

NUMERIEKE MODELLERING VAN DE GOLFGROEI DOOR WIND IN DE ZOGZONE VAN EEN PARK VAN GOLFENERGIECONVERTOREN M.B.V. HET GOLFVOORTPLANTINGSMODEL MILDWAVE

Baelus Leen, Yannick Keppens, Vasiliki Stratigaki en Peter Troch

Vakgroep Civiele Techniek, Faculteit ingenieurswetenschappen, Universiteit Gent, Faculteit Ingenieurswetenschappen; Vakgroep Civiele Techniek; Afdeling weg- en waterbouw, Campus Ardoyen, Technologiepark 904, 9052 Gent
E-mail: leenbaelus@gmail.com

Begin 2008 stelde Europa haar ambitieuze 20-20-20 klimaatdoelstellingen voor, die intens gekoppeld zijn aan hernieuwbare energie. Een veelbelovende en duurzame technologie is het opwekken van energie uit golven. Numerieke modellering van de golfenergie-convertoren is een belangrijk aspect in de verdere ontwikkeling van deze technologie. Dit artikel [1] beschrijft de implementatie van de golfgroei door wind in de hyperbolische mild-slope vergelijkingen die door het numerieke golfvoortplantingsmodel MILDwave gebruikt worden. Verschillende uitdrukkingen voor de energie-overdracht van de wind naar de golven, beschikbaar in de literatuur, worden beschouwd. De toepasbaarheid van deze uitdrukkingen voor MILDwave wordt onderzocht en gevalideerd, en de uitdrukking die de meest bevredigende resultaten levert, wordt weerhouden om de invloed van de wind op de zogzone van een park van golfenergie-convertoren te onderzoeken.

Sleutelwoorden: golfgroei door wind; MILDwave; hyperbolische mild-slope vergelijkingen; zogzone van GECs; golfenergieconvertoren; hernieuwbare energie; golfenergie.

I. INTRODUCTIE

A. Kadering van het onderzoek

Europa streeft naar een energie-efficiënte economie met een beperkte CO₂-uitstoot. Om deze ambitie te verwezenlijken werd begin 2008 een Europees klimaatplan opgesteld, dat gekend is als de 20-20-20 doelstellingen. Deze doelstellingen houden in dat een reductie van de uitstoot van broeikasgassen met 20% behaald moet worden tegen 2020 (in vergelijking met de statistieken van 1990). Eenzelfde afname wordt opgelegd aan het primair-energieverbruik. Daarenboven moet het aandeel van de hernieuwbare energie tegen 2020 opgetrokken worden tot minstens 20% van de totale energieconsumptie in de Europese Unie.

Het behalen van deze doelstellingen is rechtstreeks en onrechtstreeks gekoppeld aan de evolutie van de sector van de hernieuwbare energieproductie. De groei van deze sector is uiteraard afhankelijk van sociaal-politieke en economische factoren, maar niet in het minst ook van technologische innovatie. Hierbij is het belangrijk dat geïnvesteerd wordt zowel in de ontwikkeling van de bestaande technologieën, als in het onderzoek naar nieuwe technologieën. Een veelbelovende technologie waarvan het potentieel wereldwijd erkend wordt en die op termijn een significante bijdrage kan leveren tot de productie van groene energie, is energie opwekken uit golven.

B. Golfenergie - state of the art

Golfenergie is in essentie een geconcentreerde vorm van windenergie. Golven worden immers gegenereerd door de progressieve overdracht van energie uit de wind die over het wateroppervlak blaast. De totale hoeveelheid beschikbare energie voor alle kusten in de wereld wordt geschat op 2 TW, wat quasi gelijk is aan de globale energieconsumptie.

Ondanks de erkenning dat golfenergie significant kan bijdragen tot de globale energievoorziening, is de technologie van de golfenergieconvertoren (afgekort als GEC's) nog altijd niet kostenefficiënt. Dit dient geen rem, maar een stimulans te zijn voor verder onderzoek, indachtig dat golfenergie vandaag staat waar windenergie een dertigtal jaar geleden stond.

Inmiddels werden vele concepten voor golfenergie-conversie ontwikkeld en beproefd. De golfenergie-convertoren, die de beschikbare golfenergie omzetten naar elektrische stroom, worden in hoofdzaak ingedeeld in twee categorieën op basis van hun conversieprincipe. De GEC's van het oscillerende type, waarbij een lichaam of waterkolom oscilleert onder invloed van de zeegolven, vormen een eerste categorie. Een tweede categorie zijn de GEC's van het golfoverslagtype, waarbij golven overslaan in een bassin gelegen boven het gemiddelde zeeniveau.

