



Studiedag

Beheer van kust en zee: beleidsondersteunend onderzoek in Vlaanderen

9 november 2001
Thermae Palace Oostende

VLIZ Special Publication 4
2001

GOLFOPLOOP OP GEHELDE GESLOTEN EN OPEN ZEEWERINGEN

Julien De Rouck en Björn Van de Walle

Universiteit Gent (RUG), Vakgroep Civiele Techniek, Afdeling Weg- en Waterbouwkunde, Campus Ardoyen, Technologiepark 9, B-9052 Gent

In het kader van het Europees onderzoeksproject OPTICREST ('The optimisation of crest level design of sloping coastal structures through prototype monitoring and modelling' - MAS3-CT97-0116) werden in Vlaanderen zowel metingen op ware grootte (Zeebrugge) als laboratoriummetingen (Borgerhout) uitgevoerd. Zowel de Afdeling Waterwegen Kust als de Afdeling Waterbouwkundig Laboratorium en Hydrologisch Onderzoek binnen de Administratie Waterwegen en Zeewezen van het Departement Leefmilieu en Infrastructuur van de Vlaamse Gemeenschap waren actief betrokken bij het project. De Afdeling Weg- en Waterbouwkunde van de Vakgroep Civiele Techniek van de Universiteit Gent was coördinator van het drie jaar durend project dat van start ging op 1 maart 1998 en eindigde op 28 februari 2001. De Afdeling Waterwegen Kust stond in voor het uitvoeren van de metingen van de golfkarakteristieken, de golfoploop (E: wave run-up) en de golfoverslag (E: wave overtopping) over de stortsteengolfbreker in Zeebrugge. In het Waterbouwkundig Laboratorium van Borgerhout zijn modelproeven uitgevoerd. Deze modelproeven bestonden uit zowel het simuleren van opgemeten stormen, als het uitvoeren van parametrische testen.

De doelstellingen van het OPTICREST-project waren:

- het opstellen van ontwerpregels voor het bepalen van de kruinhoogte van kuststructuren, gebaseerd op prototypemetingen en ondersteund door modelproeven
- het verifiëren en kalibreren van schaalmodellen met prototypemetingen van golfoploop
- het kalibreren van numerieke modellen met prototypemetingen en modelproeven betreffende golfoploop
- bestaande golfoploopmeettoestellen verbeteren (inclusief software)

Het project steunde op drie grote pijlers: prototypemetingen, modelproeven en numerieke modellering.

Tien partners uit zeven Europese landen waren betrokken bij het project. Het totale budget bedroeg 1.401 miljoen EUR, waarvan 1 miljoen EUR gefinancierd werd door de Europese Gemeenschap.

In het kader van dit Europees project werden prototypemetingen uitgevoerd op de zeedijk in Petten (Nederland) en op een golfbreker te Zeebrugge (België).

In Petten, gesitueerd langsheen het centraal deel van de westkust van Nederland beschermt een zeedijk de achterliggende gebieden tegen de zee. De voet van de dijk is bekleed met basaltblokken en bovenaan is deze beschermd met asfalt en asfaltbeton. Het voorland is relatief ondiep en wordt gekenmerkt door een zandbank voor de kust. Dit voorland heeft een grote invloed op de voortplanting van de golven naar en de golfoploop op de dijk. Het dijkprofiel bevat tevens een berm. Een uitgebreid meetnet van palen in zee met druksensoren, golfhoogtemeters, golfmeetboeien,... voorziet RIKZ (Rijkswaterstaat) met data over zeegolven ter hoogte van de Pettemer meetraai. Een golfoploopbaken is ingewerkt in het bovenste gedeelte van de dijk.

