanbevelingen

Op basis van de grootschalige proeven in de Deltagoot van Deltares wordt er aanbevolen om de invloedsfactoren voor ruwheid bij golfloop bij een steenbekleding bestaande uit Verkalit GOR te bepalen met behulp van de volgende formule:

$$\gamma_{f,0} = 0,0028 \frac{H_{m0}}{d_{kanaal}} + 0,75 \quad (5.1)$$

Indien niet de golfploophoogte maar het golfoverslagdebiet wordt bepaald dient bovenstaande formule als volgt te worden gecorrigeerd:

$$\gamma_f = 0,0028 \frac{H_{m0}}{d_{kanaal}} + 0,75 + \max \left\{ 0; 0.27 + 0.0333 \cdot \ln \left(\frac{q_{glad}}{\sqrt{g} \cdot H_{m0}^3} \right) \right\} \quad (5.2)$$

De bovenstaande formule is tot stand gekomen op basis van testen met eigenschappen zoals weergegeven in Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Overzicht eigenschappen van testen met Verkalit GOR t.b.v. het bepalen van de invloedsfactor voor ruwheid

type steenzetting		Verkalit GOR
taludhelling		1:3
hoogte Verkalit GOR	$D_{\text{Verkalit GOR}}$	0,15 m
hoogte hals van Verkalit GOR	D_{hals}	0,049 m
volume open ruimte in hals per m ²	d_{kanaal}	0,021 m ³ /m ²
significante golfhoogte	H_{m0}	0,58 m – 1,36 m
dimensieloze hoogte hals	H_{m0}/d_{kanaal}	28 - 65
golfsteilheid	$S_{m-1,0}$	0,011 – 0,046
invloedsparameters	$\{\gamma_b, \gamma_\beta, \gamma_v\}$	{1, 1, 1}

Vergelijking (5.1) heeft het volgende toepassingsgebied:

- $\gamma_b \xi_{m-1,0} \leq 1,8$ (5.3)
- Verkalit GOR met een vorm welke overeenkomt met de vorm van de Verkalit GOR zoals deze zijn getest en beschreven in dit rapport. De afmetingen mogen wel anders zijn, als de vorm maar vergelijkbaar is.

Indien niet wordt voldaan aan criterium (5.3) dan kan de invloedsfactor voor ruwheid worden gecorrigeerd conform de procedure welke is beschreven in TAW (2002a) en in Paragraaf 3.6 van voorliggend rapport. Criterium (5.3) is niet alleen van toepassing op Verkalit GOR maar op alle typen bekledingen.

Bij een significant afwijkende vorm van de Verkalit GOR ten opzichte van de Verkalit GOR welke in dit rapport is beschreven is aanvullend onderzoek noodzakelijk.

De resultaten van het onderzoek geven aanleiding te veronderstellen dat de waterstand een significante invloed heeft op de golfloop. Dit is in de bestaande TAW (2002a) formulering

niet opgenomen. Om de invloedsfactor voor ruwheid van Verkalit GOR goed te bepalen zijn daarom aanvullende proeven uitgevoerd met relatief gladde taluds zodat de invloed van de waterstand meegenomen kon worden in de bepaling van de invloedsfactor voor ruwheid. Er wordt echter wel benadrukt dat er nog geen goed inzicht is in de invloed van de waterstand op de golfoploophoogte. Mogelijk dat deze parameter de relatief grote spreiding van eerdere resultaten met andere bekledingstypen rondom de TAW formulering kan verklaren. Om deze hypothese te kunnen verifiëren of te kunnen verwerpen wordt aanbevolen om hier gericht onderzoek naar uit te voeren teneinde het ontwerp- en toetsproces van dijken te kunnen optimaliseren.

Dit rapport is definitief in de zin dat het onderzoek is afgerond en het commentaar van Rijkswaterstaat is verwerkt. De resultaten kunnen echter nog niet in de praktijk gebruikt worden, omdat het nog moet worden beoordeeld door de Klankbordgroep Steenbekledingen en ENW.

6 Literatuur

- Capel, A., 2015, Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken. Ruwheid ten aanzien van golfoverslag van steenzetting met dambordpatroon en ribbenpatroon. Deltares rapport 1208618-005-HYE-0004, versie 4, mei 2015
- Hughes, S.A. 2004a, Wave momentum flux parameter: a descriptor for nearshore waves, Coastal Engineering 51 (2004) 1067-1084
- Hughes, S.A. 2004b, Estimation of wave run-up on smooth, impermeable slopes using the wave momentum flux parameter, Coastal Engineering 51 (2004) 1085-1104
- Kaste, D., 2015, Stabiliteit van Verkalit GOR steenzetting bij golfaanval. Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken (concept). Deltares rapport 1208618-015-HYE-0002, Februari 2015
- Szmytkiewicz, M., Zeidler, R.B., Pilarczyk, K.W., 1994, Irregular wave run-up on composite rough slopes, Proceedings Coastal Dynamics 1994
- TAW, 2002a, Technisch Rapport Golfoploop en Golfoverslag bij Dijken, Delft, mei 2002
- TAW, 2002b, Invloedsfactoren voor de ruwheid van toplagen bij golfoploop en overslag. Bijlage bij het Technisch Rapport Golfoploop en Golfoverslag bij Dijken, september 2002, publicatienummer DWW-2002-112

A Tabellen

Tabel A.1 Overzicht proevenprogramma, resultaten en afgeleide invloedsfactor voor ruwheid (Verkalit GOR)

