



RWS ONGECLASSIFIEERD

Relevantie van schuine golfinval en kortkammigheid voor golfoverslag, en de representativiteit van golfgootproeven – een quick scan van de literatuur

Datum 7 november 2022
Status 3.2 eindversie



Colofon

Uitgegeven door	Rijkswaterstaat, WVL
Informatie	Dr. M. Bottema
Telefoon	
Fax	
Uitgevoerd door	M. Bottema
Opmaak	
Datum	7 november 2022
Status	3.2 Eindversie, na review door Robert Vos, Patrick Oosterlo, en (deels) ook door Joost den Bieman (Deltares) en Myron van Damme
Foto voorplaat	Golfploop bij Rotterdamse Hoek (Noordoostpolder) bij een WZW-wind van 8-9 Beaufort, met licht schuine golfval en kortkammige golven, Marcel Bottema, 26/2/2002
Versienummer	3.2

Inhoud

ABSTRACT.....	7
SAMENVATTING.....	9
1 INLEIDING.....	11
2 GOLFSTEILHEID.....	13
3 INVLOED VAN WINDFORCERING.....	17
4 EFFECT VAN SCHUINE GOLFINVAL.....	19
4.1 Effect van schuine golfinval – deterministische context.....	19
4.2 Effect van schuine golfinval – probabilistische context.....	24
4.3 Effect van schuine golfinval – golfklap en dijkerosie.....	26
4.4 Effect van schuine golfinval – aanbevelingen en kennisvragen.....	27
5 INVLOED VAN KORTKAMMIGHEID EN RICHTINGSSPREIDING.....	29
5.1 Directe invloed van kortkammigheid op golfloop en golfoverslag.....	29
5.2 Indirecte invloed van kortkammigheid op golfloop en golfoverslag.....	30
6 CONCLUSIES, AANBEVELINGEN, RESTERENDE KENNISVRAGEN.....	34
6.1 Conclusies.....	34
6.1.1 Conclusies – hoofdlijnen.....	34
6.1.2 Conclusies – in meer detail.....	35
6.1.3 Conclusies – eerste beschouwing over verschillen typen experimenten.....	36
6.2 Aanbevelingen en resterende kennisvragen.....	37
6.2.1 Aanbevelingen op hoofdlijnen.....	37
6.2.2 Aanbevelingen en kennisvragen - details.....	38
7 LITERATUUR.....	43

Abstract

Wave flume experiments have been highly important for quantifying wave loads on, and erosion of, dikes and dunes. At the same time, they are not free of limitations. For example, wind forcing is absent in most wave flumes. Also, it is difficult or even impossible to reproduce oblique wave attack in a flume. The same applies to short-crested wave (see cover illustration). This raised the question whether alternatives to wave flumes should be used more extensively, such as wave-basin experiments.

These questions led to the decision to make a quick scan of relevant literature. The quick scan focusses on relevant differences between flume measurements and field (in-situ) measurements, as well as the conditions that are not yet measured, but which are to be expected during design conditions with order 12 Beaufort wind speeds, and the waves and storm surges that match such winds.

A key aim of this quick scan is to make an inventory of research questions related to the differences between wave flume and wave basin and between laboratory and in-situ measurements.

After the introduction (Chapter 1), the following topics are discussed in this report:

- Wave steepness (Chapter 2)
- Wind forcing (Chapter 3)
- Oblique wave attack (Chapter 4)
- Short-crestedness and directional spreading of the waves (Chapter 5)
- Conclusions and recommendations (Chapter 6)

The main conclusions are:

- 1 Especially large-scale laboratory experiments often do not seem (fully) able to produce the wave steepnesses of 7% and higher that are observed for strongly forced and young in-situ waves (see Figure 1). Experiments with too small a wave steepness often result in significant overestimations of wave run-up and overtopping. This limitation becomes more pronounced when design conditions (with order 12 Beaufort winds) are considered. Both wind forcing and short-crestedness are potential candidates to explain the mismatch in laboratory and in-situ wave steepness. Indirectly, it can be argued that the effect of wind forcing probably is not negligible.
- 2 For short waves like wind waves, oblique wave attack generally has a favourable (load-reducing) effect. This may no longer be the case when the consideration of long swell and/or infra-gravity waves leads to large Iribarren numbers with $\xi > 2,5$, where the wave breaking regime changes from plunging waves to collapsing and surging waves. Additionally, research on Eurotop influence factors for wave run-up and overtopping seems to have predominantly focused on smaller Iribarren numbers with $\xi < 2,5$.
- 3 Wave flumes are not suitable to quantify wave load reductions associated with oblique wave attack. For wave run-up and wave overtopping, these effects are expected to be relevant for at least a few hundred kilometres of Dutch flood defences.
- 4 For wave impact (due to peak pressures in breaking waves) and for dike erosion, wave load reductions associated with oblique wave attack even seem to be stronger, also compared to the Eurotop (2018) run-up and overtopping formulas. Hence, the relevance of oblique wave attack may be even larger for hard revetments, which in the wave impact zone are applied more often than grass revetments.
- 5 Experiments with long-crested waves on impermeable and relatively smooth slopes generally give a much too optimistic (non-conservative) estimate of the effects of oblique wave attack, and in a few cases (shallow foreshore) a slightly too conservative estimate.

- 6 There is no universal formula for an oblique-wave influence factor. Instead, the influence factor was found to depend on load variable, directional spreading and revetment type (see Figure 2).
- 7 It is worthwhile to consider interactions or even synergetic effects between different influence factors, for example between oblique wave attack and berms (Figure 4) or between oblique wave attack and slope roughness. In several cases, such synergetic effects result in additional reduction of effective wave loading.

More details on the above findings are given in Section 6.1 and its subsections.

For the recommendations, two issues play on the background:

- The significance of oblique wave attack, and the need for further optimisation and corroboration of the related influence factors.
- The relatively low wave steepnesses in laboratory experiments, compared with both in-situ measurements and validated spectral wave models.

This leads to the following set of recommendations:

1. Corroborate and include the (often favorable) influence of oblique wave attack for all types of revetments and the associated hydraulic load variables. It is important to not only consider wave run-up and overtopping, but also wave impact loadings lower on the dike slope, and run-up and front velocities that are key variables in the Cumulative Overloading Approach that is to be implemented soon. Also, it is important to account for short-crestedness of the waves (or directional spreading) in this.
2. Corroborate and include the interactions and synergetic effects between oblique wave attack on one hand, and other relevant aspects on the other hand, such as berms, slope roughness, directional spreading of the waves and the (finite) water depth at the dike toe.
3. Investigate if, when and why oblique wave attack no longer has a favourable (load-reducing) effect, but rather an unfavourable effect. This could happen when long swell and/or infra-gravity waves are considered or included, especially when the Iribarren number $\xi > 2,5$. For that situation ($\xi > 2,5$), it is also recommended to investigate in general to what extent the Eurotop (2018) formulas and influence factors are validated and applicable.
4. Investigate where, when and why wave steepnesses in wave flumes (and in some wave basin experiments and some phase-resolving models) tend to be lower than for in-situ measurements and for validated spectral wave models. In addition, investigate to what extent such wave steepness mismatches give rise to problems in practice.
5. Make a measurements-based strategy for development, calibration and validation for models that describe how wave loads act on revetments. Make sure that the strategy will allow to make a balanced and well-informed choice between different options, such as flume experiments, wave basin experiments, wind-wave-flume experiments, in-situ measurements and in some cases also sufficiently validated numerical benchmark models.
6. Focus on the main questions above, but do not overlook relevant second order effects such as short-crestedness of the waves, and generally unfavourably acting phenomena like wave-induced set-up of the water level and infragravity waves. For the latter two questions were raised related to the way they should be accounted for and to their presence or absence in laboratory experiments and data.

More details on the above recommendations are given in Section 6.2 and its subsections.

Samenvatting

Golfgootproeven zijn van groot belang gebleken voor het kwantificeren van golfbelastingen en bijbehorende erosie van dijken en duinen. Tegelijkertijd hebben golfgootproeven hun beperkingen. Zo ontbreekt in de meeste golfgoten de forcering door wind. Verder is het lastig tot onmogelijk schuine golfinval te reproduceren in een golfgoot. Hetzelfde geldt voor kortkammige golven, ofwel golven die niet als één langgerekte golfkam uit één richting komen, maar een samenstelling van een groot aantal golven die elk uit een wat andere richting komen (zie voorplaat). Naar aanleiding van deze beperkingen kwam de vraag op of niet meer gebruik gemaakt moet gaan worden van golfbassinproeven in aanvulling op golfgootproeven.

Bovenstaande vragen waren aanleiding om een quick scan van de literatuur uit te voeren. De quick scan richt zich op potentieel relevante verschillen tussen golfgootmetingen en in-situ veldmetingen, evenals de condities die tijdens voor dijken maatgevende stormen (met veelal 12 Beaufort wind) in het veld verwacht mogen worden.

Een belangrijk doel van deze quick scan is het op een rij zetten van onderzoeksvragen gerelateerd aan de verschillen tussen golfgoot- en veldmetingen, en tussen laboratorium- en veldmetingen.

Na de inleiding (Hoofdstuk 1) wordt achtereenvolgens ingegaan op:

- Golfsteilheid (Hoofdstuk 2)
- Windforcering (Hoofdstuk 3)
- Schuine golfinval (Hoofdstuk 4)
- Rol van richtingsspreiding / kortkammigheid (Hoofdstuk 5)
- De resulterende conclusies en aanbevelingen / onderzoeksvragen (Hoofdstuk 6)

De belangrijkste conclusies zijn gegeven in par. 6.1.1:

1. Zeker grootschalige laboratoriumproeven lijken vaak niet (volledig) in staat de hoge golfsteilheden van veldmetingen te produceren. Golfploop en –overslag worden daarbij veelal significant overschat wanneer een te lage golfsteilheid wordt gehanteerd. Deze tekortkoming verscherpt zich wanneer sprake is van (via Riskeer of Hydra-NL) te berekenen maatgevende golfcondities. Als potentiële oorzaken voor de verschillen in golfsteilheid zijn windforcering en kortkammigheid benoemd. Indirect kan worden beredeneerd dat het effect van windforcering vermoedelijk niet verwaarloosbaar is.
2. Voor reguliere (korte) golven werkt schuine golfinval gunstig door (lagere effectieve belasting), maar het kan niet worden uitgesloten dat het tegenovergestelde soms het geval is bij zeer lange deining en/of infragolven (meer specifiek bij een Iribarrengetal $\xi > 2,5$). Sowieso lijkt er vrij weinig bekend te zijn over het gedrag van de invloedsfactoren γ (voor schuine golfinval, bermen en taludruwheid) bij dergelijke grote Iribarrengetallen.
3. Golfgootproeven zijn niet geschikt om de belastingreducties door schuine golfinval in beeld te brengen. Voor golfploop en golfoverslag zijn deze effecten relevant voor tenminste een paar honderd kilometer aan keringen.
4. Voor golfklapbelasting en dijkerosie lijken de belastingreducties door schuine golfinval ten opzichte van de Eurotop-formules voor golfploop en golfoverslag nog een stuk groter te zijn, en de relevantie dus ook. Dat geldt naar verwachting ook voor harde bekledingen.
5. Golfploop en -overslagproeven met langkammige golven geven bij ondoorlatende en relatief gladde taluds een fors te optimistisch beeld van de belastingreductie door (zeer) schuine golfinval, en soms (vooral bij ondiep voorland) een iets te pessimistisch beeld.
6. Er is geen sprake van één generiek toepasbare invloedsfactor voor schuine golfinval (zie figuur 2). De belastinggerelateerde variabele, de

richtingsspreiding van de golven en (bij ruwe en permeabele taluds) het bekledingstype hebben alle invloed op de waarde van de invloedsfactor.

7. Het is de moeite waard om meer rekening te houden met synergetische effecten omdat belastingreducties elkaar in diverse gevallen versterken, bijvoorbeeld bij de combinatie van schuine golfinval en bermen. Maar ook bij permeabele en veelal zeer ruwe (stortsteen)bekledingen is mogelijk sprake van dergelijke interacties, gegeven het feit dat de invloedsfactor voor schuine golfinval daar sterk afhankelijk bleek te zijn van het bekledingstype.

In de daarop volgende subparagrafen zijn de conclusies verder uitgewerkt.

Bij de aanbevelingen (par. 6.2) spelen twee zaken op de achtergrond mee:

- De relevantie van schuine golfinval die fors bleek, en de behoefte aan nadere onderbouwing en aanscherping op onderdelen.
- De relatief lage golfsteilheden in laboratoriumproeven, ten opzichte van zowel veldmetingen als de BOI-software.

Dit leidt tot de volgende aanbevelingen op hoofdlijnen:

1. Onderbouw en verdisconteer op consequente wijze (voor alle bekleding- en belastingtypen) de veelal fors reducerende effecten van (zeer) schuine golfinval op de belasting van bekledingen. Doe dit niet alleen voor golfoverloop en golfoverslag, maar met name ook voor golfklapbelastingen van zachte én harde bekledingen, en voor vervolgerosie. Ook voor front- en oploop-snelheden (sleutelparameters voor de uitrol van de Cumulatieve Overbelastingsmethode) is het afleiden en verdisconteren van invloedsfactoren voor schuine golfinval van groot belang omdat dit tot nu toe een witte vlek is. Houd bij dit alles expliciet rekening met de kortkammigheid (en meer specifiek de te verwachten richtingsspreiding) van de inkomende golven.
2. Onderbouw en verdisconteer de (in veel gevallen gunstige) interacties en synergetische effecten tussen schuine golfinval en andere invloedsfactoren op voornoemde golfbelastingen. Met name de interacties met bermen zijn van belang, maar in mindere mate ook bijvoorbeeld die met (eindige) waterdiepte, met taludruwheid (vooral wanneer deze groot is) en richtingsspreiding.
3. Breng ook in beeld of en wanneer schuine golfinval niet langer een gunstig (belastingreducerend) effect heeft maar juist een ongunstig effect. Mogelijk is hier sprake van bij deining en infragolven, en meer specifiek in situaties met Iribarrengetallen $\xi > 2,5$. Breng voor die situatie ($\xi > 2,5$) ook meer generiek het validatie- en geldigheidsbereik van de Eurotop-formules en invloedsfactoren in beeld.
4. Breng scherper in beeld waar, wanneer en waarom de golfsteilheden van laboratoriumproeven (en in bassinproeven en sommige numerieke modellen) achterblijven bij veldmetingen en bij de output van Hydra-NL en Riskeer, en in welke mate die verschillen problemen veroorzaken.
5. Werk een meetstrategie uit voor ontwikkeling, kalibratie en validatie van modellen voor de doorwerking van belastingen op bekledingen. Maak daarbij een onderbouwde en expliciete afweging tussen golfgootproeven, golfbassinproeven, golfgoten-met-windforcering, veldmetingen en eventueel ook voldoende gevalideerde numerieke benchmarkmodellen.
6. Leg de focus op bovenstaande hoofdvragen, maar geef daarnaast ook aandacht aan relevante tweede-orde-effecten zoals bijvoorbeeld kortkammigheid, golfopzet, en aan de veelal ongunstige invloed van golfopzet en infragolven. Voor de laatste liggen er ook kennisvragen rond de manier waarop ze verdisconteerd moeten worden en ten aanzien van hun aan- of afwezigheid in laboratoriumproeven.

Een detailuitwerking van de kennisvragen en aanbevelingen is gegeven in par. 6.2.2.

1 Inleiding

Golfgootproeven zijn van groot belang gebleken voor het kwantificeren van golfbelastingen en bijbehorende erosie van dijken en duinen. Feitelijk zijn de huidige golfploop- en golfoverslagformules zelfs in belangrijke mate gebaseerd op golfgootproeven. Het voordeel van deze proeven is dat – anders dan bij veldmetingen – zware golfcondities min of meer “op afroep” kunnen worden geproduceerd zonder al te veel concessies te hoeven doen aan schaalgrootte. Tegelijkertijd hebben golfgootproeven hun beperkingen. Daarbij zijn er significante twijfels over de mate waarin golfgootproeven een natuurgetrouw beeld geven van de realiteit zoals die in het veld optreedt, met name tijdens maatgevende situaties.

