

Plan van aanpak golfoploop en - overslag bij ondiepe voorlanden



Plan van aanpak golfoploop en -overslag bij ondiepe voorlanden

Auteur(s)

Joost den Bieman

Marcel van Gent

Plan van aanpak golfoploop en -overslag bij ondiepe voorlanden

Opdrachtgever	RWS - WVL
Contactpersoon	Robert Vos
Referenties	Werkplan KvK Oplloop d.d. 12 juni 2024
Trefwoorden	Golfoploop, golfoverslag, ondiep voorland, infragravity golven, BOI

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	31-10-2024
Projectnummer	11210371-025
Document ID	11210371-025-GEO-0001
Pagina's	20
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	J.P. den Bieman M.R.A. van Gent	

Inhoud

1	Inleiding	5
1.1	Aanleiding	5
1.2	Scope	5
2	Probleembeschrijving	6
2.1	Infragravity golven	6
2.2	Golfvoortplanting over ondiepe voorlanden	7
3	Literatuur	9
3.1	Golfoverslag	9
3.2	Golfoploop	10
3.3	Bepaling infragravity golven bij de teen	11
3.3.1	Empirische formules	11
3.3.2	Numeriek modellen	11
4	Oplossingsrichtingen en prioritering	13
4.1	Deel I - Toepasbaarheid formules voor diep water en ondiepe voorlanden	13
4.2	Deel II - Bepaling golfbelasting bij de teen van de waterkering incl. vrijgekomen IG-golven	13
4.3	Deel III - Voorstel voor alternatieve methodiek	13
4.4	Deel IV - Consequentieanalyse	14
	Referenties	15
A	Beantwoording initiële vragen RWS	17

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

In het beoordelen en het ontwerpen van waterkeringen is voor een aantal initiële mechanismen, zoals GEKB, GEBU ophoop, de golfoploop (in de cumulatieve overbelastingmethode) of golfoverslag (binnen de vigerende BOI methodiek voor GEKB) bepalend voor de resulterende overstromingskans, en dus voor het uiteindelijke oordeel danwel ontwerp. Daarnaast zijn deze fysische processen ook belangrijk voor de vervolgmecanismen binnen de faalpaden omtrent dijkerosie die uiteindelijk kunnen leiden tot bresvorming en overstroming. Zowel de golfoploophoogte als de hoeveelheid golfoverslag worden bepaald door enerzijds de geometrie van de waterkering en anderzijds de combinatie van waterstand en golfbelasting bij de teen van de waterkering. Wanneer er sprake is van een ondiep voorland voor de waterkering, wordt de golfbelasting hierdoor significant beïnvloed. In de vigerende BOI methodiek voor het verdisconteren van het effect van deze ondiepe, lichte voorlanden wordt het effect van infragravity (IG) golven niet meegenomen. Dit terwijl al langer bekend is (Van Gent, 1999 & 2001) en in recent onderzoek binnen het All-Risk programma opnieuw is bevestigd (RWS, 2022; Lashley et al. 2020; Lashley et al., 2022) dat de invloed van vrijgekomen IG-golven op golfoploop en -overslag bij ondiepe voorlanden significant is. Vos (2024) heeft verkend wat het effect van het wel meenemen van vrijgekomen IG-golven kan zijn en vindt significante verschillen in kruinhoogte in de orde van grootte van 0,5 m tot 2,5 m. Deze verschillen zijn dermate groot dat – in de context van een zo goed mogelijke inschatting van de overstromingskans – nader onderzoek nodig is met als doel de invloed van vrijgekomen IG-golven bij ondiepe voorlanden deugdelijk mee te nemen in beoordeling en ontwerp van waterkeringen.

Het voorliggende document is een werkplan voor onderzoek binnen het SITO-PS project Kennis voor Keringen naar oplossingen voor het meenemen van de invloed van IG-golven in beoordeling en ontwerp van waterkeringen. Er wordt voorzien dat de uitvoering van dit werkplan gedurende 2025 en 2026 zal plaatsvinden. In aanloop naar het opstellen van voorliggend werkplan is er een overleg geweest op 24 juni 2024 tussen RWS WVL (Robert Vos en Patrick Oosterlo) en Deltares (Marcel van Gent en Jacco Groeneweg). Dat overleg vormt voor een belangrijk deel de basis voor de inhoud van dit werkplan.