De golfbreker in Zeebrugge is een conventionele stortsteengolfbreker waarvan de deklaag bestaat uit betonblokken, zgn. gegroefde kubussen (elk blok weegt 25 ton). De meetsectie bevindt zich op het noordelijk gedeelte van de westelijke golfbreker welke de haven

beschermt tegen de golfaanval. Op de golfbreker is een meetsteiger met een totale lengte van 60 m uitgebouwd in zee. Deze steunt aan de zeewaartse zijde op een stalen paal ($\phi = 1.80$ m) en aan de landwaartse zijde op 2 betonnen kolommen. Op deze meetsteiger zijn volgende meetinstrumenten aangebracht:

- een infrarood golfhoogtemeter ter bepaling van de golfkarakteristieken aan de voet van de golfbreker
- drie anemometers ter bepaling van de windsnelheid en -richting.

Op de stalen paal welke de meetbrug ondersteunt zijn twee druksensoren aangebracht waarmee het gemiddeld waterpeil wordt opgemeten. Voor de golfbreker liggen twee golfmeetboeien (één op 150 m en één op 215 m) waarmee de invallende golven worden opgemeten.

Golfoploop wordt gemeten met twee verschillende meetsystemen. Een eerste meetinstrument (het zogenaamde 'spiderweb'-systeem) bestaat uit zeven verticale stappenbakens welke aangebracht werden tussen de meetbrug en de deklaag. Aan hun onderzijde zijn deze bakens bevestigd aan de betonblokken en aan hun bovenzijde aan de meetbrug d.m.v. een stijve veer. Uit deze metingen kunnen m.b.v. een computeralgoritme de golfoploophoogtes berekend worden. Een tweede meetsysteem bestaat uit vijf golfoploopbakens welke bovenop de blokken van de deklaag zijn geplaatst. Deze bakens geven direct een beeld van de golfoploophoogte.

In een dwarsdoorsnede, ca. 150 m voorbij de meetsteiger, is ook een overtoppingsbak geconstrueerd. Deze overtoppingsbak is een betonnen kuip ($\cong 28 \text{ m}^3$) waarin het water dat over de kruinblokken slaat wordt opgevangen. D.m.v. een samengestelde overlaat wordt de overtoppingsbak langs één zijkant continu geledigd. Door de continue registratie van de waterhoogte in de tank en gebruikmakend van de calibratieformule van de overlaat kan zowel het gemiddeld golfoverslagdebiet als de watervolumes van de individuele overslaande golven bepaald worden.

Gedurende de afgelopen 7 jaar zijn er in Zeebrugge 13 interessante stormen opgemeten. Een storm is pas interessant wanneer de golven uit het noordwesten komen zodat de golven de golfbreker quasi loodrecht aanvallen. Dit komt gemiddeld overeen met windkracht > 7 Beaufort uit het noordwesten. De significante golfhoogtes H_{mo} (d.i. het gemiddelde van de 33% hoogste golven binnen een tijdreeks) varieerden tussen 2.40 m en 3.13 m, de gemiddelde golfperiode $T_{0,1}$ bedroeg ongeveer 6.53 s en de gemiddelde piek golfperiode T_p (d.i. de periode waar het spectrum een maximum bezit) bedroeg ongeveer 7.93 s.

Golfoploop R_u is gedefinieerd als het verschil tussen de golfoploophoogte en de gemiddelde waterstand (E: Still Water Level (SWL)). Golfoploop wordt bijvoorbeeld gekenmerkt door $R_{u_{2\%}}$. $R_{u_{2\%}}$ is de golfoploop die door 2% van de oplopende golven wordt overschreden. Conventioneel wordt veelal met de dimensieloze $R_{u_{2\%}}/H_{mo}$ waarde gewerkt. Ook andere overschrijdingspercentages x , andere dan 2%, worden gebruikt en worden aangeduid door $R_{u_{x\%}}/H_{mo}$.