Zo ontbreekt in de meeste golfgoten de forcering door wind waardoor het niet is uit te sluiten is dat een reguliere golfgoot niet alle golfcondities (qua hoogte, steilheid, en spectrale vorm) kan opwekken. Verder is het lastig tot onmogelijk schuine golfval te reproduceren in een golfgoot. Hetzelfde geldt voor kortkammige golven, ofwel golven die niet als één langgerekte golfkam uit één richting komen, maar een samenstelling van een groot aantal golven die elk uit een wat andere richting komen. Naar aanleiding van deze beperkingen kwam de vraag op of niet meer gebruik gemaakt moet gaan worden van golfbassinproeven in plaats van golfgootproeven. Dit in de hoop en verwachting dat golfbassinproeven wellicht al een deel van de kennisvragen kunnen beantwoorden, zonder dat gewacht hoeft te worden op resultaten van lopende en eventuele toekomstige in-situ meetcampagnes, waarvan de kosten en onzekerheden vaak fors hoger zijn.

Bovenstaande vragen waren aanleiding om een quick scan van de literatuur uit te voeren. Zoals de term “quick scan” al aangeeft betreft het geen uitputtend of compleet onderzoek, maar eerder een poging de belangrijkste trends, resultaten en vragen in beeld te krijgen.

De quick scan richt zich op potentieel relevante verschillen tussen golfgootmetingen en in-situ veldmetingen, evenals de condities die tijdens voor dijken maatgevende stormen (met veelal 12 Beaufort wind) in het veld verwacht mogen worden.

Daarmee maakt deze quick scan een begin met de invulling van een al eerder door Deltares (Groeneweg & Van Steeg, 2020) naar voren gebracht kennisvraag:

- *Wat is de impact van de verschillen tussen in-situ en golfgooteigenschappen op [het toepassen van] de uitkomsten van golfgoten en oloop- en overslagsimulatoren?*

De volgende aspecten spelen daarbij een rol:

- 1 Golfsteilheid
- 2 Kortkammigheid
- 3 Schuine golfval
- 4 Wind
- 5 Schaaleffecten

Ad 1) Bij het ontwerp van de Afsluitdijk was het een eis dat de te gebruiken innovatieve steenbekleding bij maatgevende condities in de golfgoot beproefd zou worden. Het bleek zeker in eerste instantie echter niet mogelijk de hoge golfsteilheden van de verschillende versies en onderdelen van het door het Rijk beschikbaar gestelde waterveiligheidsinstrumentarium (WTI/WBI/OI) in de golfgoot volledig te reproduceren.

Ad 2) Golfgoten kunnen bijna per definitie alleen langkammige golven produceren. De veldsituatie kenmerkt zich echter door kortkammige golven met een significante richtingsspreiding, waarvan de doorwerking significant verschilt van die van langkammige golven

Ad 3) Schuine golfval leidt zeker bij grote invalshoeken tot een significante reductie van golfbelastingen; de mate van reductie is tevens een functie van de

richtingsspreiding (en dus de mate van kort- of langkammigheid). In dit rapport zal blijken dat schuine golfinval niet alleen voor golfoploop/golfoverslag van belang is, maar (tenminste) evenzeer voor de golfklapbelasting lager op het talud, en de bijbehorende dijkerosie.

Ad 4) Windforcering wordt soms aangedragen als alternatieve of aanvullende verklaring voor verschillen tussen gootproeven en de veldsituatie (zie Groeneweg en Van Steeg, 2020)

Ad 5) Bij (te) kleinschalige gootproeven kunnen ook schaaleffecten een rol spelen. In deze quick scan wordt verondersteld dat de voor BOI relevante gootproeven zodanig zijn ontworpen dat schaaleffecten beperkt of verwaarloosbaar zijn. Dit in lijn met De Waal en Van der Meer (1990) die stellen dat voor golfoploop en golfoverslag schaaleffecten verwaarloosbaar zijn mits de significante golfhoogte H_{m0} minimaal 5-10 cm bedraagt, en de schaalfactor niet hoger is dan 20. Of deze criteria ook gelden voor golfklapbelasting kon in kader van deze quick scan niet achterhaald worden, maar de vraag is wel relevant. Bij golfbassinproeven lijkt vaak een H_{m0} van 10 à 15 cm gebruikt te worden. Wanneer de maatgevende in-situ-waarde van H_{m0} boven de 2 à 3 meter uitkomt (wat bij de getijwateren en delen van IJsselmeer en Markermeer regelmatig het geval is), dan zullen deze bassinproeven niet helemaal voldoen aan de voorwaarde voor de schaalfactor (schaalfactor < 20).

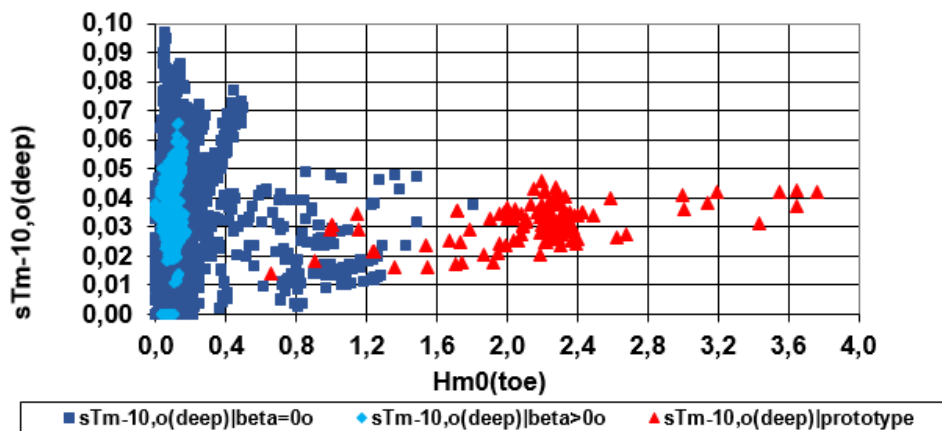
Uiteindelijk is ervoor gekozen om na de inleiding (dit Hoofdstuk 1) eerst in te gaan op de golfsteilheid (Hoofdstuk 2), daarna op de windforcering (Hoofdstuk 3), vervolgens op de schuine golfinval (Hoofdstuk 4) en daarna op de rol van richtingsspreiding en kortkammigheid (Hoofdstuk 5). Tot slot zal Hoofdstuk 6 de conclusies, aanbevelingen en kennisvragen op een rij zetten.

2 Golfsteilheid

Bij het ontwerp van de steenbekledingen van de Afsluitdijk bleek dat Hydra-NL zeer grote golfsteilheden produceerde van orde 8%, aanzienlijk hoger dan de maximale golfsteilheden van rond de 5 à 6% (Groeneweg & Van Steeg, 2020) die normaliter in een golfgootexperiment gerealiseerd kunnen worden. Op andere locaties kunnen de golfsteilheden in de WBI2017- en BOI2023-productiesommen overigens nóg hoger uitpakken. Bij het uittesten van de BOI2023-productiesommen voor het Markermeer (De Ridder en Gautier, 2021) kwamen de golfsteilheden bij de hoogste windsnelheden (47 m/s) uit op ruim 8% voor lange strijklengtes, en rond 10% in deelgebieden met kortere strijklengtes¹, een trend die overigens ook in andere watersystemen optrad. Wel betrof het condities die in de meeste gevallen bovenmaatgevend zullen zijn: het bereik aan productiesommen moet immers alle maatgevende condities inclusief statistische onzekerheden kunnen afdekken. Desondanks lijken de hoge golfsteilheden bij de Afsluitdijk geen incident te zijn, maar te passen in een bredere trend.

In de huidige quick scan kon niet achterhaald worden of fase-oplossende modellen zoals OpenFOAM en SWASH tegen een soortgelijke golfsteilheidslimiet aanlopen. Anderzijds zijn in deze quick scan ook geen modelresultaten gevonden met duidelijk hogere golfsteilheden dan de 4-5% uit bovengenoemde gootexperimenten.

Ter nuancering moet wel worden opgemerkt dat niet kan worden gesteld dat álle laboratoriumexperimenten zich beperken tot golfsteilheden kleiner dan 5%. Zie Figuur 1 op basis van de CLASH-database (CLASH, 2015)².



Figuur 1: Relatie tussen de diepwatergolfsteilheid op basis van de golfperiodemaat T_{m-10} ($s_{T_{m-10,0}} = 2\pi H_{m0} / (g \cdot T_{m-10}^2)$) als functie van de golfhoogte aan de dijkteen, op basis van de (CLASH, 2015) dataset, uitgesplitst naar veldmetingen (rood), bassinmetingen (lichtblauw) en overige metingen (bassin en golfgoot).

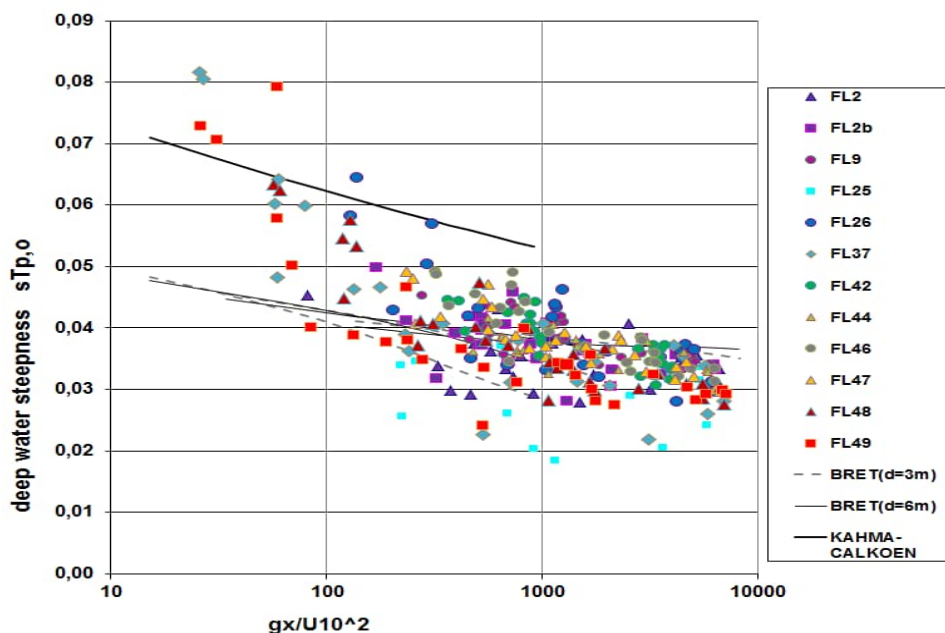
¹ De golfsteilheden voor de Afsluitdijk en Markermeer waren gebaseerd op de golfperiodemaat T_{m-10} , die veelal circa 10% lager is dan de piekperiode T_p . Groeneweg en Van Steeg (2020) noemen eigenlijk een maximale op T_p gebaseerde golfsteilheid van 4-5% voor de meeste golfgootmetingen. Voor een eerlijke vergelijking is dat in dit rapport vertaald naar een op T_{m-10} gebaseerde golfsteilheid van 5-6%.

² Merk op dat Figuur 1 niet identiek is aan Figuur 4 van Steendam et al. (2005) omdat in Figuur 1 een recentere versie van de CLASH-database is gebruikt en omdat Steendam et al. (2005) mogelijk net een andere golfsteilheids/golfperiodedefinitie hebben gehanteerd. Bovendien is in Figuur 1 getracht gootdata, bassindata en velddata te scheiden.

In Figuur 1 zijn de veldmetingen weergegeven met rode driehoekjes, de vermoedelijke bassinmetingen met lichtblauwe ruitjes (feitelijk geven deze de niet-veldmetingen met schuine golfinval weer), en de overige metingen (een mix van gootmetingen en bassinmetingen) met donkerblauwe vierkantjes. In de CLASH-database blijken diepwatergolfsteilheden (op basis van de golfperiodemaat s_{Tm-10}) groter dan 5% alleen voor te komen bij golfhoogtes H_{m0} kleiner dan 0,5 m. Feitelijk betreft het dan kleinschalige proeven, waarbij de meest kleinschalige proeven ook de grootste golfsteilheden lijken toe te laten, tot bijna 10% aan toe. Bij de vermoedelijke bassinproeven blijft de golfsteilheidsmaat s_{Tm-10} in CLASH echter onder de 7%. Het is niet duidelijk of dat komt doordat men heeft *gekozen* geen steilere golven op te wekken in de bassinproeven in CLASH, of dat er sprake is van een inherente golfsteilheidsbeperking bij bassinproeven. In dat laatste geval zou er dus sprake kunnen zijn van een steilheidsbeperking bij kortkammige golven, in plaats van een verhoogde golfsteilheid.

Figuur 1 en bovenstaande beschouwing leveren feitelijk een eerste kennisvraag:

- *Welke omstandigheden zijn in het lab precies nodig om tóch nog golfsteilheden groter dan 5% te halen?*



Figuur 2: Gemeten golfsteilheden op diverse meetlocaties in het IJsselmeer, op basis van de tabeldata van (Khachatryan, 2017), met circa 6-21 m/s wind en 1-30 km strijklengte. Merk op dat de meest extreme stormdata daarmee ontbreken. Noot: door opklotseffecten tegen de meetpaal (Bottema, 2019) kunnen de weergegeven steilheden een factor 1,05-1,10 te hoog zijn.

Figuur 2 laat zien dat op het IJsselmeer steilheden groter dan 5% voor jonge golven³ eerder regel dan uitzondering zijn. Ook is te zien dat de golven systematisch steiler worden naarmate de golven jonger zijn, en dat de trends in Bretschneider en Kahma-Calkoen vooral representatief lijken voor wat oudere golven, en een onderschatting geven voor jongere golven. Ook bij de in Figuur 1

³ Jonge golven kenmerken zich door sterke windforcering en/of korte strijklengte, en zijn vooral te vinden in de linkerhelft van Figuur 2.

geplote velddata uit (CLASH, 2015) lijkt het op basis van Figuur 2 vooral om wat minder jonge golven te gaan.

De situatie met jonge golven en extreme golfsteilheden zal naar verwachting het meest relevant zijn voor gesloten estuaria (én korte strijklengte én zware golfbelasting). Maar ook in smallere wateren (randmeren, rivieren) en sommige bredere wateren (IJsselmeer en niet-deininggevoelige delen van het Waddengebied) is deze situatie vaak relevant, zij het in iets mindere mate dan voor de gesloten estuaria.

De steilheden in Hydra-NL en Riskeer zullen daarbij significant extremer zijn dan in Figuur 2. Dat heeft twee oorzaken:

- Bij maatgevende condities zal de wind grofweg twee keer zo hoog zijn als in het databereik van Figuur 2, waardoor op basis van Figuur 2 de dimensieloze strijklengte (op de x-as) grofweg vier keer kleiner zal zijn, en de steilheid grofweg een kwart groter.
- De WBI-modelonzekerheden van de golfhoogte en golfperiode zijn niet volledig gecorreleerd. De steilheid zou hierdoor tot circa een kwart hoger kunnen uitvallen dan in de situatie zonder onzekerheden.

Groeneweg & Van Steeg (2020) is één van de zeldzame studies naar extreme golfsteilheden. Zij gaan in op gemeten golfsteilheden, zaken die in SWAN en Hydra-NL tot overschattingen kunnen leiden, en mogelijke verklaringen.