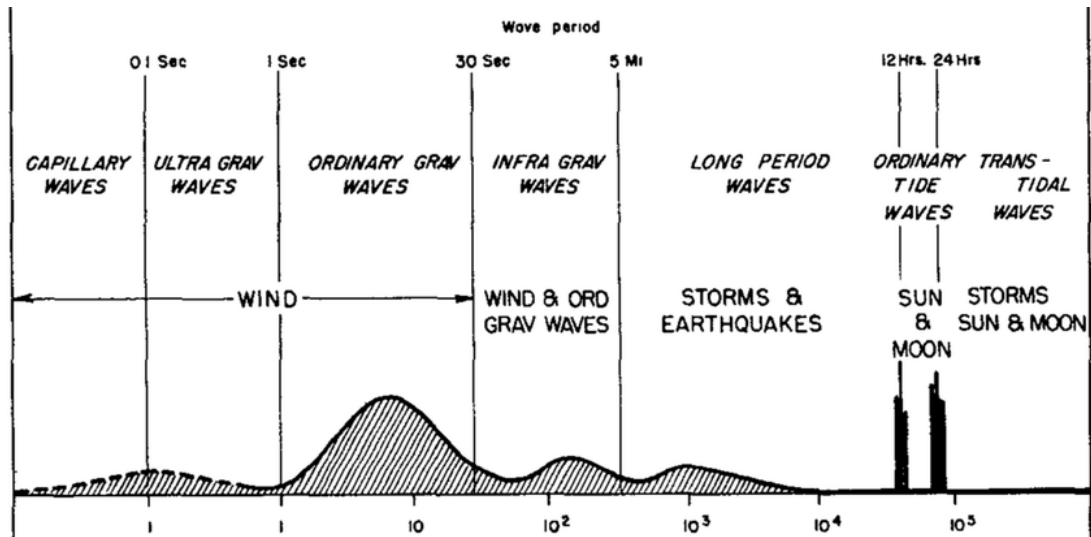
1.2 Scope

Binnen dit onderzoek wordt gekeken naar een nieuwe methodiek voor het meenemen van het effect van IG-golven op golfoploop en -overslag binnen het BOI. Er wordt hierbij alleen naar het voorland vrijgekomen IG-golven gekeken, niet naar IG-golven die zich al kunnen bevinden op dieper water (op de Noordzee). Voor dit laatste soort IG-golven is er momenteel binnen BOI nog geen kader, waardoor het niet duidelijk is met welke IG-golfparameters er rekening moet worden gehouden en i.c.m. welke golfparameters van de lokale storm (naar deze onderwerpen loopt overigens wel onderzoek bij de TU Delft). Gegeven de voorziene toepassing binnen BOI wordt de focus gelegd op de effecten bij de teen van de waterkering. Voor zover er meetdata (uit veld of labmetingen) benodigd en beschikbaar zijn, zal van bestaande meetdata gebruik gemaakt worden.

2 Probleembeschrijving

2.1 Infragravity golven

De term infragravity golven (afgekort: IG-golven) wordt typisch gebruikt voor golven met een golfperiode tussen enkele tientallen seconden en enkele minuten, zie Figuur 2.1. Deze indeling op basis van golfperiode zegt echter nog niets over het genererend mechanisme achter deze golven.



Figuur 2.1 Golf types naar golfperiode (Munk, 1950).

Wanneer we uitgaan van het golfveld bij de teen van de waterkering, zoals te doen gebruikelijk in KvK/BOI context, dan kunnen we op die locatie vier verschillende categorieën (of bronnen) van inkomende IG-golven onderscheiden:

1. Vrije IG-golven afkomstig van verre stormen
2. Gebonden IG-golven
3. Vrijgekomen (voorheen gebonden) IG-golven op ondiep water
4. IG-golven gegenereerd door ruimtelijke oscillatie van de locatie waar golfbreking plaats vindt (breekpunt mechanisme)

Inkomende vrije IG-golven vanaf dieper water worden niet gegenereerd door de lokale wind. Dit soort lange golven kan gemakkelijk grote afstanden afleggen en voor de Nederlandse Noordzeekust dus ook van bijvoorbeeld de Britse of Noorse kust afkomstig zijn (Rijnsdorp et al., 2021; Akrish et al., 2024). Binnen het in BOI gehanteerde raamwerk voor belastingen wordt – voor wat wind betreft – uitgegaan van belastingen veroorzaakt door een lokale storm (boven de Noordzee). Er is daarbinnen dus geen kader om belastingen mee te nemen die niet door de lokale wind/storm zijn gegenereerd, anders dan ze als randvoorwaarde op de modelrand op te leggen. Dit is vergelijkbaar met hoe deining, die wordt gegenereerd door stormen op bijvoorbeeld de Atlantische Oceaan, als randvoorwaarde wordt opgelegd. Dat maakt dat deze vrije IG-golven op dieper water binnen dit werkplan (en de uitvoering ervan) niet verder beschouwd zullen worden, zoals ook genoemd in Sectie 1.2.

De gebonden IG-golven worden gegenereerd door de interactie van golfcomponenten van verschillende frequenties binnen de golfgroepen van een onregelmatig golfveld (zoals dat van nature voorkomt). Dit wordt in meer detail besproken in Sectie 2.2. Aangezien gebonden IG-

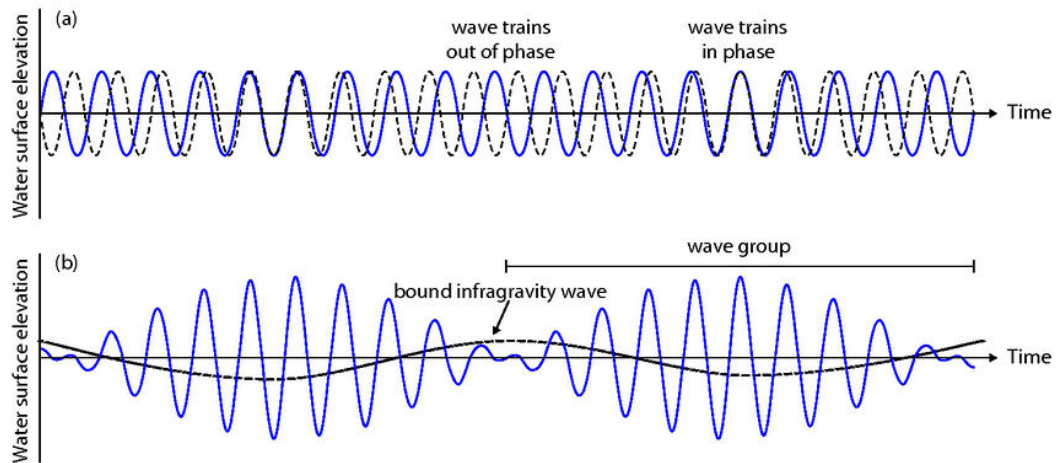
golven automatisch ontstaan bij golfgroepen, zijn deze aanwezig in de onregelmatige golfdata uit golfgoten (met 2^e orde sturing) waarop de empirische formules zijn afgeleid. Daarmee worden de gebonden IG-golven in de golfoploop en -overslagformules binnen de vigerende BOI methodiek gewoon – zij het impliciet – meegenomen. Wel is het zo dat veel van de data waarop de formules in de vigerende methodiek zijn afgeleid weinig ondiepe voorlanden bevatten, zodat het effect van de gebonden IG-golven binnen die dataset beperkt zal zijn.