De numerieke modellering van golfenergieconvertoren speelt een belangrijke rol in hun optimalisatie. Door het gebruik van golfvoortplantingsmodellen is het mogelijk om de lay-out van een GEC-park (meerdere GEC's samen die als één geheel functioneren) te optimaliseren, de impact

van de GEC's op het golfklimaat in hun zogzone te bestuderen, de golfenergieproductie te berekenen en optimaliseren, etc.

C. Het numerieke model MILDwave

MILDwave is een dergelijk numeriek golfvoortplantings-model. Het werd ontwikkeld aan de Universiteit Gent [2] en is gebaseerd op de mild-slope vergelijkingen van Radder en Dingemans (1985). Het tijdsdomein model MILDwave kan lineaire golven genereren, en de voortplanting simuleren over variërende bathymetrieën met flauwe bodemhellingen door de golfverheffingen en de snelheidspotentiaal over het domein te berekenen. Hierbij is MILDwave in staat de belangrijkste verschillende golftransformatieprocessen te modelleren zoals refractie, shoaling, reflectie, transmissie, diffractie en golfbreking, en het model behoudt daarbij een beperkte rekentijd.

De evidente causale relatie tussen wind en golven, en de vaak significante invloed van de wind op de golfgroei, maakten een uitbreiding van het numerieke golfvoortplantingsmodel noodzakelijk. De implementatie en de validatie van deze uitbreiding vormen het hoofddoel van dit onderzoek. Nadien wordt de geïmplementeerde windmodule gebruikt om de invloed van de wind na te gaan op de grootte van de zogzone van een park van GEC's.

II. GOLFGROEI DOOR WIND

A. Het fysische proces

De overdracht van energie van de wind naar de golven is een complex fysisch proces, dat tot op heden nog niet eenduidig beschreven is. Niettegenstaande de complexiteit zijn meerdere theorieën uitgeschreven, de ene al nauwkeuriger dan de andere. Op basis van theoretische en praktische overwegingen, is de voor implementatie in MILDwave meest geschikte theorie weerhouden, zoals hierna beschreven.

De negatieve dissipatieterm W_g [3] is gebruikt voor zowel regelmatige als langkruinige onregelmatige golven (kortkruinige golven vallen buiten het bestek van deze thesis):

$$W_g = -\frac{2C_g}{H_s} \frac{dH_s}{dy} \quad (1)$$

De gradiënt dH_s/dy wordt berekend volgens de groeicurve van Wilson-Krylov [4], [5], waarvan de uitdrukking gegeven wordt door (2):

$$\frac{gH_s}{V_y^2} = \beta_y \left[1 - \left(1 + \alpha_y \sqrt{\frac{gV_y}{V_y^2}} \right)^{-2} \right] \quad (2)$$

De bovenstaande uitdrukkingen worden in de hyperbolische mild-slope vergelijkingen geïmplementeerd.

B. Parameters in uitdrukkingen voor golfgroei door wind

De berekening van de golfgroei door wind maakt gebruik van de significante golfhoogte H_s , dewelke ogenblikkelijk gesimuleerd dient te worden in MILDwave. Meerdere modules zijn ontwikkeld om deze parameter te schatten, en zijn onderling vergeleken op basis van nauwkeurigheid, én rekentijd. Het is immers belangrijk dat MILDwave zijn intrinsieke voordeel als snelle numerieke solver behoudt.

De parameters die voorkomen in de groeicurve dienen gekalibreerd te worden om een goede overeenkomst met de waarnemingen te bekomen. De waarden voorgesteld in [3] zijn als standaardwaarden ingesteld in MILDwave.