Zij komen met de volgende bevindingen:

- De golfsteilheid hangt sterk af van de gebruikte golfperiodemaat. In de huidige quick scan wordt normaliter uitgegaan van dezelfde golfperiodematen als in gangbare olopformules, dus de piekperiode T_p en de energieperiode T_{m-10} . De nuldoorgangperiode T_{m02} levert al gauw een factor 1,5 hogere golfsteilheden, maar deze is minder relevant voor golfoploop en gevoeliger voor meetfouten (Bottema, 2007), en wordt daarom in dit rapport niet gebruikt.
- Metingen op de Westerschelde en Oosterschelde geven soortgelijke bevindingen als de hierboven geschetste trends voor het IJsselmeer. Er is dus daadwerkelijk sprake van hoge steilheden, in lijn met Figuur 2 hierboven.
- Als verklaringen voor eventuele Hydra-NL-golfsteilheidsoverschattingen worden aangedragen: beperkingen aan de SWAN-golfmodellering, de ongecorreleerde modelonzekerheden van de golfhoogte (H_{m0}) en golfperiode, en voor windsnelheden kleiner dan 20 m/s de voor dat specifieke geval grove stochastdiscretisatie.
- Voor de verschillen tussen de gootmetingen en veldmetingen worden twee verklaringen aangedragen: het ontbreken van windforcering in reguliere golfgoten, en de kortkammigheid van in-situ golven. De rol van kortkammigheid kan op basis van hun studie niet bekrachtigd maar evenmin uitgesloten worden. De rol van windforcering is lastig te verifiëren omdat deze in zowel reguliere golfgoten als fase-oplossende modellen ontbreekt.

Groeneweg & Van Steeg (2020) bevelen aan de volgende kennisvraag te agenderen: *Wat is de impact van de verschillen tussen in-situ en golfgooteigenschappen op de [toepassing van de] uitkomsten van golfgoten en olop- en overslagsimulatoren?*

Die kennisvraag is bepaald relevant als bedacht wordt dat het qua golfsteilheid geen kleine mismatch betreft tussen golfgootcondities (steilheden van 4-5%) en de te verwachten maatgevende in-situ-condities (steilheden van ca. 8% en meer). *Wanneer we uitgaan van een vaste/gelijkblijvende golfhoogte, dan levert een factor*

2 mismatch in golfsteilheid via het Iribarrengetal⁴ namelijk een factor 1,4 (40%) mismatch in het golfoplooppniveau ten opzichte van de stilwaterlijn.

Omdat veldmetingen in maatgevende 1/10000-jaar-condities niet haalbaar zijn is het essentieel de achterliggende oorzaken van de mismatch in golfsteilheid scherp te krijgen en waar mogelijk te verhelpen.

Het aspect richtingsspreiding en kortkammigheid is daarbij het eenvoudigst te onderzoeken. Maar eerst een korte beschouwing over het aspect wind.

⁴ Dimensieloos kengetal gekoppeld aan het type golfbreking. Het Iribarrengetal is de verhouding tussen bodem/taludhelling en de wortel van de golfsteilheid.

3 Invloed van windforcering

Een verschil tussen de veldsituatie en vrijwel alle laboratoriummetingen is het ontbreken van windforcering. Windforcering zorgt ervoor dat golven blijven groeien, én dat ze hoger en in eerste instantie ook steiler worden. Het omgekeerde gebeurt juist bij het wegvallen van windforcering: uiteindelijk leidt dat tot deining waarbij de hoogste en steilste golven door dissipatie zijn verdwenen. Merk op dat dit hieronder vooral wordt ingegaan op de vraag wat de invloed is van windforcering op de eigenschappen (en meer specifiek de golfsteilheid) van golven bij de dijkteen. Daarnaast kan wind een (veelal kleine) bijdrage leveren aan golfoverslag, onder andere doordat spatwater door de wind over de dijk kan worden geblazen of door de windkracht op de oplooptong⁵. Op die directe invloed van wind op golfoverslag wordt in dit rapport niet verder ingegaan.

Golfgoten met windforcering (wind-wave flumes) zijn wereldwijd zeldzaam en voor zover bekend niet aanwezig in Nederland. Direct toegankelijke open-source-publicaties over golfgroei in dergelijke goten lijken lastig vindbaar te zijn of niet beschikbaar. Bovendien is het allesbehalve triviaal om én voldoende grote golven én een realistisch windveld te creëren. Zo is voor golven met $H_{m0} > 20$ cm al 20 m/s wind én een paar honderd meter aan strijklengte nodig. Dit kan eenvoudig worden vastgesteld met Bretschneider of andere parametrische golfgroeiformules (Bottema, 2007 geeft enkele voorbeelden).

Om een realistisch en een qua randeffecten ongestoord verticaal windprofiel met bijbehorende turbulentie te ontwikkelen zou de wind dan aanwezig moeten zijn in het leeuwendeel van een meethal van orde 20 meter hoog en al gauw 100 meter breed. Daarmee ontstaat al gauw de situatie dat golfgoten-met-windforcering forse concessies moeten doen qua schaalfactor en/of qua fysisch realiteitsgehalte.

Wat het effect van de ontbrekende windforcering is, is lastig in te schatten omdat die windforcering ook ontbreekt in het meest geëigende alternatief voor golfgoten, te weten fase-oplossende modellen als SWASH en OpenFOAM. Op iets grotere schaal is het op papier mogelijk in SWAN de wind bijna tot nul terug te brengen. Het is niet op voorhand zeker of SWAN geschikt en goed afgeregeld is voor zo'n situatie. Qua geschiktheid is van belang dat uitschakelen van de wind onbedoeld ook andere modelprocessen in SWAN kan uitschakelen, zoals bijvoorbeeld de niet-lineaire wisselwerkingen. Qua kalibratie is het belangrijk op te merken dat de diepwaterdissipatieterm (whitecapping) feitelijk slechts indirect kon worden afgeregeld bij gebrek aan directe dissipatiemetingen.

Daarmee is de kans reëel dat rol/invloed van windforcering slechts indirect bepaald kan worden. Op de schaal van de golfgoot (van golfschot naar dijkmodel) is de invloed van windforcering naar verwachting beperkt. De vraag is echter vooral of die windforcering essentieel is om de in het veld gemeten golfsteilheden te kunnen

⁵ Lorke et al. (2013) gaan in op de invloed van wind op golfoverslag. Zij geven aan dat het allesbehalve triviaal is laboratoriumsituaties naar veldsituaties te vertalen, omdat het niet mogelijk is zowel het Reynolds- Froude- als Webergetal gelijk te houden aan de in-situ geldende waarden van deze dimensieloze getallen. De door hen geciteerde publicaties kunnen ook niet zomaar gegeneraliseerd worden, want los van bovengenoemd schalingsprobleem blijken zowel de onderzochte fenomenen als geometrieën sterk uiteen te lopen, waarbij ruwe golfbrekerdammen vaker zijn onderzocht dan gladde dijken. De directe windinvloed op de golfoplooptong is uiteindelijk door de huidige auteur afgeschat door de arbeid van de wind op de oplooptong gelijk te stellen aan de toename in potentiële energie. De toename in oploophoogte is daarmee evenredig met de windschuifspanning, en omgekeerd evenredig met de dikte van de oplooptong. Voor een fictieve zeedijk met 36 m/s wind, een wrijvingsnelheid U^* van 1,8 m/s, een 1:5 zeedijk, 10 m oploophoogte en een oplooptongdikte conform Vgl 6.3 van (Oosterlo, 2021) blijkt de windbijdrage vervolgens orde 10 cm te zijn, ofwel orde 1% van de oploophoogte. Deze bijdrage is zo goed als verwaarloosbaar. Wel is nog aan te bevelen deze afschatting te valideren.

bereiken. Het lijkt op basis van wat nu op de plank ligt niet mogelijk om nu al zo'n essentiële rol van de windforcering hard te maken. Omdat Groeneweg en Van Steeg (2020) het golfsteilheidsverschil tussen golfgoten en veldcondities vooral aan de combinatie van windforcering en kortkammigheid toeschrijven, kan wel het vermoeden worden uitgesproken dat windforcering significant bijdraagt aan het verschil in golfsteilheid wanneer kortkammigheid dat niet doet.

Al met al liggen hier de volgende kennisvragen en handelingsperspectieven:

- *Korte termijn / no-regret:*
 - *Bepaal met SWAN hoe snel (en vooral: over welke afstand) golven dissiperen en golfsteilheden inzakken als de windforcering wegvalt. Als spin-off kan hiermee ook het toepassingsbereik van voorlandmodules (waarin windforcering ontbreekt) nader in beeld worden gebracht.*
 - *Verdiepend literatuuronderzoek om na te gaan of de in het veld waargenomen golfsteilheden (en daarnaast de golfhoogte-waterdiepteverhoudingen H_{m0}/d) én de bijbehorende windforcering wél haalbaar en te realistisch reproduceren zijn in golfgoten mét wind, ofwel in speciale wind-wave flumes.*
 - *Ten behoeve van bovenstaande vraag: Maak een inventarisatie van laboratoriumfaciliteiten met windforcering, hun kenmerken en beperkingen (qua windeigenschappen en qua golven) en hun potentiële meerwaarde.*
- *Middellange termijn (mogelijk meerjarig traject in Kennis voor Keringen): ontwikkel een aanpak om windforcering toe te voegen aan faseoplossende modellen.*

4 Effect van schuine golfval

4.1 Effect van schuine golfval – deterministische context

Anders dan het effect van wind kan het effect van schuine golfval wel goed in het laboratorium worden onderzocht, al moet voor het onderzoeken van dat aspect wel de overstap van golfgoot naar golfbassin worden gemaakt ⁶. De focus in dit rapport zal liggen op tamelijk tot zeer schuine golfval (meer dan 30-45° verschil met de dijknormaal) omdat daar de voornaamste reducties in oploop en overslag optreden.

Het effect van de golfvalshoek op de golfoploop wordt net als het effect van bermen, taludruwheid en waterdiepte veelal (o.a. Eurotop, 2018) beschreven met een set invloedsfactoren γ :

$$R_{u2\%}/H_{m0} = 1,65 * \gamma_1 * \gamma_2 * \gamma_3 * \xi_{m-10} \quad (1)$$

Met $R_{u2\%}$ de 2% golfoploophoogte, H_{m0} de significante golfhoogte, de γ 's de bovengenoemde invloedsfactoren en ξ het Iribarrengetal, de verhouding tussen de taludhelling en de wortel van de golfsteilheid. Voor golfoverslag geldt een iets andere formule, maar met soortgelijke/analoge invloedsfactoren.

Eurotop (2018) gaat uit van onafhankelijke invloedsfactoren voor zaken als bermen, taludruwheid en schuine golfval ⁷, en geeft daarbij de volgende invloedsfactoren voor schuine golfval:

$$\gamma_\beta = 1 - 0,0022\beta \text{ voor golfoploop, met } \beta \text{ de golfvalshoek} \quad (2)$$

$$\gamma_\beta = 1 - 0,0033\beta \text{ voor [de logaritme van] het golfoverslagdebiet} \quad (3)$$

Bovenstaande formules gelden voor kortkammige golven (hoe kortkammig is niet helemaal duidelijk ⁸) en zijn daarmee representatief voor in-situ condities. In het laboratorium is vaker sprake van langkammige golven, en daarvoor geldt onderstaande formule.

$$\gamma_\beta = \cos^2(\beta - 10^\circ) \text{ voor } 10^\circ < \beta < 50^\circ, \text{ en daarbuiten } 1 \text{ resp. } 0,6 \quad (4)$$

Bij golfvalshoeken groter dan 80° (strijkgolven) tot aan 110° (licht aflatende golven) geldt strikt genomen een aangepaste versie van deze formules, al kunnen de gangbare (Eurotop-)aanpassingen vermoedelijk nog aangescherpt worden (Oosterlo, 2013).

Op basis van Vergelijking 2+3 voor kortkammige golven geeft Eurotop (2018) zodoende een reductie van 10% van de golfoploophoogte bij een golfvalshoek van 45° en bij bijna-strijkgolven (80°) een reductie van 18%. Voor de logaritme van het overslagdebiet bedragen de reducties resp. 15% en 26%.

⁶ Bij numerieke modellen zou het dan om een overstap van 2D naar 3D gaan, wat qua rekentijd lang niet altijd triviaal is.

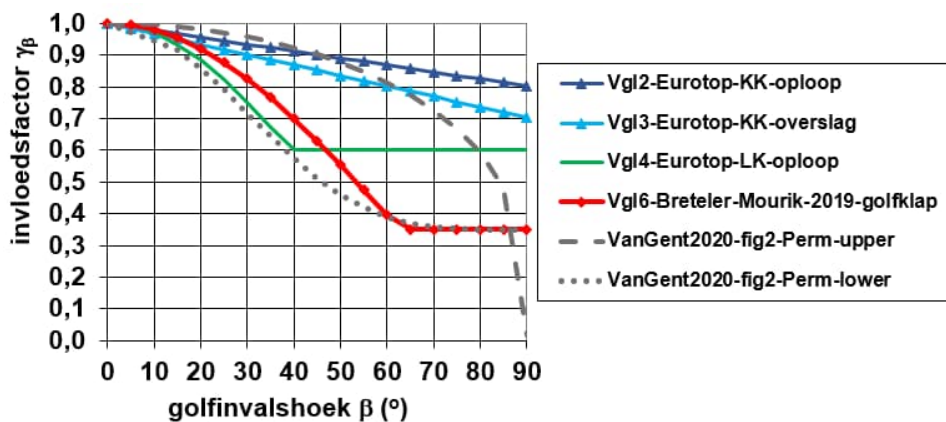
⁷ Uit recent onderzoek is gebleken dat eigenlijk ook een invloedsfactor voor de (eindige) waterdiepte bij de dijkteen gewenst is (Van Steeg et al., 2020). Deze is echter nog niet voor alle omstandigheden gekwantificeerd en nog niet in Eurotop geïmplementeerd.

⁸ De Waal en van der Meer (1990, 1992) hebben richtingsverspreidingen van 0° (langkammig) 12°, 24°, 32° en 45° onderzocht, maar het is niet duidelijk welke richtingsverspreiding ten grondslag ligt aan de aanbevolen formules voor kortkammige golven die uiteindelijk ook in Eurotop zijn gebruikt.

Eurotop (2018) geeft zodoende voor kortkammige golven al een significante reductie bij (zeer) schuin invallende golven. Toch is dit niet het hele verhaal. Twee aspecten zijn daarbij van belang:

1. Effect van schuine golfinval bij langkammige golven
2. Effect van bermen

Uit bovenstaande formules valt al af te leiden dat langkammige golven (zeldzaam in veldcondities, vaker gebruikt voor laboratoriumexperimenten) vooral bij grotere golfinvalshoeken de oploop- en overslagreductie door schuine golfinval fors overschatten ten opzichte van de kortkammige situatie. Figuur 3 illustreert dat.



Figuur 3: Invloedsfactoren voor golfoverslag bij schuine golfinval voor verschillende toepassingen/belastingtypes (golfooploop, golfoverslag, golflap), en voor verschillende situaties zoals kortkammige (KK) en langkammige (LK) golven, en permeabele (Perm) en impermeabele taluds. Bronnen: Eurotop (2018), Breteler & Mourik (2019) en Van Gent (2020).

Figuur 3 geeft de invloedsfactor voor schuine golfinval zoals die in een aantal verschillende publicaties wordt genoemd. Zeker bij golfinvalshoeken groter dan 30° à 45° is in de literatuur sprake van sterk uiteenlopende invloedsfactoren voor schuine golfinval.

Drie factoren spelen daarbij een rol:

1. De belastinggerelateerde variabele waar de invloedsfactor betrekking op heeft
2. De richtingsspreiding van de golven
3. Het type bekleding

Ad 1) Voor verschillende belastinggerelateerde variabelen gelden verschillende invloedsfactoren⁹. Zo is in Eurotop (2018) bij kortkammige golven de invloedsfactor voor overslag kleiner (en de effectieve belastingreductie sterker) dan bij golfooploop. Zie Vgl 2 en 3 hierboven, en de licht- en donkerblauwe lijnen in Figuur 3. Bij golflapbelastingen (te bespreken in par. 4.3) is de invloedsfactor nóg lager, en de effectieve belastingreductie dus nog sterker.

⁹ Een potentieel aandachtspunt daarbij is de *definitie* van de invloedsfactoren. In principe is gepoogd een vergelijking te maken tussen belastinggerelateerde variabelen die grofweg lineair samenhangen met H_{m0} . Wanneer het verband met H_{m0} sterk niet-lineair is – zoals bij het overslagdebiet q – dan heeft dat namelijk implicaties voor de invloedsfactor. Om dergelijke effecten te vermijden is in Eurotop (2018) gekozen de invloedsfactor niet te betrekken op het overslagdebiet q , maar op de logaritme daarvan.