Vrijgekomen IG-golven zijn IG-golven die voorheen gebonden waren (aan een golfgroep) maar waarvan het genererend mechanisme – de korte golfgroep – (deels) is weggefallen. Dit gebeurt door breking van (een deel van de) korte golven bij ondiepe voorlanden, en wordt in meer detail beschreven in Sectie 2.2. Het effect van deze vrijgekomen IG-golven zit niet verdisconteerd in de vigerende BOI methodiek, omdat het ontstaan hiervan afhankelijk is van de aanwezigheid van een ondiep voorland. Daarom wordt in dit werkplan de focus gelegd op de vrijgekomen IG-golven. Daarnaast blijkt dat vrijgekomen IG-golven bij ondiepe voorlanden vaak veel meer energie bevatten dan wat er overblijft van de gebonden IG-golven, en de consequenties van vrijgekomen IG-golven op golfoploop en golfoverslag dus groot kunnen zijn.

Het bestaan van korte golfgroepen en de variatie van de golfhoogte van de korte golven daarbinnen – de hogere golven breken in een grotere waterdiepte dan de kleinere golven – zorgt voor een oscillatie van het breekpunt in ruimte en tijd. Dit betekent dat ook de gradiënt in de radiation stress in de tijd varieert, wat vervolgens gecompenseerd wordt door een gradiënt in de waterstand die ook in de tijd varieert. Dit geheel is ook een genererend mechanisme voor vrije IG-golven. Dit mechanisme is vooral van belang op steilere voorlanden (Battjes et al., 2004; Bertin et al., 2018). Net als de vrijgekomen IG-golven worden de vrije IG-golven gegenereerd door het breakpoint mechanisme niet verdisconteerd in de vigerende BOI methodiek.

2.2 Golfvoortplanting over ondiepe voorlanden

Zoals hierboven genoemd worden gebonden IG-golven geforceerd door het bestaan van golfgroepen in een onregelmatig golfveld. De modulatie van golfhoogtes binnen de golfgroep zorgt voor een gradiënt in de radiation stress, die vervolgens wordt gecompenseerd door een gradiënt in de waterstand. De radiant stress gradiënt die hoort bij toename in golfhoogte veroorzaakt een lokale daling van de waterstand (set-down), en vice-versa wordt een stijging van de waterstand (set-up) veroorzaakt door afname van golfhoogte. Dat maakt dat de gebonden IG golf altijd een golfdal heeft ter plaatse van de hoge golven in de golfgroep (maximale amplitude van de omhullende van de kort golven) en wederom vice-versa een golftop bij de minimale amplitude van de golfgroep (zie Figuur 2.2). De gebonden IG golf loopt dus in fase (phase-locked) met zijn forcering, de golfgroep. Gebonden IG-golven propageren daarom ook met de golfgroepsnelheid, en niet met de golfvoortplantingssnelheid die bij een vrije golf met dezelfde golfperiode zou horen (al is in de limiet voor zeer ondiep water de groepssnelheid gelijk aan de golfvoortplantingssnelheid). Ergo, er reist een lokale waterstandsverlaging mee met de hoogste golven van de golfgroep, wat tot lagere golfoploop en minder golfoverslag leidt. Zo bezien hebben gebonden IG-golven dus een positieve werking voor waterkeringen die door golfoploop en -overslag belast worden.



Figuur 2.2 Het ontstaan van golfgroepen en de bijbehorende gebonden IG golf (bron: <https://www.coastalwiki.org>)

In de aanwezigheid van een ondiep voorland zullen eerst de (korte) golven in de golfgroep gaan shoalen. Wanneer de waterdiepte (relatief tot de golfhoogte) echter nog verder afneemt zal een deel van de (hoogste) golven in de golfgroep breken. Merk op dat het hier gaat om golfbreking door beperkte (relatieve) waterdiepte. Golven kunnen ook breken in relatief diep water door een te grote steilheid, maar dat is geen dominant mechanisme op ondiepe voorlanden. Met het breken van de korte golven valt de forcering van de gebonden IG golf (deels) weg, maar de vrijgekomen IG golf zelf blijft bestaan en gedraagt zich nu als een vrije golf. Dit betekent ook dat de vrijgekomen IG golf zich nu niet langer met de groepssnelheid maar de reguliere golfvoortplantingssnelheid verplaatst. Daarmee loopt deze niet per definitie meer in fase met de golfgroepen; het dal van de IG golf valt niet langer altijd samen met de (overgebleven) hoge golven binnen de golfgroep. Het verlagende effect van de gebonden IG golf op golfploop en -overslag is hiermee mogelijk verdwenen. Door de andere loopsnelheid van vrijgekomen IG-golven kan nu ook de top van de IG golf ter plekke van de waterkering samenvallen met de (overgebleven) hoge golven uit de golfgroep, wat zorgt voor hogere golfploop en meer golfoverslag en daarmee zeer relevant is voor het beoordelen en ontwerpen van waterkeringen.

In de context van het BOI betekent het bovenstaande dat het niet meenemen van de invloed van vrijgekomen IG-golven op golfploop en -overslag geen scherp beeld van de overstromingskans geeft in beoordeling of ontwerp van een waterkering.

3 Literatuur

Zoals beschreven in Paragraaf 1.1 zijn de fysische processen golfoploop (in de cumulatieve overbelastingmethode) en golfoverslag (in de vigerende BOI implementatie van GEKB) bepalend voor zowel initiële als vervolgmecanismen binnen de faalpaden voor dijkerosie. In dit hoofdstuk wordt een beknopt overzicht gegeven van de beschikbare literatuur omtrent deze fysische in combinatie met de invloed van vrijgekomen IG-golven.

3.1 Golfoverslag

De vigerende methodiek voor het berekenen van golfoverslagdebiet binnen BOI is de (ontwerp)formule uit TAW (2002) (merk op: dit betreft alleen TAW (2002), zonder de vele recentere inzichten uit de literatuur). Zoals in de vorige hoofdstukken geconstateerd bevatten deze formules niet het effect van vrijgekomen IG-golven op het golfoverslagdebiet (omdat omstandigheden waarin deze dominant zijn vrijwel ontbreken in de dataset gebruikt voor de fit), of wordt de betreffende formule voor ondiepe voorlanden waarbij vrijgekomen IG-golven wel zijn verdisconteerd slechts toegepast op een te beperkt toepassingsgebied.