Sub-set	Proef	type block	Water-stand h (m)	Spec-trum	dikte blok D (m)	Golf-hoogte		Golfperiode		Golf-steelheid $\xi_{m-1.0}$ (-)	breker parameter $\xi_{m-1.0}$ (-)	golfploophoogte		gamma γ_f
						H_{m0} (m)	T_p (s)	$T_{m-1.0}$ (s)	$s_{m-1.0}$ (-)			$z_{2\%}$ (m)	$z_{2\%}/H_{m0}$ (-)	
10	V25	Verkalit GOR	4.70	JONSWAP	0.15	0.86	5.16	4.76	0.024	2.12	2.75	3.21	0.94	
	V26		4.70			0.99	5.63	5.28	0.023	2.18	3.20	3.22	0.94	
	V27		4.70			1.14	6.09	5.74	0.022	2.21	3.45	3.02	0.87	
	V28		4.70			1.32	6.64	6.13	0.023	2.20	*	*	*	
	V29		4.70			1.56	7.02	6.38	0.024	2.11	*	*	*	
	V30		4.70			0.84	3.69	3.47	0.044	1.57	1.95	2.34	0.78	
	V31		4.70			0.85	3.69	3.46	0.046	1.54	2.30	2.69	0.92	
	V32		4.70			1.01	3.98	3.77	0.045	1.55	2.60	2.59	0.87	
	V33		4.70			1.15	4.28	4.09	0.044	1.57	3.10	2.69	0.89	
	V34		4.70			1.36	4.65	4.75	0.039	1.68	3.50	2.58	0.80	
	V35		4.70			1.45	4.95	4.84	0.040	1.66	*	*	*	
12	11	Verkalit (glad) / Verkalit GOR	5.40	JONSWAP	0.15	0.58	6.19	5.70	0.011	3.09	1.9	3.29	0.85	
	12		5.40			0.60	3.53	3.31	0.035	1.76	1.75	2.90	0.84	
	13		5.40			0.60	2.79	2.71	0.052	1.45	1.35	2.26	0.79	
	14		5.40			0.88	7.37	6.73	0.012	2.96	2.75	3.13	0.81	
	15		5.40			0.89	4.20	3.94	0.037	1.73	2.6	2.94	0.86	
	16		5.40			0.88	3.28	3.19	0.056	1.40	2.15	2.44	0.88	
	17		5.40			1.05	5.57	5.25	0.025	2.11	*	*	*	
	18		5.40			1.01	4.04	3.78	0.045	1.55	2.75	2.73	0.89	
14	V19	Verkalit / Verkalit GOR	4.70	JS	0.15	0.82	5.22	4.79	0.023	2.18	2.60	3.16	0.92	
	V20		4.70			1.18	6.14	5.76	0.023	2.19	3.80	3.23	0.94	
	V21		4.70			1.35	6.62	6.13	0.023	2.18	*	*	*	
	V22		4.70			1.52	6.98	6.31	0.024	2.11	*	*	*	
15	V25_LW	Verkalit GOR	3.10	JS	0.15	0.87	5.20	4.91	0.023	2.17	2.55	2.93	0.93	
	V26_LW		3.10			0.98	5.65	5.46	0.021	2.27	2.80	2.86	0.90	
	V27_LW		3.10			1.11	6.06	5.77	0.021	2.26	3.20	2.90	0.91	

Tabel A.2 Overzicht proevenprogramma en resultaten (referentiesecties)

Sub-set	Proef	type block	Waterstand h (m)	Spec-trum	dikte blok D (m)	Golf-hoogte	Golfperiode		Golf-steilheid	breker parameter	golfoploophoogte	
						H _{m0} (m)	T _p (s)	T _{m-1.0} (s)	s _{m-1.0} (-)	ξ _{m-1.0} (-)	z _{2%} (m)	z _{2%} /H _{m0} (-)
7	P2	Basalton + glad	4.70	Pierson Mosk.	0.15	0.89	5.29	4.78	0.025	2.09	2.95	3.31
	P3		4.70			1.12	6.00	5.28	0.026	2.06	3.65	3.26
	P5		4.70			0.71	3.61	3.16	0.046	1.55	1.95	2.75
	P6		4.70			0.98	4.01	3.83	0.043	1.59	2.90	2.96
8	H02	Hydroblock /glad	4.70	JONSWAP	0.17	0.91	5.48	4.95	0.024	2.14	2.75	3.02
	H03		4.70			1.05	5.79	5.43	0.023	2.18	3.15	3.00
	H04		4.70			1.21	6.09	5.71	0.024	2.14	*	*
	H05		4.70			1.34	6.68	6.10	0.023	2.17	*	*
	H06		4.70			1.51	6.97	6.35	0.024	2.13	*	*
	H08		4.70			1.01	3.96	3.78	0.045	1.55	2.63	2.60
	H09		4.70			1.16	4.29	4.10	0.044	1.57	3.05	2.63
	H10		4.70			1.29	4.80	4.36	0.044	1.58	3.50	2.71
9	T116	RONA® ton	3.10	JONSW.	0.15	0.67	3.37	3.16	0.043	1.60	1.63	2.45
	T116a		3.10			0.73	3.37	3.19	0.046	1.54	1.74	2.39
	T117		3.10			0.79	4.50	4.28	0.028	1.98	2.16	2.72
11	P01	RONA® ton + glad	4.55	JONSWAP	0.15	0.60	4.41	4.01	0.024	2.14	1.90	3.17
	P02		4.70			0.69	4.71	4.36	0.023	2.16	2.25	3.25
	P03		4.70			0.83	5.23	4.82	0.023	2.19	2.70	3.27
	P04		4.70			1.00	5.64	5.30	0.023	2.19	3.20	3.21
	P05		4.70			1.20	6.21	5.74	0.023	2.16	3.90	3.25
	P06		4.70			1.40	6.72	6.24	0.023	2.17	4.60	3.28
	P07+P07a		4.70			1.50	6.96	6.37	0.024	2.14	4.90	3.26
	P08		4.70			0.95	3.99	3.76	0.043	1.59	2.70	2.83
	P09		4.70			1.19	4.39	4.20	0.043	1.58	3.30	2.76
	P10		4.70			1.39	4.78	4.54	0.043	1.59	3.80	2.73
	P11		4.55			0.62	3.29	3.07	0.042	1.61	1.70	2.74
	P12		4.55			0.78	3.56	3.39	0.043	1.58	2.10	2.70
	P13		4.70			1.07	4.17	4.02	0.042	1.60	3.00	2.81

B Beschrijving modelopstellingen

B.1 Beschrijving modelopstelling Subset 7 (Basalton)

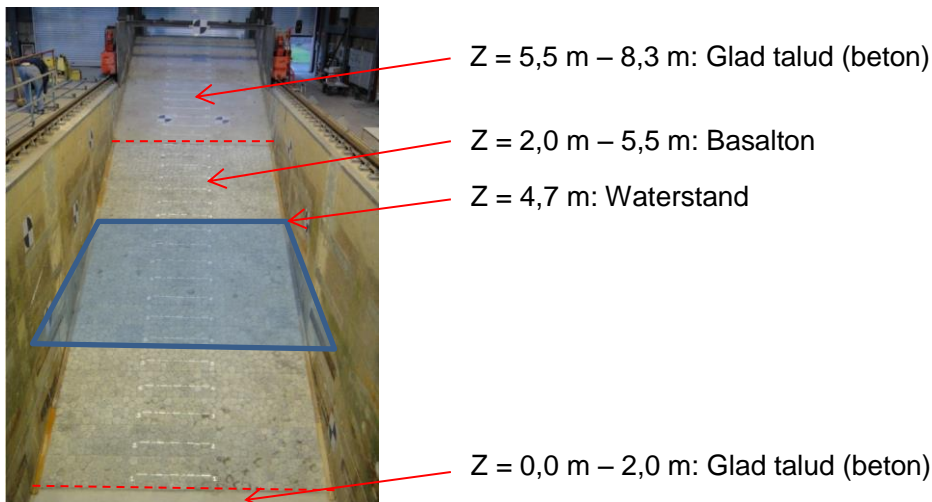
Bij de testopstelling ten behoeve van Subset 7 is een deel van het talud bekleed met Basalton. De hoogte van de blokken in het model was 0,15 m. De waterstand bij de proeven was gelijk aan $Z = 4,70$ m.