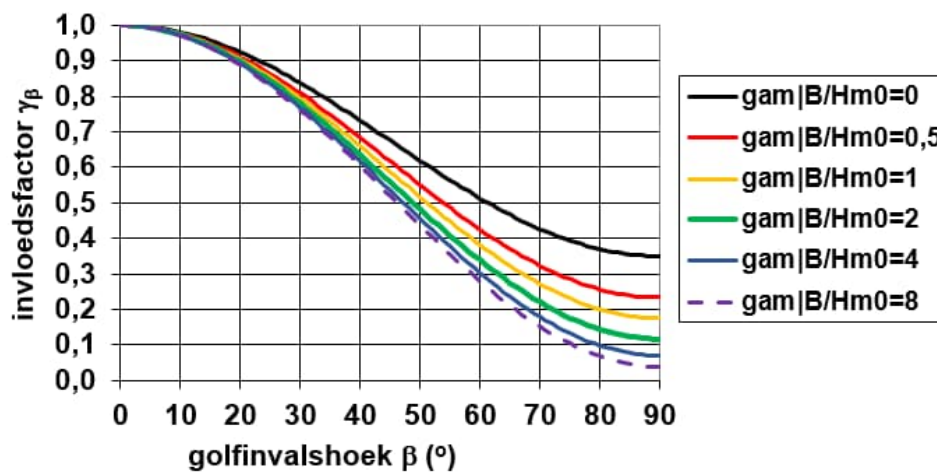
Ad 2) Het effect van richtingsverspreiding is in figuur 3 weergegeven via het verschil tussen kortkammige golven (KK) en langkammige golven (LK). Alleen bij golfploop en golfoverslag is er een fors en systematisch verschil tussen kort- en langkammige golven aangetoond, zeker naarmate de golven schuiner invallen. De invloedsfactor bij langkammige golven is daarbij fors lager dan bij kortkammige golven.

Ad 3) De Eurotop-formules lijken geldig voor een redelijk breed bereik aan impermeabele bekledingen, mits de andere invloedsfactoren (zoals die voor bermen en taludruwheid) geen grote rol spelen. De trends bij sterk doorlatende (en vaak ook zeer ruwe) bekledingen wijken echter sterk af van die van grotendeels ondoorlatende bekledingen. Bij doorlatende bekledingen lijkt het verschil tussen kortkammige en langkammige golven een relatief beperkte rol te spelen. Desondanks presenteert Van Gent (2020) forse verschillen tussen de in verschillende publicaties genoemde invloedsfactoren, waarbij de grijze lijnen de ondergrens en bovengrens van de door hem aangehaalde data voor permeabele taluds weergeven. De door Van Gent (2020) aangehaalde publicatie van Galland (1994) werpt meer licht op de grote spreiding in de invloedsfactor γ_β voor permeabele taluds. Zowel voor overslag als voor de stabiliteit van de stortsteenbekleding bleek de door Galland (1994) afgeleide invloedsfactor voor schuine golfval te variëren tussen $\cos(\beta)$ en $\cos^{0,25 \text{ à } 0,33}(\beta)$, afhankelijk van het type bekleding. Klaarblijkelijk is de invloedsfactor voor schuine golfval bij zeer ruwe en (sterk) permeabele (steen)bekledingen erg gevoelig voor het type bekleding.

Als het gaat om bermen, dan kan allereerst worden opgemerkt dat Eurotop (2018) op basis van het toen beschikbare onderzoek uitging van onafhankelijke invloedsfactoren voor schuine golfval en bermen. Dat is in lijn met de bevindingen uit het tamelijke uitgebreide golfbassinonderzoek van De Waal en Van der Meer (1990), die geen aanwijzingen zagen voor zo'n gecombineerd effect.

Recent onderzoek wijst er op dat het gecombineerde effect van schuine golfval en bermen tóch groter kan uitvallen dan de situatie waarin de invloedsfactoren voor schuine golfval en bermen onafhankelijk worden verondersteld. Zie Van Gent et al. (2020) en Chen (2022). Dit wordt geïllustreerd in Figuur 4. Figuur 4 is afgeleid op basis van Vgl 7 van Van Gent (2020), die als volgt luidt:

$$\gamma_\beta = \cos^2(\beta) + 0,35 * (1 - \cos^2(\beta)) * (1 + B/H_{m0})^{-1} \quad (5)$$

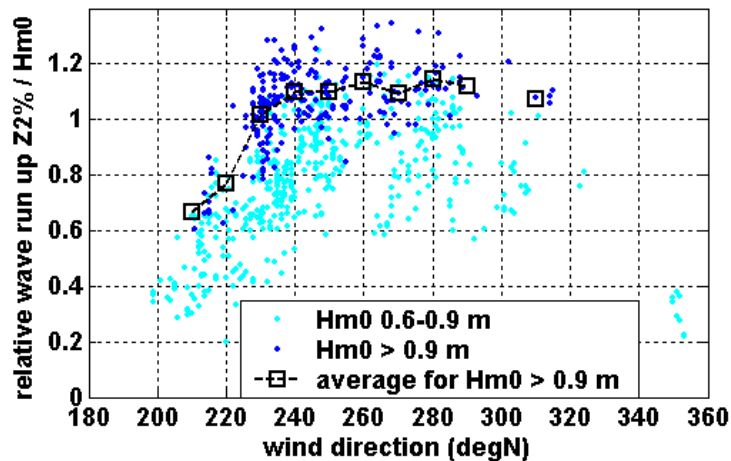


Figuur 4: Invloedsfactor voor golfoverslag bij langkammige golven als functie van de golfvalshoek bij verschillende verhoudingen tussen bermbreedte B en significante golfhoogte H_{m0} : $B/H_{m0}=0$ is de situatie zonder berm. Op basis van Vgl 7 van Van Gent (2020).

Bij die vergelijking en bij de figuur is een belangrijke kanttekening te plaatsen, namelijk dat deze zijn gebaseerd op *langkammige* laboratoriumexperimenten. Verder is het belangrijk op te merken dat het invloedsfactoren voor golfoverslag betreft, en niet voor golfoploop. Beide zaken leiden ertoe dat het effect van schuine golfinval (en de reductie ten opzichte van loodrechte golfinval) relatief sterk uitpakt ten opzichte van de reductiefactoren voor golfoploop en kortkammige golven.

Ondanks die kanttekeningen laat Figuur 4 duidelijk zien dat bermen bij zeer schuine golfinval voor *extra* overslagreductie zorgen ten opzichte van de situatie met loodrechte golfinval en een berm, al is het dan voor de situatie met langkammige golven.

De vraag is nu of de versterkte oloop- en overslagreductie bij een combinatie van schuine golfinval en bermen ook optreedt in veldcondities en bij kortkammige golven. Op basis van de golfoploopmetingen aan de westelijke Noordoostpolderdijk bij Rotterdamse Hoek lijkt het voorlopige antwoord op die vraag "ja" te zijn. Figuur 8.2 uit (Bottema, 2007) illustreert dat; zie Figuur 5.



Figuur 5: Genormaliseerde golfoploop bij Rotterdamse Hoek als functie van de windrichting, voor waterstanden groter dan +25 cm NAP en voor twee golfhoogteklassen. Bron: Bottema (2007).

Bij Figuur 5 hoort de volgende tekst en uitleg:

- 1 Het betreft oloopmetingen bij Rotterdamse Hoek (Noordoostpolder) en golfmetingen van de locatie FL2, 1-2 km westwaarts en op iets dieper water.
- 2 Het betreft een selectie met waterstanden groter dan +25 cm NAP, om de oloopreductie door de rond NAP gelegen stortsteenberm (zie Figuur 8.1 van Bottema (2007)) te beperken.
- 3 Rond +180 cm NAP ligt een middenberm. Het is onwaarschijnlijk dat deze de trends in Figuur 5 significant beïnvloedt; alleen de hoogste oloopwaarden bij min of meer loodrechte golfinval zouden hierdoor wellicht iets gereduceerd kunnen zijn.
- 4 De tussenliggende helling van het benedentalud van de dijk is circa 1:3,75
- 5 Westenwind (270°) komt overeen met loodrechte inval.
- 6 Uit de Hydra-NL illustratiepunten (en –productiesommen) blijkt dat de golven meer naar de dijk toedraaien naarmate de wind meer parallel aan de dijk is, maar het verschil tussen golfrichting en windrichting loopt niet veel verder op dan grofweg 10°.

Uit Figuur 5 blijkt dat (in vergelijking met loodrechte golfval) de golfoploopreductie bij kleine golfvalshoeken beperkt is, maar dat de oploopreducties fors sterker worden bij grotere golfvalshoeken, en schuiner invallende golven.

Voor golfvalshoeken tot 40° lijkt de gemeten oploopreductie door schuine golfval redelijk in overeenstemming met Vergelijking 2, en daarmee met Eurotop (2018). Bij golfvalshoeken groter dan 50° blijkt schuine golfval echter tot tientallen procenten oploopreductie te leiden, waarmee de reductie aanzienlijk sterker is dan in Eurotop (2018). Dit is een aanwijzing dat ook bij kortkammige golven de oploop- en overslagreducties door schuine golfval en bermen elkaar wel eens zouden kunnen versterken, in elk geval bij golfvalshoeken vanaf 50° .

Ook is het de moeite om na te gaan in hoeverre de trends in Figuur 5 ook terugkomen bij veldmetingen aan dijken zonder berm, zoals die van Uithuizerwad (Oosterlo, 2021). Dit kan een antwoord geven op de vraag of de trends in Figuur 5 inderdaad het gevolg zijn van de aanwezigheid van bermen, of dat de verklaring van de trends in Figuur 5 (en van de verschillen tussen veldmetingen en Eurotop als het gaat om de reductiefactor door schuine golfval) toch elders gezocht moet worden.

Daarbij is niet geheel uit te sluiten dat ook laboratoriummetingen een nieuw licht op de Eurotop-invloedsfactoren voor schuine golfval kunnen werpen. Ook vrij recente golfbassinmetingen (Oosterlo, 2013) met kortkammige golven geven namelijk aanwijzingen dat er wellicht toch meer overslagreductie is bij schuine golfval dan Eurotop (2018) aangeeft.

4.2 Effect van schuine golfinval – probabilistische context

Een oploopreductie van 10-20% bij schuine golfinval (en zoals hierboven blijkt in sommige gevallen duidelijk meer) is mooi meegenomen, maar de vraag is wat ervan overblijft wanneer de overstap van een deterministische naar een probabilistische context wordt gemaakt.

Eerst zal worden ingegaan op een eerste kwantitatieve verkenning door Den Bieman (2022). Vervolgens zullen de beperkingen van zijn verkenning worden belicht, en volgt een alternatieve, aangescherpte verkenning.

Den Bieman (2022) wilde in beeld brengen in welke mate een aanscherping van de Eurotop-invloedsfactoren voor schuine golfinval zou doorwerken in de vereiste kruinhoogte. Daarbij moet gedacht worden aan het effect van bijvoorbeeld een overstap van Vgl. 2 op Vgl 4 (zie ook de bijbehorende lijnen in Figuur 3). Op basis van drie testlocaties uit de Hydra-Ring testbank concludeerde Den Bieman (2022) dat de aanscherping in een quasi-deterministische context tot maximaal enkele decimeters reductie in vereiste kruinhoogte zou leiden (overeenkomend met een orde 2-3 keer lagere overstromingskansbijdrage). In een probabilistische context zal de reductie waarschijnlijk beperkter¹⁰ zijn omdat in dat geval ook richtingen met minder schuine golfinval dan bijdragen aan de overstromingskans. Den Bieman (2022) gebruikte daarbij de volgende drie locaties uit de Hydra-Ring-testbank:

Tabel 1: Dijknormaal, kritische windrichting en golfinvalshoek voor drie testlocaties (indicatieve getallen). Op basis van getallen uit (Den Bieman, 2022).

Locatie	Lauwersoog	Andijk/Enkhuizen	Westkapelle/Zoutelande
Dijknormaal (°N)	Ca. 0° N	Ca. 30° N	Ca. 225° N
Kritische windrichting (°N)	330° N	337° N	285° N
Golfinvalshoek (°)	31°	37°	40°

De kritische windrichting is daarbij de windrichting uit het probabilistisch illustratiepunt van de BOI-software, ofwel de windrichting bij de stochastcombinatie die het meest bijdraagt aan de overschrijdingskans van het Hydraulisch Belastingniveau (HBN).

Merk op dat het verschil tussen dijknormaal en kritische windrichting niet exact gelijk is aan de golfinvalshoek omdat de golfrichting kan verschillen van de windrichting.

Kenmerk van de locaties is dat een minder schuine golfinvalshoek samengaat met mildere belastingen, en dat de meest kritische golfinvalshoek tussen de 30-40° ligt. Op basis van de Eurotop-formules is de reductie in golfoploop dan nog (iets) kleiner dan 10%. Op basis van Figuur 5 liggen de golfinvalshoeken van Tabel 1 nét voor (en dus buiten) het bereik waar forse golfoploopreducties optreden, en dat geldt (zie Figuur 3) ook voor het bereik waar de verschillen tussen kort- en langkammige golven relatief groot worden.

¹⁰ In een probabilistische context dragen veelal ook richtingen met minder schuine golfinval bij aan de overstromingskans waardoor de in de hoofdtekst genoemde winst niet ten volle verzilverd kan worden. In relatieve zin kunnen laatstgenoemde richtingen zelfs de dominante kansbijdragen gaan leveren wanneer de oversstromingsbijdrage bij zeer schuine golfinval verder wordt gereduceerd/afgeknepen. In dat geval zal het illustratiepunt verschuiven naar een situatie met minder schuine golfinval. ¹⁰

De vraag is of bovenstaande drie locaties voldoende kritisch zijn ten aanzien van schuine golfaanval.

Om schuine golfval probabilistisch doorslaggevend te laten zijn moet sprake zijn van een situatie waar óf de hoogste waterstanden óf de hoogste golven (en liefst beide) nagenoeg alleen optreden in een situatie met zeer schuine golfval. Vaak is dat ook een situatie waarin de sterkste wind min of meer parallel aan de kering staat.

Aan dergelijke condities is vaak in de volgende situaties voldaan:

- 1) Langgerekte watersystemen
- 2) Dijken die alleen hoge golfoploop hebben wanneer de wind grofweg Z-ZZW of NNW-N is.
- 3) Deels afgeschermdde dijken

Ad 1) Bij de testlocaties van Tabel 1 ontbreken langgerekte watersystemen. Bij langgerekte watersystemen spelen in elk geval twee zaken die (zeer) schuine golfval in de hand werken:

- Significante opwaaiing treedt slechts op als de wind min of meer langs de lengteas van het watersysteem waait, en dat is min of meer parallel aan de keringen
- In langgerekte watersystemen wijkt de golfrichting vaak af van de windrichting en wordt deze vaak gestuurd richting de lange as van het watersysteem. Zie (Petterson, 2004) en latere publicaties uit haar onderzoeksgroep, maar ook luchtfoto's en satellietbeelden op plekken waar zulke smalle watersystemen van oriëntatie veranderen.
- Daarbij speelt uiteraard ook dat de maximale (en probabilistisch meest kritische) golfoploop wordt bepaald door de combinatie van hoge opzet en hoge golfoploop.

Bovengenoemde situatie is te verwachten langs forse delen van Ketelmeer, Zwartemeer, Vossemeer, Gooi-Eemmeer, Veluwerandmeer en Volkerak-Zoommeer, en daarnaast in meerdere takken van de Rijn-Maasmond, al is daar vooral sprake van een externe opzetbron bij NW-wind (de Noordzee). Al met al gaat lijkt het te gaan om honderden kilometers aan waterkering.

Ook veel rivierdijken hebben te maken met langgerekte watersystemen, maar het verschil is dat afvoer daar veelal sterker bijdraagt aan het Hydraulische Belastingniveau (HBN) dan wind. Zeker bij dijken op het oosten zijn de golfbelastingen daar mogelijk te zwak om golfvalshoek het verschil te laten maken.