De golfoverslagformules uit TAW (2002) vormen ook de basis voor de eerste EurOtop (2007). Inmiddels is daar een nieuwe versie van verschenen (EurOtop, 2018) met nieuwe golfoverslagformuleringen. Echter deze bevatten ook niet het effect van vrijgekomen IG-golven, terwijl de bevindingen van Lashley et al. (2022) aangeven dat de EurOtop (2018) aanpak ongeschikt is voor ondiepe voorlanden. Los van de IG-golven is ook aangetoond dat EurOtop (2018) minder accuraat is dan de TAW (2002) formules in het voorspellen van de CLASH database waarop beide zijn afgeleid (Den Bieman et al., 2021).

De formule van Van Gent (1999) verdisconteert echter wel het effect van vrijgekomen IG-golven, omdat deze specifiek voor ondiepe voorlanden zijn afgeleid (zie vergelijking (1)). Deze formule is afgeleid op data met relatieve waterdieptes – gedefinieerd als $\frac{d_{toe}}{H_{m0,deep}}$ – tussen de 0.33 en de 2.5:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = c_a \exp\left(\frac{R_c}{\gamma H_{m0}(c_b + c_c \xi_{m-1,0})}\right) \quad (1)$$

Waar q het golfoverslagdebiet is, g de zwaartekrachtversnelling, H_{m0} de spectrale golfhoogte, c_a , c_b en c_c coëfficiënten zijn (-), R_c het vrijboord (m), γ de invloedsfactoren (-) en $\xi_{m-1,0}$ het Irribarren getal (-) gebaseerd op de spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$ (s). Voor de genoemde coëfficiënten zijn twee sets afgeleid (zie Tabel 3.1): één set waar de IG-golven in de spectrale golfparameters meegenomen zijn (expliciet) en één set waarbij dat niet zo is (impliciet). Voor de impliciete coëfficiënten wordt er dus een aanname wordt gedaan over de IG-golven. Voor de expliciete coëfficiënten is dat niet het geval, en dat maakt deze coëfficiënten dus generieker toepasbaar. In TAW (2002) wordt een criterium o.b.v. het Irribarrental aangehouden om over te schakelen op de bovenstaande formule. Dit is een enigszins ongelukkige keuze, omdat dit niet het meest geschikte criterium is om de aanwezigheid van een ondiep voorland vast te stellen.

Tabel 3.1. Coëfficiënten voor in formule (1), naar: Van Gent (1999).

	Golfhoogtemaat	Periodemaat	C _a	C _b	C _c
Expliciet: korte + IG-golven	H _{m0}	T _{m-1,0}	0.12	0.33	0.022
Impliciet: alleen korte golven	H _{m0}	T _{m-1,0}	0.12	0.18	0.106

Later is door Altomare et al. (2016) nog een aanpassing voorgesteld van één van de coëfficiënten in de formule in het geval van zéér ondiepe voorlanden, waaronder situaties waarbij de teen van de dijk boven de stilwaterlijn ligt. Dit soort situaties is minder relevant in de context van Nederlandse waterkeringen.

Zeer recent onderzoek van De Ridder et al. (2024) naar golfoverslag bij ondiepe voorlanden laat nog een verbetering zien t.o.v. Van Gent (1999) door ook de laagfrequente golfhoogte ($H_{m0,LF}$) en de golfhoogte die door 2% van de golven wordt overschreden ($H_{2\%}$) in de formule mee te nemen, zie vergelijking (2). Het voordeel van deze aanpak – naast de toegenomen nauwkeurigheid – is dat door het expliciet meenemen van de laagfrequente golfhoogte ($H_{m0,LF}$) de mogelijkheid wordt geboden om op termijn ook IG-golven met andere generatiemechanismen mee te nemen, zoals de vrije IG-golven afkomstig van verre stormen, die in dit werkplan buiten de scope vallen (zie Paragraaf 1.2). In De Ridder et al. (2024) is deze aanpak toegepast bij golfoverslag bij golfbrekers van breuksteen. Voor uiteindelijke toepassing bij beoordeling en ontwerp van waterkeringen zou deze methode middels aanvullende fysieke modelexperimenten moeten worden uitgebreid naar zowel dijken als golfploophoogte.

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.15 \exp \left(-9.45 \frac{R_c^{-0.90} H_{m0,LF}}{H_{m0} \gamma_f} S_{m-1,0,HF}^{0.28} \right) \quad (2)$$

3.2 Golfploop

De TAW (2002) bevat tevens formules voor het berekenen van golfploophoogte. Ook in dit geval bevatten deze formules niet het effect van vrijgekomen IG-golven op de golfploophoogte. Exact dezelfde formules zijn opgenomen in de meest recente versie van EurOtop (2018).

Een alternatieve golfploopformule van Van Gent (2001) – zie vergelijkingen (3) en (4) – is afgeleid met twee sets aan coëfficiënten; één exclusief ($c_0 = 1.45$ en $c_1 = 3.8$) en één inclusief ($c_0 = 1.45$ en $c_1 = 5.0$) het effect van vrijgekomen IG-golven, op dezelfde manier als voor vergelijking (1).

$$\frac{z_{2\%}}{\gamma H_{m0}} = c_0 \xi_{m-1,0} \text{ voor } \xi_{m-1,0} \leq p \quad (3)$$

$$\frac{z_{2\%}}{\gamma H_{m0}} = c_1 - \frac{c_2}{\xi_{m-1,0}} \text{ voor } \xi_{m-1,0} > p \quad (4)$$

Hier is $z_{2\%}$ de golfploophoogte met een 2% overschrijdingskans (m) en c_0 , c_1 en c_2 zijn coëfficiënten (-).

3.3 Bepaling infragravity golven bij de teen

Om de vrijgekomen IG-golven bij de teen van een waterkering te bepalen zijn er twee oplossingsrichtingen; ofwel het gebruik van een empirische formule, ofwel met numerieke modelberekeningen. Beiden worden hieronder verder toegelicht.

