

# Experimentele studie van het overslagdebiet voor steile hellingen en verticale wand met zeer lage vrijboord

Mollaert Justine en Sofie Peelman

Universiteit Gent, Afdeling Weg- en Waterbouwkunde

E-mail: [justinemollaert@gmail.com](mailto:justinemollaert@gmail.com); [sofie.peelman@gmail.com](mailto:sofie.peelman@gmail.com)

Dit artikel beschrijft het onderzoek naar het gemiddeld golfoverslagdebiet bij structuren met zeer steile en verticale helling en zeer lage vrijboord. Op basis van experimentele testen, uitgevoerd in de grote golfgoot van de Universiteit Gent, is de invloed van de relevante parameters voor overslag onderzocht. De data worden vergeleken met de reeds bestaande formules uit de literatuur. Een algemene uitdrukking voor steile hellingen met lage vrijboord wordt afgeleid, inclusief de situatie zonder vrijboord en verticale wand.

KEY WORDS: overslag; steile helling; lage vrijboord; verticale wand.

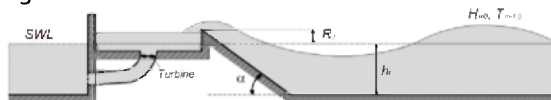
## Introductie en achtergrond

Overslag is een cruciaal fysisch proces in de bescherming tegen overstromingen. Kustwaterbouwkundige structuren worden ontworpen vanuit esthetisch en economisch oogpunt. Een degelijke kennis van het overslaande volume water is hierbij van groot belang voor het bepalen van de kruinhoogte.

Ook vanuit de hernieuwbare energie sector komt de problematiek van overslagdebieten naar voor. Golfenergie, de blauwe energie van toekomst, is een booming business. Een manier om golfenergie te benutten is via golfenergie-convertoren, gebaseerd op golfoverslag (OGEC). Het principe van een OGEC is gebaseerd op golven die een talud oplopen en overslaan in een reservoir. Hierin wordt het water gestockeerd op een grotere hoogte dan het gemiddeld waterpeil. Vervolgens loopt het water terug naar zee via openingen in de bodem van het reservoir waarin turbines werden geplaatst. Deze turbines wekken de elektriciteit op. OGEC's worden gekenmerkt door een zeer steile helling en een zeer lage vrijboord, wat atypisch is ten opzichte van een klassieke zeewering. Een beter inzicht is dan ook nodig in het overslagdebiet voor structuren met steile helling en lage vrijboord om OGEC's te kunnen optimaliseren.

Eerder onderzoek naar de optimalisatie van OGEC's is verricht door Victor (2012). Dit onderzoek breidt het werk van Victor (2012) verder uit naar situaties zonder vrijboord en verticale wand.

Vooraleerst wordt de gebruikte testopstelling beschreven alsook de methodiek om de gewenste overslagdebieten te meten. Vervolgens worden de data geanalyseerd waarbij wordt gekeken naar de invloed van de relevante parameters voor overslag. De meest bepalende parameters zijn de spectrale golfhoogte  $H_{m0}$ , de piekperiode  $T_p$ , de vrijboord  $R_c$ , de hellingshoek  $\alpha$  van de structuur en de waterdiepte  $h_t$  aan de teen van de structuur. Deze parameters zijn visueel weergegeven in Figuur 1.



Figuur 1: Relevante parameters voor golfoverslag.

De bekomen data worden vergeleken met voorspellingsformules uit de bestaande literatuur. Ook wordt een algemene uitdrukking opgesteld voor structuren met steile helling en lage vrijboord. Als laatste onderdeel van dit onderzoek wordt de reflectie op de beschouwde structuur bestudeerd.