Ad 2) Op de smallere wateren is hierboven al ingegaan. Bij bredere wateren kan (zeer) schuine golfval (probabilistisch) ook doorslaggevend worden wanneer de dijken min of meer op het oosten zijn georiënteerd en er toch redelijk sterke golfaanval is. Het moet dan wel gaan om dijken die meer op het oosten zijn georiënteerd dan de twee eerste dijken in Tabel 1. Situaties met voldoende op het oosten georiënteerde dijken treden met name op langs een fors deel van de westzijde van het IJsselmeer en in wat mindere mate bij Texel, de Eems-Dollard en delen van de Scheldes. Het lijkt ordegrrootte honderd kilometer aan kering te betreffen.

Ad 3) Hier moet worden gedacht aan dijken waar de windrichting met maximale opwaaiing sterk verschilt van die met de maximale golven. Vaak betreft dat de hierboven genoemde dijken op het oosten, maar soms ook meer op het zuiden georiënteerde dijken zoals bij de noordelijke oever van de Westerschelde en bij de oostelijke Waddeneilanden. Dit aandeel lijkt eerder richting de tientallen kilometers kering te gaan.

Al met al is er een significant areaal aan keringen waar verwacht mag worden dat golfoplopreductie door schuine golfval ook in probabilistische context een significante rol van betekenis speelt. Ter indicatie moet qua areaal dan gedacht worden aan orde 10% tot mogelijk 20% van het keringenareaal. Bij de (vrij beperkte) reductie uit de Eurotop-manual (2018) moet dan eerder aan 10% gedacht

worden, bij reducties in lijn met de IJsselmeermetingen (Figuur 5) komt mogelijk de 20% in beeld.

Bovengenoemde 10-20% komt overeen met (tenminste) enkele honderden kilometers aan kering. Qua ordegrrootte is dat vergelijkbaar met het areaal asfaltbekledingen waarvoor een apart onderzoekspoor bestaat. Qua ligging betreft het dan vooral keringen langs langgerekte watersystemen (behalve wellicht als deze afvoerdominant zijn) en keringen langs de oostelijke en soms ook noordelijke oevers van de bredere wateren.

4.3 Effect van schuine golfinval – golfklap en dijkerosie

Hoewel de focus van dit rapport ligt op de effecten van schuine golfinval en kortkammigheid op golfloop en –overslag, is het toch de moeite in te gaan op een recente publicatie die deze aspecten in beeld brengt voor golfklapbelastingen, en daarmee voor dijkerosie van de lagere delen van het dijktafval (Klein Breteler en Mourik, 2019). De focus van hun rapport ligt op grasbekledingen maar hun bevindingen zijn waarschijnlijk ook toepasbaar op harde bekledingen, waar golfklap immers het belangrijkste belastinggerelateerde mechanisme is. Het is met name vanwege dit laatste aspect dat deze paragraaf is toegevoegd, omdat schuine golfinval mogelijk nog onvoldoende is meegenomen in de software voor harde bekledingen. Daarnaast helpen de hieronder gegeven resultaten de context van de bevindingen in par. 4.1 te verbreden.

Klein Breteler en Mourik (2019) komen voor golfklap op de volgende invloedsfactor voor schuine golfinval:

$$\gamma_{\beta, \text{golfklap}} = \max(0,35 ; (\cos(\beta))^{0,67}) \quad (6)$$

Hun invloedsfactor blijkt zowel geldig te zijn voor lang- als kortkammige golven; het verschil tussen lang- en kortkammige golven dat optrad bij oploop en overslag blijkt bij golfklap dus niet terug te komen. Zij nemen daarbij aan dat de invloedsfactor zowel geldig is voor de piekdrukken (die op hun beurt grofweg evenredig zijn met H_{m0}) op het buitentalud als voor de daaruit voortvloeiende dijkerosie.

De getalswaarden van de invloedsfactoren voor golfloop, golfoverslag en de hierboven aangehaalde invloedsfactor voor golfklap zijn vergeleken in Tabel 2 hieronder en daarnaast ook in Figuur 3. Hieruit blijkt dat de reductie van golfklapbelastingen door schuine golfinval op golfklap aanzienlijk sterker is dan voor golfloop en golfoverslag, wat de verdiscontering ervan extra relevant maakt.

Tabel 2: Invloedsfactoren voor schuine golfinval (in de situatie van kortkammige golven) voor resp. golfloop (Vgl 2), golfoverslag (Vgl 3) en golfklap (Vgl 6)

Golfinvalshoek / invloedsfactor	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Golfloop (Vgl 2)	1,00	0,97	0,93	0,90	0,87	0,84	0,80
Golfoverslag (Vgl 3)	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70
Golfklap (vgl 6)	1,00	0,98	0,91	0,79	0,63	0,40	0,35

Anders dan bij golfloop en golfoverslag worden bij golfklap en erosie buitentalud tot nu toe geen probabilistische maar semi-probabilistische belastingen gebruikt. Klein Breteler en Mourik (2019) geven een eenvoudig recept om het effect van schuine golfinval mee te nemen bij het bepalen van de meest kritische belastingcombinatie: als onderdeel van het recept is een rekenwaarde van H_{m0} gebruikt die gelijk is aan de oorspronkelijke H_{m0} vermenigvuldigd met de invloedsfactor van Vergelijking 6.

De conclusies van Klein Breteler en Mourik (2019) en de bijbehorende Vgl (6) komen grotendeels overeen met die van een eerdere studie van Klein Breteler et al. (2006), afgezien van de nadien toegevoegde ondergrens van 0,35. Laatstgenoemde studie uit 2006 geeft wel nog enkele interessante elementen voor de duiding van de resultaten:

- De invloedsfactor heeft betrekking op het maximale stijghoogteverschil over een steenzetting. Voor alternatieve variabelen (cumulatieve belastingen; de impuls die een zetsteen ondervindt) waren de resultaten minder eenduidig.
- Het stijghoogteverschil is berekend met het numerieke model ZSTEEN, waarbij in golfgoten gemeten stijghoogtes bovenop de bekleding als modelinvoer zijn gebruikt.
- De gevonden invloedsfactor van $(\cos(\beta))^{0,67}$ komt nagenoeg overeen met de $(\cos(\beta))^{2/3}$ die zou optreden in een theoretische benadering waarin schuine golfval wordt verdisconteerd via een alternatieve taludhelling α' , volgens de relatie $\tan(\alpha') = \tan(\alpha) \cdot \cos(\beta)$, met α de taludhelling en β de golfvalshoek.
- Voor de situatie met lange golven en een groot Iribarrengetal ($\xi > 2$ en zeker $\xi > 3$ ¹¹) suggereert diezelfde theoretische benadering echter dat de invloedsfactor voor met name golfvalshoeken tussen 30° en 80° boven de 1 zou kunnen uitkomen, waarbij schuine golfval dus niet tot lagere maar tot hogere belastingen leidt.

Met name de laatste bevinding is belangrijk, omdat deze impliceert dat de invloed van schuine golfval bij lange deining en infragolven wezenlijk anders zou kunnen zijn dan bij reguliere korte golven. Nog belangrijker is het gegeven dat hieruit volgt dat een groot deel van de bevindingen van deze studie slechts geldig is voor niet al te grote Iribarrengetallen, meer specifiek voor $\xi < 2,5$.

4.4 Effect van schuine golfval – aanbevelingen en kennisvragen

Uit het voorgaande kunnen de volgende kennisvragen en aanbevelingen worden gedistilleerd om het belang van schuine golfval beter in beeld te brengen.

- 1) De belastingreductie door schuine golfval lijkt voor de golfklap- en erosiemechanismen op het buitentalud duidelijk sterker dan voor golfploop en golfoverslag. Tot nu toe zijn echter nog relatief weinig metingen uitgevoerd aan de effecten van schuine golfval op de (golfklap)belasting van het buitentalud. Overigens is er nóg minder bekend over de effecten van schuine golfval op de front- en oloopsnelheden die in de nu in te voeren Cumulatieve Overbelastingsmethode gebruikt worden.
- 2) Verdiscontering en verdere aanscherping van de effecten van schuine golfval is daarmee extra van belang voor belasting van het buitentalud, ook bij harde bekledingen en vervolgerosie. Dit neemt niet weg dat schuine golfval ook bij golfploop en golfoverslag leidt tot significante belastingreductie.
- 3) Het wordt aangeraden te onderzoeken of de huidige bevindingen ook gelden voor lange golven (lange deining en infragolven), en meer specifiek voor Iribarrengetalswaarden waarvoor geldt $\xi > 2,5$. Er zijn voor die situatie theoretische aanwijzingen dat schuine golfval dan wellicht een ongunstige (zwaarder belastende) invloed heeft in plaats van een gunstige invloed.
- 4) De IJsselmeermetingen geven bij (zeer) schuine golfval een soms fors sterkere golfploopreductie ten opzichte van loodrechte inval dan Eurotop (2018). Ga na of dit ook het geval is voor veldmetingen aan dijken zonder berm, zoals Petten en Uithuizerwad.

¹¹ Een Iribarrengetal $\xi > 2$ à 3 komt overeen met golven die niet langer overstortend breken (plunging breakers) maar in het collapsing of surging golfbrekingsregime zitten.

- 5) Breng de geldigheid en bruikbaarheid van gecombineerde reductiefactoren voor bermen en schuine golfinval (zoals die van Van Gent, 2020) nader in beeld.
- 6) Breng nader in beeld bij welke dijktrajecten sprake is van significante golfklap-, golfploop- en golfoverslagreductie door schuine golfinval, in een probabilistische context.
- 7) Ga (naar aanleiding van par. 4.1, voetnoot 8) na welke richtingsverspreiding is gehanteerd bij de in Eurotop (2018) gegeven formules voor schuine inval van kortkammige golven.

5 Invloed van kortkammigheid en richtingsverspreiding

5.1 Directe invloed van kortkammigheid op golfoploop en golfoverslag

Een belangrijke bron van experimentele data op het gebied van golfoploop en golfoverslag is de CREST-database, waarin meer dan 10000 proefresultaten zijn samengebracht (Steendam et al., 2005; CLASH, 2015). Volgens Steendam et al. (2005) is bij het samenstellen van de database ook informatie verzameld over het type experiment (goot, bassin, in-situ; 2D of 3D), het type golf (regelmatig [wat niet representatief is voor in-situ metingen] of onregelmatig; kortkammig of langkammig), en de golfinvalshoek. Helaas lijkt een groot deel van deze informatie niet terug te komen in hun lijst entries / variabelen van de CLASH database, alleen de golfinvalshoek komt daarin terug.

Daarom is het aan te bevelen de documentatie bij de CLASH-brongegevens nog eens na te lopen op bruikbare experimenten.

Een snelle scan van de literatuur heeft slechts twee publicaties opgeleverd die *direct* ingaan op de invloed van richtingsverspreiding op golfoploop en golfoverslag. Daarnaast zijn er overigens wel indirecte aanwijzingen, zie par. 5.2.

De Waal en Van der Meer (1992) vonden voor loodrechte inval geen significante verschillen tussen de golfoploop bij kort- en langkammige golven¹², maar wel forse verschillen bij schuine golfinval (zie figuur 4 van het huidige rapport). De resultaten zijn gebaseerd op kleinschalige golfbassinproeven met golfhoogtes van $6 \text{ cm} < H_{m0} < 12 \text{ cm}$, golfsteilheden van 1-4% en taludhellingen van 1:2,5 en 1:4. Er zijn richtingsverspreidingen van 0° , 12° , 24° , 32° en 45° onderzocht, het is echter niet duidelijk welke richtingsverspreiding ten grondslag ligt aan de aanbevolen formules die uiteindelijk ook in Eurotop zijn gebruikt.

In een aanzienlijk recentere publicatie komen Altomare et al. (2020) tot heel andere conclusies dan De Waal en Van der Meer (1992), en laten bij loodrechte golfinval juist wel een significante invloed van kortkammigheid zien. Die invloed is er niet alleen op de golfcondities aan de dijkteen (dat qua onderwerp meer in par. 5.2 past), maar ook in de vorm van directe invloed, dus een invloed op golfoverslag *gegeven* de golfcondities aan de dijkteen.

Het verschil tussen de experimenten van De Waal en Van der Meer (1992) en Altomare et al. (2020) zit met name in de geometrie: Eerstgenoemde auteurs gebruikten een dijkmodel in een vlakke overslagbak, terwijl Altomare et al (2020) proeven deden met een ondiep en licht hellend voorland voor de dijk, feitelijk met een geschematiseerd strandprofiel.

Figuur 8 van Altomare et al. (2020) laat zien dat een richtingsverspreiding van 28° leidt tot een factor 2 à 10 reductie in golfoverslagdebiet, bij respectievelijk een $h_{\text{teen}}/H_{m0, \text{offshore}}$ -verhouding kleiner dan 1 en kleiner dan 0,3. Daarbij is h_{teen} de waterdiepte bij de dijkteen, en $H_{m0, \text{offshore}}$ de significante golfhoogte op diep water.

Wel is het belangrijk op te merken dat de factor 10 en factor 2 van Altomare et al. (2020) betrekking hebben op een reductie van het overslagdebiet, terwijl de invloedsfactoren (de γ 's) in overslagformules veelal gerelateerd zijn aan de logaritme van het overslagdebiet. De equivalente γ -invloedsfactoren voor golfoploop liggen waarschijnlijk eerder in de orde van 0,75 à 0,9, wat nog altijd significant te noemen is. Mogelijk verdwijnen de ondiep-water-effecten wanneer $h_{\text{teen}}/H_{m0, \text{offshore}}$

¹² Oosterlo (2015) kwam voor een ander experiment ondiep hellend voorland (en in zijn geval een flauw dijktaalud) tot kwalitatief vergelijkbare bevindingen, zij het op basis van 1D- en 2D-XBeach-modelsimulaties.

afneemt tot 3, want bij die waarde vonden De Waal en Van der Meer (1990) geen ondiep-water-effecten op de golfoploop.

Al met al lijkt de literatuur op het eerste gezicht geen eenduidig beeld te geven van de invloed van kortkammigheid op golfoploop en golfoverslag, bij loodrechte inval. Bij nadere beschouwing kan voorzichtig geconcludeerd worden dat kortkammigheid (in vergelijking met de langkammige situatie in golfgoten) bij een voldoende ondiep gelegen dijkteen wel zorgt voor een reductie in golfoploop van 10-25%, en van een factor 2-10 in golfoverslagdebiet.

Wel wordt aanbevolen nader literatuuronderzoek te doen om in beter in beeld te brengen wanneer kortkammigheid leidt tot een reductie van golfoploop en golfoverslag. Het ligt daarbij voor de hand om eerst de achtergronddocumenten bij de in CLASH opgenomen data te raadplegen. Het algemene beeld lijkt te zijn dat kortkammigheid en ondiep water elkaars effect lijken te versterken, terwijl kortkammigheid de belastingreducties door schuine golfinval juist lijkt te verzwakken wanneer de golven voldoende schuin (orde 45° of meer) invallen. Anderzijds lijkt de golfoploop- en –overslagreductie meer uitgesproken te zijn wanneer de schuine golfinval samengaat met de aanwezigheid van bermen en mogelijk ook taludruwheid. Voor deze situaties lijken golfbassinproeven meerwaarde te hebben.

Daarnaast kan kortkammigheid ook op *indirecte* wijze leiden tot golfoploop- en overslagreductie. Dit zal worden besproken in paragraaf 5.2.

5.2 Indirecte invloed van kortkammigheid op golfoploop en golfoverslag

Kortkammigheid kan ook indirect tot een reductie van golfoploop en golfoverslag leiden, via de waterstand en golfcondities aan de dijkteen.

Twee fenomenen lijken met name van belang:

- Het opwekken en/of vrijkomen van lange golven (infragolven) in de brandingszone
- Permanente waterstandsverhoging, doordat dissiperende golven eerst stroming genereren, en vervolgens een extra opzet, aangeduid als golfopzet.