3.3.1 Empirische formules

In Lashley et al. (2020) wordt een methode gepresenteerd om de (relatieve) invloed van vrijgekomen IG-golven bij de teen van de waterkering te voorspellen (zie vergelijking (5)). De formule is afgeleid op basis van een groot aantal berekeningen met de non-hydrostatische solver van XBeach. Door de gekozen vorm van de formule is de coëfficiënt niet dimensieloos, deze heeft namelijk de dimensie $m^{-0.5}$. Het feit dat de coëfficiënt dimensiehoudend is maakt dat deze formule niet goed schaalbaar en daarmee niet generiek toepasbaar is buiten het type condities waarop deze is afgeleid.

$$\tilde{H}_{IG} = \frac{H_{m0,IG,toe}}{H_{m0,SS,toe}} = 0.36 \cdot \sqrt{H_{m0,deep}} \cdot \bar{\gamma}_\sigma \cdot \bar{\gamma}_h \cdot \bar{\gamma}_f \cdot \bar{\gamma}_v \cdot \bar{\gamma}_d \quad (5)$$

Hierin is \tilde{H}_{IG} de ratio tussen IG en korte golfhoogte (-), $H_{m0,IG,toe}$ de spectrale IG golfhoogte (m), $H_{m0,SS,toe}$ de spectrale korte golfhoogte (m), $H_{m0,deep}$ de (totale) spectrale golfhoogte op diep water (m). Daarnaast zijn er verschillende invloedsfactoren voor het verdisconteren van richtingspreiding ($\bar{\gamma}_\sigma$), beperkte waterdiepte bij de teen ($\bar{\gamma}_h$), de helling van het voorland ($\bar{\gamma}_f$), vegetatie ($\bar{\gamma}_v$) en de taludhelling van de dijk ($\bar{\gamma}_d$).

Merk op dat voor het toepassen van deze formule nog wel de golfhoogte op diep water en de invloedsfactoren bekend moeten zijn.

Daarnaast is er in Lashley et al. (2022) een formule afgeleid die de verandering van de spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$ door het voorland kwantificeert (zie vergelijking (6)). Deze formule is specifiek afgeleid voor relatief flauwe voorlanden met een constante helling. De evidente beperking hierbij is dat dit soort formules niet geldig zijn op complexe voorlanden, zoals die in de praktijk vaak voorkomen. Het werken met numerieke modellen, zoals beschreven in de onderstaande paragraaf, kent die beperking niet.

$$\frac{T_{m-1,0,toe}}{T_{m-1,0,deep}} = \begin{cases} 1.59 \cdot \tilde{H}_{IG}^{0.69} \cdot \cot(m)^{0.17} & \text{voor } \frac{h_{toe}}{H_{m0,deep}} \leq 1 \\ 1 & \text{voor } \frac{h_{toe}}{H_{m0,deep}} > 1 \end{cases} \quad (6)$$

3.3.2 Numeriek modellen

Voor het simuleren van gebonden IG-golven en het vrijkomen daarvan op een ondiep voorland is een numeriek model nodig dat ofwel de IG-golven en het loslaten ervan uitrekent (een surfbeat model), ofwel ook de fase van de korte (wind)golven uitrekent (een fase oplossend of phase-resolving model). Dat maakt dat het (binnen BOI veel gebruikte) golfmodel SWAN (Booij et al., 1999) hiervoor niet geschikt is, omdat dit een spectraal golfmodel is en dus noch de IG-golven uitrekent, noch fase-informatie van de windgolven bepaalt. De meest voor de hand liggende golfmodellen zijn enerzijds XBeach in surfbeat modus (Roelvink et al., 2009), anderzijds SWASH (Zijlema et al., 2011) of XBeach in de niet-hydrostatische modus (Smit et al., 2010; De Ridder et al., 2021). Op basis van lopend onderzoek wordt verwacht dat SWAN t.z.t. wel uitgebreid gaat worden voor het verdisconteren van IG-golven, maar dat is nu nog niet het geval.

SWASH en XBeach in niet-hydrostatische modus zijn redelijk vergelijkbaar voor deze toepassing. Het meest wezenlijke verschil is dat waar SWASH een volledige meer-lagen implementatie (in de verticaal) kent en XBeach gebruik maakt van een versimpelde maar efficiënte benadering van een tweelaags systeem. Beide modellen kennen een fase-oplossende aanpak van zowel korte als IG-golven. Dit in tegenstelling tot XBeach in surfbeat modus, waarin de fase van de IG-golven wel opgelost wordt, maar de korte golven spectraal worden opgelost middels een wave-action balance. Fase-informatie betreffende de korte golven is daarom dus niet beschikbaar in XBeach surfbeat.

4 Oplossingsrichtingen en prioritering

4.1 Deel I - Toepasbaarheid formules voor diep water en ondiepe voorlanden

Zoals beschreven in Hoofdstuk 3 is er een aantal verschillende formules voor het berekenen van golfloop en -overslag, met ieder een specifiek toepassingsgebied. Om dit tot een werkbaar geheel te maken dient te worden onderzocht welke formule in welke situatie bij de beoordeling van de waterkering gebruikt wordt. Hierbij moet enerzijds de invloed van vrijgekomen IG-golven worden meegenomen (dit in tegenstelling tot de vigerende methodiek), anderzijds moet recht worden gedaan aan de overstromingskansbenadering door een zo scherp mogelijke overstromingskans te bepalen (niet te positief rekenen, maar ook geen conservatisme).

De meest kansrijke en toekomstbestendige aanpak lijkt die van De Ridder et al. (2024), waarin de IG-golfhoogte expliciet wordt meegenomen zodat toekomstige inzichten m.b.t. vrije IG-golven van verre stormen hierin eenvoudige kunnen worden meegenomen. Gegeven dat deze aanpak momenteel nog alleen is toegepast op golfoverslag bij golfbrekers van breuksteen, zal dit moeten worden uitgebreid naar enerzijds dijken en anderzijds golfloop. Om dit te kunnen doen zijn aanvullende fysieke modeltesten nodig.