C. Implementatie in MILDwave

De hyperbolische mild-slope vergelijkingen waarop MILDwave [2], [6] steunt voor de berekening van de golfverheffing η en de snelheidspotentiaal ϕ worden gegeven door (3):

$$\begin{cases} \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\omega^2 - k^2 CC_g}{g} \phi - \nabla \cdot \left(\frac{CC_g}{g} \nabla \phi \right) \\ \frac{\partial \phi}{\partial t} = -g\eta \end{cases} \quad (3)$$

Door de dissipatietermen voor diepte-geïnduceerde golfbreking (D_b/E) [7] en de groeiterm voor de bijdrage van de wind (W_g) op te nemen, worden de vergelijkingen (3) uitgebreid tot (4):

$$\begin{cases} \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\omega^2 - k^2 CC_s}{g} \phi - \nabla \cdot \left(\frac{CC_s}{g} \nabla \phi \right) - \left(\frac{D_B}{E} + W_s \right) \eta \\ \frac{\partial \phi}{\partial t} = -g\eta \end{cases} \quad (4)$$

Implementatie in de MILDwave code is mogelijk na discretisatie in tijd en ruimte van (4).

III. VALIDATIE VAN DE WIND-MODULE

De validatie van de module die de invloed van de wind op de golven simuleert, wordt in dit onderzoek verricht via een vergelijking met de groeicurve van Wilson-Krylov [4], [5], en is uitgevoerd zowel voor regelmatige als langkruinige onregelmatige golven. In Tabel I worden de golfkarakteristieken van een selectie uit de uitgevoerde testcases ter validatie weergegeven. In Figuren 1-3 wordt de vergelijking tussen numerieke (MILDwave) en theoretische (Wilson-Krylov groeicurve) resultaten weergegeven voor regelmatige (Fig. 1) en onregelmatige langkruinige (Fig. 2-3) golven. In deze figuren wordt de windgroei van de significante golfhoogtes gegeven langs een longitudinale snede van het numeriek bassin.

Tabel I. Golfkarakteristieken van de testcases besproken in Fig. 1-3

test case	H(s) [m]	T(p) [s]	U ₁₀ [m/s]	Golfgeneratie
4-6	2.0	5	20	Regelmatig
J-4	1.0	5.2	12.0	Langkruinig onregelmatig JONSWAP ($\gamma=3.3$)
PM-4	3.0	7.6	25.0	Langkruinig onregelmatig Pierson- Moskovitz

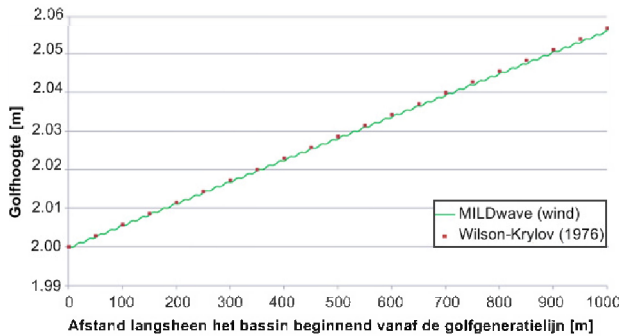


Fig. 1. Testcase 4-6: Groei van de golfhoogte Hs langs een longitudinale sectie van het numeriek bassin: MILDwave resultaten (volle lijn), Wilson-Krylov groeicurve (puntlijn).

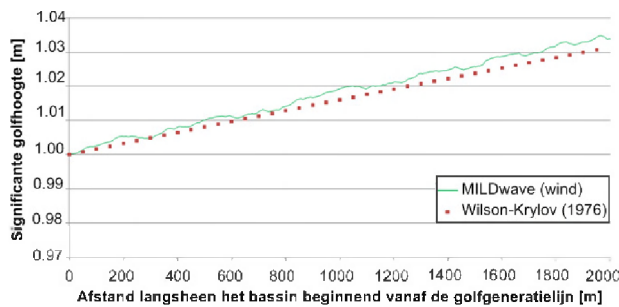


Fig. 2. Testcase J-4: Groei van de golfhoogte Hs langs een longitudinale sectie van het numeriek bassin: MILDwave resultaten (volle lijn), Wilson-Krylov groeicurve (puntlijn).

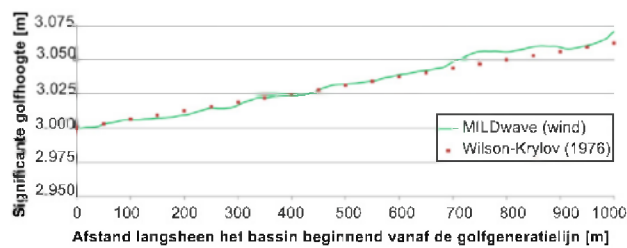


Fig. 3. Testcase PM-4: Groei van de golfhoogte H_s langsheen een longitudinale sectie van het numeriek bassin: MILDwave resultaten (volle lijn), Wilson-Krylov groeicurve (puntlijn).

De numerieke resultaten van simulaties in MILDwave met de windmodule actief, zijn in goede overeenstemming met de theoretische resultaten van de Wilson-Krylov groeicurve voor de regelmatige golven gegenereerd in 'Testcase 4-6' (Fig. 1). Deze testcase kan als karakteristiek beschouwd worden voor de volledige reeks uitgevoerde testen met regelmatige golven. Voor de langkruinige onregelmatige golven worden kleine afwijkingen t.o.v. de theoretische waarden geobserveerd (Fig. 2-3). Anderzijds zijn op de significante golfhoogte H_s variaties van dezelfde grootteorde waargenomen voor simulaties waarbij de windmodule inactief is. De kleine afwijkingen zijn bijgevolg niet te wijten aan het effect van de windgroeimodule, maar het resultaat van onregelmatige golfvoortplanting. Hierop gebaseerd besluiten we dat de windmodule op een correcte en bevredigende wijze de invloed van de wind op de golven modelleert, ook voor langkruinige onregelmatige golven.

IV. INVLOED OP DE ZOGZONE VAN EEN PARK VAN GEC'S

De uitgebreide MILDwave code wordt vervolgens toegepast om de invloed van de wind op de zogzone van één individuele, vrijstaande GEC, en vervolgens van een GEC-park te onderzoeken. Een reeks simulaties, met verschillende configuraties van de parklay-out van de GEC's, wordt onderzocht. Eén van de onderzochte types van GEC's is de 'Wave Dragon' (GEC van het golfoverslag-type). Observaties van de numerieke resultaten tonen aan dat de invloed van de wind onmiddellijk achter één GEC of een GEC-park zeer beperkt is, en vergroot met een toenemende afstand achter de golfenergieconvertoren.

Dit wordt geïllustreerd door een testcase waarbij een rij van drie GEC's (met een tussenafstand gelijk aan twee maal de breedte van één GEC) wordt beschouwd. De opgelegde golfkarakteristieken zijn: significante golfhoogte H_s gelijk aan 3.0m, piekperiode T_p gelijk aan 8.4m en windsnelheid U_{10} gelijk aan 15.0m/s. De resultaten worden weergegeven m.b.v. van een contourplot van K_d -verstoringcoëfficiënten (Fig. 4), waar de waarde van de verstoringcoëfficiënt in een 'punt A' van het domein, $K_{d,A}$ gelijk is aan de gemeten golfhoogte in 'punt A', $H_{s,A}$ gedeeld door de opgelegde invallende golfhoogte langs de golfgeneratielijn $H_{s,i}$.

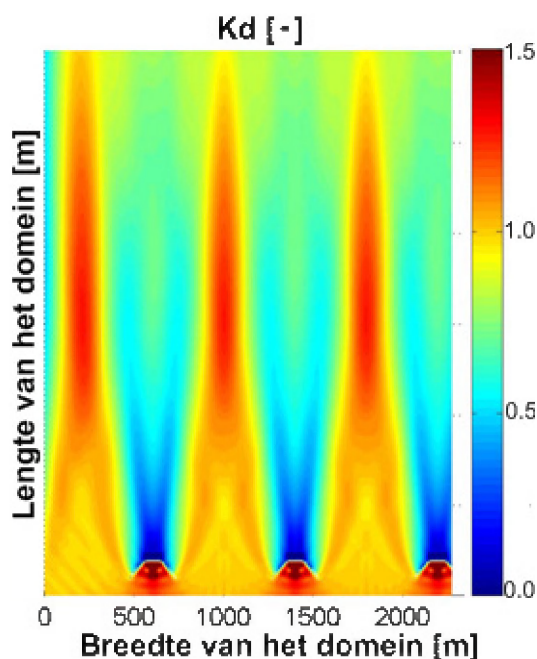
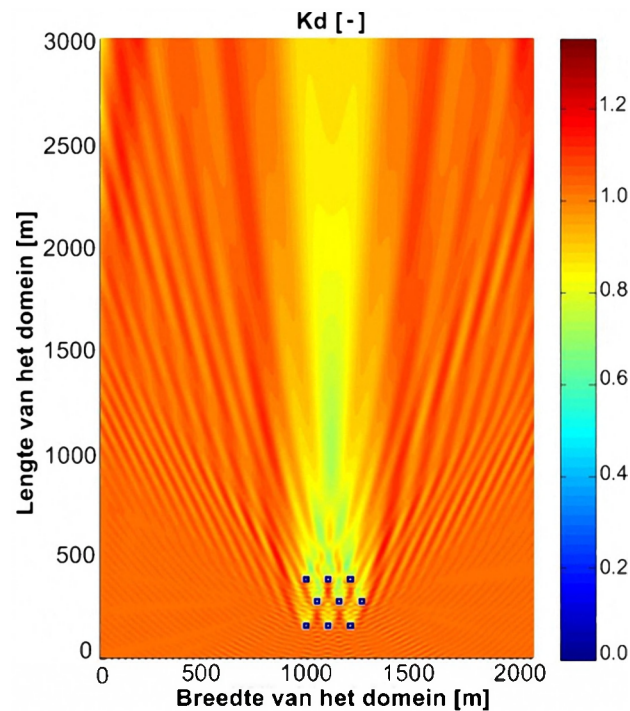


Fig. 4. Contourplot van de verstoringscoëfficiënten, K_d [-], voor een rij van 'Wave Dragon'-GEC's (onregelmatige golven, $H_s = 3.0\text{m}$, $T_p = 8.4\text{ s}$, $U_{10} = 15.0\text{m/s}$).

Op een afstand van 100m achter een GEC, gepositioneerd op de buitenste positie van de rij, is de aanwezige golfenergie gelijk aan $144 \cdot 10^4\text{ W}$, voor het geval waarbij geen wind wordt aangelegd over het wateroppervlak. Deze golfenergie wordt berekend over een oppervlakte van 1200m^2 . Wanneer het effect van de wind in rekening wordt gebracht, wordt over dezelfde oppervlakte een licht verhoogde waarde van de beschikbare golfenergie teruggevonden: $146 \cdot 10^4\text{ W}$ (toename van 1.4%). Op een afstand van 500m achter de GEC wordt het effect van de wind belangrijker. De waarde van de aanwezige golfenergie stijgt van $549 \cdot 10^4\text{ W}$ tot $574 \cdot 10^4\text{ W}$ (toename van 4.5%) voor condities zonder en met het effect van de wind, respectievelijk.

Dezelfde windeffecten worden eveneens geïllustreerd door een studie van een park van negen hypothetische GEC's (GEC's met eenvoudige geometrie), geplaatst in een geschrante (zogenaamde staggered grid) lay-out (Fig. 5). Deze hypothetische GEC's hebben dezelfde absorptie-eigenschappen als echte GEC's. Op de configuratie vallen regelmatige golven in met een golfhoogte, H_w , gelijk aan 1.0m en een golfperiode, T_w , gelijk aan 5.2 s . In Fig. 5 (onderaan) zijn de K_d -waardes in de zogzone van de GEC's groter door het effect van de windgroei. In Figuur 6 wordt de evolutie van de golfhoogte gegeven langs een longitudinale snede van het numerieke bassin en het GEC-park. Onder invloed van een windveld met een snelheid, U_{10} , van 12.0m/s , treedt op een afstand van 2100m achter het GEC-park een golfhoogte-toename van 0.046m op t.o.v. de windstille situatie.



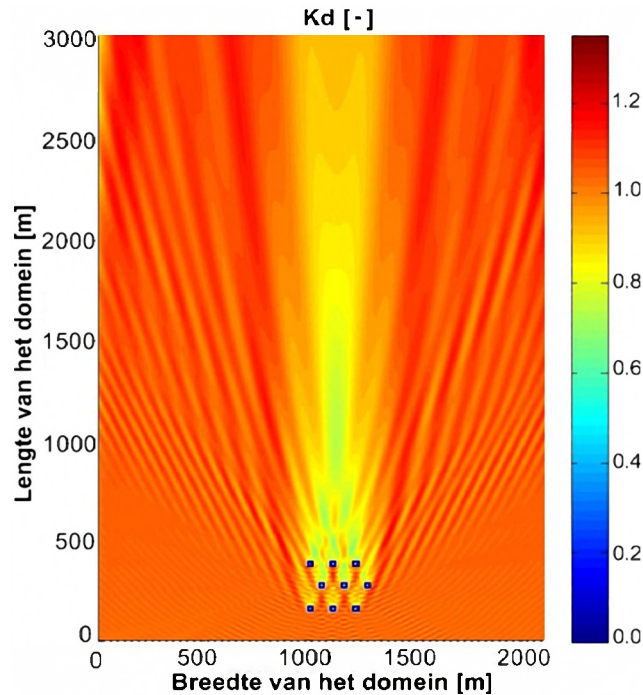


Fig. 5. Zogzone achter een park van hypothetische GEC's voor loodrecht invallende regelmatige golven ($H_w = 1.0\text{m}$ en $T_w = 5.2\text{s}$). Contourplotten van de berekende verstoringscoëfficiënt K_d [-] voor een staggered grid met de wind module inactief (bovenaan) en de windmodule actief (onderaan).

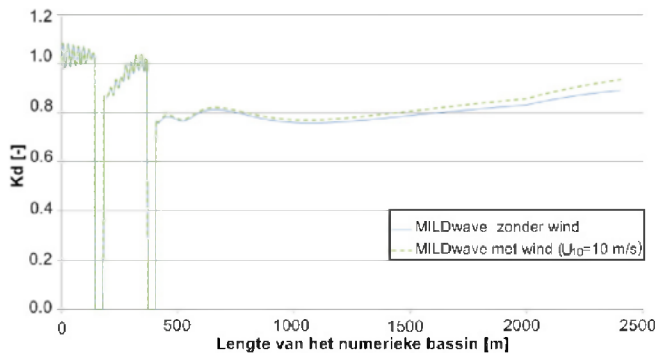


Fig. 6. Berekende verstoringscoëfficiënt K_d [-] langs een parallelsectie t.o.v. de golfvoortplantingsrichting op $x = 1100\text{m}$, voor loodrecht invallende regelmatige golven op een park van hypothetische GEC'S en voor een windsnelheid, U_{10} , gelijk aan 0.0m/s (origineel) en 12.0m/s .

V. CONCLUSIES

Algemeen kan men besluiten dat uit de studie van zowel individuele convertoren als van verschillende park lay-outs is gebleken dat de invloed van de wind beperkt is over korte afstanden, maar significant is wanneer men grotere afstanden beschouwt. Het is dan ook voornamelijk bij de optimalisatie van de inplanting van meerdere parken van golfenergie-convertoren dat het in rekening brengen van de invloed van de wind op het golfklimaat een meerwaarde biedt. Ook voor de studie van de golfimpact op kustlijnen, windmolenparken, etc. gelegen in de schaduwzone van de GEC-parken is het effect van de wind significant, en kan het numerieke golfvoortplantingsmodel MILDwave met de windgroei-module een krachtig ingenieurstool zijn.

Dankbetuigingen

De auteurs willen graag ir. V. Stratigaki en prof. dr. ir. P. Troch bedanken voor de begeleiding en ondersteuning bij het tot stand brengen van deze scriptie.

Referenties

- [1] Baelus, I. and Y. Keppens. 2010. Numerical modelling of wave regeneration by wind in the lee of a farm of wave energy converters using MILDwave for multiple wakes. Thesis, Universiteit Gent.
- [2] Troch P. 1998. MILDwave – a numerical model for propagation and transformation of linear water waves (in Dutch). Internal Report, Department of Civil Engineering, Ghent University.
- [3] Vogel J.A., A.C. Radder and J.H. De Reus. 1988. Verification of numerical wave propagation models in tidal inlets. p.433-447. *In: Proceedings of the 23rd International Conference on Coastal Engineering*, Malaga, Spain, ASCE.
- [4] Wilson B.W. 1965. Numerical prediction of ocean waves in the North Atlantic for December. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift* 18 (3):114-130.
- [5] Krylov Y.M., S.S. Strekalov and V.F. Tsyplukhin. 1976. *Vetrovye volug i ich vozdejstvie na sooruzewija (wind waves and their impact on structures)*. Hydrometeoizdat, Leningrad.
- [6] Radder A.C. and M.W. Dingemans. 1985. Canonical equations for almost periodic, weakly nonlinear gravity waves. *Wave Motion* 7:473-485.
- [7] Gruwez V. 2008. Implementatie en validatie van golfbreking in het numeriek golfvoortplantingsmodel MILDwave (in Dutch). Thesis, Universiteit Gent.