

Ontwikkeling van een point absorber golfenergieconverter: realisatie van power take off, optimalisatie van geometrie en installatietechnieken

Van de Sijpe Annelies

Afdeling Weg- en Waterbouwkunde, Vakgroep Civiele Techniek, Universiteit Gent
E-mail: VandeSijpe@UGent.be

In het kader van het project WECwakes (Stratigaki *et al.*, 2011) binnen het Europese HYDRALAB IV programma zijn grootschalige experimenten gepland met golfenergieconvertorenparken (GEC-parken), bestaande uit point absorbers die enkel in de verticale richting kunnen bewegen, om effecten binnen en achter de parken te onderzoeken. Een schaalmodel van een point absorber GEC is ontwikkeld en geoptimaliseerd aan de hand van experimenten in een golfgoot en golfbak. De stabiliteit en stijfheid van de voet en as, verschillende installatietechnieken, de invloed van de meetinstrumenten, de karakteristieken van het power take-off-systeem (PTO-systeem) en de interne wrijving zijn eerst in detail bestudeerd. Na controle van deze eigenschappen zijn de ongedempte en gedempte boeibeweging, de reflectiecoëfficiënt van het model en zijn invloed op het golfklimaat onderzocht.

Inleiding

De ontwikkeling van hernieuwbare energiebronnen is noodzakelijk om tegemoet te komen aan de stijgende energievraag, aangezien de reserves aan fossiele brandstoffen dalen. Het winnen van energie uit oceaangolven is één domein binnen deze context, dat aan belangstelling wint. Er zijn veel verschillende concepten van golfenergieconvertoren (GEC's) ontwikkeld, zoals de point absorber, oscillerende waterkolommen, overslaande structuren, enz. Opdat het geleverde vermogen op één plaats aanzienlijk zou zijn, wordt een groot aantal GEC's in parken op zee ingeplant.

Bij de schikking van de convertoren binnen een park wordt rekening gehouden met enerzijds het effect van één GEC op de vermogensabsorptie van een nabijgelegen apparaat ("near-field" effecten) en anderzijds met de invloed van de afgenomen golfhoogte in het zog achter een park op andere activiteiten op zee of aan de kustlijn ("far-field" effecten). Er is al veel numeriek onderzoek uitgevoerd rond GEC-parken (b.v. Troch *et al.*, 2010; Stratigaki *et al.*, 2011; Child, 2011; Borgarino *et al.*, 2012), maar het aantal grootschalige experimentele studies is beperkt.

Binnen het Europese HYDRALAB IV programma is het project WECwakes (Stratigaki *et al.*, 2011) gelanceerd. Fysische proeven met GEC-parken bestaande uit een groot aantal point absorbers zullen uitgevoerd worden voor verschillende lay-outs en tussenafstanden van de GEC's. Een point absorber is een oscillerend apparaat dat door zijn beweging golven genereert, die interfereren met de invallende golven. Dit type GEC is gekarakteriseerd door horizontale dimensies die klein zijn in vergelijking met de invallende golfhoogte.

Het is de bedoeling om de experimentele resultaten te gebruiken om numerieke methoden te valideren en verder te ontwikkelen en om de geometrische lay-out van GEC-parken te optimaliseren voor reële toepassingen. Een schaalmodel van een point absorber GEC moet ontwikkeld en geoptimaliseerd worden, zodat het gedrag in overeenstemming is met de werkelijke impact van een GEC op het golfklimaat. Het model is eenvoudig wat betreft zijn structuur en operationeel gedrag waardoor het gemakkelijk een groot aantal kan geproduceerd worden.

Schaalmodel

Geometrie en materialen

Het principe van het ontwikkeld schaalmodel is geschetst in Fig. 1. De point absorber heeft een hemisferisch bodemstuk, gemaakt uit polyurethaan dat gestort is in een mal, en een cilindrisch geprefabriceerd bovenstuk uit PVC met een deksel uit hetzelfde materiaal. Zijn totale hoogte bedraagt 60cm. De diepgang van 31.5cm is gelijk aan de diameter van de point absorber GEC, wat overeenstemt met een massa van 20.545kg. De GEC kan enkel in de verticale richting bewegen langsheen een vierkante, holle as uit inox, die onderaan verankerd is in een betonnen voet van 15cm dik. Deze vaste as wordt doorheen een lichtjes grotere aslager binnenin de boei geplaatst, die over de volledige hoogte doorloopt om waterinfiltratie te vermijden. Dankzij de vierkante vorm roteert de boei niet rondom de as. De beweging in het horizontale vlak, te wijten aan de marge tussen de as en de lager, wordt verhinderd door twee polytetrafluorethyleen (PTFE) lagers onder- en bovenaan in de boei. Er wordt een smalle marge van 0.25mm voorzien tussen de as en de blokjes

om bijkomende interne wrijving te vermijden. Dit wordt versterkt door de lage wrijvingscoëfficiënt van de staal-PTFE combinatie (Stratigaki & Troch, 2012; Stratigaki *et al.*, 2012).

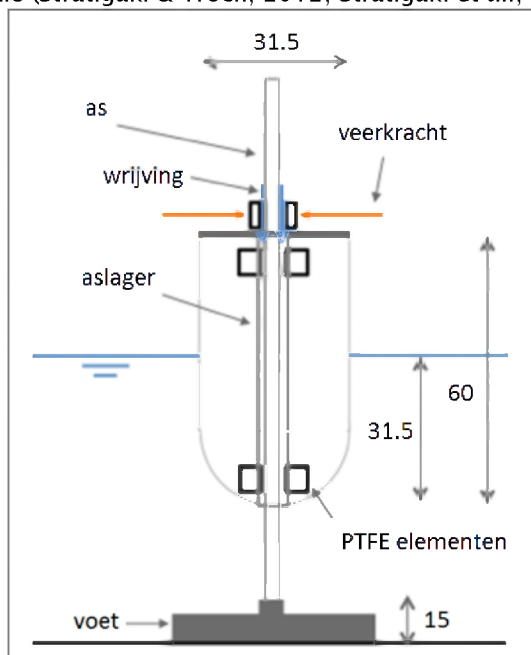


Fig. 1. Principeschema van het prototype point absorber (dimensies in cm)

De energie uit de golven wordt door een GEC geabsorbeerd via een power take-off systeem (PTO-systeem) en wordt vervolgens omgezet in elektriciteit door een generator. De PTO wordt hier gesimuleerd door de boeibeweging te dempen met een mechanische rem, waarbij de onttrokken energie verloren gaat door wrijving. Het systeem bestaat uit vier veren, die een normaalkracht uitoefenen op twee PTFE-blokjes bovenop de boei, die op hun beurt tegen de as worden gedrukt. De externe dempingskracht kan bepaald worden met formule (1) met $F_{demp,A}$ de grootte van de kracht, μ de wrijvingscoëfficiënt, F_{veren} de veerkracht en z de boeioppositie.

$$F_{demp,ext} = -F_{demp,A} \cdot \operatorname{sgn}\left(\frac{dz}{dt}\right) = -\mu \cdot F_{veren} \cdot \operatorname{sgn}\left(\frac{dz}{dt}\right) \quad (1)$$

Wrijvingseigenschappen

Het schaalmodel is onderworpen aan testen in de mechanische trekbank van de afdeling Mechanische Constructie en Productie van de Universiteit Gent om de wrijvingseigenschappen te bepalen.

De inwendige wrijving binnenin het model veroorzaakt ook energieverliezen en wordt daarom opgemeten. De grootte van de kracht blijkt echter sterk afhankelijk van de temperatuur en de relatieve vochtigheid, aangezien er een variatie van bijna 50% is opgemeten voor testen uitgevoerd op verschillende dagen. De waarde is dus niet nauwkeurig gekend.

De wrijvingscoëfficiënt μ van de staal-PTFE combinatie van het dempingssysteem is experimenteel bepaald om de dempingskracht, die correspondeert met een aangelegde veerkracht (zie Vgl.(1)), nauwkeurig te kunnen bepalen. De resultaten tonen verwaarloosbare verschillen tussen de wrijvingscoëfficiënten voor statische en dynamische wrijving en voor natte en droge wrijving. "Stick-slip" wordt dus vermeden en de mogelijks niet gesmeerde wrijving aan de bovenste lager zal geen belangrijke bijkomende wrijving veroorzaken. Een gemiddelde waarde van de wrijvingscoëfficiënt μ over de verschillende testen van 0.07 is gebruikt voor verder onderzoek. Dit stemt overeen met het theoretische interval voor een staal-PTFE combinatie van 0.04 tot 0.10.

Voor het merendeel van de testen is de beweging van de boei opgemeten met een potentiometer, waarbinnen een draad op- en ontwindt. Testen in de mechanische trekbank tonen aan dat deze draad een terugroepende kracht uitoefent op de boei en dat er een bijkomende interne wrijving in het meetinstrument optreedt. Het eerste ongunstige effect kan grotendeels gereduceerd worden door een bijkomende massa (0.468kg) bovenop de boei te plaatsen. De gewenste diepgang van 31.5cm wordt opnieuw bereikt en de wijziging van de terugroepende kracht over de totale lengte van de draad is klein.

Experimenteel onderzoek

2D golfgoot

De eerste reeks testen is uitgevoerd in de grote golfgoot van het laboratorium van AWW, Universiteit Gent. Deze opstelling heeft een breedte van 1m, een lengte van 30m en de waterdiepte bedraagt 70cm. Regelmatige golven worden aangelegd, die zijn bepaald op basis van Froude-schaling van metingen voor de kust van verschillende Europese landen (b.v. België, Frankrijk). Dit resulteert in golfhoogtes van 0.050m en 0.100m en periodes variërend van 0.800s tot 1.500s (Stratigaki & Troch, 2012; Stratigaki *et al.*, 2012b).

De horizontale beweging van de as onder golven is beperkt dankzij zijn hoge buigstijfheid. De beste resultaten met de kleinste horizontale beweging van de verticale as (zie Fig. 1) worden bekomen door de voet te verankeren, maar de resultaten van testen met de voet los op de bodem zijn ook aanvaardbaar. Metingen van de ongedempte boeibeweging met en zonder de aanwezigheid van de potentiometer tonen aan dat de invloed van dit meetinstrument daalt in hogere golven.

Het schaalmodel heeft een grote diameter ten opzichte van de breedte van de golfgoot. Er is een belangrijke verstoring door de reflectie van de zijwanden, wat zorgt voor niet-herhaalbare gedempte bewegingen van de boei en onregelmatige verheffingen van het wateroppervlak. De golfgoot is dus niet geschikt voor nauwkeurige metingen van de boeibeweging als een sterk radiërende structuur.

3D golfbak

Experimenten zijn uitgevoerd in de golfbak van Queen's University Belfast in Portaferry om de ongunstige invloed van de reflectie van de radiatiegolven op de zijwanden te elimineren. Regelmatige en onregelmatige golven met dezelfde golfhoogte en -periode worden aangelegd (Stratigaki *et al.*, 2012ab). De herhaalbaarheid van de gedempte boeibeweging is bevestigd, zodat het PTO-systeem kan behouden worden.

Een optimaal geabsorbeerd vermogen wordt nagestreefd in regelmatige golven omdat hierbij het grootste zog wordt gerealiseerd. Het gemiddeld vermogen geabsorbeerd door het PTO-systeem wordt berekend voor verschillende externe dempingskrachten met behulp van formule (2), zonder hierbij de interne wrijving in rekening te brengen:

$$P_{abs,gem} = \left| \frac{1}{T} \int_0^T \vec{F}_{demp} \cdot \vec{v}_{boei}(t) dt \right| = 4 \cdot \frac{1}{T} \cdot z_{As} \cdot F_{demp,A} \quad (2)$$

met $F_{demp,A}$ de grootte van de externe dempingskracht, z_{As} de amplitude van de boeibeweging en T de corresponderende periode. Het resultaat voor één golfconditie is gegeven in Fig.2 en de parabolische trendlijn toont aan dat het geabsorbeerd vermogen weinig gevoelig is voor de aangelegde dempingskracht rond het optimum, aangezien de curve weinig steil is in haar top.

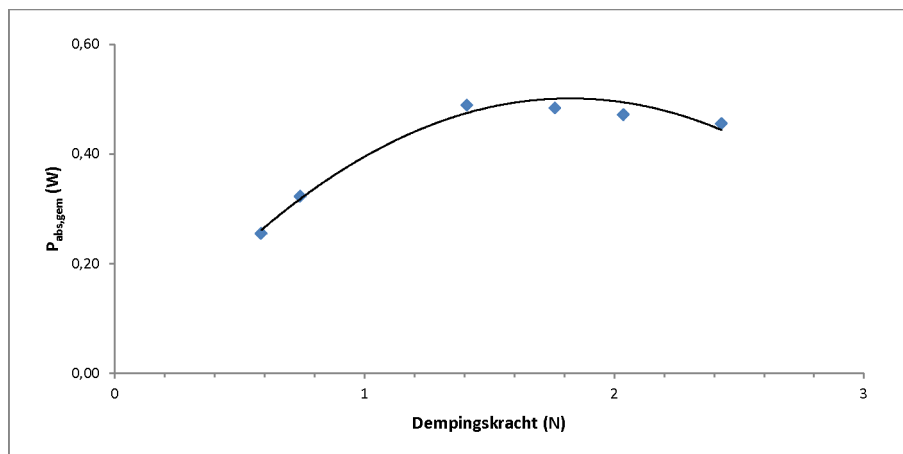


Fig. 2. Gemiddeld geabsorbeerd vermogen door het PTO-systeem in functie van de externe dempingskracht (golfconditie: golfhoogte $H = 0.100$ m en golfperiode $T = 1.100$ s – waterdiepte $d = 0.61$ m)

De invloed van de aanwezigheid van de boei op het golfklimaat wordt onderzocht door de verandering in opgemeten golfhoogte t.o.v. de invallende golfhoogte te bepalen, geregistreerd door tien golfhoogtemeters voor, na en naast de boei. Zowel constructieve als destructieve interferentie van de invallende, geradiëerde, gediffracteerd en gereflecteerde golven is waargenomen op de posities van de golfhoogtemeters. Het ruimtelijk patroon is afhankelijk van de golfperiode van de invallende golven. Het zog van één boei is echter beperkt en moeilijk voor te stellen door

puntmetingen. De variatie van de significante golfhoogte in onregelmatige golven is kleiner dan van de gemiddelde golfhoogte in regelmatige golven. De golfhoogtemeters voor de boei worden aangewend om de reflectiecoëfficiënt te bepalen, wat resulteert in een gemiddelde waarde van 0.20.

Vergelijking met numerieke data

De amplitude z_{As} van de boeibeweging in regelmatige golven is numeriek berekend voor een ongedempte beweging van de boei door het toepassen van de lineaire point absorber theorie met behulp van WAMIT (2011):

$$z_{As}(\omega) = \frac{F_{ex,A}(\omega)}{\sqrt{[k - (m + m_a(\omega) + m_{sup}) \cdot \omega^2]^2 + [(b_{hyd}(\omega) + b_{ext}) \cdot \omega]^2}} \quad (3)$$

met ω de hoekfrequentie van de invallende golf, $F_{ex,A}$ de amplitude van de verticale component van de exciterende golfkracht, k de hydrostatisch herstellende coëfficiënt, m de massa van de boei, m_a de hydrodynamisch coëfficiënt van toegevoegde massa en b_{hyd} de hydrodynamische dempingscoëfficiënt. De externe dempingscoëfficiënt b_{ext} en de supplementaire massa m_{sup} zijn beide gelijk aan nul, aangezien er geen externe damping of tuning wordt toegepast. k stemt overeen met $\rho_w g A_w$, met A_w de oppervlakte ter hoogte van de waterlijn. Het BEM software pakket WAMIT (2011) berekent de hydrodynamische parameters m_a , b_{hyd} en $F_{ex,A}$ van de golf-GEC interactie voor verschillende golf frequenties.

De vergelijking met de testen in de golfgoot in Fig. 3 toont een verplaatsing van de experimentele resultaten naar grotere periodes, aangezien de opgemeten natuurlijke periode van 1.176s lichtjes groter is dan de numeriek berekende waarde van 1.147s. Wanneer beide curven vergeleken worden na het verplaatsen van de experimentele meetpunten naar links, blijkt er een aanvaardbare overeenkomst te zijn voor kleine en grote periodes. De opgemeten waarden zijn wel kleiner, omdat de interne wrijving niet beschouwd wordt in het numeriek model. Rond de natuurlijke periode is er een niet-verwaarloosbaar verschil, dat te wijten is aan de grote amplitude en snelheid van de boeibeweging. Deze veroorzaken een niet-lineaire hydrostatisch herstellende kracht en viskeuze verliezen. Beide effecten worden niet in rekening gebracht in de berekeningen. De beschikbare ruimte onder water is onvoldoende voor de test met een golfhoogte van 0.100m en de opgemeten natuurlijke periode: de boei raakt de voet tijdens de verticale beweging.

De ongedempte boeibeweging vertoont in het algemeen het verwachte verloop, wat erop wijst dat de invloed van de reflectie van de zijwanden waarschijnlijk klein is in vergelijking met de andere krachten.

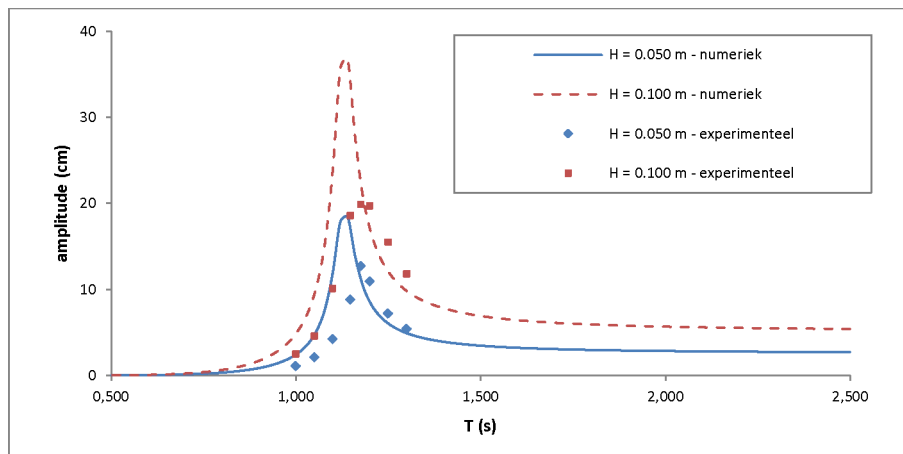


Fig. 3. Vergelijking tussen de opgemeten en berekende waarden voor de amplitude van de ongedempte boeibeweging in de golfgoot (waterdiepte $d = 0.70\text{m}$) in functie van de invallende golfhoogte en -periode.

Conclusie

Een generieke point absorber golfenergieconverteer, die beperkt is tot verticale beweging, is ontwikkeld met het oog op productie van de GEC's op grote schaal. De wrijvingseigenschappen van het dampingssysteem (PTO-systeem), de invloed van de meetinstrumenten en de reflectiecoëfficiënt van de boei zijn bepaald.

De ongedempte en gedempte boeibeweging zijn opgemeten. De ongedempte beweging is vergeleken met numerieke berekeningen en toont een goede overeenkomst, behalve rond de natuurlijke periode van de GEC. Voor de gedempte boeibeweging wordt op een experimentele manier optimale absorptie door het PTO-systeem in regelmatige golven nagestreefd, omdat hierbij het grootste zog achter de boei veroorzaakt wordt.

De invloed van de aanwezigheid van de GEC op het golfklimaat is voorgesteld door de verandering van de opgemeten golfhoogte t.o.v. de invallende golfhoogte te bepalen, hoewel het zog van één boei beperkt is.

De ontwikkelde generieke golfenergieconvector is geschikt voor verder gebruik tijdens de grootschalige experimenten die zullen plaatsvinden in een grote golfbak in DHI (Denemarken) in januari 2013 binnen het kader van het WECwakes HYDRALAB IV project (EU project) onder de coördinatie van Universiteit Gent met deelname van zeven internationale partners.

Erkenningen

De auteur wil graag het FWO bedanken voor het financieren van de constructie van de prototype GEC's. Daarnaast is ook het "Queen's Marine Laboratory (QML)" in Belfast bedankt voor het ter beschikking stellen van de golfbak voor de experimenten en Prof. Matt Folley (QML) en Prof. Marc Vantorre (UGent, WL) voor hun waardevolle feedback tijdens het testen van de GEC. Ten slotte wil de auteur graag het WECwakes project (HYDRALAB IV, EU project – Contract Number 261520) danken aangezien dit onderzoek deel uitmaakt van dit Europees project. Het consortium van het WECwakes project is bedankt voor de ontwikkeling van de prototype WEC (Universiteit Gent – België, Aalborg University – Denemarken, University of Manchester – VK, Ecole Centrale de Nantes – Frankrijk, EDF – Frankrijk, University of Edinburgh – VK and Queen's University of Belfast – VK).

Referenties

- Borgarino B., A. Babarit and P. Ferrant P. 2012. Impact of wave interactions effects on energy absorption in large arrays of wave energy converters. *Ocean Engineering* 41:79-88.
- Child B.F.M. 2011. On the configuration of arrays of floating wave energy converters. Ph.D Thesis, Edingburgh University.
- Stratigaki V. and P. Troch. 2012. Large scale experiments on farms of heaving wave energy converters. VLIZ Young Marine Scientists' Day (KHBO, Brugge, 24 February 2012). VLIZ Special Publication 55:79.
- Stratigaki V., P. Troch, L. Baelus and Y. Keppens. 2011. Introducing wave regeneration by wind in a mild-slope wave propagation model, MILDwave, to investigate the wake effects in the lee of a farm of wave energy converters. *Proc. of the 30th OMAE 2011*, Rotterdam.
- Stratigaki V., P. Troch, M. Vantorre and M. Folley. 2012b. Development of a point absorber Wave Energy Converter for investigation of wake effects and wave energy absorption. *Proceedings of 4th International Coastlab12 Conference*, Ghent, Belgium.
- Stratigaki V., P. Troch, T. Stallard, J.P. Kofoed, M. Benoit, G. Mattarollo, A. Babarit, D. Forehand and M. Folley. 2011. Large scale experiments on wave energy converter farms to study the near-field effects between the converters and the far-field effects on other users in the coastal area. HYDRALAB IV, Research report.
- Stratigaki V., P. Troch, T. Stallard, J.P. Kofoed, M. Benoit, G. Mattarollo, A. Babarit, D. Forehand and M. Folley. 2012a. Large scale experiments on farms of heaving buoys for investigation of wake dimensions, near-field and far-field effects. *Proc. of International Conference on Coastal Engineering 2012*, Santander, Spain.
- Troch P., C. Beels, J. De Rouck and G. De Backer. 2010. Wake effects behind a farm of wave energy converters for irregular long-crested and short-crested waves. *Proceedings of the International Conference on Coastal Engineering 32*, Shanghai, China. Retrieved from: <http://journals.tdl.org/ICCE/>.
- WAMIT, Inc. User Manual, <http://www.wamit.com/manual.htm>, Accessed August 2011.