4.2 Deel II - Bepaling golfbelasting bij de teen van de waterkering incl. vrijgekomen IG-golven

Om de invloed van vrijgekomen IG-golven mee te kunnen nemen, moet wel bekend zijn hoe groot deze golven zijn aan de teen van de waterkering (tezamen met de korte windgolven). Hiervoor zijn twee voor-de-hand-liggende oplossingsrichtingen; ofwel inschatting d.m.v. het gebruik van een simpele empirische formule, ofwel het berekenen van de golftransformatie en het ontstaan van de vrijgekomen IG golf middels een numeriek (fase-oplossend) model.

In feite is de formule van Lashley et al. (2020) een voorbeeld van zo'n empirische formule. Echter, in dit specifieke geval zijn er in Sectie 3.3.1 en in Appendix A enkele openstaande vragen geconstateerd met betrekking tot de toepasbaarheid van deze formule. Daarmee lijkt het verstandig om goed te kijken naar de formule en de afleiding ervan, om zo de openstaande vragen te kunnen beantwoorden. Wellicht kan het model aangepast worden zodat het bruikbaar wordt voor bepaalde toepassingen met relatief eenvoudige ondiepe voorlanden.

Er is een aantal numerieke modellen dat het ontstaan en de grootte van de vrijgekomen IG golf in theorie zou moeten kunnen simuleren. Met name SWASH (en wellicht ook de non-hydrostatische solver van XBeach) lijkt hier kansrijk. Hierbij is het belangrijk om inzicht te krijgen in de mate waarin een numeriek model de vrijgekomen IG-golven goed kan voorspellen. Daarom dient dit gevalideerd te worden met (bestaande) meetdata uit fysieke faciliteiten van proeven met golfbreking op een ondiep voorland. Daarbij kan ook nagegaan worden of rekentijden dermate groot worden dat een andere aanpak op basis van een vooraf met een numeriek model gegenereerde database adequaat kan zijn.

4.3 Deel III - Voorstel voor alternatieve methodiek

Uit het bovengenoemde twee stappen moet duidelijk worden hoe eerst de vrijgekomen IG-golven bepaald zouden kunnen worden om vervolgens het effect ervan op golfloop en -overslag met daarvoor geschikte formules uit te rekenen. Deze elementen worden samengevat in een voorstel tot een alternatieve methodiek voor het berekenen van golfloop en -overslag met inbegrip van het effect van vrijgekomen IG-golven. Dit alles in het kader van beoordeling

en ontwerp van waterkeringen zoals in BOI. Daarom wordt tevens een controle op de implementeerbaarheid in de bestaande BOI software uitgevoerd.

4.4 Deel IV - Consequentieanalyse

Na het ontwikkelen van een alternatieve methodiek voor het berekenen van golfloop en -overslag binnen BOI resteert de vraag hoe groot de consequenties daarvan zijn op de beoordeling van de waterkering. In deze stap wordt een beperkt aantal representatieve locaties geselecteerd, waarbij berekeningen van de overstromingskans worden gedaan met zowel de vigerende als de voorgestelde alternatieve methodiek. Wat de selectie van locaties betreft ligt het voor de hand om locaties te kiezen waarbij ondiepe voorlanden c.q. golfbreking op diepte voorkomt.

Referenties

- Akrish, G., Reniers, A., Rijnsdorp, D., Zijlema, M., Rutten, J. and Tissier, M., 2024. Unstructured SWAN modelling of free infragravity waves over the Southern North Sea. *Proc. CoastLab24*. doi: <https://doi.org/10.59490/coastlab.2024.738>
- Altomare, C., Suzuki, T., Chen, X., Verwaest, T. and Kortenhaus, A., 2016. Wave overtopping of sea dikes with very shallow foreshores. *Coastal Engineering*, 116, 236 – 257. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.07.002>
- Ardhuin, F., Arshad, R. and Aucun, J., 2014. A numerical model for free infragravity waves: Definition and validation at regional and global scales. *Ocean Modelling*, 77, 20 – 32. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2014.02.006>
- Battjes, J.A., Bakkenes, H.J., Janssen, T.T. and van Dongeren, A.R., 2004. Shoaling of subharmonic gravity waves. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol. 109, No. C2. doi: <https://doi.org/10.1029/2003JC001863>
- Bertin, Xavier, de Bakker, Anouk, van Dongeren, Ap, Coco, Giovanni, André, Gael, Ardhuin, Fabrice, Bonneton, Philippe, Bouchette, Frédéric, Castelle, Bruno, Crawford, Wayne C., Davidson, Mark, Deen, Martha, Dodet, Guillaume, Guérin, Thomas, Inch, Kris, Leckler, Fabien, McCall, Robert, Muller, Héloïse, Olabarrieta, Maitane, Roelvink Dano, Ruessink, Gerben, Sous, Damien, Stutzmann, Éléonore, Tissier, Marion, 2018. Infragravity waves: From driving mechanisms to impacts. *Earth-Science Reviews*, 177, 774 – 799. doi: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.01.002>
- Den Bieman, J.P., Van Gent, M.R.A. and Van den Boogaard, H.F.P., 2021. Wave overtopping prediction using an advanced machine learning technique. *Coastal Engineering*, 166, 103830. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103830>
- Booij, N., Ris, R.C. and Holthuijsen, L.H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4), 7649–7666. doi: <https://doi.org/10.1029/98JC02622>
- Chen, W., van Gent, M.R.A., Warmink, J.J., Hulscher, S.J.M.H., 2020. The influence of a berm and roughness on the wave overtopping at dikes. *Coastal Engineering*, 156, 103613. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.103613>
- EurOtop, 2007. *Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual*; Pullen, T., Allsop, N.W.H., Bruce, T., Kortenhaus, A., Schüttrumpf, H., van der Meer, J.W., Eds..
- EurOtop, 2018. In: van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., de Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P., Zanuttigh, B. (Eds.), *Manual on Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures*. www.overtopping-manual.com.
- Van Gent, M.R.A., 2001. Wave runup on dikes with shallow foreshores. *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, 127(5), 254 – 262. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2001\)127:5\(254\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2001)127:5(254))
- Van Gent, M.R.A., 1999. Physical model investigations on coastal structures with shallow foreshores – 2D model tests with single and double-peaked wave energy spectra. Technical report H3608, WL | Delft Hydraulics.