Drie laboratoria hebben de golfbreker van Zeebrugge gemodelleerd: het Waterbouwkundig Laboratorium te Borgerhout (FH), de Afdeling Civiele Techniek van de Universiteit van Aalborg (Denemarken) (AAU) en het Laboratorium van Havens en Kusten van de Polytechnische Universiteit van Valencia (Spanje) (UPV). FH en UPV modelleerden de golfbreker van Zeebrugge tweedimensionaal op schaal 1:30. AAU modelleerde de golfbreker driedimensionaal op schaal 1:40. Het kernmateriaal van de golfbreker werd zodanig verschaald zodat de hydraulische gradiënten dezelfde waren in model en in prototype (op ware grootte). Golfoploop werd in alle laboratoria gemeten met een laboversie

van de stappenbaak, ontworpen en geconstrueerd aan de Afdeling Weg- en Waterbouwkunde van de Gentse Universiteit. Het unieke aan deze stappenbaak is dat de naalden van de baak zeer nauwkeurig (tot op 2 mm) het grillig verloop van de helling van een golfbreker kunnen volgen. Op die manier kan golfoploop dan ook veel nauwkeuriger opgemeten worden.

De algemene waarde, opgemeten bij hoogwater, voor $Ru_{2\%}/H_{mo}$ in prototype is 1.77 (voor $\xi_{om} = 3.59$ waarbij ξ_{om} het Iribarren getal voorstelt en het brekertype (oplopende breker) kenmerkt). Zowel het 'spiderweb'-systeem als de oplopbakens detecteerden een zelfde waarde voor de golfoploop. Deze waarde werd verkregen door analyse van 9 stormen, elk 4 opeenvolgende tijdreeksen van 30 minuten binnen een twee uur durend tijdsvenster rond hoog water in rekening brengend. Gedurende deze 2 uur durende periodes op hoogtij is het gemiddeld waterpeil nagenoeg constant.

Tabel 1. Resultaten van prototypemetingen en laboratoriummetingen, opgemeten bij hoogtij

	Lengte van tijdreeks	$\frac{Ru_{2\%}}{H_{mo}}$ [-] prototype- metingen	ξ_{om} [-]	$\frac{Ru_{2\%}}{H_{mo}}$ [-] FH	$\frac{Ru_{2\%}}{H_{mo}}$ [-] UPV	$\frac{Ru_{2\%}}{H_{mo}}$ [-] AAU
29 augustus 1995	2h15min	1.66	3.76	1.42		1.91
19 januari 1998	2h30 min	1.73	3.70	1.53		1.76
20 januari 1998	2h	1.79	3.64	1.40		1.89
7 februari 1999	2h	1.73	3.55	1.39		1.71
6 november 1999	2h	1.82	3.45	1.44	1.81	1.41
6-7 november 1999	2h	1.84	3.64	1.57	1.76	1.29

Een ander merkwaardig resultaat is dat de waarde van $Ru_{2\%}/H_{mo}$ stijgt naarmate het waterpeil daalt. Bovendien zijn tijdens vloed de $Ru_{x\%}/H_{mo}$ waarden groter dan tijdens eb. Hierbij wordt de invloed van de stromingen voor de kust als mogelijke oorzaak beschouwd. Tevens wordt gemeend dat als gevolg van zettingen van de deklaagelementen door de jaren heen de elementen in het onderste gedeelte van de deklaag dichter zijn gepakt dan bovenaan waardoor bij lager waterpeil een hogere golfoploop wordt opgemeten.

Golfafloop (E: wave run-down) werd ook opgemeten m.b.v. het 'spiderweb'-systeem. De waarde van $Rd_{2\%}/H_{mo}$ bedroeg -0.86.