De proefopstelling bestond uit een dijklichaam van zand. Op het 1:3 talud zijn drie verschillende secties aangelegd:

- $Z = 0,0$ m – $2,0$ m: dummy sectie bestaande uit glad beton
- $Z = 2,0$ m – $5,5$ m: testsectie bestaande uit Basalton
- $Z = 5,5$ m – $8,3$ m: dummysectie bestaande uit glad beton

Op de onderliggende zandlaag is een zandcementstabilisatie en een geotextiel aangebracht. Hierop is een filter bestaande uit een laagje steenslag aangebracht. Op het filter is de Basalton geplaatst. De Basalton is ingewassen met gebroken steenslag (hoekig).

Een indruk van de testopstelling van Subset 7 is weergegeven in Figuur B.1.



Figuur B.1 Overzicht proefopstelling Subset 7 (Basalton, deel van het talud)

B.2 Beschrijving modelopstelling Subset 8 (Hydroblocks)

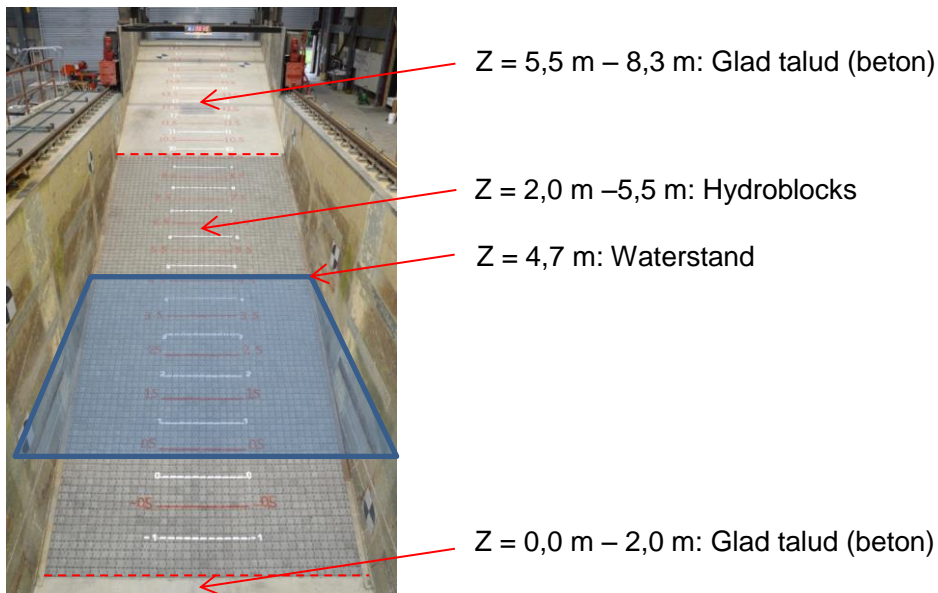
Bij de testopstelling ten behoeve van Subset 8 is een deel van het talud bekleed met Hydroblocks. De hoogte van de blokken in het model was 0,166 m. De waterstand bij de proeven was gelijk aan $Z = 4,7$ m.

De proefopstelling bestond uit een dijklichaam van zand. Op het 1:3 talud zijn drie verschillende secties aangelegd:

- $Z = 0,0$ m – $2,0$ m: dummy sectie bestaande uit glad beton.
- $Z = 2,0$ m – $5,5$ m: testsectie bestaande uit Hydroblocks
- $Z = 5,5$ m – $8,3$ m: dummysectie bestaande uit glad beton.

Op de onderliggende zandlaag is een zandcementstabilisatie en een geotextiel aangebracht. Hierop is een filter bestaande uit een laagje steenslag aangebracht. Op het filter zijn de

Hydroblocks geplaatst. De Hydroblocks zijn ingewassen met gebroken steenslag (hoekig). Een indruk van de testopstelling van Subset 8 is weergegeven in Figuur B.2.



Figuur B.2 Overzicht proefopstelling Subset 8 (Hydroblocks, deel van het talud)

B.3 Beschrijving modelopstelling Subset 9 en Subset 11 (RONA[®]ton)

Bij de testopstelling ten behoeve van Subset 9 is een deel van het talud bekleed met RONA[®]ton. De hoogte van de blokken in het model was 0,15 m. De waterstand bij de proeven was gelijk aan Z = 4,7 m (Subset 11) en 3,1 m (Subset 9).

De proefopstelling bestond uit een dijklichaam van zand. Op het 1:3 talud zijn drie verschillende secties aangelegd:

- Z = 0,0 m – 2,0 m: dummy sectie bestaande uit glad beton.
- Z = 2,0 m – 5,5 m: testsectie bestaande uit RONA[®]ton
- Z = 5,5 m – 8,3 m: dummysectie bestaande uit glad beton.

Op de onderliggende zandlaag is een zandcementstabilisatie en een geotextiel aangebracht. Hierop is een filter bestaande uit een laagje steenslag aangebracht. Op het filter is de RONA[®]ton geplaatst. De RONA[®]ton zijn ingewassen met gebroken steenslag (hoekig).

C Aanpassing van bestaande TAW formulering

In deze bijlage wordt de bestaande TAW formulering gecorrigeerd op basis van de metingen met de referentietaluds, zodat het als referentie kan dienen voor de metingen met Verkalit GOR. Dit resulteert in een correctiefactor C welke voor iedere referentietest een andere waarde heeft. De correctiefactor kan worden toegepast in de aangepaste TAW formulering welke is beschreven in Paragraaf 3.3 van dit rapport.

C.1 Algemene procedure per test

De algemene procedure om te komen tot de correctiefactor C is als volgt:

- Stap 1: Met behulp van PC-Overslag is de theoretische ruwheid van de samengestelde referentietaluds bepaald. Dit is veelal een combinatie van een glad talud van beton ($\gamma_f = 1$) en een talud met enige ruwheid. Voor de taluds met Basalton en Hydroblocks is op basis van het TAW-rapport een invloedsfactor voor ruwheid van $\gamma_f = 0,9$ genomen. Op basis van expert judgement is voor RONA[®] ton tevens een factor van $\gamma_f = 0,9$ aangenomen. De ruwheid van een talud bestaande uit meerdere bekledingen met een verschillende ruwheid is voor iedere test net iets anders aangezien de samengestelde ruwheid tevens een functie is van de hydraulische belasting. Er wordt dus voor iedere referentietest een aparte waarde gevonden van de invloedsfactor.

$\rightarrow \gamma_{f,ref,TAW}$ (invloedsfactor voor ruwheid van het samengestelde referentietalud o.b.v. TAW)

- Stap 2: De gemeten relatieve golfploophoogten voor de referentietesten zijn bepaald:

$$\rightarrow \left(\frac{z_{2\%}}{H_{m0}} \right)_{ref,meting}$$

- Stap 3: De theoretische relatieve golfploophoogte van het referentietalud, waarbij is aangenomen dat deze 'volledig glad' is ($\gamma_f = 1,0$), is bepaald op basis van de TAW (2002)

$$\rightarrow \left(\frac{z_{2\%}}{H_{m0}} \right)_{ref,glad,TAW}$$

- Stap 4: Op basis van de meting van de relatieve golfploophoogte $(z_{2\%}/H_{m0})_{ref,meting}$ en de invloedsfactor voor ruwheid volgens PC overslag $(\gamma_{f,ref,TAW})$ wordt de fictieve relatieve golfploophoogte $(z_{2\%}/H_{m0})_{ref,glad,aangepast}$ op een volledig glad talud bepaald:

$$\rightarrow \left(\frac{z_{2\%}}{H_{m0}} \right)_{ref,glad,aangepast} = \frac{\left(\frac{z_{2\%}}{H_{m0}} \right)_{ref,meting}}{\gamma_{f,ref,TAW}} \quad (C.1)$$

- Stap 5: Er wordt een correctiefactor bepaald waarmee de bestaande TAW formulering voor deze specifieke proef dient te worden aangepast:

$$\rightarrow C = \frac{\left(\frac{z_{2\%}}{H_{m0}}\right)_{ref,meting}}{\left(\frac{z_{2\%}}{H_{m0}}\right)_{ref,glad,TAW} \cdot \gamma_{ref,TAW}} \quad (C.2)$$

- Stap 6: De TAW formulering wordt aangepast met de correctiefactor:

$$\frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = C \cdot \min \left[1.65 \cdot \gamma_f \cdot \xi_{m-1.0}; \gamma_f \cdot \left(4.0 - \frac{1.5}{\sqrt{\xi_{m-1.0}}} \right) \right]$$

Bovenstaande procedure wordt in de volgende paragraaf met een voorbeeld verduidelijkt.

C.2 Voorbeeld

Ter illustratie is hieronder een voorbeeld gegeven met een proef (P3) waarbij het talud deels bestaat uit een glad talud ($\gamma_f = 1,0$) en deels uit Basalton ($\gamma_f = 0,9$).

Stap 1: Met behulp van PC-Overslag is de ruwheid van het samengestelde talud bepaald:

$$\gamma_{f,ref,TAW} = 0.94$$

Stap 2: De gemeten relatieve golfploophoogten van proef P3 is bepaald:

$$\left(\frac{z_{2\%}}{H_{m0}}\right)_{ref,meting} = 3.26$$

Stap 3: Met behulp van PC-Overslag is de relatieve golfploophoogte van dit talud bepaald waarbij is aangenomen dat deze geheel glad is ($\gamma_f = 1,0$):

$$\left(\frac{z_{2\%}}{H_{m0}}\right)_{ref,glad,TAW} = 2.95$$

(Hierbij valt overigens op dat de relatieve golfploophoogte van het denkbeeldige gladde talud lager is dan de gemeten golfploophoogte. Dit is een indicatie dat de TAW formulering minder goed van toepassing is op deze testcondities.)

Stap 4: Er wordt een aangepaste relatieve golfploophoogte vastgesteld:

$$\left(\frac{z_{2\%}}{H_{m0}}\right)_{ref,glad,aangepast} = \frac{\left(\frac{z_{2\%}}{H_{m0}}\right)_{ref,meting}}{\gamma_{f,ref,TAW}} = \frac{3.26}{0.94} = 3.48$$

Stap 5: de correctiefactor wordt bepaald:

$$C = \frac{\left(\frac{z_{2\%}}{H_{m0}}\right)_{ref,meting}}{\left(\frac{z_{2\%}}{H_{m0}}\right)_{ref,glad,TAW} \cdot \gamma_{ref,TAW}} = \frac{3.26}{2.95 \cdot 0.94} = 1.18$$

Stap 6: De TAW formulering wordt aangepast met de correctiefactor:

$$\frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = 1.18 \cdot \min \left[1.65 \cdot \gamma_f \cdot \xi_{m-1.0}; \gamma_f \cdot \left(4.0 - \frac{1.5}{\sqrt{\xi_{m-1.0}}} \right) \right]$$

D Beschouwing toepassingsgebied van invloedsfactor voor ruwheid

D.1 Inleiding

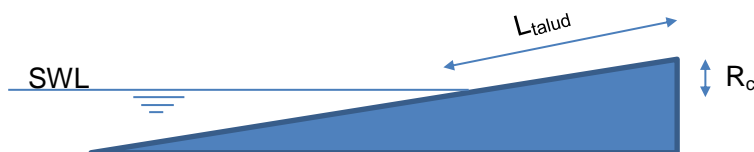
In de proeven is de invloedsfactor voor ruwheid bepaald door de oploophoogte welke door 2% van de golven wordt overschreden te vergelijken met een denkbeeldige situatie waarbij een glad talud wordt toegepast. Echter in de praktijk wordt tegenwoordig niet veel meer met de 2% oploophoogte gewerkt maar met het gemiddelde golfoverslagdebiet q . Het is onbekend in hoeverre invloedsfactoren voor ruwheid welke op basis van oploophoogtes zijn bepaald, mogen worden toegepast voor golfoverslagformuleringen. Er is echter te verwachten dat bij het toenemen van het overslagdebiet (en het korter worden van de taludlengte tot de kruin) het effect van de ruwheid steeds kleiner wordt.

Om deze reden wordt theoretisch beschouwd wat de invloed van een dergelijke steenzetting kan zijn op het golfoverslagdebiet. Hiertoe is een hypothese opgezet.

De basisgedachte van de hypothese is dat iedere golfloop voor een deel wegzakt in de holtes van de steenzetting. Dit volume kan per golfloop in mindering worden gebracht op het totale overslaande volume (en dus indirect op het totale golfoverslagdebiet). Deze hypothese wordt in onderstaande paragrafen verder uitgewerkt.

D.2 Bergend volume in de steenzetting

Vooralsnog wordt aangenomen dat het bergend volume in de steenzetting van toepassing is vanaf de stilwaterlijn tot aan de kruinhoogte.



De lengte van het talud kan worden bepaald door:

$$L_{talud} = \sqrt{R_c^2 + (\cot \alpha \cdot R_c)^2} = R_c \sqrt{1 + \cot^2 \alpha} \quad (D.1)$$

Het bergend volume van de steenzetting is afhankelijk van de taludlengte L_{talud} en de dikte van de bergende laag d_{kanaal} :

$$V_{bergend} = L_{talud} \cdot d_{kanaal} = R_c \sqrt{1 + \cot^2 \alpha} \cdot d_{kanaal} \quad (D.2)$$

In de bovengenoemde aanpak gelden de volgende aannames:

- De kanalen zijn volledig leeg op het moment dat de golf over het talud loopt (er is dus geen water van de vorige golf in het talud opgenomen).
- De laagdikte van de oplooptong is altijd groter dan de bergende laagdikte d_{kanaal} van de kanalen.
- Het water kan snel genoeg in de kanalen van de steenzetting lopen.

Het is vooralsnog onduidelijk of de bovengenoemde aannames van toepassing zijn op de Verkalit GOR taludbescherming. Met name de derde aanname is mogelijk niet van toepassing bij indien de bovenzijde van de steenzetting relatief kleine openingen heeft..

D.3 Overslagvolume per golf

Het overslagvolume is in iedere afzonderlijke golf verschillend en wijkt aanzienlijk af van het gemiddelde golfoverslagdebiet. In TAW (2002) is een kansverdelingsfunctie gegeven waarmee het volume per golf kan worden bepaald:

$$P_v = 1 - e^{-\left(\frac{V}{a}\right)^b} \quad (D.3)$$

Met

$$a = 0.84T_m \cdot \frac{q}{P_{ov}} \quad (D.4)$$

$$b = 0.75 \quad \text{Volgens TAW (2002)} \quad (D.5)$$

$$b = 0.73 + 55 \left(\frac{q}{gH_{m0}T_{m-1.0}} \right)^{0.8} \quad \text{Volgens Zanuttigh et al (2013)} \quad (D.6)$$

Waarbij:

P_v	=	de kans dat de realisatie van het overslagvolume per golf V groter dan of gelijk aan V is (-)
V	=	overslagvolume per golf (m^3/m)
T_m	=	de gemiddelde golfperiode (NT_m is de stormduur of beschouwd tijdsinterval) (s)
q	=	gemiddeld golfoverslagdebiet (m^3/m per s)
P_{ov}	=	N_{ov}/N = de kans op overslag per golf (-)
N_{ov}	=	het aantal overslaande golven [-]
N	=	het aantal inkomende golven tijdens de stormduur [-]
a	=	schaalfactor bij Weibull verdeling
b	=	vormfactor bij Weibull verdeling. In TAW is deze gegeven als een vaste waarde van 0,75. In Zanuttigh et al, 2013 is dit echter variabel en wijkt deze voornamelijk voor grotere overslagdebieten af van de waarde zoals deze is gegeven in TAW (2002).

De gemiddelde golfperiode is in het hier beschouwde model gekoppeld aan de spectrale golfperiode:

$$T_m = 0.91 \cdot T_{m-1.0} \quad (D.7)$$

D.4 Opzet model (voorbeeld)

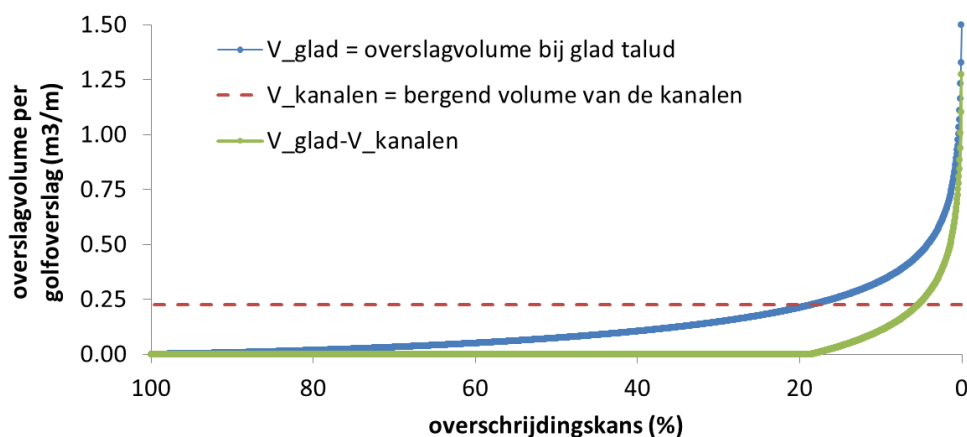
In het model wordt een reeks golven zodanig gegenereerd dat er 2000 golven overslaan. Met behulp van hierboven gegeven formules wordt het golfoverslagvolume per golfloop bepaald. Vervolgens worden deze volumes gesorteerd (van klein naar groot).

Een voorbeeld is gegeven voor een situatie waarbij de volgende parameters zijn gehanteerd:

Taludhelling	$\cot\alpha$	=	3
Kruinhoogte	R_c	=	1,59 m
Periode	$T_{m-1.0}$	=	4,80 s
Golfhoogte	H_{m0}	=	1,0 m
Aantal golven	N_w	=	6284
Bergende diepte kanalen	d_{berging}	=	0.0447 m

De bepaling van vormfactor b is conform Zanuttigh et al (2013).

Het overslagdebiet bij een glad talud is bepaald met behulp van de TAW formule en bedraagt 10 l/s/m.



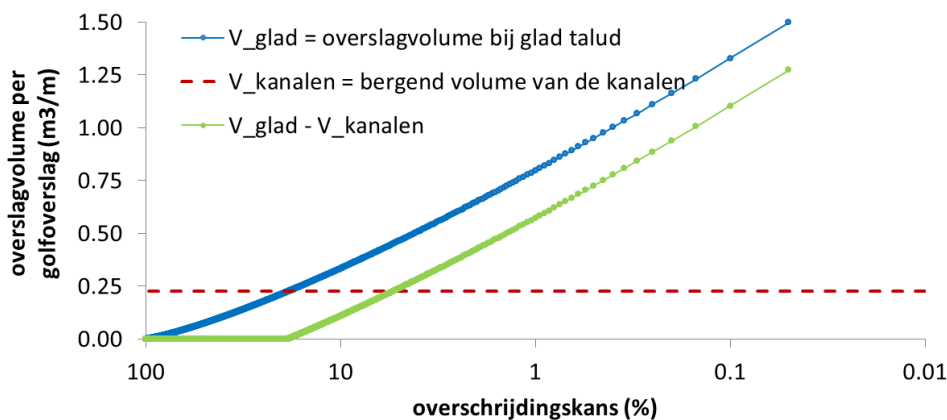
Figuur D.1 Overslagvolume per golf als functie van de overschrijdingskans

In Figuur D.1 zijn drie lijnen te zien. De blauwe lijn is het overslagvolume per golf bij een glad talud. De rode stippellijn is het potentieel bergend volume in de kanalen van de steenzetting. De groene lijn is het verschil tussen het golfverslagvolume en het potentieel bergend volume in de kanalen. De groene lijn representeert dus het overslaand volume in het geval een steenzetting met kanalen wordt toegepast.

Kanttekening

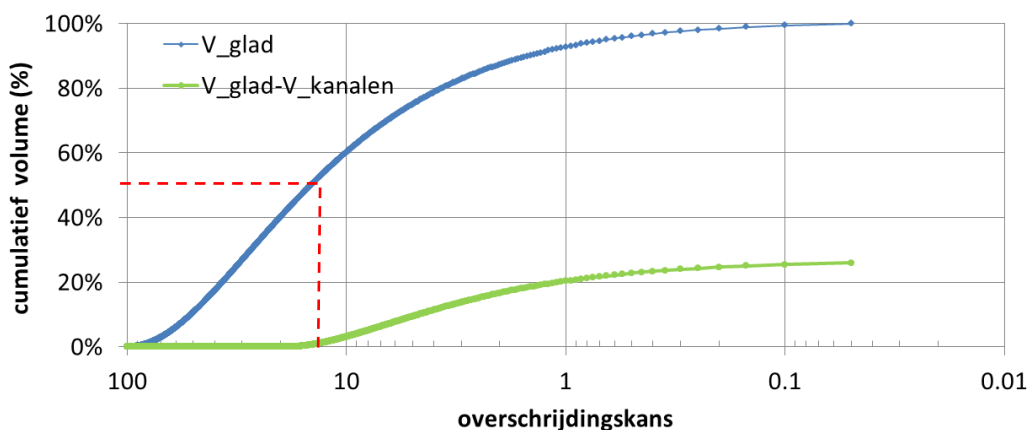
Wanneer de individuele volumes worden gesommeerd en gedeeld door de duur van de simulatie dan dient het gemiddeld overslagdebiet conform TAW (2002) te worden bereikt. Bij de controle in het hierboven gegeven voorbeeld bleek dit echter geen 10 l/s/m te zijn maar 9.6 l/s/m. De verklaring hiervoor is het verschil in de waarde van b (vormfactor). In de TAW methode is deze gelijk aan 0,75, in de hierboven gegeven aanpak is deze bepaald op basis van de methode zoals beschreven in Zanuttigh et al (2013). Wanneer de TAW methode wordt gebruikt, blijkt er 10 l/s/m uit te komen.

Bovenstaande figuur is opnieuw weergegeven in Figuur D.2 waarbij de horizontale as logaritmisch is.



Figuur D.2 Gelijk aan figuur hierboven maar met logaritmische horizontale as

Om het effect van de kanalen op het totale overslagdebiet te laten zien, zijn de cumulatieve overslagvolumes berekend, waarbij nog steeds de golfoverslagvolumes zijn gesorteerd van klein naar groot. Dit is gedaan in onderstaande figuur waarbij het cumulatieve overslagvolume procentueel is uitgedrukt ten opzichte van het totale uiteindelijke overslagvolume.



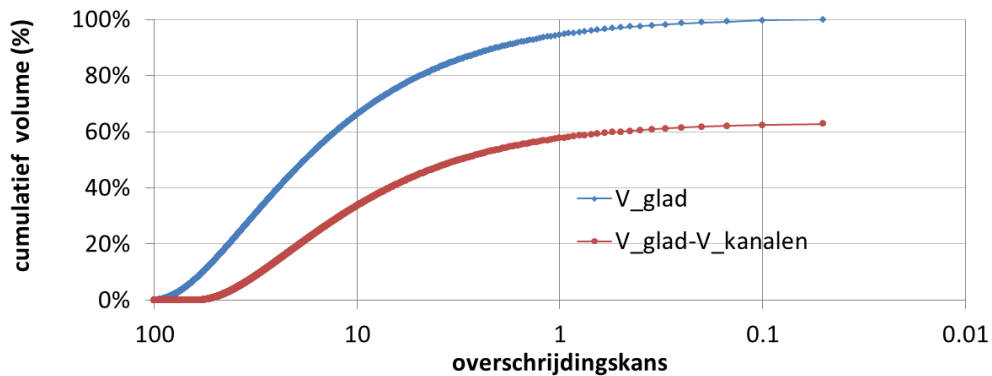
Figuur D.3 Cumulatief overslagvolume als functie van de overschrijdingskans waarbij golfvolumes zijn gesorteerd van klein naar groot (10 l/s/m, $H_{m0} = 1$ m)

Uit de bovenstaande figuur kan worden afgeleid dat circa 80 procent van het aantal golven dat bij een glad talud over de kruin zou slaan niet meer over de kruin slaat bij het talud met kanalen (aangegeven met verticaal rood gestreepte lijn). Dit is gelijk aan circa 50% van het totale volume (aangegeven met horizontaal rood gestreepte lijn). Circa 20% van de overslaande golven bij een glad talud slaan nog wel over de kruin maar hebben een kleiner volume.

Wanneer de individuele volumes worden gesommeerd en deze som vervolgens wordt gedeeld door de stormduur, wordt het overslagdebiet q verkregen. In het geval zonder kanalen bedraagt dit 9,6 l/s/m (zie kanttekening hierboven). In het geval met kanalen bedraagt dit 2,5 l/s/m.

Het is nu mogelijk om met de bestaande TAW formules een equivalente invloedsfactor voor ruwheid γ_f te bepalen. Immers alle parameters (inclusief q) zijn bekend. In dit specifieke geval is de equivalente invloedsfactor voor ruwheid gelijk aan $\gamma_f = 0,81$.

Figuur D.3 is alleen van toepassing op een situatie zoals aan het begin van deze paragraaf aangegeven (in dit geval was het overslagdebiet gelijk aan 10 l/s/m). Tevens is voor dezelfde situatie de kruin verlaagd tot een niveau waarbij het golfoverslagdebiet toeneemt tot 50 l/s/m. De overige parameters zijn gelijk gebleven. Het resultaat voor die casus is weergegeven in Figuur D.4.

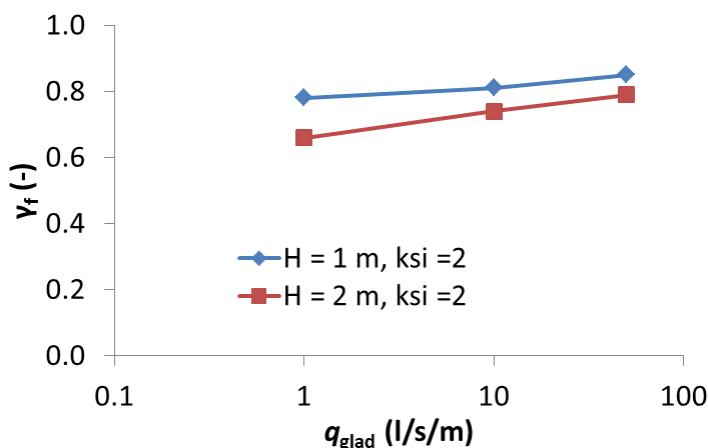


Figuur D.4 Cumulatief overslagvolume als functie van de overschrijdingskans waarbij golfvolumes zijn gesorteerd van klein naar groot (50 l/s/m, $H_{m0} = 1$ m)

Door Figuur D.3 en Figuur D.4 te vergelijken valt duidelijk te zien dat bij een hoger overslagdebiet de werking van de kanalen relatief minder wordt.

D.5 Uitwerking voor verschillende cases

Het hierboven beschreven model is toegepast op een zestal situaties. Onderscheid is gemaakt in de significante golfhoogte ($H_{m0} = \{1,0 ; 2,0\}$ m) en het golfoverslagdebiet ($q = \{1 ; 10 ; 50\}$ l/s/m). Het golfoverslagdebiet is gevarieerd door de kruinhoogte te wijzigen. De brekerparameter $\xi_{m-1,0}$ en de golfsteilheid $s_{m-1,0}$ zijn constant gehouden door de waarde van $T_{m-1,0}$ aan te passen. Alle andere parameters zijn gelijk aan het hierboven gegeven voorbeeld. De resultaten zijn grafisch weergegeven in onderstaande figuur.



Figuur D.5 Invloedsfactor voor ruwheid γ_r als functie van het fictieve golfoverslagdebiet bij een glad talud (q_{glad})

In de bovenstaande figuur valt duidelijk te zien dat in dit gegeven voorbeeld de invloedsfactor voor ruwheid toeneemt bij toenemend golfoverslagdebiet.

D.6 Analogie met ribbels (Capel, 2015)

In Capel (2015) is voor een talud bestaande uit ribbels, de volgende formule voorgesteld met betrekking tot de invloedfactor voor ruwheid als functie van onder andere het golfoverslagdebiet.

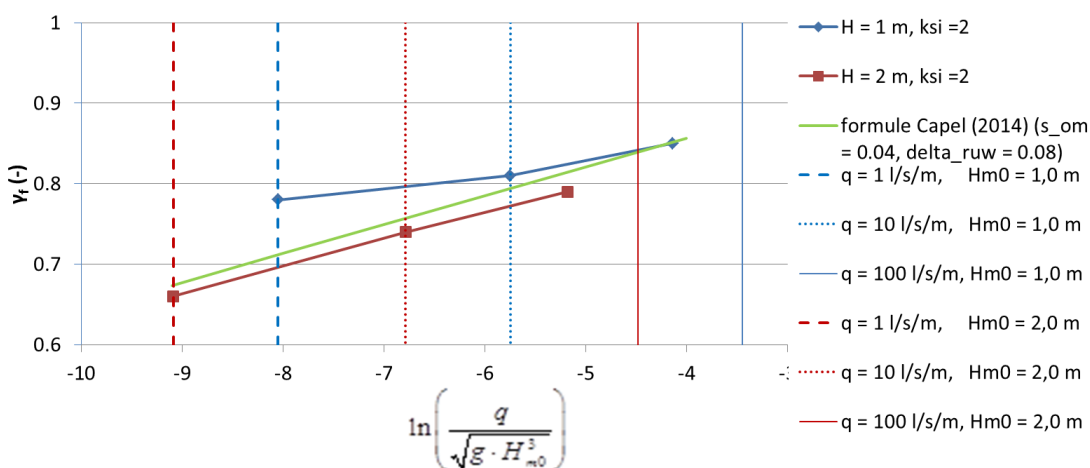
$$\gamma_f = 1 + 0,585 \cdot \sqrt{0,075 - s_{om}} \cdot \sqrt{\delta_{ruw}} \cdot \ln\left(\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}}\right) \quad (D.8)$$

Waarbij δ_{ruw} een maat voor de ruwheidseigenschappen van de bekleding is. In deze formule is de invloedfactor voor ruwheid linear afhankelijk met de natuurlijke logaritme van $q/\sqrt{(gH_{m0}^3)}$ ofwel:

$$\gamma_f = a \cdot \ln\left(\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}}\right) + b \quad (D.9)$$

Waarbij a en b constanten zijn. Het blijkt dat de trend in deze formule vergelijkbaar is met de trend in Figuur D.5. Dit is in Figuur D.6 getoond door de lijnen uit Figuur D.5 nogmaals te tekenen en daarbij formule (D.8) toe te voegen voor $s_{om} = 0,028$ (conform het voorbeeld) en $\delta_{ruw} = 0,08$ m.

Er wordt daarom aangenomen dat er bij steenzettingen met kanalen ook een dergelijke afhankelijkheid tussen de invloedfactor voor ruwheid γ_f en het dimensieloze overslagdebiet aanwezig is.



Figuur D.6 Invloedfactor voor ruwheid als functie van het dimensieloze golfoverslagdebiet

Nu is het mogelijk om een vergelijking op te stellen op basis van vergelijking (D.9) en Figuur D.6.

De waarde van a in vergelijking (D.9) is als volgt bepaald: Er is aangenomen dat de trend (toename van de waarde van γ_f) gelijk is aan de trend van de rode lijn in Figuur D.6). Deze trend wordt gerepresenteerd door de richtingscoëfficiënt van de linearisering van de rode lijn in Figuur D.6. Dit resulteert in de waarde $a = 0,0333$.

De waarde van b in vergelijking (D.9) is als volgt bepaald: Er wordt aangenomen dat de bij de metingen gevonden waarden van de invloedfactor voor ruwheid ($\gamma_{f,0}$) van toepassing zijn bij $H_{m0} = 1,0$ m en zodanige kruinhoogte dat het overslagdebiet gelijk is aan $q = 1$ l/s/m (0,001

$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$) bij een glad talud. Het dimensieloze overslagdebiet heeft in dat geval een waarde van $\ln(q/\sqrt{gH_{m0}^3}) = -8,05$. Bij grotere waarden van het dimensieloze overslagdebiet zal de waarde van γ_f toenemen. Vergelijking (D.9) kan nu worden omgeschreven tot:

$$b = \gamma_f - a \cdot \ln\left(\frac{q_{glad}}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}}\right) \quad (\text{D.10})$$

De waarde van b kan nu worden bepaald door te stellen dat:

$$\bullet \quad \gamma_f = \gamma_{f,0} \quad (\text{D.11})$$

$$\bullet \quad \ln\left(\frac{q_{glad}}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}}\right) = -8,05 \quad (q = 1 \text{ l/s/m en } H_{m0} = 1,0 \text{ m}) \quad (\text{D.12})$$

$$\bullet \quad a = 0,0333 \quad (\text{D.13})$$

Hieruit volgt:

$$b = 0,27 + \gamma_{f,0} \quad (\text{D.14})$$

Nu a en b bekend zijn kan vergelijking (D.9) als volgt worden herschreven:

$$\gamma_f = \gamma_{f,0} + C \quad (\text{D.15})$$

Met

$$C = 0 \quad \text{voor } \ln\left(\frac{q_{glad}}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}}\right) < -8,05 \quad (\text{D.16})$$

$$C = 0,27 + 0,0333 \cdot \ln\left(\frac{q_{glad}}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}}\right) \quad \text{voor } \ln\left(\frac{q_{glad}}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}}\right) > -8,05 \quad (\text{D.17})$$

D.7 Voorbeeld

Hieronder volgt een voorbeeld hoe de invloedsfactor voor ruwheid kan worden bepaald:

Gegevens (fictief)

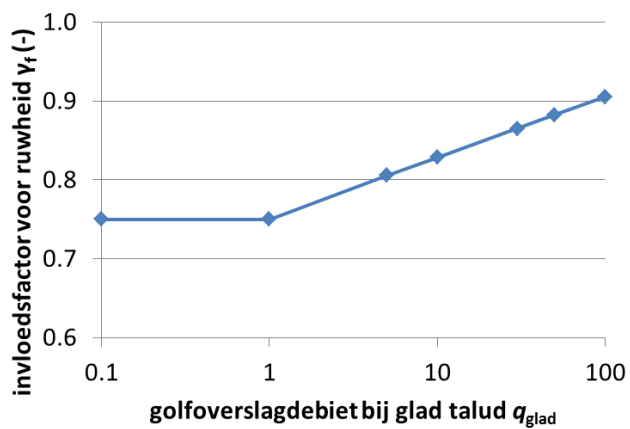
Significante golfhoogte	H_{m0}	=	1,0 m
Kanaalvolume	d_{kanaal}	=	$0,05 \text{ m}^3/\text{m}^2$

De invloedsfactor voor ruwheid bij een fictieve steenzetting is in dit voorbeeld:

$$\gamma_{f,0} = 0,75 \quad (\text{D.18})$$

Bij hogere overslagdebieten dient gecorrigeerd te worden middels vergelijking (D.15). Dit is voor verschillende overslagdebieten uitgevoerd en samengevat in onderstaande tabel en figuur.

q (l/s/m)	$\ln(q/\sqrt[3]{gH_{m0}^3})$ (-)	C (-)	γ (-)
0.1	-10.35	0.00	0.75
1	-8.05	0.00	0.75
5	-6.44	0.06	0.81
10	-5.75	0.08	0.83
30	-4.65	0.12	0.87
50	-4.14	0.13	0.88
100	-3.44	0.16	0.91



Figuur 6.1 Invloedsfactor voor ruwheid γ_f als functie van het golfoverslagdebiet bij een fictief glad talud q_{glad} bij $H_{m0} = 1,0$ m en $d_{kanaal} = 0,05$.

E Bepaling volumes open ruimte in Verkalit GOR

E.1 Inleiding

In deze bijlage wordt beschreven hoe de volumes van de kanalen in de steenzettingen zijn bepaald. Tevens zijn de resultaten weergegeven.

De volumes van de open ruimte van de volgende steenzettingen zijn bepaald:

- Verkalit GOR $D = 0,15$ m (beproefd in de Deltagoot in 2014)

De steenzetting bestaat uit drie delen: de voet, de hals en de kop. Van alle drie de delen heeft een volumebepaling plaatsgevonden.

E.2 Meetmethode

De afmetingen van de holle ruimtes zijn bepaald door een steenzettingselement in een cilindervormige bak (diameter = 0,2391 m) te plaatsen en de totale massa te noteren. Vervolgens is er water toegevoerd tot de hoogte van respectievelijk de bovenzijde van de voet, de hals en de kop. Door de massatoename te meten, en gegeven de dichtheid van water en de diameter van de cilindervormige bak, is het open volume van voet, hals en kop bepaald.

Voorafgaande aan de metingen is op basis van de bouwtekeningen de hoogte van de voet, hals en kop ten opzichte van het grondvlak gedefinieerd. Dit is op deze manier gedaan omdat het in de praktijk lastig bleek om de exacte hoogte van de voet, hals en kop te bepalen (veelal zijn er afgeronde hoeken, was er wat ruwer beton en waren de hoekjes een klein beetje beschadigd). Deze hoogtes zijn vervolgens met behulp van een peilnaald aangegeven in de cilindervormige bak met water. De waterstand is vervolgens gelijkgezet met de peilnaald. Visueel is gecontroleerd of de gedefinieerde hoogtes van de voet, hals en kop overeen kwamen met de werkelijke hoogtes.

De steenzettingselementen hebben een nacht onder water gestaan alvorens de metingen zijn uitgevoerd. Op deze manier konden eventuele poriën vollopen met water en wordt voorkomen dat deze tijdens de meting vollopen met water (wat zou leiden tot een overschatting van het open volume).

De diameter van de cilindervormige bak met water is indirect afgeleid door de massa van een volle bak (waarvan de waterstand bekend was) te meten. Het resultaat is gecontroleerd door middel van het aflezen van de diameter met behulp van een meetlint.

Het gemeten open volume is het volume per individueel steenzettingselement. Dit dient echter nog omgerekend te worden naar het volume per m² steenzetting. Hiertoe is voor iedere voet, hals en kop een denkbeeldige omhullende balk gedefinieerd. De afmeting van deze denkbeeldige omhullende balk is gelijk aan het product van de lengte en breedte van het element (welke zijn gedefinieerd als de hart op hart afstand) en de hoogte van voet, hals of kop.

E.3 Resultaten

De resultaten zijn hieronder samengevat.

Diameter cilindervormige bak met water: $D_{\text{bak}} = 0,2391 \text{ m}$
 Dichtheid water $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$

Tabel 6.1 Gedefinieerde hoogtes, lengtes en breedtes van voet, hals en kop

	hoogte (mm)				lengte (mm)	breedte (mm)	volume omhullende balk (m ³)			
	voet	hals	kop	element	element	element	voet	hals	kop	element
Verkalit GOR	56	60	34	150	154.5	154.5	0.0013	0.0014	0.0008	0.0036

Tabel 6.2 Gemeten volume beton, gemeten volume open en afgeleide volume open per m²

	volume beton (liter)				volume open (liter)				oppervlak (obv hoh) (m ²)	volume open per m ² (m ³ /m ²)			
	voet	hals	kop	element	voet	hals	kop	element		voet	hals (=d _{kanal})	kop	element
Verkalit GOR	1.17	0.93	0.75	2.86	0.16	0.50	0.06	0.73	0.024	0.007	0.021	0.003	0.030