- Lashley, C.H., Bricker, J.D., van der Meer, J.W., Altomare, C. and Suzuki, T., 2020. Relative magnitude of infragravity waves at coastal dikes with shallow foreshores. *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, Vol. 146, No. 5. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000576](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000576)
- Lashley, C.H., Jonkman, S.N., van der Meer, J.W., Bricker, J.D., Vuik, V., 2022. The influence of infragravity waves on the safety of coastal defences: a case study of the Dutch Wadden Sea. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 22, No. 1, p. 1-22. doi: <https://doi.org/10.5194/nhess-22-1-2022>
- De Ridder, M.P., van Kester, D.C.P., van Bentem, R., Teng, D.Y.Y. and van Gent, M.R.A., 2024. Wave overtopping discharges at rubble mound structures in shallow water. *Coastal Engineering*, 194, 104626. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2024.104626>
- De Ridder, M.P., Smit, P.B., van Dongeren, A.R., McCall, R.T., Nederhoff, K. and Reniers, A.J. (2021). Efficient two-layer non-hydrostatic wave model with accurate dispersive behaviour. *Coastal Engineering*, 164, 103808. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103808>
- Rijnsdorp, D.P., Reniers, A.H.J.M. and Zijlema, M., 2021. Free Infragravity Waves in the North Sea. *J. Geophys. Res. Oceans*, Vol. 126, No. 8. doi: <https://doi.org/10.1029/2021JC017368>
- Roelvink, J.A., Reniers, A.J.H.M., Van Dongeren, A.R., Van Thiel de Vries, J.S.M., McCall, R.T. and Lescinski, J., 2009. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*, 56(11-12), 1133–1152. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.08.006>
- RWS, 2022. Golfloopmodellering voor de Waddenzee met toevoeging van Infragravity waves – Bijdrage RWS WV aan het kennisprogramma AllRisk. Technisch rapport, Rijkswaterstaat WV. Auteur(s): R.J. Vos.
- Smit, P., Stelling, G., Roelvink, D., van Thiel de Vries, J., McCall, R., van Dongeren, A., Zwinkels, C., Jacobs, R., 2010. XBeach: Non-hydrostatic Model. Report, Delft University of Technology and Deltares, Delft, The Netherlands
- TAW, 2002. Technisch Rapport Golfloop en Golfoverslag bij Dijken. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, Delft
- Vos, R.J., 2024. Berekeningen van Q en Z2% met de formules van Gent. Memo, dd 02-07-2024.
- Zijlema, M., Stelling, G. and Smit, P., 2011. SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. *Coastal Engineering*, 58, 10. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.05.015>

A Beantwoording initiële vragen RWS

In aanloop naar het opstellen van voorliggend werkplan is er een overleg geweest op 24 juni 2024 tussen RWS WVL (Robert Vos en Patrick Oosterlo) en Deltares (Marcel van Gent en Jacco Groeneweg). Dat overleg vormt voor een belangrijk deel de basis voor dit werkplan. Bij dit overleg is er een achttal vragen van de kant van RWS WVL besproken. Deze vragen en de antwoorden hierop zijn – op basis van het eerder opgestelde bespreekverslag – in deze bijlage opgenomen. Een deel van de antwoorden is ook in voorgaande hoofdstukken opgenomen.

Vraag 1: Waarom geeft de “kale formule van Van Gent” zonder extra IG-energie al zoveel extra kruinhoogte t.o.v. TAW-2002?

De TAW formule is niet gevalideerd voor breken op ondiepe vooroevers en wordt dus eigenlijk buiten het geldigheidsdomein toegepast. De formule van Van Gent (1999) is expliciet gevalideerd met brekende golven op de vooroever. Bij golfbreking worden gebonden IG-golven vrij gemaakt. Het effect van IG-golven is verdisconteerd. IG-golven zorgen typisch voor een waterstandsverhoging en -verlaging. De hoogste (wind)golven vallen typisch samen met het dal van de gebonden IG golf, hetgeen gunstig is voor waterveiligheid. Vrijgemaakte IG-golven lopen met hun eigen snelheid en de grootste windgolven kunnen wel degelijk samenvallen met een top van de vrije IG golf (waterstandsverhoging). Op ondiepe voorlanden treedt golfbreking op, worden IG-golven vrijgemaakt en is het effect op oploop en overslag relevant. De expliciete formule heeft zonder toevoeging van het IG-deel aan SWAN uitkomsten verder geen betekenis; het IG-deel hoort in de golfcondities aan de teen te zitten.

Vraag 2: Zijn er dubbeltellingen denkbaar bij toepassen van Lashley die leiden tot de hoogste kruinhoogte?

Indien goed toegepast zijn er geen dubbeltellingen. In de impliciete formule zit een hoeveelheid IG-golven (d.w.z. de IG-golven die in de gebruikte testen zijn opgetreden) al verwerkt, dus moet je die er niet extra bij stoppen (want dat zou een dubbeltelling zijn). Daar moet je dus mee oppassen als je resultaten aan de teen van de dijk van SWAN inclusief IG-golven (recent door TU ontwikkeld) of SWASH toepast.

De formule van Lashley et al. (2020) voor een schatting van de hoeveelheid IG waves bij bepaalde golfcondities is niet dimensieloos; de dimensieloze ratio \tilde{H}_{IG} is een functie van de dimensiedragende $\sqrt{H_{m0,deep}}$. Daardoor kan deze formule alleen kwantitatief worden toegepast in het gebied (d.w.z. het golfhoogtebereik) waarvoor de formule is afgeleid. Dat hangt af van het datadomein en hoe dat is benut in de fit. Hiermee kunnen helaas grote fouten worden geïntroduceerd die bij extreme omstandigheden tot overschattingen kunnen leiden. Het is daarom zaak uit te zoeken hoe de formule precies is afgeleid om de consequenties van een dergelijke toepassing te kunnen inschatten. Op termijn is een dimensieloze, juist geschaalde, formule nodig voor \tilde{H}_{IG} als de IG-golven niet worden bepaald met een model dat deze IG-golven efficiënt kan uitrekenen.