Op diep water zijn lange golven (infragolven of infragravity waves) gebonden aan golfgroepen maar daarnaast kan er ook sprake zijn van vrije infragolven die bijvoorbeeld in een eerder stadium zijn vrijgekomen op ondiep water (Rijnsdorp et al. 2021). Op ondiep water aangekomen, breken de hoogste golven in zo'n golfgroep, waarmee de tot dan toe gebonden infragolf vrijkomt. Daarnaast zijn er ook vrije infragolven in de vorm van bijvoorbeeld infragolven die vanuit de kust reflecteren, en zich dan tamelijk ongehinderd over de Noordzee voortplanten. Er zijn nog veel kennisleemtes en onzekerheden rond infragolven, dus het is zaak onderstaande beschouwing vooral als indicatie van mogelijke effecten te beschouwen, en er niet al te harde conclusies aan te verbinden.

Deze lange golven hebben een niet-verwaarloosbare invloed op golfoploop en golfoverslag. Zo vindt Lashley (2021) dat het verdisconteren van infragolven bij de vastelandsdijken langs de Waddenzee een 1,1-1,6 keer hogere faalkans oplevert. Dat komt op die locaties grofweg overeen met het effect van 0,2 meter (of 0,1 decimeringshoogte) waterstandsverhoging. Lashley (2021) hanteert daarbij een kritisch overslagdebiet van $q_{crit} = 50$ l/m/s. Plouvier (2022) vond bij lagere overslagdebieten (ordegrootte 1 l/m/s) grofweg een factor 10 toename in overslagdebiet. Het is nog te vroeg hier harde conclusies aan te verbinden, maar de bevindingen suggereren wel dat bij lagere q_{crit} -waarden de kansfactor mogelijk hoger uitvalt dan 1,1-1,6. Hierbij moet wel worden bedacht dat de (relatieve) impact van infragolven sterk toeneemt naarmate de relatieve waterdiepte bij de

dijkteen lager ligt (daarmee de verhouding $h_{\text{teen}}/H_{m0, \text{offshore}}$). Bij de Waddenzeecases van Lashley (2021) is die verhouding grofweg 2, waardoor de effecten van infragolven niet zo groot zullen zijn als in de in par. 5.1 besproken resultaten van Altomare et al (2020). Dat is ook niet verwonderlijk, omdat de "offshore"-waarde van H_{m0} niet erg groot kan worden in de ondiepe Waddenzee.

Bij kortkammige golven neemt het belang van infragolven af naarmate de mate van richtings spreiding van de golven toeneemt. Lashley (2021, Eq. 2.36) hanteert daarvoor een invloedsfactor γ_{sc} :

$$\gamma_{sc} = 1 - \sigma \text{ [}^\circ\text{]} \quad (7)$$

met σ de richtings spreiding in graden. Vos (2022) berekende voor de vastelandsdijken langs de Waddenzee circa 0,2 m verhoging in vereiste kruinhoogte als gevolg van het verdisconteren van infragolven, op basis van de infragolfformules van Lashley (2021; zijn vergelijkingen 2.26, 2.27, 2.28, 2.29, 5.6 en 5.13) en de in Eurotop (2018) gegeven golfoploopformule voor ondiepe voorlanden.

De auteur van dit rapport heeft voor een grotere $H_{m0, \text{offshore}}$ -waarde van 5 m en een kritisch overslagdebiet van $q_{\text{crit}} = 10 \text{ l/m/s}$ soortgelijke spreadsheetberekeningen gemaakt en komt dan op orde grootte 0,2 m verhoging in vereiste kruinhoogte. De keuze van kritische overslagdebiet en bodemhelling zijn daarbij wel van belang. Bij een factor 10 reductie in kritisch overslagdebiet ($q_{\text{crit}} = 1 \text{ l/m/s}$) is vanwege infragolven namelijk 0,5 m in plaats van 0,2 m kruinverhoging nodig. Hetzelfde geldt bij een tien maal flauwer onderwatertalud (1/1000 in plaats van 1/100).

Ondanks de verschillen in bovenstaande schattingen blijft de tendens dat de impact van infragolven zich vaak lijkt te beperken tot maximaal enkele decimeters in vereiste kruinhoogte.

Het is daarbij wel van belang dat olop- en overslagformules worden gebruikt die geschikt zijn voor de sterk verhoogde golfperiodes die het gevolg zijn van het verdisconteren van infragolven. Formules die al te gevoelig zijn voor het Iribarrengetal ξ (zoals de TAW-formules en daarmee ook Vgl (1) in par. 4.1) lijken in deze context daarom minder geschikt.

Sowieso kan dan de vraag worden gesteld of de bijdrage van korte golven en infragolven zondermeer kan worden samengenomen in één integrale golfparameter zoals de significante golfhogte H_{m0} of de golfperiodemaat T_{m-10} , wanneer het de bedoeling is deze toe te passen in golfoploop- of golfoverslagformules. Op grond van het Iribarrengetal kan namelijk worden verwacht dat het golfbrekingsproces bij infragolven wezenlijk anders is (collapsing of surging) dan bij korte golven (plunging, en bij zeer flauwe taluds spilling)¹³. Bovendien vallen situaties met Iribarrengetallen groter dan 2-3 (en daarmee met golfbreking van het type collapsing en surging) buiten het validatie- en geldigheidsbereik van de meest gebruikte golfoploop- en golfoverslagformules en bijbehorende γ -invloedsfactoren. Wel zijn bestaan er in een aantal gevallen speciale varianten van deze formules voor situaties met hoge Iribarrengetallen.

Kortkammigheid reduceert de invloed van infragolven, maar het effect is alleen in relatieve zin significant. Weliswaar levert 30° richtings spreiding 30% reductie in de amplitude van infragolven (zie Vergelijking (7)), maar daar staat tegenover dat blijkens bovenstaande resultaten infragolven in veel (maar niet alle?) gevallen vooral een tweede-orde-effect lijken op te leveren. Vaak betreft het hoogstens enkele decimeters verhoging in vereiste kruinhoogte. Het indirecte effect van kortkammigheid via infragolven lijkt zich dan te beperken tot hoogstens orde 10 cm in vereiste kruinhoogte. In het meest gunstige geval zou dit effect nog grofweg

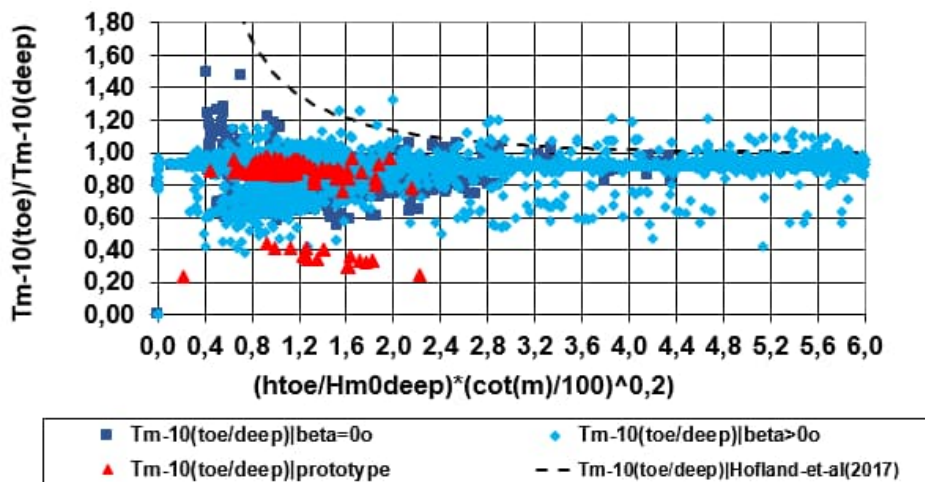
¹³ De bij het type golfbreking gebruikte begrippen spilling, plunging, collapsing en surging kunnen vrij vertaald worden als geleidelijk dissiperend, overstortend, inzakkend en opklotsend/oplopend.

kunnen verdubbelen, want bij duinafslagberekeningen met XBeach is de α_E -factor voor richtingsverspreiding/kortkammigheid nog aanzienlijk kleiner ten opzichte van Vergelijking (7). In de meest recente XBeach-kalibratie (Deltares, 2022) wordt namelijk een α_E -waarde van 0,3 aanbevolen bij kortkammige golven (tegen een γ_σ van 0,7 bij gebruik van Vergelijking 7 met een richtingsverspreiding van 30°), en 1 bij golfgootproeven.

Al met al lijkt de doorwerking van infragolven in veel gevallen te zeer een tweede orde effect te zijn om kortkammigheid hier een doorslaggevend aspect te laten zijn, al leidt kortkammigheid wel degelijk tot significant minder krachtige infragolven.

Dat infragolven vaak een tweede-orde-effect zijn betekent niet dat hun invloed altijd verwaarloosd kan worden.

In dat licht is de vraag relevant of infragolven ook in een laboratoriumsetting op (kunnen) treden. In-situ infragolven hebben veelal golflengtes van (tenminste) een paar honderd meter. In een laboratorium zal dit zonder verscaling vaak niet volledig te reproduceren zijn. Nadeel van zo'n verscaling is dat ook de amplitude van de infragolven dan kleiner wordt, en in het diepere deel van een golfgoot of golfbassin hoogstens enkele centimeters zou bedragen.



Figuur 6: Verhouding van golfperiodes bij de dijkteen en op diep water, als functie van de verhouding tussen de waterdiepte bij de dijkteen en de diepwatergolffoogte, gewogen met de reciproke waterbodenhelling. De symbolen geven de CLASH(2015) data weer (zelfde notatie als in Figuur 1), de gestreepte lijn de relatie van Hofland et al. (2017), zie ook Vgl 8.

Figuur 6 lijkt op het eerste gezicht te suggereren dat de bijdrage van infragolven in veel van de tot nu toe gearchiveerde laboratoriumproeven beperkt of afwezig is. In Figuur 6, die is gebaseerd op data uit de CLASH (2015) database, is de door Hofland et al (2017) en Lashley (2021) gevonden toename van de golfperiodemaat T_{m-10} naarmate de verhouding $h_{\text{teen}}/H_{m0,\text{diep}}$ kleiner wordt namelijk niet terug te vinden. Daarbij is h_{teen} de waterdiepte bij de dijkteen en $H_{m0,\text{diep}}$ de (offshore) significante golfhoogte op diep water). Hofland et al. (2017) beschrijven de golfperiodetoename met de volgende formule ¹⁴:

$$T_{m-10}(\text{teen})/T_{m-10}(\text{diep}) = h_{\text{teen}}/H_{m0}(\text{diep}) * ((\cotan(m)/100)^{0,2}) \quad (8)$$

¹⁴ Lashley (2021) presenteert een verbetering op de formule van Hofland et al. (2017). Deze is hier niet gebruikt omdat Lashley's formule aanzienlijk complexer is, maar vooral ook omdat deze niet alle variabelen in Lashley's formule dimensieloos zijn gemaakt, wat de toepassing op laboratoriumdata erg lastig maakt.

Daarbij is m de reciproke helling van de waterbodem nabij de dijkteen.

Bij Figuur 6 moet één belangrijke kanttekening worden gemaakt. De kans is namelijk reëel dat het frequentiebereik van infragolven (veelal) niet is meegenomen bij de bepaling van de in de CLASH-database opgenomen golfperiodes. Het kan dus niet worden uitgesloten dat het verschil tussen de CLASH-data en de formule van Hofland een artefact is, en dat er in een deel van de CLASH-data (en in de daaruit afgeleide oploop- en overslagformules) wellicht toch nog sprake is van een impliciete (en verborgen) bijdrage van infragolven. Figuur 2.2 van Den Bieman en Van Steeg (2021) lijkt in die richting te wijzen en suggereert dat er in laboratorium-faciliteiten toch nog sprake lijkt te zijn van lange golfcomponenten.

Over golfopzet is vrij weinig bekend omdat deze parameter vaak onderbelicht blijft in experimenten en meetcampagnes (Bottema, 2019). Dat is mede omdat golfopzet vooral landwaarts van de brekerzone optreedt. Bij een aan diep water gelegen dijk treedt de golfopzet feitelijk pas boven het onderwatertalud op, en maakt daarmee impliciet deel uit van de golfoploop. Wanneer sprake is van ondieptes waarop het leeuwendeel van de golven breekt, dan zal golfopzet ook zeewaarts van de dijkteen optreden. Modellen en deels ook metingen suggereren dat dit vooral bij buitendelta's gebeurt.

Een recente verkenning naar golfopzet (Eikema, 2018) geeft de volgende bevindingen:

8. Significante golfopzet treedt voornamelijk landwaarts van de dijkteen op, tenzij ondieptes zorgen voor zeer sterke golfbreking, zoals op buitendelta's.
9. Qua orde-grootte kan de golfopzet oplopen tot circa 8% van de diepwater/offshore-waarde van de significante golfhoogte H_{m0} , maar de spreiding in empirische relaties is groot
10. Bij significante 2D-effecten (een kustlangs gezien smalle in plaats van brede ondiepte) zal het effect kleiner zijn door zijdelings afvloeien van de opzet.
11. Bij regelmatige en langkammige golven kan de golfopzet tot 2-3 keer groter zijn als hierboven genoemd. Mogelijk is de rol van langkammigheid ondergeschikt, want de overeenkomst tussen veldmetingen en gootmetingen is bij onregelmatige golven toch nog vrij goed.
12. Bij schuine golfinval zal de golfopzet grofweg evenredig met de cosinus van de golfinvalshoek zijn.

Al met al valt niet met zekerheid te zeggen of kortkammigheid ook tot een significante reductie in golfopzet leidt.

6 Conclusies, aanbevelingen, resterende kennisvragen

6.1 Conclusies

Deze quick scan van de literatuur is uitgevoerd gegeven het feit dat golfgootproeven een essentiële rol vervullen voor het onderbouwen van [modellen voor] golfbelastingen op en bijbehorende erosie van dijken en duinen, maar tegelijkertijd hun beperkingen kennen. Daarbij liggen er twijfels ten aanzien van de vraag of gootproeven een in alle opzichten voldoende realistische weergave kunnen geven van de golven die in het veld tijdens maatgevende condities optreden. Zo lijken golfgoten aanzienlijk minder steile golven te produceren dan in stormcondities in het veld kunnen optreden. Mogelijke oorzaken hiervan zijn het ontbreken van windforcering en van richtings spreiding in de golven. Die laatste maakt dat de golven kortkammig zijn, in plaats van de langkammige golven in een golfgoot.

Feitelijk zijn de huidige golfoploop- en golfoverslagformules zelfs in belangrijke mate gebaseerd op golfgootproeven.

Tegelijkertijd hebben golfgootproeven hun beperkingen. Daarbij zijn er significante twijfels over de mate waarin golfgootproeven een natuurgetrouw beeld geven van de realiteit zoals die in het veld optreedt, met name tijdens maatgevende situaties.

Zo ontbreekt in de meeste golfgoten de forcering door wind. Verder is het lastig tot onmogelijk schuine golfval te reproduceren in een golfgoot. Hetzelfde geldt voor kortkammige golven, ofwel golven die niet als één langgerekte golfkam uit één richting komen, maar een samenstelling van een groot aantal golven die elk uit een wat andere richting komen. Naar aanleiding van deze beperkingen kwam de vraag op of niet meer gebruik gemaakt moet gaan worden van golfbassinproeven in plaats van golfgootproeven. Dit in de hoop en verwachting dat golfbassinproeven wellicht al een deel van de kennisvragen kunnen beantwoorden, zonder dat gewacht hoeft te worden op resultaten van lopende en eventuele toekomstige in-situ meetcampagnes, waarvan de kosten en onzekerheden vaak fors hoger zijn.

Een belangrijk doel van deze quick scan is daarmee het op een rij zetten van onderzoeksvragen gerelateerd aan de verschillen tussen golfgoot- en veldmetingen, en tussen laboratorium- en veldmetingen.

De volgende aspecten zijn daarbij beschouwd:

- 1 Golfsteilheid
- 2 Wind
- 3 Schuine golfval
- 4 Kortkammigheid

6.1.1 Conclusies – hoofdlijnen

1. Zeker grootschalige laboratoriumproeven lijken vaak niet (volledig) in staat de hoge golfsteilheden van veldmetingen te produceren. Golfoploop en – overslag worden daarbij veelal significant overschat wanneer een te lage golfsteilheid wordt gehanteerd. Deze tekortkoming verscherpt zich wanneer sprake is van (via Riskeer of Hydra-NL) te berekenen maatgevende golfcondities. Als potentiële oorzaken voor de verschillen in golfsteilheid zijn windforcering en kortkammigheid benoemd. Indirect kan worden berekend dat het effect van windforcering vermoedelijk niet verwaarloosbaar is.
2. Voor reguliere (korte) golven werkt schuine golfval gunstig door (lagere effectieve belasting), maar het kan niet worden uitgesloten dat het tegenovergestelde soms het geval is bij zeer lange deining en/of infragolven

- (meer specifiek bij een Iribarrengetal $\xi > 2,5$). Sowiezo lijkt er vrij weinig bekend te zijn over het gedrag van de invloedsfactoren γ (voor schuine golfval, berm en taludruwheid) bij dergelijke grote Iribarrengetallen.
3. Golfgootproeven zijn niet geschikt om de belastingreducties door schuine golfval in beeld te brengen. Voor golfoploop en golfoverslag zijn deze effecten relevant voor tenminste een paar honderd kilometer aan keringen.
 4. Voor golfklapbelasting en dijkerosie lijken de belastingreducties door schuine golfval ten opzichte van de Eurotop-formules voor golfoploop en golfoverslag nog een stuk groter te zijn, en de relevantie dus ook. Dat geldt naar verwachting ook voor harde bekledingen.
 5. Golfoploop en -overslagproeven met langkammige golven geven bij ondoorlatende en relatief gladde taluds een fors te optimistisch beeld van de belastingreductie door (zeer) schuine golfval, en soms (vooral bij ondiep voorland) een iets te pessimistisch beeld.
 6. Er is geen sprake van één generiek toepasbare invloedsfactor voor schuine golfval (zie figuur 2). De belastinggerelateerde variabele, de richtingspreiding van de golven en (bij ruwe en permeabele taluds) het bekledingstype hebben alle invloed op de waarde van de invloedsfactor.
 7. Het is de moeite waard om meer rekening te houden met synergetische effecten omdat belastingreducties elkaar in diverse gevallen versterken, bijvoorbeeld bij de combinatie van schuine golfval en berm. Maar ook bij permeabele en veelal zeer ruwe (stortsteen)bekledingen is mogelijk sprake van dergelijke interacties, gegeven het feit dat de invloedsfactor voor schuine golfval daar sterk afhankelijk bleek te zijn van het bekledingstype.

In par. 6.1.2 zijn de conclusies in meer detail uitgewerkt.

6.1.2 *Conclusies – in meer detail*

Golfsteilheid:

Bij een gegeven golfsteilheid gaat een grotere golfsteilheid meestal samen met minder golfoploop en -overslag (zie Vgl 1). Qua golfsteilheid blijken binnen het meetbereik al golfsteilheden van ruim 7% voor te komen wanneer sprake is van jonge golven. Maatgevende condities zijn bijna twee keer extremer, en steilheden zullen dan nog extremer zijn én ook bij wat minder jonge golven voorkomen. Daar komt in BOI de bijdrage van onzekerheden nog bij.

In het laboratorium lijken golfsteilheden richting 7% alleen haalbaar voor kleinschalige proeven; bij grootschalige gootproeven zijn geen steilheden groter dan circa 5% bekend.

Twee oorzaken zijn aangedragen voor de hoge golfsteilheden in het veld: windforcering en kortkammigheid (richtingspreiding) van de golven.

Windforcering:

Windforcering zou kunnen zorgen voor steilere golven, maar uit de doorgenomen literatuur valt niet op te maken of en vooral in welke mate dat gebeurt. Indirect kan wel aannemelijk gemaakt worden dat windforcering hierbij een rol van belang speelt (of in elk geval kan spelen). Bij loodrechte golfval is het in Hoofdstuk 5 gevonden pure effect van kortkammigheid op golfoploop (vaak amper 5%) namelijk kleiner dan de golfoploopverschillen (van zeker 10-15%) die te verwachten zijn op basis van de in Hoofdstuk 2 beschreven golfsteilheidsverschillen tussen maatgevende veldcondities en golfgootcondities. Verder zijn enkele beperkingen van wind-golf-goten (wind-wave flumes) aan het licht gekomen en zijn (zie par. 6.2) enkele onderzoeksvragen geformuleerd.

Schuine golfval:

In reguliere golfgoten (zonder windforcering) is ook de rol van schuine golfval niet goed te onderzoeken. Het verdisconteren van schuine en zeer schuine golfval lijkt voor significante reductie van de faalkans door overslag te kunnen zorgen voor

tenminste een paar honderd kilometer aan waterkering, vooral langs langgerekte wateren en de westzijde van de grote meren. Overigens lijkt de belastingreductie door schuine golfinval bij golfklap (Klein Breteler en Mourik, 2019) duidelijk groter te zijn dan de maximaal 20-30% reductie die bij golfoploop en golfoverslag kan optreden. Verdere relevante bevindingen:

- Er is geen sprake van één generiek toepasbare invloedsfactor voor schuine golfinval, zie figuur 2. De belastinggerelateerde variabele, de richtingsverspreiding van de golven en (bij ruwe en permeabele taluds) het bekledingstype spelen alle een rol.
- Schuine golfinval lijkt de belastingreductie door bermen te versterken (synergetisch effect dat nog niet is verdisconteerd in de TAW/Eurotop-formules). Ook bij schuine golfinval en zeer ruwe (en/of permeabele) taluds is mogelijk sprake van interactie-effecten.
- De belastingreductie door schuine golfinval is mogelijk sterker dan de TAW/Eurotopformules suggereren (zie Oosterlo, 2013 en daarnaast Figuur 2 van dit rapport), waarmee de relevantie van schuine golfinval mogelijk groter is dan nu aangenomen.
- De belastingreductie door schuine golfinval is ook sterker bij langkammige golven (vergeleken met kortkammige golven), maar dit gegeven is vooral belangrijk voor de keuze en duiding van laboratoriumproeven, en minder relevant voor de veiligheidsbeoordeling van dijken.
- Er zijn theoretische aanwijzingen (zie Klein Breteler et al, 2006) dat bij zeer lange golven (lange deining, infragolven, bij Iribarrengetallen $\xi > 2,5$) het normaliter gunstige effect van schuine golfinval soms omslaat in een ongunstig effect.

Invloed van kortkammigheid:

Bij in-situ situaties (op open water) is veelal sprake van kortkammige golven. Er is weinig literatuur over de invloed van kortkammigheid op golfoploop en golfoverslag, of het betreft vooral grijze en minder goed vindbare literatuur. De bevindingen zijn als volgt:

- Bij loodrechte inval is het effect van kortkammigheid mogelijk beperkt op relatief diep water (De Waal en Van der Meer, 1992), terwijl de golfoverslag juist een factor 2-10 kleiner kan uitvallen bij een ondiep voorland (Altomare et al, 2020).
- Bij (zeer) schuine golfinval werkt kortkammigheid – anders dan bij loodrechte golfinval – juist niet gunstig: bij langkammige golven is de belastingreductie door schuine golfinval sterker dan bij de kortkammige golven waarop TAW en Eurotop gebaseerd zijn.
- Ook hier lijkt dus sprake te zijn van interactie-effecten: kortkammigheid lijkt de (in Eurotop nog niet verdisconteerde) belastingreductie door ondiepe voorlanden (Van Steeg et al., 2020) te versterken en die door schuine golfinval juist te verzwakken
- Daarnaast werkt kortkammigheid door in de belastingen bij de dijkteen, al lijken deze indirecte effecten uiteindelijk beperkt te zijn als het gaat om vereiste kruinhoogte. In relatieve zin zorgt kortkammigheid nog wel voor een significante reductie van de amplitude van infragolven (infragravity waves); het effect op golfopzet is minder duidelijk.

6.1.3 *Conclusies – eerste beschouwing over verschillen typen experimenten*

Tot slot nog een korte beschouwing over de geschiktheid van verschillende typen experimenten.

Bij reguliere golfgootproeven liggen de voordelen in beschikbaarheid, niet al te hoge prijs, de controleerbaarheid en reproduceerbaarheid van de golfcondities, de relatief goede mogelijkheden metingen uit te voeren, en niet in de laatste plaats in de schaal die niet al te veel van veldcondities hoeft af te wijken.

Nadeel is dat een aantal belangrijke tot essentiële zaken niet of in elk geval zeer lastig zijn te modelleren in een golfgoot: namelijk de zeer hoge steilheden die in stormcondities en nog meer in maatgevende condities in het veld optreden, de windforcering, schuine golfinval en kortkammigheid/richtingsspreiding van de golven.

Bij golfbassinproeven vervallen twee nadelen van reguliere golfgootproeven. Schuine golfinval en kortkammigheid zijn in een golfbassin namelijk goed op te wekken, *mits* het een golfbassin betreft met de juiste aansturingsoftware (!) voor de golfgeneratoren, zie Altomare et al. (2020) en mits onbedoelde reflecties afdoende worden weggenomen.

Daar staat tegenover dat forse concessies gedaan moeten worden aan de schaal, wat de kans op schaaleffecten vergroot, zeker wanneer sprake is van een schaalfactor groter dan 20 (De Waal en van der Meer, 1990). Vaak zijn de significante golfhoogtes in golfbassins namelijk niet veel groter dan $10 \text{ cm} < H_{m0} < 20 \text{ cm}$. Anderzijds zijn mogelijk juist zulke kleinschalige proeven het meest geschikt wanneer hoge golfsteilheden ge(re)produceerd moeten worden, zie Figuur 1. Qua beschikbaarheid en kosten is het plaatje iets minder gunstig dan voor reguliere golfgoten.

Over wind-golf-goten (wind-wave-flumes) kon in deze quick scan eigenlijk onvoldoende informatie worden achterhaald. Wel is in Hoofdstuk 3 beredeneerd dat het allesbehalve eenvoudig zal zijn om wat grotere golven én representatieve atmosferische condities (windprofiel, turbulentie) te genereren. Het grote voordeel is dat in wind-golf-goten windforcering toegevoegd kan worden.

Nadeel is dat lang niet zeker is dat die windcondities natuurgetrouw zijn, nog los van de forse schaaleffecten voor zowel wind als golven, en de (zeer) beperkte beschikbaarheid van dergelijke faciliteiten. Het is dan ook de vraag hoe kansrijk deze meetstrategie is, maar het is wel van belang de meerwaarde van deze strategie goed te onderbouwen en niet al te snel af te schrijven.

Veldmetingen hebben natuurlijk het grote voordeel dat ze natuurgetrouw zijn; daarnaast hebben ze het voordeel dat ook de invloed van infragolven kan worden meegenomen, wat met laboratoriumexperimenten niet in alle gevallen mogelijk lijkt. Nadeel is dat het haalbare meetbereik veelal niet verder komt dan 9 à 10 Beaufort, en ruim achterblijft bij het maatgevende bereik met veelal orkaanwinden (12 Beaufort). Met een in-situ-schaalexperiment (met onder andere verschaalde strijklengte en dijkafmetingen) zijn deze bezwaren deels maar niet geheel weg te nemen, nog los van de extra kosten.

Bijkomende nadelen zijn onder andere de kosten, meetproblemen, en het lange wachten op geschikte meetcondities. Toch is en blijft er grote behoefte aan veldmetingen voor met name modelvalidatie (Bottema, 2019).

Uit bovenstaande blijkt dat elke meetstrategie zijn sterktes en zwaktes heeft. Het is per geval dan ook telkens een afweging welke meetstrategie de voorkeur heeft.

6.2 Aanbevelingen en resterende kennisvragen

6.2.1 Aanbevelingen op hoofdlijnen

In dit verkennende rapport kwamen twee zaken naar voren die er uit sprongen als het gaat om de toepasbaarheid van golfgootproeven als het gaat om het onderbouwen en aanscherpen van de belasting op dijkbekledingen:

- Het niet goed in beeld kunnen brengen van belastingreducties door schuine golfinval.

- Een vaak te lage golfsteilheid ten opzichte van veldmetingen en met name ten opzichte van maatgevende condities

Het aspect schuine golfinval bleek uiteindelijk zeker zo belangrijk te zijn als het aspect golfsteilheid.

Dit leidt tot de volgende aanbevelingen op hoofdlijnen:

1. Onderbouw en verdisconteer op consequente wijze (voor alle bekleding- en belastingtypen) de veelal fors reducerende effecten van (zeer) schuine golfinval op de belasting van bekledingen. Doe dit niet alleen voor golfoploop en golfoverslag, maar met name ook voor golfklapbelastingen van zachte én harde bekledingen, en voor vervolgerosie. Ook voor front- en oploop-snelheden (sleutelparameters voor de uitrol van de Cumulatieve Overbelastingmethode) is het afleiden en verdisconteren van invloedsfactoren voor schuine golfinval van groot belang omdat dit tot nu toe een witte vlek is. Houd bij dit alles expliciet rekening met de kortkammigheid (en meer specifiek de te verwachten richtings spreiding) van de inkomende golven.
2. Onderbouw en verdisconteer de (in veel gevallen gunstige) interacties en synergetische effecten tussen schuine golfinval en andere invloedsfactoren op voornoemde golfbelastingen. Met name de interacties met bermen zijn van belang, maar in mindere mate ook bijvoorbeeld die met (eindige) waterdiepte, met taludruwheid (vooral wanneer deze groot is) en richtings spreiding.
3. Breng ook in beeld of en wanneer schuine golfinval niet langer een gunstig (belastingreducerend) effect heeft maar juist een ongunstig effect. Mogelijk is hier sprake van bij deining en infragolven, en meer specifiek in situaties met Iribarrengetallen $\xi > 2,5$. Breng voor die situatie ($\xi > 2,5$) ook meer generiek het validatie- en geldigheidsbereik van de Eurotop-formules en invloedsfactoren in beeld.
4. Breng scherper in beeld waar, wanneer en waarom de golfsteilheden van laboratoriumproeven (en in bassinproeven en sommige numerieke modellen) achterblijven bij veldmetingen en bij de output van Hydra-NL en Riskeer, en in welke mate die verschillen problemen veroorzaken.
5. Werk een meetstrategie uit voor ontwikkeling, kalibratie en validatie van modellen voor de doorwerking van belastingen op bekledingen. Maak daarbij een onderbouwde en expliciete afweging tussen golfgootproeven, golfbassinproeven, golfgoten-met-windforcering, veldmetingen en eventueel ook voldoende gevalideerde numerieke benchmarkmodellen.
6. Leg de focus op bovenstaande hoofdvragen, maar geef daarnaast ook aandacht aan relevante tweede-orde-effecten zoals bijvoorbeeld kortkammigheid, golfopzet, en aan de veelal ongunstige invloed van golfopzet en infragolven. Voor de laatste liggen er ook kennisvragen rond de manier waarop ze verdisconteerd moeten worden en ten aanzien van hun aan- of afwezigheid in laboratoriumproeven.

In par. 6.2.2 volgt een detailuitwerking van de kennisvragen en aanbevelingen.

6.2.2 *Aanbevelingen en kennisvragen - details*

Voor de volledigheid volgt hieronder een eerste uitwerking en detaillering, gekoppeld aan de hoofdstukindeling van dit rapport.

Veel van de kennisvragen en aanbevelingen uit de voorgaande hoofdstukken en par. 6.2.1 hebben vooral een probleemverkenkend karakter. Wanneer de aard en omvang van de issues rond schuine golfinval, kortkammigheid en het in golfgoten/golfbassins veelal ontbreken van windforcering beter in beeld zijn, dan kan ook worden vastgesteld welke aanvullende inspanningen nodig zijn om deze

aspecten beter te laten landen in de BOI-bekledingsmodellen, en in een meet-/kalibratie/validatiestrategie ter ondersteuning en onderbouwing van deze modellen.

De meer gedetailleerde kennisvragen en aanbevelingen (met voor dit rapport nog een focus op het aspect probleemverkennen) luiden als volgt. De urgentie ligt daarbij vooral bij de hoofdvragen van par. 6.2.1, onderstaande detaillering is vooral een inkleuring van die hoofdvragen.

Golfsteilheid:

1. Prioritair / no-regret: Ga na op welke dijktrajecten sprake er voor golfoverslag resp. overige bekledingbelastingen sprake is van maatgevende golfsteilheden groter dan 5% (de waarde waarboven het lastig is deze te reproduceren in golfgoten), en zoek uit welke factoren daar het meest aan bijdragen
2. Geef bij veldmetingen expliciet aandacht aan golfsteilheid
3. Ga na onder welke omstandigheden in het laboratorium tóch golfsteilheden groter dan 5% haalbaar zijn. Wanneer dat alleen voor kleinschalige proeven lukt, maak dan een expliciete afweging tussen de keuze van de schaalfactor en het reproduceren van de in het veld te verwachten golfsteilheid.

Windforcering: (als verklaring voor de hoge in-situ golfsteilheden)

1. Korte termijn: Bepaal met SWAN hoe snel (en vooral: over welke afstand) golven dissiperen en golfsteilheden inzakken als de windforcering wegvalt. Als spin-off kan hiermee ook het toepassingsbereik van voorlandmodules (waarin windforcering ontbreekt) nader in beeld worden gebracht.
2. Korte termijn: Verdiepend literatuuronderzoek om na te gaan of de in het veld waargenomen golfsteilheden (en daarnaast de golfhoogte-waterdiepteverhoudingen H_{m0}/d) én de bijbehorende windforcering wél haalbaar en te realistisch reproduceren zijn in golfgoten mét windforcering, ofwel in speciale wind-wave flumes.
3. Ten behoeve van bovenstaande vraag: Maak een inventarisatie van laboratoriumfaciliteiten met windforcering, hun kenmerken en beperkingen (qua windeigenschappen en qua golven) en hun potentiële meerwaarde.
4. Middellange termijn (mogelijk meerjarig traject in Kennis voor Keringen): ontwikkel een aanpak om windforcering toe te voegen aan fase-oplossende modellen.

Schuine golfinval:

1. Prioritair: Onderbouw en verdisconteer de effecten van schuine golfinval niet alleen voor de aspecten golfploop en golfoverslag, maar ook en juist voor golfklapbelastingen (op zachte én harde buitentaluds), dijkerosie en in het bijzonder ook voor de oploop- en frontsnelheden die worden gebruikt in de Cumulatieve Overbelastingsmethode. Bekijk voor die laatste vier zaken ook in hoeverre het concept van Eurotop- γ -invloedsfactoren (in aangepaste vorm) toepasbaar is.
2. Prioritair: Geef meer aandacht aan interacties en synergiën tussen de invloeden en/of belastingreducties door schuine golfinval, bermen, eindige waterdiepte, taludruwheid, kortkammigheid etc. De huidige aanpak negeert veelal dergelijke interacties, en in veel gevallen is die aanname conservatief (maar soms wellicht ook niet).
3. Als eerste stap daarvoor: Breng de geldigheid en bruikbaarheid van gecombineerde reductiefactoren voor bermen en schuine golfinval (zoals die van Van Gent, 2020) nader in beeld.
4. Prioritair: Ga na of de bevindingen van deze studie en meer generiek de Eurotop-formules en –invloedsfactoren ook geldig zijn bij (het verdisconteren van) lange deininggolven en infragolven, of dat schuine golfinval voor die situaties anders/ongunstiger uitpakt, met name bij een Iribarrengetal $\xi > 2,5$.

5. De IJsselmeermetingen geven bij schuine golfinval een sterkere oploopreductie dan Eurotop (2018), en Oosterlo (2013) vond een analoog resultaat voor bassinproeven met golfoverslag. Ga na of deze trend ook elders aanwezig is. Bijvoorbeeld bij veldmetingen aan dijken zonder berm, zoals Petten en Uithuizerwad.
6. Breng al dan niet na bovenstaande aanscherpingen nader in beeld bij welke dijktrajecten sprake is van significante golfklap-, golfoploop- en golfoverslagreductie door schuine golfinval, in een probabilistische context.
7. Ga na welke richtingsverspreiding is gehanteerd bij de in Eurotop (2018) gegeven formules voor schuine inval van kortkammige golven.

Kortkammigheid en aanverwante zaken:

1. Kortkammigheid lijkt vooral tot reductie van golfoploop en golfoverslag te leiden bij ondiepe voorlanden (en daarmee een ondiep gelegen dijkteen), en waarschijnlijk ook wanneer sprake is van bermen en/of taludruwheid. Bij schuine golfinval leidt kortkammigheid juist tot minder reductie (ten opzichte van langkammige golven). Nader onderzoek (van in eerste instantie de literatuur) wordt aanbevolen om deze trends vollediger en eenduidiger in kaart te brengen. De documentatie van de in CLASH opgenomen data kan daarbij een startpunt vormen.
2. Infragolven leveren een niet-verwaarloosbare bijdrage aan de overstromingskans, maar hun effect neemt af naarmate de golven kortkammiger zijn, en hun richtingsverspreiding groter is. Nader onderzoek naar kortkammigheid komt vooral in beeld wanneer er sprake is (of zou zijn) van gevallen waar de bijdrage van infragolven aan de vereiste kruinhoogte meer is dan enkele decimeters.
3. Er is betrekkelijk weinig bekend over golfopzet. Omdat de waterstandsverhoging door golfopzet kan oplopen tot orde 8% van de offshore-golfhoogte (en meer bij langkammige golven), wordt aanbevolen bij goot- en veldexperimenten golfopzet standaard mee te nemen als te bemeten parameter. Een aandachtspunt is dat significante golfopzet vaak pas optreedt rond en voorbij het punt dat de meeste golven al gebroken zijn, wat soms pas op het dijktaalud is (en dan soms lastig te bemeten). Juist daarom zijn bij veldmetingen ook de buitendelta's bij de Waddeneilanden kansrijk.
4. Bekijk kritisch of en waar kortkammigheid/richtingsverspreiding expliciet een plaats moet krijgen in het BOI-instrumentarium, en waar het volstaat kortkammigheid expliciet een plaats te geven in de meet- en onderbouwingsstrategie van het BOI-instrumentarium.

Overige zaken - infragolven:

1. Onderzoek op welke wijze infragolven het beste verdisconteerd kunnen worden in golfoploop- en golfoverslagformules, gegeven de bevinding dat er bij korte golven qua golfbrekingsgedrag/-regime sterk verschillen van infragolven, en dat bij die verschillende regimes ook verschillende oploop- en overslagformules horen.
2. Breng in beeld of en op welke wijze laboratoriumexperimenten geschikt zijn voor het produceren van infragolven, gezien het vermoeden dat laboratoriumexperimenten minder goed in staat zijn om infragolven volledig te produceren, of slechts na aanpassingen aan bijvoorbeeld de schaalfactor,
3. Meet bij nieuwe goot- en bassinproeven ook het infragolvensignaal, want het kan niet worden uitgesloten dat er bij brekende golven rond de dijkteen en op ondiepe voorlanden toch nog sprake is van lokale opwekking van infragolven in een golfgoot of golfbassin.
4. Ga, al dan niet met behulp van de bij punt 3 genoemde informatie, na bij welke eerder uitgevoerde laboratoriumexperimenten (uit CLASH en uit andere bronnen) toch nog sprake zou kunnen zijn van significante infragolfbijdragen. Ga vervolgens na of en in welke mate infragolven wellicht al impliciet zijn verdisconteerd in bestaande oploop- en overslagformules.

Meetstrategie:

1. Breng uitgebreider in beeld waar de sterktes en beperkingen van resp. gootproeven, bassinproeven, wind-golf-goten en veldmetingen liggen. Kom vervolgens met een handelingsperspectief dat aangeeft wanneer welke meetstrategie optimaal is. Weeg daarin ook de mogelijkheid mee van schaalproeven op een in-situ-velddlocatie. Weeg ook de geschiktheid voor andere belangrijke belastingparameters mee, zoals de piekdrukken die nodig zijn om het golfklapmechanisme te beschrijven. Een vervolgstap kan zijn om de meetstrategie uit te breiden met opties voor numeriek modelonderzoek.
2. Gebruik deze informatie en de informatie uit bovenstaande kennisvragen voor het uitwerken van een meetstrategie waarmee het BOI-bekledingen-instrumentarium nader kan worden uitgewerkt, gekalibreerd en gevalideerd. Kortkammigheid, schuine golfinval, golfklap-piekdrukken, golfopzet, infragolven en mogelijk ook windforcering verdienen daarin aandacht, maar die aandacht zou zich zeker niet exclusief tot deze aspecten moeten beperken. Het is namelijk de bedoeling is zo'n meetstrategie breed en integraal op te zetten, met naast de belastingen ruime aandacht voor de eigenschappen van de bekledingen.

7 Literatuur

1. C. Altomare, T. Suzuki, T. Verwaest, 2020, Influence of directional spreading on overtopping of sea dikes with gentle and shallow foreshores, Coastal Engineering 157, 103654, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103654>
2. J. den Bieman, P. van Steeg, 2021, Wave run-up velocities or the cumulative overload method for erosion of grass revetments, Deltares-rapport 11206817-034-GEO-0001, 9 December 2021
3. J. den Bieman, 2022, Aanscherpen γ_B voor golfpoot t.b.v. GEKB & GEBU, Deltares-Powerpoint-presentatie 15 augustus 2022
4. M. Bottema, 2007: Measured wind-wave climatology Lake IJssel ; main results for the period 1997-2007; RWS RIZA rapport 2007.020, https://puc.overheid.nl/rijkswaterstaat/doc/PUC_128571_31/1/
5. M. Bottema, G.Ph. van Vledder, 2009: A ten-year data set for fetch and depth limited wave growth, Coastal Engineering, 56, 703-725
6. M. Bottema, 2019, Informatiebehoefte WBI-BOI Veldmetingen vanaf 2018, met focus op Wadden en IJsselmeergebied, Rapport Rijkswaterstaat, 25/1/2019, https://puc.overheid.nl/rijkswaterstaat/doc/PUC_165017_31/1/
7. W. Chen, 2022, The influence of berms , roughness and oblique waves on wave overtopping at dikes, proefschrift Technische Universiteit Twente, 16/12/2021, <https://research.utwente.nl/en/publications/the-influence-of-berms-roughness-and-oblique-waves-on-wave-overtop>
8. CLASH, 2015, CLASH runup & overtopping database, versie 20150101, <http://www.overtopping-manual.com/eurotop/neural-networks-and-databases/>
9. B. Eikema, 2018, Verkennende studie naar het belang van golfopzet in WBI2023, SVASEK-rapport 1917/U17234/C/BE, https://puc.overheid.nl/rijkswaterstaat/doc/PUC_155562_31/1/
10. Eurotop, 2018, EuroTop (2018). Manual on wave overtopping of sea defences and related structures: An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application. 2nd edition, December 2018, <http://www.overtopping-manual.com/eurotop/downloads/>
11. J.-C. Galland, 1994, Rubble mound breakwater stability under oblique wave: an experimental study, ASCE Proc. Coast. Eng. 1994, p1061-1074, <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/9780784400890.078>
12. M.R.A. van Gent, 2020, Influence of oblique wave attack on wave overtopping at smooth and rough dikes with a berm, Coastal Engineering 160, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103734>
13. J. Groeneweg, P. Van Steeg, 2020 Extreme golfsteilheden – literatuuronderzoek, Deltares-rapport 11205235-010-ZWS-0001, https://puc.overheid.nl/rijkswaterstaat/doc/PUC_640407_31/1/
14. B. Hofland, X. Chen, C. Altomare, P. Oosterlo, 2017, Prediction formula for the spectral wave period $T_{m-1,0}$ on mildly sloping shallow foreshores, Coastal Engineering 123, p21–28, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037838391630237X?via%3DIihub>
15. S. Khachatryan, 2017, Wind-wave climate analysis and wave height prediction using neural network for Lake IJssel and Lake Marken, MsC Thesis IHE Delft, https://puc.overheid.nl/rijkswaterstaat/doc/PUC_155574_31/1/
16. M. Klein Breteler, C. Kuiper, A. Bezuijen, 2006, Invloed scheve golfaanval op stabiliteit van steenzetting – onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steen-bekledingen, Rapport H4420, WL|Delft, ism GeoDelft en Rijkswaterstaat , https://puc.overheid.nl/rijkswaterstaat/doc/PUC_725475_31/
17. M. Klein Breteler, G.C. Mourik, 2019, Invloed hoek van golfaanval op graserosie op dijken, Deltares-rapport 11203270-017-GEO-0001, https://puc.overheid.nl/rijkswaterstaat/doc/PUC_723300_31/
18. S. Lorke, A. Bornschein, R. Pohl, H. Schüttrumpf, 2013, FlowDike-D – Influence of wind and current on wave run-up and wave overtopping -

- Extracts of the final report, Die Küste 80 (2013) 1-76,
https://henry.baw.de/bitstream/20.500.11970/105221/1/k080101_a.pdf
19. R. McCall, A. de Bakker, E. Quataert R. de Goede, L. de Vet, M. de Ridder M. van der Lugt D. Roelvink H. Petterson, 2022, BOI Standaard instellingen - Kalibratie van de XBeach model parameters, Deltares- en Arcadisrapport 11206818-018-GEO-0006, 22/2/2022
 20. N. Plouvier, 2022, The influence of infra-gravity waves on dike overtopping for shallow foreshores, stageverslag Rijkswaterstaat WVL
 21. P Oosterlo, 2013, Hydralab – Cornerdike Influence of very oblique waves on wave overtopping, BSc Thesis TU Delft,
<http://resolver.tudelft.nl/uuid:06c60388-2500-4fa0-9012-ba101e90fa5a>
 22. P. Oosterlo., 2015, A method to calculate the probability of dike failure due to wave overtopping, including the infragravity waves and morphological changes, MSc Thesis TU Delft, <http://resolver.tudelft.nl/uuid:4c139e62-cc55-4013-844f-ad5d5ab62e29>
 23. P. Oosterlo, 2021, Nearshore waves and related wave overtopping in complex estuaries, proefschrift TU Delft, 8/12/2021,
<https://doi.org/10.4233/uuid:884cbc96-ebcd-488a-a820-0daae3962bb1>
 24. M. de Ridder, C. Gautier, 2021, SWAN-modelschematisatie Markermeer t.b.v. BOI en RWsOS, Deltares-rapport 11206813-013-ZWS-0001, 5/11/2021
 25. D.P. Rijnsdorp, A.J.H.M. Reniers, M. Zijlema, 2021, Free infragravity waves in the North Sea, Journal of Geophysical Research - Oceans,
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2021JC017368>
 26. D. Roelvink, R. McCall, S. Mehvar, K. Nederhof, A. Dastgheib, 2018, Improving swash dynamics in XBeach: the role of groupiness and incident band runup, Coastal Engineering 134, 103-123
 27. P. van Steeg, M. de Ridder, A. Capel, M. Bottema, 2020, Influence of water depth on wave overtopping, Proc. Int. Symposium FloodRisk2020, Budapest,
https://repositorium.omikk.bme.hu/bitstream/handle/10890/15150/1_25.pdf?isAllowed=y
 28. G.J. Steendam, J.W. van der Meer, H. Verhaeghe, P. Besley, L. France, M.R.A. Van Gent, 2005, The international database on wave overtopping, Proc. 29th Int. Conf. on Coastal Engineering, Lisbon, 19-24 Sept. 2004, (Ed. J McKee Smith), p. 4301-4313.
https://doi.org/10.1142/9789812701916_0347
 29. R.J. Vos, 2022, Golfploopmodellering voor de Waddenzee met toevoeging van infragravity waves, Rapport RWS WVL, 6/1/2022,
https://puc.overheid.nl/rijkswaterstaat/doc/PUC_699713_31/1/
 30. J.P. de Waal, J.W. van der Meer, 1990, Invloed van scheve inval en richtingsverspreiding op golfploop en overslag, WL-rapport H638, tbv TAW projectgroep A1 – Belastingen,
https://puc.overheid.nl/rijkswaterstaat/doc/PUC_49103_31/1/
 31. J.P. de Waal, J.W. van der Meer, 1992, Wave runup and overtopping on coastal structures, Proc. 2nd Int Conf on Coastal Engineering, p 1758-1771,
<https://icce-ojs-tamu.tdl.org/icce/index.php/icce/article/view/4812>