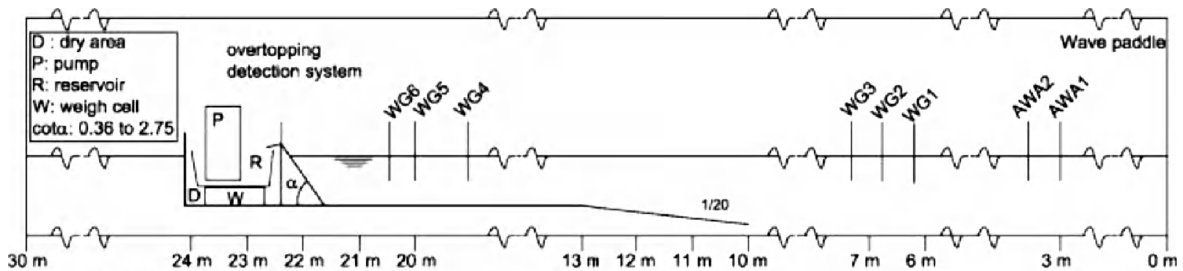
## Testopstelling en dataverwerking

Een testopstelling gelijkaardig aan Victor (2012) wordt ingebouwd in de grote golfgoot van de Universiteit Gent. Het betreft voor dit onderzoek een structuur met gladde, uniforme helling. De opstelling wordt geoptimaliseerd om grote overslagdebieten op te meten. Een horizontaal voorland, aansluitend op een geheld voorland, is aangebracht vóór het schaalmodel van de helling. De

structuur zelf bestaat uit een uitneembare houten helling en een droogzetkuip. De droogzetkuip bevat het reservoir, een pomp en een weegschaal.

Het opmeten van overslagvolumes gebeurt aan de hand van de variabele massa van een reservoir. Deze techniek heeft enkele voordelen ten opzichte van het meten via drukveranderingen of waterstandwijziging. De gebruikte techniek is minder vatbaar voor oscillaties en is minder onderhevig aan de impact van de overslagvolumes in het reservoir. Een nauwkeurigheid van overslagdebiet van 0.0016 l/m/s kan worden bereikt.

Een schematische voorstelling van de gebruikte testopstelling en plaatsing van de apparatuur is weergegeven in Figuur 2.



Figuur 2: Definitieschets van de testopstelling.

Om een realistische karakterisatie van golven in de Noordzee te bekomen, worden onregelmatige golven volgens een JONSWAP spectrum met  $\gamma = 3.3$  gegenereerd. Op basis van de signalen van de golfhoogtemeters worden in WaveLab™ de invallende en reflecterende golfparameters bepaald. Het signaal van de weegschaal en het overslagdetectiesysteem worden geanalyseerd met behulp van een Matlab®-script om het gemiddelde overslagdebiet te bekomen.

De testcondities voor dit onderzoek bestaan uit een variatie van acht hellingshoeken  $\alpha$  gaande van 25° tot 90° en zes vrijboorden  $R_c$  tussen 0 en 7 cm. Voor de golfcondities wordt beroep gedaan op Victor (2012) die zich baseert op frequent voorkomende golfcondities in de Noordzee nabij Denemarken waar OGEC prototypes werden getest. Deze testcondities leveren enkel niet-brekende golven met brekerparameter  $\xi_{m-1,0} > 2$ . Een overzicht van de testcondities is weergegeven in Figuur 3.

<b>cot <math>\alpha</math> [-]:</b>	0.00, 0.09, 0.18, 0.27, 0.58, 1.00, 1.43, 2.14				
<b><math>R_c</math> [-]:</b>	0.000, 0.005, 0.010, 0.020, 0.045, 0.070				
<b><math>H_s</math> [m]</b>	<b><math>T_p</math> [s]</b>				
	1.022	1.278	1.534	1.789	2.045
0.020	X				
0.033	X	X			
0.067	X	X	X		
0.100		X	X	X	
0.133			X	X	X
0.167				X	X
0.185					X

Figuur 3: Testcondities van de nieuwe UG13 dataset.

### Data-analyse

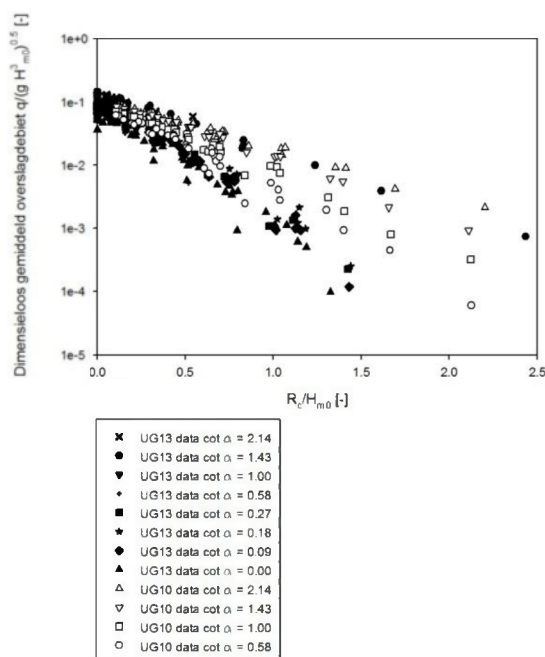
De data-analyse wordt behandeld in drie delen. Vooraleerst wordt het algemene geval van steile hellingen met helling  $0 \leq \cot \alpha \leq 2.14$  en relatieve vrijboord  $0 \leq R_c/H_{m0} \leq 2$  beschouwd. Vervolgens wordt dieper ingegaan op de randgevallen zonder vrijboord ( $R_c = 0$ ) en verticale wand ( $\cot \alpha = 0$ ). Tot slot wordt de invloed besproken van de relevante parameters gevolgd door het opstellen van een nieuwe formule.

#### *Algemeen geval met positieve vrijboord*

De data verkregen in dit onderzoek worden verder als de UG13 dataset aangeduid. De UG13 dataset wordt voorgesteld in Figuur 4.

De invloed van de parameters, behandeld door Victor (2012), is gelijkaardig voor zeer lage vrijboord  $0 \leq R_c/H_{m0} \leq 0.1$  en zeer steile hellingen  $0 \leq \cot \alpha \leq 0.27$ . Met stijgende hellingshoek  $\alpha$  wordt een afname van het dimensieloos gemiddeld overslagdebiet waargenomen. Voor een toenemende relatieve vrijboord  $R_c/H_{m0}$  is eveneens een afname van  $q/(gH_{m0}^3)^{0.5}$  merkbaar. De invloed van de helling op het dimensieloos gemiddeld overslagdebiet is het sterkst voor  $0.27 < \cot \alpha \leq 2.14$  en verdwijnt voor  $\cot \alpha \leq 0.2$ . De spreiding van  $q/(gH_{m0}^3)^{0.5}$  wordt significant voor een relatieve vrijboord groter dan 0.8.

De golfperiode  $T_p$  en golfsteilheid  $s_0$  blijken geen significant effect te hebben op het gemiddeld overslagdebiet. Hetzelfde wordt bemerkt voor de brekerparameter  $\xi_{m-1,0} > 20$ , hoewel een zeker maximaal overslagdebiet bereikt wordt voor  $\xi_{m-1,0}$  lager dan 20.



Figuur 4: Dimensieloos gemiddeld overslagdebiet  $q/(gH_{m0}^3)^{0.5}$  in functie van  $R_c/H_{m0}$  voor alle UG13 data samen met de data uit de UG10 dataset van Victor (2012).

In vergelijking met de bestaande literatuur, blijkt de formule van EurOtop (2007) [2] voor niet-brekende golven geen goede overeenkomst te geven voor steilere hellingen met  $\cot \alpha \leq 1$  en lage vrijboord met  $R_c/H_{m0} \leq 0.5$ . Het dimensieloos gemiddeld overslagdebiet wordt hierbij overschat door de formule van EurOtop (2007). De formules van Victor (2012) geven een goede voorspelling van het gemiddeld overslagdebiet hoewel ze voor zeer steile hellingen een onderschatting geven.

Een nieuwe uitdrukking is afgeleid op basis van de vorm in vergelijking (1), naar het idee van Battjes (1974). Het beste resultaat wordt bekomen voor een constante waarde voor de exponent C. Deze waarde voor de exponent C wordt gelijkgesteld aan 1.3, zoals voorgesteld door van der Meer en Bruce (2013). De coëfficiënten A en B worden respectievelijk uitgedrukt in een lineair en kwadratisch verband met de helling  $\cot \alpha$ . Deze verbanden zijn de best passende curven die door de coëfficiënten A en B konden gefit worden via regressieanalyse. De  $R^2$ -waarden voor de uitdrukkingen van A en B zijn respectievelijk 0.986 en 0.975 welke dus een zeer goed verband weergeven.

De uitdrukkingen voor beide coëfficiënten worden weergegeven in de vergelijkingen (2) en (3), respectievelijk. De formule is geldig voor  $0 \leq \cot \alpha \leq 2.14$  en  $0 \leq R_c/H_{m0} \leq 2$ . De *rmse*-waarde voor de nieuwe uitdrukking is 0.073. Dit houdt in dat vergelijking (1) een zeer nauwkeurige schatting geeft van het gemiddelde overslagdebiet  $q/(gH_{m0}^3)^{0.5}$ .

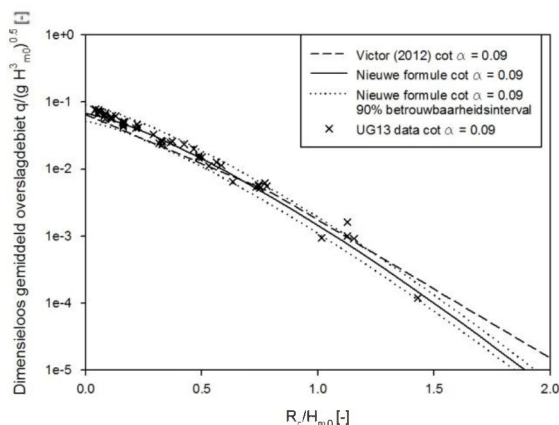
$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = A \exp \left[ - \left( B \frac{R_c}{H_{m0}} \right)^C \right] \quad (1)$$

$$A = 0.016 \cot \alpha + 0.067 \quad (2)$$

$$B = 0.31 \cot^2 \alpha - 1.37 \cot \alpha + 2.94 \quad (3)$$

$$C = 1.3 \quad (4)$$

In Figuur 5 wordt een specifieke helling met  $\cot \alpha = 0.09$  weergegeven in combinatie met de vergelijking (1) en de toepasbare formule van Victor (2012). Het blijkt dat op een enkel datapunt na, alle UG13 data gesitueerd zijn binnen het 90% betrouwbaarheidsinterval van vergelijking (1). Ook de onderschatting door Victor (2012) voor lage relatieve vrijboorden is te merken in Figuur 5.



Figuur 5: Dimensieloos gemiddeld overslagdebiet  $q/(gH_{m0}^3)^{0.5}$  in functie van de relatieve vrijboord  $R_c/H_{m0}$  voor UG13 data met  $\cot \alpha = 0.09$ . De nieuwe vergelijking (1) (en 90% betrouwbaarheidsinterval) en Victor (2012) [1] zijn bijgevoegd.

### Geval zonder vrijboord

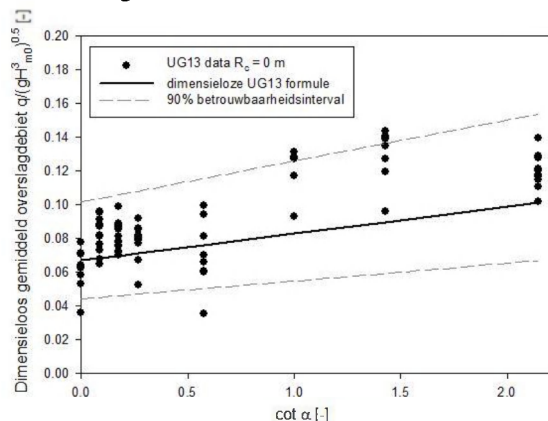
Het randgeval van overslag zonder vrijboord wordt eveneens apart behandeld. De relevante parameters blijken de helling  $\cot \alpha$  en in minder mate de golfhoogte  $H_{m0}$  te zijn. Een toenemende  $H_{m0}$  en  $\cot \alpha$  zorgen voor een stijging in het dimensieloos gemiddeld overslagdebiet  $q/(gH_{m0}^3)^{0.5}$ .

Wanneer de vergelijking gemaakt wordt tussen de UG13 data zonder vrijboord en de bestaande literatuur, blijkt dat de vergelijking volgens Schüttrumpf (2001) [4] de omgekeerde trend weergeeft als de UG13 data wanneer  $q/(gH_{m0}^3)^{0.5}$  in functie van  $\xi_{m-1,0}$  wordt beschouwd. Smid et al. (2001) [5] neemt een constante waarde van 0.062 aan voor  $q/(gH_{m0}^3)^{0.5}$  in het specifieke geval van een verticale wand zonder vrijboord. Dit komt goed overeen met de UG13 data voor een verticale wand. Er wordt nochtans spreiding van de UG13 data opgemerkt rond de constante waarde van 0.062.

De voorgestelde experimentele formule voor het geval zonder vrijboord wordt bekomen door in de algemene vergelijking (1) de relatieve vrijboord  $R_c/H_{m0} = 0$  in te vullen.

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.016 \cot \alpha + 0.067 \quad (5)$$

De uitdrukking van vergelijking (5) blijkt vrij accuraat te zijn met een *rmse*-waarde van 0.11. In Figuur 6 is vergelijking (5) weergegeven ten opzichte van de UG13 datapunten zonder vrijboord. Het 90% betrouwbaarheidsinterval is toegevoegd en geeft een beeld van de bereikte nauwkeurigheid.



Figuur 6: Dimensieloos gemiddeld overslagdebiet  $q/(gH_{m0}^3)^{0.5}$  in functie van de helling  $\cot \alpha$  voor UG13 data met vrijboord gelijk aan nul. De vergelijking (5) en het 90% betrouwbaarheidsinterval zijn bijgevoegd.

### Geval met verticale wand

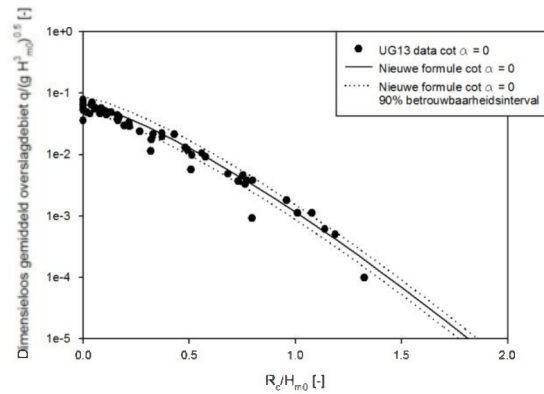
Een ander randgeval is de situatie van een verticale wand. De invloed van de relevante parameters is dezelfde als voor het algemene geval met positieve vrijboord.

In vergelijking met de literatuur voor  $\cot \alpha = 0$  blijkt dat de uitdrukkingen volgens EurOtop (2007) en Allsop *et al.* (1995)  $q/(gH_{m0}^3)^{0.5}$  overschatten voor grote relatieve vrijboorden en onderschat voor kleine relatieve vrijboorden. Franco *et al.* (1994) overschat het dimensieloze gemiddeld overslagdebiet voor de volledige range aan geteste vrijboorden. Enkel de formule van Victor (2012) lijkt de UG13 data goed te voorspellen.

Weerom wordt de algemene vergelijking (1) gebruikt om  $q/(gH_{m0}^3)^{0.5}$  te voorspellen voor  $\cot \alpha = 0$ . Een voldoende nauwkeurige vergelijking (6) wordt bekomen.

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.067 \exp \left[ - \left( 2.94 \frac{R_c}{H_{m0}} \right)^{1.3} \right] \quad (6)$$

In Figuur 7 zijn de UG13 data met verticale wand voorgesteld. De nieuwe vergelijking (6) en het 90% betrouwbaarheidsinterval zijn bijgevoegd. Uit Figuur 7 blijkt dat vergelijking (6) de UG13 data zeer goed benadert. Slechts enkele data liggen buiten het 90% betrouwbaarheidsinterval. Deze datapunten zijn uitschieters van de UG13 dataset ten gevolge van de grenzen van de testopstelling. Deze uitschieters komen immers overeen met laagst geteste golfhoogten en overslagdebieten die minder nauwkeurig kunnen gemeten worden met de UG13 testopstelling.



Figuur 7: Dimensieloos gemiddeld overslagdebiet  $q/(gH_{m0}^3)^{0.5}$  in functie van de relatieve vrijboord  $R_c/H_{m0}$  voor UG13 data met  $\cot \alpha = 0$ . De nieuwe vergelijking (6) en het 90% betrouwbaarheidsinterval zijn bijgevoegd.

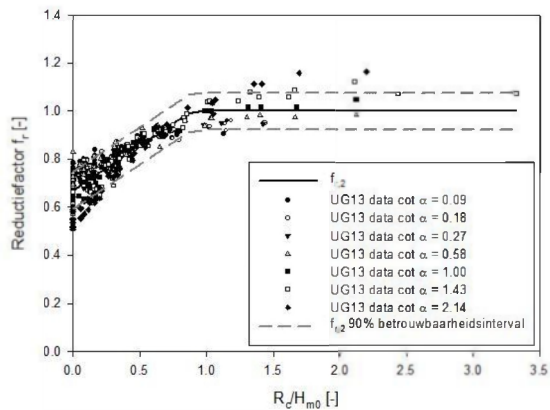
### Reflectie

Tot slot wordt het fenomeen van reflectie behandeld. De grootste invloed op de reflectiecoëfficiënt  $K_r$  wordt uitgeoefend door de brekerparameter  $\xi_{m-1,0}$ , welke een stijgende trend vertoont in functie van  $K_r$ .

Wanneer de UG13 data worden vergeleken met van der Meer en Zanuttigh (2008) en Seelig en Ahrens (1981), wordt een duidelijke overschatting van  $K_r$  door de bestaande formules opgemerkt. Victor (2012) geeft de beste benadering door Seelig en Ahrens (1981) te combineren met de reductiefactor  $f_{r,2}$ , gegeven door vergelijking (8), tot de vergelijking (7). De betrouwbaarheid is voldoende accuraat met een *rmse*-waarde van 0.047.

$$K_r = f_{r,2} \frac{\xi_{m-1,0}^2}{\xi_{m-1,0}^2 + 5} \quad (7)$$

$$f_{r,2} = \begin{cases} 0.37 \frac{R_c}{H_{m0}} + 0.67, & -1.0 \leq \frac{R_c}{H_{m0}} < 0.9 \\ 1, & \frac{R_c}{H_{m0}} \geq 0.9 \end{cases} \quad (8)$$



Figuur 8: Reductiefactor  $f_r$  als functie van de relatieve vrijboord  $R_c/H_{m0}$  voor de UG13 test data met specifieke helling  $\cot \alpha$ . De reductiefactor  $f_{r,2}$  en het 90% betrouwbaarheidsinterval zijn bijgevoegd.

Verder onderzoek is aangewezen voor de bepaling van de reductiefactor  $f_{r,2}$ . De factor  $f_r$  wordt voorgesteld in Figuur 8. Er wordt een meer gekromde curve bemerkt in plaats van de vereenvoudiging tot twee rechten. Deze curven vertonen een afhankelijkheid van de helling  $\cot \alpha$ . Tevens zou het limietgeval van een verticale wand moeten vervat zijn in de uitdrukking voor de reflectiecoëfficiënt  $K_r$  wat in de huidige vorm niet mogelijk is door het oneindig karakter van de brekerparameter  $\xi_{m-1,0}$  voor een verticale wand.

### Conclusie

Dit onderzoek is gericht op de bepaling van het gemiddeld overslagdebiet voor structuren met steile helling, inclusief de randgevallen zonder vrijboord en verticale wand. Een algemene formule werd afgeleid voor het volledige bereik van vrijboorden en hellingen.

Een aanbeveling wordt gemaakt voor verder onderzoek. Er werden enkel niet-brekende golven getest in de UG13 dataset. Data voor brekende golven kunnen afwijkend gedrag vertonen van de voorgestelde formule. Tevens heeft de gebruikte testopstelling zijn limieten, vooral betreffende de maximaal mogelijke golfhoogte. Aanpassingen aan de testopstelling zijn nodig om hogere golfhoogten te kunnen opmeten. De formule voor de reflectiecoëfficiënt  $K_r$  kan eveneens nog aangepast worden om ook het limietgeval van een verticale wand te omvatten. Tenslotte wordt opgemerkt dat de focus van dit onderzoek het gemiddelde overslagdebiet is maar dat ook individuele overslagvolumes werden geregistreerd tijdens de experimentele testen. Verder onderzoek is dan ook aangewezen om de verdeling van individuele overslagvolumes te bestuderen voor structuren met zeer steile helling en zeer lage vrijboord.

### Dankbetuigingen

De auteurs willen graag Prof. dr. ir. P. Troch en Dr. ir. L. Victor bedanken voor hun hulp en verrijkende informatie en de technici van de Afdeling Weg- en Waterbouwkunde van de Universiteit Gent voor hun technische ondersteuning.

### Referenties

- Allsop W., P. Besley en L. Madurini. Overtopping performance of vertical and composite breakwaters, seawalls and low reflection alternatives, Final MCS Project Workshop, Alderney, 1995.
- Battjes J.A. Computation of set-up, longshore currents, run-up and overtopping due to wind-generated waves, Technical University Delft, 1974.
- Franco L., M. de Gerloni en J.W. van der Meer. Wave overtopping on vertical and composite breakwaters, Coastal Engineering, 1994.
- Pullen T., N. Allsop, T. Bruce, A. Kortenhaus, H. Schüttrumpf en J.W. van der Meer. EurOtop, Technical report, EA Environment Agency, UK and ENW Expertise Netwerk Waterkeren, NL and KFKI Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, DE, 2007.
- Schüttrumpf H. Wellenüberlauf-strömung bei Seedeichen Experimentelle und Theoretische Untersuchungen, Technical University of Braunschweig, 2001.
- Seelig W. en J.P. Ahrens. Estimation of wave reflection and energy dissipation coefficients for beaches, revetments and breakwaters, CERC Technical paper 81-1, Fort Belvoir, U.S.A.C.E., Vicksburg, MS, 1981.

- Smid R. en H. Schüttrumpf en J. Möller. Untersuchungen zur Ermittlung der mittleren Wellenüberlauffrate an einer senkrechten Wand und einer 1:1.5 geneigten Böschung für Versuche mit und ohne Freibord (Report on small scale tests, in German), Leichtweiß Institute for Hydraulics, Technical University of Braunschweig, 2001.
- van der Meer J.W. en T. Bruce. New Physical Insights and Design Formulae on Wave Overtopping at Sloping and Vertical Structures, Journal of Waterway, Port and Ocean Engineering, 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000221, 2013
- Victor L. Optimization of the Hydrodynamic Performance of Overtopping Wave Energy Converters: Experimental Study of Optimal Geometry and Probability Distribution of Overtopping Volumes, Ghent University, 2012.
- Zanuttigh B. en J.W. van der Meer. Wave reflection from coastal structures in design conditions. Coastal Engineering, Elsevier, 2008.