Wanneer de meetresultaten van de meetcampagnes te Zeebrugge en de laboratoriumresultaten worden vergeleken komen we tot enkele merkwaardige vaststellingen (Tabel 1). Alle waarden in Tabel 1 zijn geldig bij hoog water. De laboratoriumresultaten komen over het algemeen niet goed overeen met de prototype meetresultaten, dit ondanks de zeer natuurgetrouwe opbouw van het model en de deklaag in het bijzonder (de positie van de deklaagelementen in de buitenste laag van het model is identiek aan de positie van de deklaagelementen t.h.v. de meetsteiger op de golfbreker te Zeebrugge). De eerste vier

stormen die nagebootst werden in AAU hebben een golfoploopwaarde welke van dezelfde grootteorde is als de waarden bekomen in prototype. De laatste twee waarden liggen veel lager dan de prototypewaarde. Wanneer de opgemeten prototype spectra en de in het labo gegenereerde spectra van de eerste vier stormen op elkaar worden gelegd dan stemmen deze niet goed overeen: in het laboratorium krijgen de laagfrequente golven meer energie toebedeeld. De $Ru_{2\%}/H_{mo}$ waarden bekomen in FH liggen allen veel lager dan de prototypewaarden. De resultaten bekomen in UPV stemmen wel zeer goed overeen met de prototype golfoploopwaarden.

Daar waar in prototype een afhankelijkheid van de $Ru_{2\%}/H_{mo}$ waarde van het waterpeil werd vastgesteld, wordt deze afhankelijkheid tevens slechts in één labo (AAU) waargenomen. Echter, de afhankelijkheid is niet zo uitgesproken als in prototype. De andere labo's vonden nauwelijks invloed van het waterniveau op de golfoploop. In AAU werd een beperkte invloed van stroming evenwijdig met de as van de golfbreker opgemerkt en in UPV werd de invloed van wind op golfoploop onderzocht. Echter, wind heeft slechts een beperkte invloed.

Vergelijking van de resultaten van de prototypemetingen op de golfbreker van Zeebrugge met beschikbare informatie in de wetenschappelijke literatuur leidt tot enkele verrassende conclusies. Een eerste referentie betreft de proefresultaten gerapporteerd door Allsop *et al.* (1985). De formule van Losada & Giménez-Curto (1982) werd hierbij als uitgangspunt genomen. Deze laatste formule werd opgesteld voor proeven met regelmatige golven. Niettemin werd deze gefit op de resultaten van de proeven waarin onregelmatige golven werden gebruikt. De deklaag bestond tevens uit gegroefde kubussen. Een kern was niet aanwezig. De deklaagelementen werden namelijk geplaatst op een laag stortsteen op een geperforeerde stalen plaat. De formule van Allsop *et al.* (1985) geeft een waarde $Ru_{2\%}/H_{mo} = 1.19$ (voor de prototype waarde $\xi_{om} = 3.59$), een waarde welke duidelijk lager is dan de 1.77 opgemeten op prototype in Zeebrugge.

Een tweede referentie betreft de resultaten van de reeks proeven gerapporteerd door Kingston & Murphy (1996) op een schaalmodel van de golfbreker te Zeebrugge. Hierbij werd ook de formule van Losada & Giménez-Curto (1982) op de resultaten gefit en een $Ru_{2\%}/H_{mo}$ waarde 1.12 was het resultaat.

Een derde en vierde referentie zijn de proeven gerapporteerd door van der Meer & Stam (1992) en Ahrens & Heimbaugh (1982). De deklaag beider structuren bestond uit stortsteen waarbij de nominale diameter van de stenen D_{n50} veel kleiner was dan de toegepaste significante golfhoogte H_s . De formule van van der Meer & Stam (1992) duidt een waarde $Ru_{2\%}/H_{mo} = 1.97$ (voor $\xi_{om} = 3.59$) aan (in prototype is $Ru_{2\%}/H_{mo} = 1.77$) en de formule van Ahrens & Heimbaugh (1982) levert een waarde $Ru_{max}/H_{mo} = 2.19$ op, waartegen een prototype waarde $Ru_{max}/H_{mo} = 2.07$ (voor $\xi_{om} = 4.56$) geplaatst wordt. De formules geldig voor stortsteen leunen veel dichter aan bij de prototypemetingen (talud met gegroefde kubussen) dan de formules gepubliceerd voor golfbrekers met een deklaag bestaande uit gegroefde kubussen.

Diepgaand onderzoek betreffende de mogelijke reden(en) waarom golfoploop verschillend is in prototype en in labo wordt voortgezet. Alvast worden reeds enkele mogelijke oorzaken opgesomd: enerzijds zijn er de schaafeffecten die onmiskenbaar optreden wanneer modelproeven worden uitgevoerd (al was het maar omdat de viscositeit van water niet verschaald kan worden) en anderzijds zijn er de modefeffecten zoals:

- het niet exact kunnen reproduceren van opgemeten golfspectra
- de invloed van wind

- de invloed van stromingen
- de invloed van de plaatsing van de blokken (een kleine verandering in plaatsingspatroon heeft een grote verandering in $Ru_{2\%}$ waarde tot gevolg)
- de porositeit en de doorlatendheid van de deklaag

Met het einde van het OPTICREST project is het einde van het onderzoek betreffende golfploop nog lang niet in zicht. Het is een complexe materie welke één van de vele onderzoeksdomeinen is van de Afdeling Weg- en Waterbouwkunde van de Gentse Universiteit. Tevens is gebleken dat golfploop niet hét fysisch verschijnsel is waarop de bepaling van de kruinhoogte van een golfbreker moet gebaseerd zijn. Golfoverslag is hiervoor een meer aangewezen fysisch verschijnsel. Echter, dit moet nog onderzocht worden. Golfoverslag is het onderwerp van een nieuw Europees project CLASH ('Crest Level Assessment of coastal Structures by full scale monitoring, neural network prediction and Hazard analysis on permissible wave overtopping'). Dertien partners uit 7 Europese landen zullen golfoverslag bestuderen a.d.h.v. prototypemetingen op 4 sites, modelproeven, numerieke modellering en het ontwikkelen van een neurale netwerk.

De bekomen resultaten zijn verkregen via het OPTICREST project. De Europese Unie en de Vlaamse Gemeenschap worden dan ook hartelijk bedankt voor hun financiële steun.

Literatuur

- Ahrens J.P. and M.S. Heimbaugh. 1988. Irregular wave runup on riprap revetments. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 114(4).
- Allsop N.W.H., P.J. Hawkes, F.A. Jackson, and L. Franco. 1985. Wave run-up on steep slopes - model tests under random waves. Report SR2.
- Burcharth H.F., Z. Liu, and P. Troch. 1999. Scaling of core material in rubble mound breakwater model tests. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries (COPEDEC V)*, Cape Town, South Africa.
- De Rouck J., C. Boone, and B. Van de Walle B. 2001. OPTICREST – Detailed scientific and technical report (FINAL), MAS03/1131, Dept. Of Civil Eng., Ghent University, Belgium.
- De Rouck J., P. Troch, B. Van de Walle, L. Van Damme, and J. Bal. 2000. The optimisation of crest level design of sloping coastal structures through prototype monitoring and modelling. *EurOCEAN 2000 Conference*, August-September 2000, Hamburg (Germany).
- Kingston K. and J. Murphy. 1996. Full scale dynamic load monitoring of rubble mound breakwaters, MAS2-CT92-0023, Thematic report 'B. Wave run-up / Run-down'.
- Losada M.A. and L.A. Giménez-Curto. 1981. Flow characteristics on rough, permeable slopes under wave action. *Coastal Engineering* 4:187-206.
- Troch P., J. De Rouck, and L. Van Damme. 1998. Instrumentation and prototype measurements at the Zeebrugge rubble mound breakwater. *Coastal Engineering* 35:141-166.
- Troch P., M. De Somer, J. De Rouck, L. Van Damme, D. Vermeir, J.P. Martens, and C. Van Hove. 1996. Full scale measurements of wave attenuation inside a rubble mound breakwater. p.1916-1929. In: *Proceedings 25th ICCE*, 2-6 September 1996, Orlando (USA).
- van der Meer J.W., Stam C.-J.M. 1992. Wave run-up on smooth and rock slopes of coastal structures. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* 118(5).