Vraag 3: Voor welke condities mogen we de formule van Van Gent toepassen? (is de brekerparameter wel relevant?)

Voor de overgang van de TAW (2002) formule (zonder brekende golven op de vooroever) naar de Van Gent formule (met en zonder brekende golven op de vooroever) wordt in TAW nu de brekerparameter gebruikt. Een betere indicator voor een eventuele overgang van de ene formule naar de andere formule, is mogelijk de $H_{m0,deep}/d_{toe}$ met H_{m0} op "diep" water en de lokale diepte aan de teen van de dijk. Het is waarschijnlijk dat deze indicator beter geschikt is om aan te geven tot welke condities het gebruik van de TAW formule beperkt zou moeten zijn.

De Van Gent formule is relevant voor ondiepe voorlanden waarbij golfbreking optreedt en gebonden IG energie door breking wordt omgezet naar vrije IG-energie. De formule is gevalideerd voor voorlanden met een helling van minimaal 1:250 ($m = 250$) of steiler, en voor taludhellingen van tenminste 1:4 of steiler. Deze formule is ook geldig voor diep water (er hoeft geen ondiep voorland aanwezig te zijn).

Er is nog een aanpassing door Altomare et al. (2016) voor zeer ondiep water (als bij de Belgische kust, waarbij de teen van de constructie droog staat), maar deze situaties zijn voor de Nederlandse situaties minder relevant.

Juist voor de Waddenzee is de TAW (2002) formule niet geldig, omdat daarin het breken op de vooroever niet is meegenomen. Op diep water convergeren de TAW formule en Van Gent formule naar elkaar toe, maar zijn overigens niet in elkaar om te schrijven.

Vraag 4: Gedragen IG waves zich niet anders op bermen dan normale golven?

Marcel gaf aan dat voor alleen IG-golven (zonder korte golven) de berm in feite weinig of niets doet; de afmeting van de berm is immers relatief klein t.o.v. de IG golflengte. De korte golven worden wel beïnvloed door de waterstandsverhoging – danwel -verlaging – die door de IG-golven worden veroorzaakt. Het is lastig het bermeffect in deze gecombineerde situatie af te schatten maar het is aannemelijk dat de IG-golven zorgen voor een andere waterstand t.o.v. de berm en dat het effect van de berm op de korte golven daarmee beïnvloed wordt door de aanwezigheid van IG-golven. De mate waarin dit het geval is, is wel met een gevoeligheidsstudie in te schatten, gebruikmakend van de huidige methode voor bermen voor korte golven zoals door Chen et al. (2020) is bepaald.

Vraag 5: Wat is de impuls/snelheid van zeer lange golven t.o.v. normale golven?

Het gaat bij golfoploop niet zozeer om de impuls of snelheid (we bedoelen hier sowieso niet de voortplantingssnelheid van een golf maar de golfoploopsnelheid) maar om de golflengte (golfperiode). Hoe langer de golflengte (golfperiode), hoe langer de tong van de golf die over de dijk gaat en hoe langer dat duurt. Het overslagvolume van deze zeer lange golven is dus groter dan voor korte golven. Het overslagvolume is te relateren aan q of $Z^{2\%}$.

Vraag 6: Wat is een vlak voorland precies? Mogen oneffenheden, geulen en kwelders van beperkte afmetingen aanwezig zijn?

Bij formule van Van Gent wordt gesproken over een ondiep voorland. De essentie daarvan is dat de korte (wind)golven daarop breken, zodat de IG golf vrijkomt. Golfcondities bij de teen van de dijk vormen invoer voor de formule. In principe is dat gescheiden van hoe het voorland er uitziet, al dan niet met geulen en kwelders. De kwaliteit van de golfmodellen bepaalt natuurlijk wel de nauwkeurigheid van de golfcondities aan de teen van de dijk.

De huidige formules voor de invloed van schuin invallende golven (γ_β) zijn gebaseerd op diep-water condities aan de teen. Voor situaties met ondiep water, cq. brekende golven op de vooroever, is niet bekend wat de invloedsfactor voor schuininvallende golven is. Hier ligt een kennishiaat.

Windgolven en IG-golven kunnen bij de dijken in de Waddenzee uit een verschillende richting komen. Dit maakt dat in de Waddenzee een 2DV model (a la golfgoot) niet meer voldoet maar eigenlijk een 3D benadering nodig is. Voor Petten is een 2DV benadering waarschijnlijk nog wel voldoende betrouwbaar.

Met ADCPs is door Patrick Oosterlo recent waargenomen dat de IG waves nabij Noordkaap vrijwel parallel aan de dijk lopen. De oorzaak hiervan verdient nadere analyse(s).

Vraag 7: Is de hoek van golfval nog anders voor IG-golven? En kortkammigheid?

Hoek van golfval is inderdaad anders voor IG-golven, zie ook het antwoord op vraag 6. Wat betreft kortkammigheid: het directe gevolg van richtingsverspreiding is dat hoe meer richtingsverspreiding er in het golfveld zit, hoe minder IG-energie aan de teen van de dijk wordt teruggevonden. Het verdisconteren hiervan zou bijvoorbeeld met invloedsfactoren kunnen.

Suzuki beweert dat er wel een effect is van kortkammigheid, ook bij gemiddeld loodrechte golfaanval. Het vermoeden bestaat dat zijn conclusies gebaseerd zijn op onnauwkeurig bepaalde inkomende golfhoogten. Het is immers erg lastig om de inkomende golfhoogte goed te bepalen bij condities met richtingsverspreiding.

Vraag 8: Zitten vrije IG-golven in de formule?

De gebonden IG energie die door breken wordt vrijgemaakt zit in de golfhoogte en golfperiode waarden waar de formule op is afgeregeld. De vrije fractie aan IG-energie die rondzwerft over de Noordzee en de Waddenzee binnenkomt (Rijnsdorp et al., 2021; beschreven in SWAN met de aanpak van Arduin et al., 2014) zit hier niet in.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl