



RWS INFORMATIE

Golfdoordringing Noordzeegolven in estuaria

Plan van Aanpak

Datum	19 december 2024
Versie	1.0
Status	Definitief

Colofon

Uitgegeven door Rijkswaterstaat, Deltares, TU Delft, HKV, Arcadis
Auteur Patrick Oosterlo (RWS WVL), Jacco Groeneweg (Deltares), Ad Reniers (TU Delft), Matthijs Benit (HKV), Henk Steetzel (Arcadis), Job Oude Vrielink (Arcadis) & Robert Vos (RWS WVL)

Informatie
Telefoon
Mobiel
E-mail

Datum 19 december 2024
Versie 1.0
Status Definitief

Versiebeheer

V0.4	25-11-2024	Eerste concept
V0.5	27-11-2024	Controle op inhoud, consistentie, spelling en grammatica
V0.6	10-12-2024	Verwerking commentaar QA (Vincent Vuik, Deltares)
V0.7	18-12-2024	Verwerking commentaar RWS-WVL
V1.0	19-12-2024	Definitief

Samenvatting

Voor operationele voorspellingen of beoordeling en ontwerp van dijken zijn voldoende nauwkeurige voorspellingen van golfcondities van groot belang. Op de Noordzee, in estuaria en op meren wordt hiervoor het golfmodel SWAN gebruikt. Een van de nog onverklaarde aspecten bij de toepassing van dit model betreft de onderschatting door SWAN van laagfrequente golfenergie in een complex systeem als de Waddenzee. Mogelijk treedt dat ook in de Westerschelde, de monding van de Oosterschelde of op andere locaties op. De beperkte hoeveelheid metingen in deze systemen zijn echter niet geanalyseerd op deze omissie. Het effect van de onderschatting op de overstromingskans kan significant zijn, waarbij gedacht kan worden aan een factor 20 (ongeveer 1.5 m in dijkhoogte).

De laatste vijftien jaar is er veel onderzoek gedaan naar de onderschatting van de van de laagfrequente golfenergie, zijn verscheidene hypothesen verworpen, maar ook nieuwe hypothesen ontstaan. Doel van de voorliggende activiteit is te komen tot een plan van aanpak, waarin kansrijke en haalbare activiteiten worden gedefinieerd en vervolgens geprioriteerd om de onderschatting van de laagfrequente energie op te kunnen lossen.

Om tot een geprioriteerd voorstel te komen, zijn allereerst mogelijke vervolgonderzoeksrichtingen geïnventariseerd. Per onderzoeksrichting is niet alleen een beschrijving op hoofdlijnen gegeven, maar is ook uiteengezet hoe deze scoren ten aanzien van een aantal beoordelingscriteria. Daarbij moet gedacht worden aan een inschatting van de verbetering van modelresultaten (gericht op hoofddoelstelling) en verbetering van de weergave van de fysica. Daarnaast zijn criteria opgesteld en geëvalueerd, gerelateerd aan de rekentijd bij toepassing in bijvoorbeeld BOI, mogelijkheid tot implementatie in de modellenketen en doorlooptijd en kosten van het onderzoek. De prioritering en logische combinatie van een aantal onderzoeksrichtingen heeft uiteindelijk, via een aantal tussenstappen, geleid tot een viertal als zeer relevant aangemerkte onderzoeksporen. Deze zijn achtereenvolgens:

- A. Golfrandvoorwaarden (aangemerkt als no-regret);
- B. Ondiepwaterfysica en Infragravitygolven;
- C. Golfvoortplanting;
- D. Golfopzet en golf-stroominteractie.

In aanvulling op een nadere duiding van de onderdelen van elk onderzoekspoor, zijn de bijbehorende activiteiten in een overall planning geplaatst. Daarin zijn drie logische fases gedefinieerd, waarbij per onderzoekspoor ook een of meerdere go-no-go-momenten zijn ingepast. Tevens is een indicatieve kostenraming opgesteld.

Metingen spelen een belangrijke rol in het geheel. Dit betreft zowel lab- als veldmetingen. In het bijzonder zal, waar mogelijk, gebruik gemaakt worden van de Meerjarige Veldmetingen Eems-Dollard (MVED, 2018-2030). Andersom zullen kennis en modelverbeteringen die worden vergaard, als gevolg van uitvoering van voorliggend Plan van Aanpak, beschikbaar worden gesteld aan o.a. het MVED-project. Omdat generieke verbeteringen worden beoogd aan SWAN, is de verwachting dat meerdere instanties profiteren van de nagestreefde modelverbeteringen.

Inhoud

Colofon 2

Samenvatting 3

Inhoud 4

1	Inleiding	7
1.1	Aanleiding	7
1.2	Doelstelling	8
1.3	Aanpak	8
1.4	Projectteam	9
1.5	Relaties met andere projecten	9
2	Procesgang ten behoeve van prioritering	10
3	Inventarisatie onderzoeksrichtingen	11
3.1	Inleiding	11
3.2	Invulling	11
4	Uitwerking onderzoeksrichtingen	13
4.1	Golfvoortplanting i.r.t. geulwanden	13
4.1.1	Bijdrage aan de oplossing van het kernprobleem	13
4.1.2	Overzicht van beschikbare kennis	13
4.1.3	Grove schets van de uit te voeren stappen	15
4.1.4	Inschatting van de criteria	15
4.1.5	De rol van metingen	16
4.2	Numerieke aspecten: discretisatie, resolutie (bodemp, rooster, richtingen, frequenties)	16
4.2.1	Bijdrage aan de oplossing van het kernprobleem	16
4.2.2	Overzicht van beschikbare kennis	16
4.2.3	Grove schets van de uit te voeren stappen	18
4.2.4	Inschatting van de criteria	18
4.2.5	De rol van metingen	19
4.3	Ondiepwaterfysica in een richtingsgespreid golfveld	19
4.3.1	Bijdrage aan de oplossing van het kernprobleem	19
4.3.2	Overzicht van beschikbare kennis	19
4.3.3	Grove schets van de uit te voeren stappen	19
4.3.4	Inschatting van de criteria	20
4.3.5	De rol van metingen	21
4.4	Infragravitygolven	21
4.4.1	Bijdrage aan de oplossing van het kernprobleem	21
4.4.2	Overzicht van de beschikbare kennis	21
4.4.3	Grove schets van de uit te voeren stappen	22
4.4.4	Inschatting van de criteria	22
4.4.5	De rol van metingen	23
4.5	Golfopzet, stormopzet en golf-stroominteractie	23
4.5.1	Bijdrage aan de oplossing van het kernprobleem	23

4.5.2	Overzicht van beschikbare kennis	24	
4.5.3	Grove schets van de uit te voeren stappen	24	
4.5.4	Inschatting van de criteria	25	
4.5.5	De rol van metingen	26	
4.6	Interactie kruisende zeeën	26	
4.6.1	Bijdrage aan de oplossing van het kernprobleem	26	
4.6.2	Overzicht van de beschikbare kennis	26	
4.6.3	Grove schets van de uit te voeren stappen	27	
4.6.4	Inschatting van de criteria	27	
4.6.5	De rol van metingen	28	
4.7	Braggscattering	28	
4.7.1	Bijdrage aan de oplossing van het kernprobleem	28	
4.7.2	Overzicht van beschikbare kennis	28	
4.7.3	Grove schets van de uit te voeren stappen	28	
4.7.4	Inschatting van de criteria	29	
4.7.5	De rol van metingen	29	
4.8	Onzekerheid in bodemligging	29	
4.8.1	Bijdrage aan de oplossing van het kernprobleem	29	
4.8.2	Overzicht van beschikbare kennis	29	
4.8.3	Grove schets van de uit te voeren stappen	29	
4.8.4	Inschatting van de criteria	30	
4.8.5	De rol van metingen	30	
4.9	Golfrandvoorwaarden	30	
4.9.1	Bijdrage aan de oplossing van het kernprobleem	30	
4.9.2	Overzicht van beschikbare kennis	31	
4.9.3	Grove schets van de uit te voeren stappen	31	
4.9.4	Inschatting van de criteria	31	
4.9.5	De rol van metingen	32	
5	Rol van metingen	33	
5.1	Inleiding	33	
5.2	Bestaande metingen	33	
5.2.1	Laboratoriummetingen	33	
5.2.2	Veldmetingen	33	
5.3	MVED	33	
6	Prioritering onderzoeksrichtingen	35	
6.1	Reductie aantal onderzoeksrichtingen	35	
6.2	Prioriteringen relevante onderzoeksrichtingen	35	
6.3	Definitie van gecombineerde onderzoekssporen	35	
7	Kosten en doorlooptijd	37	
7.1	Kostenraming en doorlooptijd	37	
7.2	Indicatieve planning	38	
7.3	Vervolgstappen	41	
7.4	Aanbevelingen onderzoek buiten huidige PvA	42	
Referenties		43	
Bijlage A: Detailuitwerking ondiepwaterfysica in een richtingsgespreid golfveld		48	
A.1	Inleiding	48	
A.2	Triads	49	
A.2.1	Beschrijving	49	
A.2.2	Grove schets van de uit te voeren stappen	51	

A.2.3	Inschatting van de criteria	52	
A.3	Bifase	52	
A.3.1	Beschrijving	52	
A.3.2	Grove schets van de uit te voeren stappen	54	54
A.3.3	Inschatting van de criteria	54	
A.4	Dieptegelimiteerd breken	55	
A.4.1	Beschrijving	55	
A.4.2	Grove schets van de uit te voeren stappen	57	57
A.4.3	Inschatting van de criteria	57	

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Het golfmodel SWAN speelt een belangrijke rol bij de bepaling van hydraulische belastingen voor brede wateren. Een van de nog onverklaarde aspecten betreft de onderschatting door SWAN van laagfrequente golfenergie in een complex systeem als de Waddenzee. Met laagfrequente energie wordt hier de energie tussen ongeveer 0,040 Hz en 0,125 Hz (8 s – 25 s) bedoeld. Dit probleem is al zo'n vijftien jaar bekend, maar nog steeds onopgelost.

De onderschatting van deze golven betekent dat er te weinig energie bij lage frequenties wordt berekend, resulterend in te lage golfperioden bij de teen van de kering, en daardoor te lage belastingen op de kering. Deze belastingen bestaan bijvoorbeeld uit de golfklappen, golfploop en -overslag, die weer relevant zijn voor de initiërende gebeurtenissen (en vervolg van het faalpad) met betrekking tot de bekleding op buitentalud, kruin en binnentalud.

De modellering van met name de doordringing van de laagfrequente golven wordt sterk bemoeilijkt door het complexe systeem van geulen en platen waarover deze golven zich moeten voortplanten. De onderschatting is in de Oostelijke Waddenzee tijdens forse stormen waargenomen. Er zijn meerdere gebieden met geulen en platen waar dit potentieel op kan treden, zoals in de Westelijke Waddenzee en de Zeeuwse Delta. De beperkte hoeveelheid metingen in deze systemen zijn echter niet geanalyseerd op deze ommissie.

Het effect van de onderschatting op de overstromingskans kan significant zijn. Afgaande op resultaten van hindcasts in de Oostelijke Waddenzee, kan de onderschatting van de doordringing van golfenergie vanaf de Noordzee naar de teen van de dijk meer dan 50% zijn. Hoe zwaarder de (noordelijke) stormen, hoe groter het aandeel golven vanaf de Noordzee, vergeleken met lokaal in de Waddenzee gegenereerde golven. Dit kan dan zomaar leiden tot een onderschatting van de gemiddelde golfperiode van 20% tot 30% en de golfhoogte met 5% tot 10%. Een toename van 30% in spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$ en 10% in significante golfhoogte H_{m0} leidt bijvoorbeeld op de Noordkaap op het Uithuizerwad (traject 6-6) tot een toename van het golfoverslagdebiet van ongeveer 5 naar 35 l/s/m, een toename van de 2%-golfploophoogte $R_{u2\%}$ met ongeveer 1,5 m en de vereiste dijkhoogte met ongeveer 1,5 m. Gegeven een decimeringshoogte van de benodigde kruinhoogte (HBN, $Q = 5$ l/s/m) van ongeveer 1,1 m, is het effect op de overstromingskans ongeveer een factor 20.

Na hindcasts van de stormen van 2006 en 2007 is dit probleem al geïdentificeerd, en voor WTI2011 heeft Gerbrant van Vledder al voorgesteld om de refractie van laagfrequente golven uit te schakelen. Dit verbeterde voor sommige condities de golfvoortplanting, maar was een ad-hoc-oplossing die fysisch niet correct is.

De laatste vijftien jaar is er veel onderzoek gedaan naar de doordringing van de Noordzeegolven en zijn verscheidene hypothesen verworpen, maar ook nieuwe hypothesen ontstaan. Uit eerdere studies van onder andere Groeneweg et al. (2015) en Oosterlo (2021) is de hypothese ontstaan dat de onderschatting mogelijk veroorzaakt wordt door niet-lineaire effecten, of preciezer, het gebrek daaraan in SWAN. Zo zorgen driegolfwisselwerkingen (triads) onder andere voor een

verplaatsing van golfenergie naar lagere frequenties (langere golven) en andere richtingen. In SWAN werd dit vooralsnog niet meegenomen.

Gezamenlijk is binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging en Kennis voor keringen de afgelopen twee jaar door HKV, TU Delft, Deltares en RWS gewerkt aan een nieuwe methode voor de driegolfwisselwerkingen, de DCTA (distributed collinear triad approximation). Dit onderzoek is recent afgerond (Benit, 2022; Zijlema 2023, Rijnsdorp, Reniers, & Zijlema, 2023; Deltares, 2023), maar een definitieve verklaring voor de onderschatting van de laagfrequente energie is niet gevonden. Wel blijkt uit het onderzoek dat de DCTA kwalitatief gezien een sterke verbetering is ten opzichte van de huidige methode in SWAN. Voor sommige cases komen de resultaten verkregen met de DCTA echter nog niet goed overeen met metingen en SWASH-resultaten, wat te maken lijkt te hebben met bepaalde schalingsparameters. Voor andere cases, met golfvoortplanting over een geul, onderschatten zowel SWAN als SWASH (dat meer processen meeneemt dan SWAN, maar door het ontbreken van windforcering over langere afstanden beperkt bruikbaar is) de energie bij de kust, waarbij de refractie van ondiep water naar diep water (van ondiepe platen naar diepere geulen) de golfvoortplanting (te) sterk tegengaat. Op dit moment is nog onduidelijk waarom SWAN, maar soms ook SWASH, voor dit soort cases de golfenergie onderschat ten opzichte van de metingen. In het onderzoek is dan ook aanbevolen om bijvoorbeeld de refractie, diffractie, resolutie van het model of numerieke zaken nog verder te onderzoeken. Verder is gebleken dat golfopzet een rol speelt, hetgeen wel in SWASH zit en niet standaard in SWAN.

1.2 Doelstelling

Het uiteindelijke hoofddoel van het onderzoek is "het probleem van de onderschatting van de doordringing van laagfrequente energie (golfperioden van grofweg 8 s – 25 s) in SWAN oplossen". Doel van de huidige studie is te komen tot een plan van aanpak, waarin kansrijke en haalbare activiteiten worden gedefinieerd en vervolgens geprioriteerd om deze ambitieuze doelstelling te halen. Hierbij kunnen ook incrementele verbeteringen zeer waardevol zijn en als terugvaloptie dienen.

1.3 Aanpak

Bij de verschillende pogingen die indertijd zijn ondernomen om het probleem op te lossen, was telkens de conclusie dat er toch een of meerdere andere oorzaken voor de onderschatting door SWAN zouden moeten zijn. Daarnaast liep men steeds tegen beperkingen in het aantal beschikbare metingen aan. De pogingen om de onderschattingen tegen te gaan kregen op deze manier een ad-hoc-karakter. Om dit te voorkomen, willen we een aanpak volgen die nog wel iteratief is, maar waarbij de kans op convergentie groter is dan in het verleden. Op hoofdlijnen komt het erop neer dat allereerst mogelijke vervolgonderzoeksrichtingen worden geïnventariseerd. Vervolgens worden deze geordend naar kansrijkheid, zodat vervolgonderzoek zich kan richten op de meest kansrijke sporen, die deels sequentieel, deels parallel kunnen worden uitgevoerd. Daarbij wordt waar mogelijk ook gebruik gemaakt van de in het kader van het MVED-project uitgevoerde metingen. Ieder onderzoeksspoor heeft een of meerdere evaluatiemomenten, waarin haalbaarheid en kansrijkheid tegen het licht worden gehouden. Dit om te voorkomen dat onnodig lang in een bepaalde richting wordt gelopen.

Om tot het plan van aanpak te komen zijn zes stappen onderscheiden:

1. Uitschrijven van een proces om tot een prioritering van onderwerpen te komen, inclusief criteria in termen van haalbaarheid en kansrijkheid (uitgeschreven in Hoofdstuk 2);

2. Inventarisatie van mogelijke onderzoeksrichtingen, inclusief reeds uitgevoerde studies (Hoofdstuk 3);
3. Uitwerking van de verschillende onderzoeksrichtingen (Hoofdstuk 4);
4. Relatie met metingen (Hoofdstuk 5);
5. Prioritering van onderzoeksrichtingen aan de hand van het in stap (1) gedefinieerde proces (Hoofdstuk 6);
6. Schatting van kosten en doorlooptijd (Hoofdstuk 7).

1.4 Projectteam

Beoogd project vloeit voort uit bovengenoemd DCTA-onderzoek. Tevens is er een logisch verband met het MVED-project (Meerjarige Veldmetingen Eems-Dollard). Voorliggend Plan van Aanpak is geschreven door personen die in een of beide projecten meedraai(d)en: Ad Reniers (TU-Delft), Matthijs Benit (HKV), Henk Steetzel en Job Oude Vrielink (Arcadis), Patrick Oosterlo en Robert Vos (RWS WVL) en Jacco Groeneweg (Deltares). De kwaliteitsborging is uitgevoerd door Vincent Vuik (Deltares).

1.5 Relaties met andere projecten

Er zijn relaties met de volgende projecten:

- Meerjarige Veldmetingen Eems-Dollard (MVED): uitwisseling van meetbehoeften en -data, golfmodellen en golfbelastingen bij de kering.
- KvK golfoploop en -overslag over vlakke voorlanden (HB7-2): juiste voorspelling van golfbelastingen bij de kering t.b.v. juiste oploop en -overslagmodellering.
- Kennisprogramma Zeespiegelstijging: verbeteringen in golfmodellering;
- Morfologie kust en Waddenzee: invloed morfologie op doordringing laagfrequente energie.
- Living Dikes (kwelders Waddenzeedijken): o.a. het opwekken en/of vrijkomen van laagfrequente energie bij ondiepten.
- HWBP-dijkversterkingsprojecten in estuaria en aan de kust: juiste voorspelling van golfbelastingen bij de kering.
- Golfvoortplanting berekend met SWASH tot aan de Oosterscheldekering (HKV in opdracht van RWS Zee en Delta).

2 Procesgang ten behoeve van prioritering

Zoals aangegeven in paragraaf 1.3, worden eerst de mogelijke onderzoeksrichtingen geïnventariseerd. Per individuele richting wordt de kansrijkheid van het onderzoek ingeschat. Kort gezegd: wat levert het op? Daarbij kan onderscheid gemaakt worden in verschillende aspecten. Het is vooral belangrijk dat inzicht wordt verkregen in hoeverre het onderzoek bijdraagt aan de oplossing van het gestelde probleem. Echter, wanneer het onderzoek bijvoorbeeld meer dan tien jaar aan doorlooptijd vergt of wanneer extreem veel rekenkracht ingezet moet worden, zodat toepassingen in operationele setting of in het kader van beoordeling en ontwerpen van waterkeringen (BOI) onmogelijk worden, dan wordt dit niet als een kansrijke onderzoeksrichting gezien.

Om in te schatten of een onderzoeksrichting kansrijk is, is een aantal criteria opgesteld, die gericht zijn op:

1. De mate van verbetering van modelresultaten in vergelijking met metingen (gericht op hoofddoel);
2. De mate van verbetering van fysica in het model (inclusief numerieke aspecten): verbeteren bestaande formuleringen, toevoegen fysica, verbeteringen implementatie van fysica in model (gericht op uitlegbaarheid);
3. Rekentijd bij toepassing van onderzoek binnen o.a. BOI;
4. Doorlooptijd van het benodigde onderzoek in relatie tot de wens om deze resultaten te kunnen inzetten;
5. De mogelijkheid tot implementatie in al dan niet bestaande modellen of modellenketens;
6. De kosten: dit is deels evenredig met doorlooptijd, maar als dure meetcampagnes nodig zijn, kan dit flink oplopen.

De eerste twee criteria lijken sterk op elkaar. Het kan echter zo zijn dat een verbetering leidt tot verkleining van de afwijking met metingen, maar dat dit niet noodzakelijk is op basis van fysische gronden. Zo leidde begrenzing van refractie op de laagfrequente golven tot het gewenste resultaat dat meer laagfrequente golfenergie de Friese en Groningse kust bereikte, maar een fysische onderbouwing voor deze ingreep was er niet. Daarmee zou het voorstel wel aan het eerste maar niet aan het tweede criterium voldoen.

Per onderzoeksrichting zullen de criteria worden doorlopen en gescoord in klassen. De classificatie is typisch in termen van hoog/middel/laag (ofwel: scoort goed/middelmatig/slecht). Uiteindelijk worden de scores samengenomen. Voor de eerste twee criteria is een hoge score bijvoorbeeld een sterke bijdrage aan een verbeterde representatie van de golfdoordringing of een op fysica gebaseerde formulering in het model. Een lage score betekent dan geen (verwachte) verbetering van de modelresultaten of fysica. Het derde criterium heeft vooral betrekking op de haalbaarheid binnen bijvoorbeeld BOI. Voor de doorlooptijd betekent een tijdsduur van maximaal zo'n 1,5 jaar dat verbeteringen in SWAN op tijd komen voor zowel BOI als MVED. Indien dat het geval is, zal de score dus hoog zijn. Mocht onderzoek tien(tallen) jaren vergen, dan is de score laag. De implementatie hangt bijvoorbeeld samen met de SWAN-code en het raamwerk voor de hydraulische belastingen binnen BOI. De kosten zijn, zoals vermeld, deels evenredig met de doorlooptijd, maar ook onder andere afhankelijk van de eisen aan meetdata.

3 Inventarisatie onderzoeksrichtingen

3.1 Inleiding

Tijdens het afsluitende overleg van de DCTA-studie in december 2023, bij het opstellen van het voorstel voor het schrijven van het plan van aanpak en tijdens de startbijeenkomst van dit project zijn de nodige fysische en numerieke aspecten genoemd, die de oorzaak zouden kunnen zijn voor de geconstateerde onderschatting van laagfrequente energie. Dit betreft de volgende 13 aspecten:

1. Golfvoortplanting i.r.t. geulwanden: refractie, reflectie, diffractie;
2. Numerieke aspecten: discretisatie, resolutie (bodem, rooster, richtingen, frequenties);
3. Modellering driegolfwisselwerkingen (triads) a.d.h.v. DCTA-formulering (bijv. kalibratie en schatting van de bifase);
4. Ondiepwaterfysica (combinatie breken, triads, bodemwrijving) in een richtingsgespreid golfveld;
5. Gebrek aan geschikte metingen;
6. Infragravity (IG) golven (bijv. formuleringen van vrije en gebonden IG-golven in SWAN);
7. Golfopzet en stormopzet;
8. Golf-stroominteractie (interactie stroming in geulen en golfveld);
9. Interactie kruisende zeeën (combinatie IG, Noordzee- en lokaal in de Waddenzee opgewekte windgolven);
10. Braggscattering;
11. Interactie tussen wind en golven;
12. Onzekerheid in bodemligging;
13. Voorspelling laagfrequente energie op de Noordzee (golfrandvoorwaarden).

3.2 Invulling

In het volgende wordt ingegaan op de onderdelen die in de vorige paragraaf zijn genoemd. Omdat breken op diepte, driegolfwisselwerkingen en bodemwrijving hand in hand gaan, zijn deze samengenomen (aspecten 3 en 4). Datzelfde geldt voor golfopzet en stormopzet en golf-stroominteractie (aspecten 7 en 8). We zien ook grote parallellen tussen interacterende kruisende zeeën en interactie tussen wind en golven (aspecten 9 en 11). Het laatste aspect is daarom samengenomen met het onderdeel over kruisende zeeën. Metingen (aspect 5) spelen bij de meeste onderwerpen een rol en wordt dus niet als apart onderwerp beschouwd, maar zal per onderdeel worden beschouwd, mits dat relevant is.

De definitieve lijst bestaat derhalve uit 9 onderdelen en is daarmee:

1. Golfvoortplanting i.r.t. geulwanden;
2. Numerieke aspecten;
3. Ondiepwaterfysica in een richtingsgespreid golfveld;
4. IG-golven;
5. Golfopzet, stormopzet en golf-stroominteractie;
6. Interactie kruisende zeeën;
7. Bragg-scattering;
8. Onzekerheid in bodemligging;
9. Golfrandvoorwaarden.

Per onderdeel belichten we in het volgende hoofdstuk de volgende aspecten:

- Weergave hoe het onderzoeksvoorstel bijdraagt aan de oplossing van het probleem;
- Overzicht van beschikbare kennis;
- Grove schets van de uit te voeren stappen;
- Inschatting van de criteria;
- Waar relevant, de rol van metingen.

4 Uitwerking onderzoeksrichtingen

4.1 Golfvoortplanting i.r.t. geulwanden

4.1.1 Bijdrage aan de oplossing van het kernprobleem

Van Vledder & Koop (2009) beschreven al dat een combinatie van refractie en dissipatie-effecten de oorzaak is van de onderschatting van laagfrequente (Noordzee-)energie bij de kust van Friesland en Groningen. De door hen voorgestelde – en voor WTI2011 gebruikte – refactielimiter (het uitschakelen van refractie voor frequenties lager dan 0,2 Hz) leidde tot een verbetering van de doordringing van Noordzeegolven richting Uithuizerwad (UHW). Deze aanpak was echter niet gebaseerd op een juiste voorstelling van de fysica, maar toonde wel aan dat refractie een belangrijke rol speelt.

4.1.2 Overzicht van beschikbare kennis

Volgens de wet van Snel zullen de golven bij ondieper wordend water (bijvoorbeeld bij de geulwanden in de Waddenzee) richting de normaal op de dieptecontouren buigen en bij dieper wordend water van de normaal afbuigen. Langere golven (lagere frequenties) zijn gevoeliger voor refractie dan kortere golven. Volgens de wet van Snel bestaat er bij dieper wordend water een kritische hoek, waarbij de golf richting parallel aan de dieptecontouren gaat lopen. Hiermee kan de golf het diepere water niet meer bereiken en zal hij "aan de geulwand blijven plakken". Bij nog grotere hoeken zal de golf reflecteren op de geulwand.

Uit eerder onderzoek (Van Vledder & Koop, 2009; Groeneweg et al., 2015; Oosterlo, 2021; Rijnsdorp, Reniers, & Zijlema, 2021) blijkt dat SWAN met name voor dit soort overgangen naar dieper water en rondom de kritische hoek andere resultaten geeft dan metingen en gedetailleerdere modellen. Boven de kritische hoek kunnen volgens SWAN (en de wet van Snel) de golven het diepere water niet bereiken; de energie blijft hangen op de geulwand of reflecteert. In werkelijkheid is de relatief eenvoudige wet van Snel niet altijd toereikend, door bijvoorbeeld niet-parallele dieptecontouren, stroming, richtingsverspreiding, frequentiespreiding, diffractie en niet-lineaire effecten als driegolfwisselwerkingen en het tunneleffect. SWAN kan in principe rekening houden met de eerste vier aspecten, deels met diffractie en driegolfwisselwerkingen, maar niet met het tunneleffect.

Met name de richtings- en frequentiespreiding zijn belangrijk voor de voortplanting van golven richting dieper water, in geulen of over geulen heen. Bij een grotere richtingsverspreiding bestaat het golfveld uit meer golven met een hoek onder de kritische hoek, die nog wel door kunnen dringen. Bij een grotere frequentiespreiding bestaat het golfveld uit meer kortere golven, die een grotere kritische hoek hebben en dus makkelijker door kunnen dringen. Vergelijkingen met labmetingen en simulaties met gedetailleerdere numerieke modellen als SWASH en TRITON laten zien dat in werkelijkheid ook energie het diepere water kan bereiken boven de kritische hoek, door diffractie, driegolfwisselwerkingen en het tunneleffect (Groeneweg et al., 2015; Oosterlo, 2021; Rijnsdorp, Reniers, & Zijlema, 2021).

Het tunneleffect is afkomstig uit de kwantummechanica en beschrijft dat een klein deel van de energie toch door kan dringen door uitdovende golven (evanescent

waves, zie ook Dusseljee et al., 2014; Magne et al, 2007), die binnen enkele golflengten uitdoven. Aangezien de laagfrequente energie de kust van Friesland en Groningen bereikt, gaat het hier niet om uitdovende golven, wat tevens blijkt uit TRITON en SWASH-simulaties (Groeneweg et al., 2015; Oosterlo, 2021; Rijnsdorp, Reniers, & Zijlema, 2021). Daarom wordt het tunneleffect niet relevant geacht.

Guzman Mardones (2011); Groeneweg et al. (2015); Oosterlo (2021); Rijnsdorp, Reniers, & Zijlema (2021) laten zien dat de doordringing van golven wordt veroorzaakt door een combinatie van diffractie en (niet-collineaire) driegolfwisselwerkingen. Deze processen verbreden de spectra (diffractie in de richtingsruimte en driegolfwisselwerkingen in zowel de richting- als frequentieruimte) en voegen dus richtings- en frequentiespreiding toe. In werkelijkheid kan er geen scherpe gradiënt in golfenergie bestaan en zal diffractie optreden, waardoor golfenergie de geul kan bereiken. De driegolfwisselwerkingen verplaatsen energie naar richtingen die onder de kritische hoek liggen en naar frequenties die een grotere kritische hoek hebben, wat tot meer doordringing leidt. Voorgaande blijkt bijvoorbeeld uit de analyses in Deltares (2023), waarin SWAN en SWASH zijn vergeleken met labproeven met een havengeul. In zowel SWASH als SWAN blijft veel van de laagfrequente energie op de geulwanden hangen. Op basis van de golfrichting en kritische hoek zou het blijven hangen van de laagfrequente energie volgens de wet van Snel ook moeten optreden. In SWASH dringt echter iets meer energie door - door diffractie en driegolfwisselwerkingen - dan in SWAN.

Het effect van diffractie is onder andere onderzocht in Liu (2009); Van Vledder & Koop (2009); Guzman Mardones (2011); Oosterlo (2021); Rijnsdorp, Reniers, & Zijlema (2021). Oosterlo (2021); Rijnsdorp, Reniers, & Zijlema (2021) laten met SWASH-simulaties zien dat lineaire golven boven de kritische hoek ook kunnen doordringen tot in een geul, veroorzaakt door diffractie. Echter, uit de resultaten van Van Vledder & Koop (2009) blijkt dat het toevoegen van diffractie aan SWAN slechts tot een beperkte verbetering van de doordringing van Noordzeegolven in de Waddenzee leidt. De resultaten in zowel deze studie als Oosterlo (2021) werden echter beperkt door de relatief grove schematisatie van diffractie in SWAN.

De driegolfwisselwerkingen zijn onderzocht in de DCTA-studie (Rijnsdorp, Reniers, & Zijlema, 2021, 2022; Benit, 2022; Deltares, 2023; Zijlema, 2023), waarbij de DCTA-formulering voor de driegolfwisselwerkingen is ingebouwd in SWAN en vergeleken met SWASH en lab- en veldmetingen. Deze formulering staat verschilinteracties (verplaatsing van energie naar sub-harmonischen, lagere frequenties) en (in de niet-collineaire versie) ook verplaatsing van energie naar andere richtingen toe. De formulering bevat dus meer fysica en leidt kwalitatief tot een sterke verbetering. Kwantitatief kunnen nog stappen gezet worden, bijvoorbeeld in de kalibratie. Dit wordt verder behandeld in paragraaf 4.3.

Uit de DCTA-studie is tevens gebleken dat SWASH minder goed presteerde in de Waddenzee dan voor labonderzoek met een havengeul. SWASH onderschatte de golfhoogten in de Waddenzee, waarbij de gemiddelde golfrichting van het laagfrequente deel in SWASH ook veel minder noordelijker was dan volgens

boeimetingen (Rijnsdorp, Reniers, & Zijlema, 2022).¹ Het is onduidelijk of dit door het ontbreken van wind in SWASH wordt veroorzaakt, door een golfvoortplantingsproces of dat dit een andere oorzaak heeft. Dit aspect wordt verder behandeld in paragraaf 4.9.

4.1.3 *Grove schets van de uit te voeren stappen*

Op dit moment vormt met name de grove schematisatie van diffractie in SWAN – voor wat betreft de golfvoortplanting rondom geulwanden – het knelpunt om in meer detail uitspraken te kunnen doen over de invloed van diffractie en een mogelijke verbetering van de SWAN-resultaten in de Waddenzee. Daarom zou vervolgonderzoek zich vooral moeten richten op een verbeterde schematisatie van diffractie in SWAN.

Uit te voeren stappen:

1. Inschatten effect van diffractie op basis van SWASH-simulaties in de Waddenzee;
2. Uitdenken verbeterde methode diffractie in SWAN;
3. Inbouwen verbeterde methode diffractie in SWAN;
4. Kalibratie, validatie verbeterde methode diffractie in SWAN;
5. Toepassen nieuw SWAN-model in Waddenzee, vergelijking met metingen en SWASH, analyse en conclusies.

4.1.4 *Inschatting van de criteria*

De in Hoofdstuk 2 genoemde criteria scoren zoals weergegeven in onderstaande tabel.

Criteria	Score	Toelichting
1. Verbetering modelresultaten	Middel	Een verbeterde modellering van diffractie in SWAN kan mogelijk tot verbeterde golfdoordringing leiden.
2. Verbetering fysica	Middel	De bestaande formulering wordt verbeterd of een alternatief wordt ingebouwd. Er wordt een deel fysica toegevoegd (niet volledig, want daarvoor is fase-informatie nodig, die niet aanwezig is in SWAN). Er wordt dus met name een verbeterde implementatie van de fysica ingebouwd. De uiteindelijke score voor dit onderdeel is afhankelijk van de haalbaarheid van een verbeterde diffractieformulering in een fasegemiddeld model. Dat zal tijdens de uitvoering moeten blijken.

¹ Figuur 4.10 van Deltares (2023) laat zien dat op locatie 13 (voor de geul) beide modellen de meeste energie geven. Op locatie 14 (op de geulwand) geven beide modellen al veel minder energie. Op locatie 15 (in de geul) geven beide modellen nog minder energie. Op WRW1 (een stuk verder in de Waddenzee) geeft SWAN nog minder energie, maar SWASH weer meer energie (t.o.v. locatie 15). SWASH laat dus ofwel (ergens anders) meer energie door of er wordt ergens energie gegenereerd, waarbij dit in SWAN niet gebeurt.

3. Rekeningtijd	Hoog	Afhankelijk van de mate van detail van de diffractiemodellering. Verwacht wordt dat rekeningtijden niet extreem toe zullen nemen.
4. Doorlooptijd	Middel	Dit is niet een heel uitgebreid onderzoek, maar de gewenste mate van detail van de diffractieformulering bepaalt in grote mate de doorlooptijd en complexiteit.
5. Implementatie modellen	Hoog	Bij niet te sterke toename van rekeningtijden, kan de nieuwe SWAN-versie worden toegepast binnen bijvoorbeeld BOI.
6. Kosten	Hoog	Lage kosten. Extra lab- of veldmetingen zijn niet noodzakelijk, evenals grootschalige modelsimulatie-exercities.

4.1.5 De rol van metingen

(Richtings)metingen rondom geulwanden, bijvoorbeeld vanuit MVED, zouden nuttig zijn, maar zijn niet noodzakelijk om het onderzoek uit te kunnen voeren. Op basis van de SWASH-simulaties kan een indicatie worden gegeven van de invloed van diffractie.

4.2 Numerieke aspecten: discretisatie, resolutie (bodem, rooster, richtingen, frequenties)

4.2.1 Bijdrage aan de oplossing van het kernprobleem

SWAN modelleert refractie volgens de wet van Snel (zie ook de vorige paragraaf). In sommige gevallen zal SWAN de refractie overschatten voor golven die zich voortplanten richting ondieper water of onderschatten voor golven die zich voortplanten richting dieper water. De belangrijkste parameters hierin zijn de taludhelling, golflengte en (ruimtelijke) roosterresolutie. Voor een grotere sprong in diepte over een roostercel (Δd) en grotere golflengte zal SWAN de refractie sterker over- of onderschatten.

Mogelijk hebben ook numerieke aspecten invloed op de doordringing van laagfrequentie energie in SWAN. Het kan hierbij bijvoorbeeld gaan om:

1. Numerieke schema's in de geografische ruimte;
2. Numerieke schema's in de spectrale ruimte;
3. Rescaling;
4. Refractieformules;
5. Richtingsresolutie;
6. Ruimtelijke resolutie en resolutie van de bodem.

4.2.2 Overzicht van beschikbare kennis

SWAN gebruikt voor de discretisatie in de geografische ruimte standaard het Second ORDER UPwind-schema (SORDUP). Het Backward in Space Backward in Time-schema (BSBT) is het alternatief. Het BSBT-schema is een eerste-orde schema en geeft meer numerieke diffusie dan het SORDUP-schema. In gevallen waarbij golven zich voortplanten over een ondiepte richting een diepere geul en onder een hoek die groter is dan de kritische hoek volgens de wet van Snel (zie ook vorige paragraaf), leidt het BSBT-schema tot meer doordringing van golven in de geul dan het SORDUP-schema. Dit wordt veroorzaakt door numerieke diffusie (Oosterlo, 2021). Indien de wet van Snel goed gemodelleerd zou worden, zou er in deze gevallen geen doordringing zijn. In werkelijkheid kan er in dergelijke gevallen echter wel doordringing zijn, bijvoorbeeld door diffractie of driegolfwisselwerkingen, zie ook

de vorige paragraaf. In sommige gevallen leidt de doordringing door numerieke diffusie tot betere resultaten in vergelijking met metingen of gedetailleerdere numerieke modellen, maar omdat het geen fysisch effect is, gaat het om een verbetering om verkeerde redenen. Bij een juiste modellering van de refractie (en minimalisering van numerieke diffusie) wordt de onderschatting van de doordringing van golfenergie in de geul daarom eerder veroorzaakt door het ontbreken van bepaalde fysica in SWAN dan door het gebruikte numerieke schema in de geografische ruimte.

Voor de discretisatie in de spectrale ruimte (richtings- en frequentieruimte, waarbij de refractie wordt gemodelleerd door het numerieke schema voor de richtingsruimte) wordt een hybride centraal differentie-/upwindschema gebruikt, omdat een puur eersteorde upwindschema te diffusief is en een (tweede-orde) centraal differentieschema tot oscillaties en daarmee negatieve actiedichtheden kan leiden. In Van Vledder & Koop (2009) is de invloed van de keuze voor upwind, centraal of hybride schema onderzocht voor de oostelijke Waddenzee. Dit effect bleek relatief beperkt ten opzichte van andere keuzes, veelal voor de fysica, en deze conclusie werd nogmaals bevestigd in Oosterlo (2021). Smale (2022) laat zien dat met onder andere een flux-gelimiteerd hogere-orde schema de diffusie afneemt en nauwkeuriger actiedichtheden en richtingsverspreiding worden gevonden. Dit leidt tot een betere modellering van de golfvoortplanting (en dus refractie), maar niet noodzakelijkerwijs tot meer doordringing van Noordzeegolven, omdat golven met een nauwkeuriger modellering van de refractie juist sterker zullen blijven hangen op geulwanden.

Oosterlo (2021) laat zien dat het uitschakelen van rescaling (schalen van de actiedichtheid) de modellering van de refractie kan verbeteren, doordat minder artificiële richtingsverspreiding wordt gegenereerd. Ook dit leidt tot minder energie in de geul in het geval van golfvoortplanting van ondieper naar dieper water boven de kritische hoek, zoals beschreven in de vorige alinea. Het uitschakelen van rescaling kan echter wel leiden tot negatieve variantiedichtheden in de spectra. In Smale (2022) wordt aangetoond dat de rescalingoptie niet meer benodigd is als een hogere-orde schema met flux-limitering wordt gebruikt, omdat actiedichtheden volledig geconserveerd worden. Ook dit leidt tot een betere weergave van de refractie, maar niet noodzakelijkerwijs tot meer doordringing van Noordzee-energie.

In het verleden werd de mate van bijdraaien van de golven (refractie) in SWAN geschematiseerd met een formule op basis van waterdiepten. Sinds versie 41.01 is dit op basis van golfgetallen. De formule op basis van golfgetallen is, net als het tweedeorde centraal differentieschema, in theorie nauwkeuriger (Van der Reijden, 2020; Zijlema, 2020; Oosterlo, 2021). Met voldoende ruimtelijke resolutie spelen de verschillen tussen de formules echter vrijwel geen rol, zie bijvoorbeeld Van Vledder & Koop (2009); Oosterlo (2021).

Het aantal richtingsbins (richtingsresolutie) is met name van belang in situaties met weinig richtingsverspreiding (Oosterlo, 2021). Weinig bins (grove schematisatie van de richtingen) en (vrijwel) langkammige golven leiden tot artificiële richtingsverspreiding in SWAN, waardoor meer energie een geul kan oversteken (vanaf een ondiepte de geul kan bereiken). Dit is echter wederom een numeriek, maar niet een fysisch effect. Bij een hoge richtingsresolutie zal de refractie nauwkeuriger worden gemodelleerd (Van Vledder & Koop, 2009; Oosterlo, 2021) en zal (volgens de wet van Snel) minder energie de geul binnendringen. Het gebruik van een voldoende hoge richtingsresolutie (bijvoorbeeld 180 bins, Van Vledder & Koop, 2009; 360 bins,

Oosterlo, 2021) is echter niet zozeer een onderzoeksrichting, meer een aanbeveling voor de modellering binnen bijvoorbeeld BOI.

Ook de ruimtelijke roosterresolutie en bodemresolutie zijn van belang. De vaklodingen, die meestal gebruikt worden voor de bodemligging, hebben een resolutie van 20 m x 20 m. Voor een geulwand die loopt van -4 m+NAP tot -10 m+NAP met een helling 1:10 geeft deze roosterresolutie een $\Delta d = 2$ m. In combinatie met een Noordzeegolfperiode van 10 s met een hoek van 30° ten opzichte van de normaal op de dieptecontouren, levert dit in SWAN een fout van 3,3° ten opzichte van de wet van Snel op (8° voor 60 m x 60 m, 0,9° voor 5 m x 5 m). Oosterlo (2021) beveelt $\Delta d \leq 1$ m aan voor langkammige en $\Delta d \leq 5$ m voor kortkammige golven. In Van Vledder & Koop (2009) werd een beperkt effect gevonden van de invloed van het verhogen van de resolutie met een factor 2 en 3 (vanaf 20 m x 20 m) op de doordringing in de Waddenzee. Het gladstrijken van de bodem had ook slechts een klein effect. De aanbevelingen voor wat betreft Δd zijn wederom meer aanbevelingen voor de modellering binnen bijvoorbeeld BOI dan onderzoeksrichtingen.

4.2.3 *Grove schets van de uit te voeren stappen*

Bij modellering van meer realistische condities met wind en richtingsverspreiding worden de hierboven beschreven numerieke effecten vaak relatief minder belangrijk, zie bijvoorbeeld Van Vledder & Koop (2009); Oosterlo (2021); Smale (2022). Dit, in combinatie met het feit dat een verbetering in de modellering van de refractie vaak leidt tot juist minder golfdoordringing in geulen, maakt dat vervolgonderzoek zich eerder lijkt te moeten richten op fysische dan numerieke aspecten. Daarom wordt hier geen onderzoek met in detail de uit te voeren stappen beschreven.

4.2.4 *Inschatting van de criteria*

De in Hoofdstuk 2 genoemde criteria scoren zoals weergegeven in onderstaande tabel.

Criteria	Score	Toelichting
1. Verbetering modelresultaten	Laag	In veel gevallen blijkt het verbeteren van numerieke aspecten juist tot minder golfdoordringing te leiden.
2. Verbetering fysica	Laag	Er wordt geen fysica toegevoegd, de implementatie wordt (mogelijk) slechts verbeterd.
3. Rekentijd	Middel	Indien toch geconcludeerd wordt dat hogere-orde schema's nodig zijn, dan leidt dit tot meer rekestijd.
4. Doorlooptijd	Hoog	Relatief beperkte inspanning.
5. Implementatie modellen	Middel	Indien toch andere schema's nodig blijken te zijn, dan dient rekening gehouden te worden met de implementatie voor recti-lineaire, curvi-lineaire en ongestructureerde roosters met zowel cartesische als sferische coördinaten.
6. Kosten	Hoog	Lage kosten. Metingen rondom geulwanden zouden nuttig zijn, maar zijn niet noodzakelijk om het onderzoek uit te kunnen

		voeren, zodat het onderzoek relatief weinig kost.
--	--	---

4.2.5 De rol van metingen

Metingen rondom geulwanden (bijvoorbeeld volgend uit MVED) zouden nuttig zijn, maar zijn niet noodzakelijk om het onderzoek uit te kunnen voeren.

4.3 Ondiepwaterfysica in een richtingsgespreid golfveld

4.3.1 Bijdrage aan de oplossing van het kernprobleem

Vanwege de hoeveelheid aan processen en formuleringen voor de ondiepwaterfysica is een uitvoerige beschrijving van de fysische processen, hun tekortkomingen en voorgestelde stappen voor verbetering gepresenteerd in Bijlage A. Hier wordt een samenvatting gegeven.

Het voorgestelde onderzoek naar ondiepwaterfysica in een richtingsgespreid golfveld richt zich op de volgende specifieke fysische processen:

- Driegolfwisselwerkingen (triads);
- De ontwikkeling van de bifase van de triads;
- Dieptegelimiteerd breken.

De beschrijving en modellering van deze processen is complex, vanwege hun onderlinge afhankelijkheid, gezamenlijk optreden en sterk niet-lineaire karakter.

4.3.2 Overzicht van beschikbare kennis

De huidige modellen, zoals SWAN, bevatten parametrisaties voor deze processen, maar deze hebben beperkingen in nauwkeurigheid en fysische representatie, met name bij richtingsgespreide golfvelden. Daarnaast zijn belangrijke gegevens, zoals het effect van richtings spreiding en de ontwikkeling van de bifase, voornamelijk gebaseerd op theoretische aannames of 1D-laboratoriummetingen die niet volledig overeenkomen met natuurlijke omstandigheden. Recent onderzoek toont aan dat het toevoegen van fysisch onderbouwde schalingen en betere parametrisaties essentieel is voor nauwkeurigere voorspellingen van de doordringing van laagfrequente energie.

4.3.3 Grove schets van de uit te voeren stappen

Op basis van de in Bijlage A gepresenteerde analyse is een aantal vervolgstappen voorgesteld. Deze volgorde, inclusief enkele go-no-go's, zorgt voor een geleidelijke opbouw van inzichten, waarbij telkens de resultaten van de vorige stap worden gebruikt om de volgende stap te verbeteren of te valideren:

- **Bispectrale analyse van bestaande SWASH-berekeningen (SEAWAD)**
Gebruik de bestaande simulaties om inzicht te krijgen in de triad-interacties. Dit biedt een basis voor verdere analyses en modelontwikkeling.
- **Bispectrale analyse van MVED-metingen**
Vergelijk de metingen met de bestaande SWASH simulaties om te verifiëren hoe goed de huidige modellen de natuurlijke omstandigheden beschrijven.
- **Nieuwe 1D en 2D SWASH-berekeningen**
Breed de simulaties uit met nieuwe scenario's, zoals variërende richtings spreiding en bodemtopografie. Dit is nodig om lacunes in de huidige beschrijvingen te vullen, bijvoorbeeld het ontbreken van richtings spreiding in veel bestaande analyses. De focus hierbij is om bestaande metingen te reproduceren en het bereik uit te breiden indien nodig.

- **Bispectrale analyse van de nieuwe SWASH-berekeningen**
Analyseer de resultaten van nieuwe berekeningen om de invloed van triad-interacties, bifase en richtings spreiding beter te begrijpen.
- **Verbeteren van de beschrijving van bifase**
Ontwikkel verbeterde parametrisaties van bifases door aangepaste parametrisaties of machine learning-methoden gebaseerd op inzichten uit de bispectrale analyses.
- **Verbeteren van de beschrijving van de triads**
Begin met het verfijnen van triad-interacties door het combineren van de sterke punten van DCTA (distributed collinear triad approximation) en FTIM (full triad interaction model), zoals het integreren van som- en verschilinteracties en het kalibreren op basis van bifases. Ontwikkel verbeterde parametrisaties gebaseerd op inzichten uit de bispectrale analyses. De uitkomsten zijn toepasbaar voor zowel de DCTA als de FTIM.
- **Verbeteren van de beschrijving van golfbreken**
Werk aan een nauwkeurigere spectrale beschrijving van dieptegelimiteerd breken, rekening houdend met richtings spreiding en niet-lineaire effecten.
- **Kalibratie**
Kalibreer de (verbeterde) beschrijvingen van triads, bifase en golfbreken aan de hand van beschikbare veld- en labmetingen.
- **Implementatie in SWAN**
Integreer de verbeteringen in SWAN en zorg voor een werkbare versie van het model.
- **Vergelijking van SWAN met bestaande labmetingen**
Evalueer de prestaties van SWAN in gecontroleerde laboratoriumomstandigheden om de nauwkeurigheid van de verbeteringen te bevestigen.
- **Vergelijken met MVED-metingen en andere veldmetingen**
Voer een eindvalidatie uit door SWAN-simulaties te vergelijken met de natuurlijke omstandigheden zoals gemeten in de MVED-dataset en watersystemen met dieptegelimiteerde condities (o.a. Markermeer, IJsselmeer, Scheldes). Daarbij worden ook extreme, nog niet gemeten, condities beschouwd om de stabiliteit van de DCTA in combinatie met quadruplets te controleren.

4.3.4 *Inschatting van de criteria*

Zoals eerder genoemd, kunnen de ondiepwaterprocessen moeilijk afzonderlijk van elkaar worden beschouwd, gezien de sterke niet-lineaire interacties binnen het spectrum. Dit vraagt om een gebalanceerde aanpak waarbij de mate van verbetering vergelijkbaar is. Hierbij is met name de combinatie van triads en breken cruciaal. Hoewel het a priori moeilijk is om te voorspellen hoe de niet-lineariteit de uiteindelijke golfdoordringing gaat bepalen, is het wel duidelijk dat de individuele veranderingen bijdragen aan een verbeterde beschrijving van de spectrale evolutie van golven in zeegaten. De voorgestelde verbeteringen in de beschrijving van de som- en verschilinteracties in de DCTA en FTIM zullen leiden tot een betere overdracht van energie naar met name het laagfrequente deel van het spectrum. Door gebruik te maken van een frequentie-en richtingsafhankelijke dissipatieformulering zal een groter deel van het laagfrequente spectrum doorgelaten worden. Hierbij is het uiteraard van belang om zowel de individuele bijdragen te verifiëren (zoals eerder beschreven) en ook de combinatie met de bijbehorende niet-lineaire wisselwerking. Ook voor deze laatste stap kunnen zowel de eerdergenoemde metingen en SWASH-berekeningen gebruikt worden.

Criteria	Score	Toelichting
1. Verbetering modelresultaten	Hoog	Gecombineerde processen van triads en breken bepalen de doordringing in zeegaten
2. Verbetering fysica	Hoog	De huidige beschrijvingen worden vervangen door generieke beschrijvingen op basis van fysica.
3. Rekeningtijd	Hoog	Door slim gebruik te maken van de DCTA en FTIM blijft de rekeningtijd beperkt
4. Doorlooptijd	Midden	Alle procesbeschrijvingen samen zorgen voor een langere doorlooptijd. Echter, de eerder voorgestelde SWASH-benchmarksimulaties kunnen voor alle verbeteringen gebruikt worden.
5. Implementatie modellen	Hoog	De implementatie van de verbeterde formuleringen in SWAN is relatief eenvoudig omdat het aanpassingen zijn in de bestaande structuur.
6. Kosten	Midden	Lab- en veldmetingen (MVED) zijn beschikbaar. SWASH-simulaties en bijbehorende analyse moeten nog uitgevoerd worden.

4.3.5 De rol van metingen

Het verzamelen van bestaande labmetingen, nadere analyse van bestaande (MVED en andere) veldmetingen zijn onlosmakelijke onderdelen van de voorgestelde aanpak. De metingen vormen de brug tussen gecontroleerde labomstandigheden waar processen heel geïsoleerd worden waargenomen en de omstandigheden in het veld, waar een heel andere balans van dominante processen wordt waargenomen.

4.4 Infragravitygolven

4.4.1 Bijdrage aan de oplossing van het kernprobleem

De interactie tussen infragravitygolven en de korte golven (zeegang en deining) bepaalt de doordringing van de laagfrequente energie in de Waddenzee. Hierbij werkt het zeegat als een filter, waarbij energie van de infragravitygolven en de korte golven uitgewisseld worden. De wisselwerking wordt daarbij gestuurd door driegolfinteracties (triads). Buiten de brekerzone is de overdracht van de korte golven naar de infragravitygolven dominant (buffering van korte golfenergie in infragravity-energie). Omdat infragravitygolven niet breken, zal via infragravitygolven meer golfenergie door het zeegat propageren. In de ondiepe brekerzone draait het proces om, waarbij infragravity-energie deels weer wordt omgezet naar korte golfenergie en daarmee de doordringing van de laatste bevordert. Een complete beschrijving van de triad-interacties tussen de deining/zeegang en de infragravitygolven is daarbij nodig en geeft daarmee een verbeterde schatting van de doordringing van zowel de infragravitygolven als het laagfrequente deel van het deining/zeegang spectrum.

4.4.2 Overzicht van de beschikbare kennis

InfraGravity (IG) golven spelen een grote rol in de golfoploop en eventuele overslag langs de dijken (Lashley et al., 2021) en de erosie van de duinen tijdens stormcondities (Roelvink et al., 2009). Hoewel het belang van de IG-golven zelf en de interacties van IG-golven met andere processen (onder andere via de triads) onderkend wordt, ontbreekt het in de huidige voorspellingen voor de Waddenzee. Voor de Hollandse kust is er ondertussen een mogelijkheid om de vrije en geforceerde IG-golven mee te nemen in SWAN voor de berekening van de IG-golfrandvoorwaarde, voor meer gedetailleerde berekeningen van de totale golftransformatie middels modellen zoals SWASH en XBeach. Voor de vrije IG-

golven wordt gebruikgemaakt van bronlijnen langs de kusten van de Noordzee om de bijdragen van lokale trapping alsmede verder verwijderde kusten mee te nemen (Rijnsdorp, Reniers & Zijlema, 2021). Recent is dit uitgebreid door Akrish et al. (2024), met gebruik van een ongestructureerd rooster met hogere resolutie nabij de kust, met goede overeenkomsten tussen metingen en voorspellingen van vrije IG-golven langs de Nederlandse kust en op de Noordzee. Het toepassen van het model in zeegaten heeft potentie maar wordt beperkt door het ontbreken van IG-golfmetingen en een passende definitie van de bron- en reflectielijnen (Teun Grandiek, MSc report TUD, 2023). Deze definitie is niet triviaal vanwege het ontbreken van een aaneengesloten brandingszone in het geval van zeegaten.

Naast de vrije IG-golven is er een belangrijke bijdrage van de lokaal golfgroepgeforceerde IG-golven. Ook die kunnen met SWAN berekend worden, mits de bodemvariaties in langsricting beperkt zijn (SWAN-SurfBeat, Reniers & Zijlema, 2022). Dat geldt uiteraard niet voor zeegaten, zoals in de Waddenzee het geval is, waar geulen en platen een belangrijke rol spelen. Voor dit soort situaties dienen beide aanpakken geïntegreerd te worden, dat wil zeggen een enkel model waarbij de voorspelling van de golfgroepgeforceerde IG-golven toegevoegd worden aan de vrije IG-golven. Dit kan middels een uitbreiding van de driegolfwisselwerkingen van zeegang en deining met de IG-golven, in combinatie met een bijbehorende parametrisatie van de bifase (zie ook 4.3) of door een hybride aanpak met het oplossen van de evolutievergelijking voor de bifase in bepaalde gebieden. Deze bifase kan zowel positief (groei van IG-golven) als negatief (demping van IG-golven) zijn, afhankelijk van de condities. Met name in de ondiepe brandingszone is er een gedeeltelijke overdracht van IG-golfenergie terug naar de zeegang- en deiningscomponenten (op basis van SWASH-berekeningen door Rijnsdorp, Smit & Guza, 2022). In het geval van een constante helling, zoals aangenomen in deze studie, zullen de korte golven vervolgens verdwijnen door dieptegelimiteerd breken en de IG-golven zullen reflecteren. In het geval van een eb-delta met een minimale waterdiepte zullen deze zeegang-/deiningsgolven echter niet volledig uitdempen en daarmee neemt de doordringing van zeegang en deining toe. Daarnaast reflecteren de IG-golven niet, maar propageren als een combinatie van vrije en geforceerde IG-golven door het zeegat richting de kust. Ook in dit geval is er slechts een beperkt aantal metingen beschikbaar waarmee de modellen gedeeltelijk getoetst kunnen worden. Met name de transformatie van het totale golfveld, zeegang/deining en IG-golven door het zeegat en de propagatie naar de kust ontbreekt. Verder onderzoek met deze formuleringen in de oostelijke Waddenzee zou naast verificatie en validatie tevens tot nieuwe inzichten kunnen leiden t.b.v. de doordringing van Noordzeegolven en golfoploop en-overslag (voor oploop en overslag, zie KvK factsheet HB7-2).

4.4.3 *Grove schets van de uit te voeren stappen*

We voorzien de volgende stappen:

1. Uitbreiden van het ongestructureerde SWAN-model voor de Waddenzee. Definitie van bron- en absorptie-/reflectielijnen voor zeegaten voor de voorspelling van vrije IG-golven en vergelijking met metingen.
2. Integratie van beide modellen, dus inclusief de golfgroepforcering van IG-golven. Op het ogenblik zijn de collineaire driegolfwisselwerkingen beschikbaar.

4.4.4 *Inschatting van de criteria*

Criteria	Score	Toelichting
1. Verbetering modelresultaten	Hoog	Deze aanpak geeft een voorspelling van de doordringing van IG-golven die tot nu toe ontbreekt en invloed heeft op de deiningendoordringing.
2. Verbetering fysica	Hoog	Een generieke beschrijving van de forcering van IG-golven over variabele bodem en een meer robuuste beschrijving van de voortplanting van vrije IG-golven.
3. Rekeningtijd	Hoog	Voor de IG-golven is de rekeningtijd onderdeel van de DCTA en FTIM, dus geen extra toename
4. Doorlooptijd	Midden	De benodigde uitbreiding en toetsing van de vrije IG-golven aan de hand van (MVED) metingen is een beperkte inspanning. Het generaliseren van de geforceerde IG-golven vraagt meer tijd in zowel de formuleringen als de verificatie.
5. Implementatie modellen	Hoog	Dit betreft een beperkte aanpassing van de bestaande implementatie voor driegolfwisselwerkingen in de IG-range.
6. Kosten	Midden	Analyse van metingen en generalisatie zijn door de benodigde tijd duurder.

4.4.5 De rol van metingen

Metingen van de transformatie van de gecombineerde deining/zeegang en infragravitygolven zijn hierbij van groot belang, waarbij met name metingen van de processen in het zeegat en de daaropvolgende doordringing op het moment beschikbaar zijn. Hier vormen de bestaande en voorziene MVED-metingen een unieke dataset, die gebruikt kunnen worden om de voorspellingen te verifiëren en te verbeteren.

4.5 Golfopzet, stormopzet en golf-stroominteractie

4.5.1 Bijdrage aan de oplossing van het kernprobleem

In de productiesommen voor BOI wordt waterstand ruimtelijk uniform verondersteld en wordt het effect van stroming niet meegenomen. Uitzondering vormen de Waddenzee en Westerschelde, waar voor WT12011 met het DCSM-model ruimtelijk variërende waterstand- en stromingsvelden zijn berekend. Echter, daarin is het effect dat golven op de waterstand en stroming hebben, zich onder andere uitend in een golfopzet, niet meegenomen.

In diverse hindcaststudies zijn deze effecten wel meegenomen maar desondanks wordt nog steeds een onderschatting van de gemeten laagfrequente energie bij meetlocaties langs de Friese kust gezien tijdens forse stormen. Dit is onder andere geïllustreerd in Alkyon (2009), Arcadis (2014, 2015). In Deltares (2023) is de focus meer gelegd op de voortplanting over geulen en is een sterke afname van de energie over de geulen in zowel SWASH als SWAN waargenomen. Naar dit lokale gedrag is in bijvoorbeeld Alkyon (2009) niet gekeken. Echter, in Deltares (2023) is een uniforme waterstand aangenomen en is stroming niet verdisconteerd, om de vergelijking met SWASH-resultaten mogelijk te maken. Ook is een vergelijking met metingen gemaakt. Daartoe zijn ruimtelijk variërende stromings- en waterstandsvelden als randvoorwaarden voor SWAN opgelegd. Ook hier was een zeer sterke afname van laagfrequente energie over de geulen waarneembaar. De nauwkeurigheid van de stromingsvelden en met name de golfopzet zijn echter

onduidelijk. Het effect van stroming en een verhoogde waterstand als gevolg van golfopzet op de voortplanting van laagfrequente golven kunnen best groot zijn (zie o.a. Rijnsdorp, 2023).

4.5.2 *Overzicht van beschikbare kennis*

Het modelleren van de waterbeweging wordt uitgevoerd met state-of-the-art modellen. De aanname is hier dat deze met voldoende nauwkeurigheid uit de stromings- en waterstandsvelden kunnen worden bepaald. Anderzijds is ook bekend dat de waterstand in de Oostelijke Waddenzee, en dan met name in de Eems-Dollard tijdens de zwaarste reeds opgetreden stormen, is onderschat met enkele decimeters (bijvoorbeeld in de Dollard, boven een bepaalde drempel van ca. 1,5 m, tot 20% van alle opzet boven die drempel).

Daarnaast is binnen de DCTA-studie aan de hand van SWASH-berekeningen geconstateerd (Rijnsdorp et al., 2022) dat de doordringing van laagfrequente golven toenam met afnemende bodemwrijving. Echter, dit werd toegeschreven aan een toename van de golfgeïnduceerde opzet van 20 cm - 40 cm. In hoeverre de hydrodynamische modellen hierop afgeregeld zijn, is het nazoeken waard. Svasek (2018) heeft laten zien dat golfopzet in de Waddenzee op kan lopen tot 0,3 m – 0,5 m tijdens stormcondities. Dit is gelijk aan een halve decimeringshoogte. Daarnaast denkt Firmijn Zijl (pers. comm.) al langere tijd aan variaties van bodemwrijving en bodemvormen, waarbij het idee is dat deze in de Eems-Dollard tijdens forse stormvloed tijdelijk veranderen (en op dat moment gaat de M4-getijcomponent daar sterker opspelen dan gewoonlijk, tot deze enkele dagen na de stormvloed weer uitgedempt is).

In het kader van SBW zijn diverse studies uitgevoerd naar het effect van stroming op de golfcondities:

- Ten aanzien van de golfleeftijd en daardoor golfgroei (zie Haus, 2007 en Van der Westhuysen et al., 2012).
- Dissipatie bij tegenstroming (Deltares, 2007b).
- Amplitudedispersie kan een significant effect hebben (Chawla en Kirby, 1998, 2002) en Suastika (2004). Dit is later aangehaald in Deltares (2007), maar heeft geen vervolg gekregen.
- Diverse hindcast- (o.a. Alkyon, 2009) en gevoeligheidsstudies (o.a. Deltares, 2007a) hebben laten zien dat het al dan niet verdisconteren van stroming een groot effect (tot 50% op de golfhoogte en golfperiode) kan hebben.

De studies laten zien dat het effect op het al dan niet meenemen van stroming tot forse verschillen kan leiden in zowel golfhoogte, golfperiode en uiteraard ook golfrichting.

4.5.3 *Grove schets van de uit te voeren stappen*

In Deltares (2023) is ingezoomd op de geul bij de vergelijking tussen SWAN en SWASH, waarbij berekeningen zonder stroming en uniforme waterstand zijn beschouwd. Ook is een vergelijking met metingen gemaakt met realistische stromings- en waterstandsvelden. Nadere analyse van deze berekeningen geeft een eerste indicatie van het belang van een nauwkeuriger beschrijving van genoemde randvoorwaarden.

De volgende activiteiten worden voorzien:

1. Nagaan wat het effect is van stroming door de geulen op golfvoortplanting, a.d.h.v. met SWAN uitgevoerde hindcasts. Hierbij kan gebruik worden gemaakt van hindcasts die beschikbaar zijn in testbanken.
2. Inschatten van het effect van een verhoogde waterstand, met zowel SWASH als SWAN. Hiervoor kunnen de gebruikte testen uit de DCTA-studie dienen als basis.
3. Inschatten van de juiste hoeveelheid opzet, waarbij het effect van bodemwrijving wordt meegenomen. Daarbij worden ook de hypothesen van Zijl en Rijnsdorp, et al. (2022) naast elkaar gelegd. Mogelijk vergt validatie van de hypothese nogal wat in termen van metingen, omdat eigenlijk enkele malen per stormseizoen gemeten moet worden. Als metingen onvoldoende beschikbaar zijn, dan zal de toetsing van de hypothesen in eerste instantie beschouwend worden uitgevoerd.
4. Indien bovenstaande analyses daartoe aanleiding geven, een advies richting BOI opstellen om/hoe deze aspecten mee te nemen.

4.5.4 *Inschatting van de criteria*

Criteria	Score	Toelichting
1. Verbetering modelresultaten	Hoog	Met name de SBW-studies laten een grote invloed zien van het meenemen van stroming in de SWAN-berekeningen (orde 50% op golfhoogte en -periode). De verwachting is dat meenemen van golfgeïnduceerde opzet, die leidt tot orde halve meter aan waterstandsverhoging, grote invloed heeft op de golfvoortplanting over de geulen.
2. Verbetering fysica	Hoog	De weergave van de randvoorwaarden (waterstand en stroming) wordt sterk verbeterd ten opzichte van de huidige aanpak binnen BOI.
3. Rekeningtijd	Middel	De rekeningtijd van de SWAN-berekeningen is vergelijkbaar als stroming en ruimtelijk variërende waterstanden worden meegenomen. Het verkrijgen van deze randvoorwaarden met een hydrodynamisch model kost tijd.
4. Doorlooptijd	Hoog	De doorlooptijd van de studie is beperkt.
5. Implementatie modellen	Middel	In WTI2011 is een aanpak ontwikkeld om ruimtelijk variërende waterstand- en stromingsvelden in rekening te brengen. Deze aanpak zou nog eens goed tegen het licht gehouden moeten worden, maar is tegelijkertijd voor verbetering vatbaar. Hoe dat te doen is niet zondermeer duidelijk.
6. Kosten	Hoog	Ervan uitgaande dat de hydrodynamische modellen golfgeïnduceerde opzet en stroming goed kunnen berekenen, zullen de kosten van het onderzoek beperkt zijn, gegeven de beperkte doorlooptijd.

4.5.5 De rol van metingen

In hindcaststudies zijn de waterstanden en stroomsnelheden verkregen uit modellen. Met name de lokale variatie van stroming beïnvloedt de mate van refractie en de golfleeftijd. Tevens is het de vraag of de golfgeïnduceerde opzet nauwkeurig wordt meegenomen. Inzicht in de lokale stroming en waterstand, in combinatie met de voortplanting van de golven over de geulen en zeegaten, is hier zeer wenselijk. Gecombineerde metingen van stroming (grootte en richting), waterstand in geulen en zeegaten en de verandering van golfcondities (2D-spectra) over geulen en zeegaten zouden hierbij helpen. Deze informatiebehoefte is zeer beperkt ingevuld in SBW-onderzoek van 15 jaar geleden en zou binnen MVED ingevuld kunnen worden.

4.6 Interactie kruisende zeeën

4.6.1 Bijdrage aan de oplossing van het kernprobleem

Uit de binnen MVED uitgevoerde ADCP-metingen bij Uithuizerwad blijkt dat het golfveld bij de dijk bestaat uit kruisende zeeën (drie componenten met drie verschillende richtingen): windgolven, die lokaal worden opgewekt op de Waddenzee, langere Noordzeegolven en infragravitygolven. Zowel de op de Noordzee opgewekte golven (inclusief deining die bijvoorbeeld boven Schotland wordt opgewekt) als gebonden en vrije IG golven, dringen vanuit de Noordzee de Waddenzee in.

De formuleringen in SWAN zijn (grotendeels) gebaseerd op integrale spectrale parameters. Het gelijktijdig optreden van kruisende zeeën heeft invloed op het golfspectrum, maar het is onduidelijk hoe dit doorwerkt op de golfcondities in het algemeen en op de laagfrequente energie in het bijzonder.

4.6.2 Overzicht van de beschikbare kennis

Een korte scan van literatuur wijst op een samenhang tussen enerzijds invloed van deining op de windgroei, dissipatie en niet-lineaire viergolfwisselwerkingen. De relaties zijn niet heel eenduidig:

- Donelan, M.A. (1987). The Effect Of Swell On The Growth Of Wind Waves. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 8(1).
- Mitsuyasu, H., & Yoshida, Y. (1991). The Effect of Swell on the Growth of Wind Waves. *Elsevier oceanography series*, 54, 381-392.
doi:[https://doi.org/10.1016/S0422-9894\(08\)70110-7](https://doi.org/10.1016/S0422-9894(08)70110-7)
[https://doi.org/10.1016/S0422-9894\(08\)70110-7](https://doi.org/10.1016/S0422-9894(08)70110-7)
- Hanson, J.L., & Phillips, O.M. (1999). Wind Sea Growth and Dissipation in the Open Ocean. *Journal of physical oceanography*, 29(8), 1633-1648.
https://journals.ametsoc.org/view/journals/phoc/29/8/1520-0485_1999_029_1633_wsgadi_2.0.co_2.xml?tab_body=fulltext-display
- Mitsuyasu, H., & Yoshida, Y. (2005). Air-Sea Interactions under the Existence of Opposing Swell. *Journal of oceanography*, 61, 141-154.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s10872-005-0027-1>
- Vincent, C.L., Thomson, J., Graber, H.C., & Collins III, C.O. (2019). Impact of swell on the wind-sea and resulting modulation of stress. *Progress in Oceanography*, 178, 102164.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079661118302209>
- Wu, L., Sahlée, E., Nilsson, E., & Ruthersson, A. (2024). A review of surface swell waves and their role in air-sea interactions. *Ocean Modelling*, 102397.
doi: <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2024.102397>.

Het validatierapport van de ST6-formulering (waarvan een parametrisatie van het effect van deining expliciet onderdeel is) stelt: "...applying the ST6 formulation significantly improves the predicted high-frequency tail. According to Rogers (WISE meeting, 2017) this is a direct result of applying the proper balance between the wind and wave stress." De saturation-based methode die Van der Westhuysen (Van der Westhuysen et al., 2007) tien jaar eerder ontwikkelde, heeft ertoe geleid dat de voorspelling van gecombineerde windzee-deiningsituaties significant verbeterde ten opzichte van gebruik van de formulering van Komen of Janssen, omdat laatstgenoemde formuleringen uitgingen van een gemiddelde periode in plaats van frequentieafhankelijkheid. Maar daarmee werd het windzeedeel beter voorspeld, niet zozeer het deiningsgedeelte. De alternatieve formuleringen lijken dus juist gericht op de hoogfrequente kant, waarbij weinig winst lijkt te behalen met betrekking tot de doordringing van laagfrequente energie. De conclusie is daarom dat dit geen zinnige richting lijkt te zijn voor onderzoek binnen het huidige project.

4.6.3 *Grove schets van de uit te voeren stappen*

Voor het modelleren van de interactie tussen kruisende zeeën is geen fysische formulering beschikbaar. Dit formuleren zal een significante inspanning vergen, maar tegelijkertijd is het niet duidelijk of dit een bijdrage zal leveren aan de doelstelling, namelijk het representeren van laagfrequente energie in de Waddenzee in het spectrale golfmodel SWAN.

In plaats daarvan wordt voorgesteld om een beknopte analyse van beschikbare metingen uit te voeren, om na te gaan of dit een rol kan spelen en hypothesen te formuleren. Deze bestaat op hoofdlijnen uit de volgende stappen:

- Verzamelen meetgegevens en modelresultaten:
 - Spectrale metingen inclusief richtingsverspreiding;
 - Windsnelheden;
 - Waterstanden;
 - Stroomsnelheden;
 - Op diep en ondiep water. Hier komen de MVED-metingen van pas, maar ook die in het AZG en andere locaties rondom de Waddenzee (en de Wester- en Oosterschelde).
- Vergelijking op diep water:
 - Analyse van de bias en scatter;
 - Separate analyse van situaties zonder wind (deining), zonder deining en met beide.
- Vergelijking op ondiep water;
 - Idem.
- Advies over gewenste aanvullende meetgegevens.

4.6.4 *Inschatting van de criteria*

Criteria	Score	Toelichting
1. Verbetering modelresultaten	Laag	Onzeker, daarom alleen vergelijking voorgesteld.
2. Verbetering fysica	Laag	Idem.
3. Rekentijd	Hoog	Geen berekeningen voorzien.
4. Doorlooptijd	Midden	Het verzamelen van data bij externe partijen kan enige tijd vergen. De verwerking van data voor het beoogde gebruik vraagt enige tijd.

5. Implementatie modellen	Hoog	Er is geen implementatie voorzien.
6. Kosten	Hoog	Er worden geen aanvullende kosten gemaakt voor het uitvoeren van metingen en berekeningen.

4.6.5 De rol van metingen

Dit is reeds beschreven onder 4.6.3.

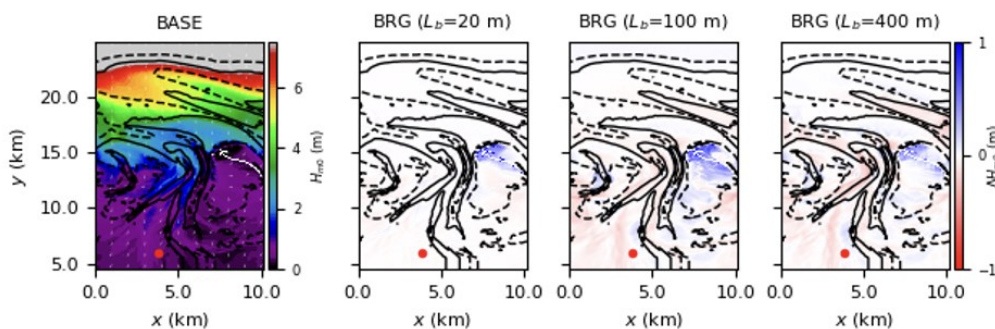
4.7 Braggscattering

4.7.1 Bijdrage aan de oplossing van het kernprobleem

Refractie en shoaling worden bepaald door grootschalige dieptevariaties. Braggscattering is de invloed van kleine variaties in de bodemtopografie op de golven, in de orde van een golflengte. Het meenemen van Braggscattering in de golftransformatie geeft een betere voorspelling van de richtingsverspreiding van de golven. Dit is met name van belang in gebieden met schaduwzones.

4.7.2 Overzicht van beschikbare kennis

Braggscattering is ingebouwd in SWAN en getest met een Matlab-script dat laat zien dat de richtingsverspreiding breder wordt voor golven op een constante helling. Verificatie van de implementatie voor het Lauwersgat wordt echter bemoeilijkt door het ontbreken van metingen van zowel de golfhoogten als de onderliggende bodemvariaties. Met name het laatst punt is problematisch, omdat het spectrum van de bodemvormen bepalend is voor de Braggscattering en bijbehorende verbreding van het golfspectrum. Onder de aanname van een gegeven bodemspectrum, lijkt het erop dat Braggscattering geen effect heeft op de doordringing van de deining aan de kustlijn van het Lauwersgat. Tegelijkertijd zijn er wel gebieden waarbij de golfhoogte toeneemt, met name in schaduwzones zoals de Rottumerplaat (zie Figuur 4.1).



Figuur 4.1 Verschil in golfhoogte voor SWAN-simulaties met Braggscattering ten gevolge van bodemvormen met verschillende lengteschalen ten opzichte van de simulatie zonder Braggscattering (zie linkerpaneel). *Figuur uit Rijnsdorp, Reniers, & Zijlema (2022).*

4.7.3 Grove schets van de uit te voeren stappen

De volgende stappen worden voorgesteld:

- Verkrijgen van gedetailleerde bodemligging in het gebied van interesse;
- Uitvoeren van SWAN-simulaties en vergelijken met metingen van golfhoogte, richtingsverspreiding en spectrale vorm.

4.7.4 *Inschatting van de criteria*

Criteria	Score	Toelichting
1. Verbetering modelresultaten	Laag	Er is reeds aangetoond dat Braggscattering voor de open Waddenkust weinig invloed heeft. Het is mogelijk wel van belang voor schaduwzones, zoals bijvoorbeeld in het Eems-estuarium.
2. Verbetering fysica	Laag	Fysica is reeds up-to-date.
3. Rekeningtijd	Midden	Verandert niet ten aanzien van huidige stand.
4. Doorlooptijd	Hoog	De benodigde uitbreiding en toetsing aan de hand van (MVED) metingen is een beperkte inspanning.
5. Implementatie modellen	Hoog	Implementatie reeds aanwezig.
6. Kosten	Laag	Inspanning is beperkt tot verificatie mits de bodem beschikbaar is. Dat laatste is echter niet het geval.

4.7.5 *De rol van metingen*

Op het ogenblik zijn er geen grootschalige metingen van zowel de bodemvormen als de bijbehorende golftransformatie beschikbaar. De combinatie van gedetailleerde bodemmetingen met een resolutie van orde 5 meter op specifieke locaties en de MVED-metingen vormen een unieke gelegenheid om de implementatie van Braggscattering in SWAN te verifiëren.

4.8 **Onzekerheid in bodemligging**

4.8.1 *Bijdrage aan de oplossing van het kernprobleem*

De bodemligging van de Waddenzee wordt gekenmerkt door een stelsel van geulen en ondiepe platen. De beperkte waterdiepte heeft een groot effect op de golfcondities. Dat geldt met name voor de lange golven die de bodem goed voelen. Het is daarom van groot belang de bodemhoogte nauwkeurig in beeld te hebben. Dit is echter eerder een eis aan deze randvoorwaarde, die moet worden gecontroleerd bij iedere studie die wordt uitgevoerd.

4.8.2 *Overzicht van beschikbare kennis*

Rijkswaterstaat beschikt over nauwkeurige apparatuur om de bodemligging te meten. Echter de frequentie waarmee zogenaamde vaklodingen worden uitgevoerd is eens per 3-6 jaar. De Waddenzee is morfologisch gezien een zeer dynamisch gebied. Voorstudies naar geschikte locaties voor een meetpaal in de Waddenzee (o.a. Uithuizerwad) hebben dit aangetoond, zie o.a. Haskoning (2006).

Deltares (2008) heeft ook de impact op de bodemhoogte en golfcondities bepaald van een extreme storm met herhalingstijd van 4.000 jaar. In de Waddenzee kunnen tijdens een dergelijke storm bodemveranderingen van 1 m optreden (op de ebb-tidal delta is dit tot 5 m), die leiden tot lokale veranderingen in golfhoogte en golfperiode van enkele decimeters resp. 0.5 s – 1 s. Deze variaties treden met name op nabij de plaatranden. Nabij de Friese kust zijn de veranderingen een orde kleiner. In Deltares (2008) is niet specifiek gekeken naar de laagfrequente energie.

4.8.3 *Grove schets van de uit te voeren stappen*

We veronderstellen dat morfologische veranderingen tijdens een storm een maat zijn voor de onzekerheid in de bodemligging. Aan de hand van in het verleden uitgevoerde studies waarin de morfologische veranderingen tijdens stormen zijn

beschouwd (b.v. Deltares, 2008; Steetzel et al., 2016), zal worden nagegaan in hoeverre veranderingen van de bodemhoogte rondom geulen aanleiding geven tot veranderingen in golfcondities. Daarbij ligt de focus op de laagfrequente golfenergie, zowel nabij de geulen, als vlakbij de Friese/Groningse dijk. Door de veranderingen in golfcondities te vergelijken met de in Deltares (2023) geconstateerde veranderingen van golfcondities over de geulen heen, kan inzicht verkregen worden in de bijdrage van bodemveranderingen aan deze veranderingen, gegeven het gebruikte model.

Deze activiteit levert dus hooguit inzicht op. Het is immers niet mogelijk een eis op te leggen aan de nauwkeurigheid van de bodem. Dat is wat het is, zeker als de variatie tijdens een storm groot kan zijn. Wat wel mogelijk is, is om gegeven de mate van onzekerheid in bodemligging een schatting van de onzekerheid in golfhoogte, golfperiode of laagfrequente golfenergie bepalen. Vanwege de verwachte beperkte winst, zal dit vooralsnog niet worden gedaan.

4.8.4 *Inschatting van de criteria*

Criteria	Score	Toelichting
1. Verbetering modelresultaten	Laag	Hooguit inzicht in effect van de bodemligging wordt verkregen, er wordt geen beter modelresultaat verkregen.
2. Verbetering fysica	Laag	Idem.
3. Rekeningtijd	Hoog	De mate van nauwkeurigheid heeft naar verwachting geen invloed op de rekeningtijd, onder de aanname dat niet een veel fijnere rekenrooster nodig is om de bodemligging met de gewenste nauwkeurigheid weer te geven.
4. Doorlooptijd	Hoog	We gaan uit van reeds uitgevoerde studies.
5. Implementatie modellen	Middel	De keuze van de te gebruiken bodem heeft geen effect op de wijze waarop de modellen(ketens) worden ingezet.
6. Kosten	Hoog	Doorlooptijd en daarmee de kosten zijn beperkt.

4.8.5 *De rol van metingen*

Nieuwe metingen lijken hier niet relevant. In deze activiteit wordt gebruik gemaakt van bestaande metingen.

4.9 Golftrandvoorwaarden

4.9.1 *Bijdrage aan de oplossing van het kernprobleem*

In hindcasts van stormen is het van groot belang om randvoorwaarden voldoende nauwkeurig weer te geven, om zinvolle conclusies te kunnen trekken uit de vergelijking tussen meetresultaten en rekenresultaten. Voor SWAN op de Waddenzee betreft dat naast wind-, waterstands- en stromingsvelden de offshore golftrandvoorwaarden. Deze worden veelal verkregen uit metingen van offshore gelegen richtingsafhankelijke boeien. Een incorrecte weergave van de deze randvoorwaarden leidt direct tot een incorrecte doordringing van de hoeveelheid energie vanaf de Noordzee.

4.9.2 Overzicht van beschikbare kennis

In Deltares (2023) is geconstateerd dat voor de labcase Taman de met SWAN berekende golfhoogte in en over de geul de metingen sterk onderschatte, terwijl met SWASH de metingen konden worden gereproduceerd. Voor de veldcase bleek echter dat in en over de geul de golfenergie sterk wordt gereduceerd in de berekeningen met zowel SWAN als SWASH. Dat oogt consistent, maar gezien de bevindingen met Taman werd dit niet verwacht. Een verklaring is in Deltares (2023) niet gegeven.

De input voor de veldcase zijn uit SWIVT (testbank) overgenomen. De offshore golfrandvoorwaarden zijn gegeven als 1.5D-spectrum, dat wil zeggen dat golfenergie, gemiddelde richting en richtings spreiding is gegeven als functie van frequentie. Echter, zowel de gemiddelde richting als richtings spreiding zijn hetzelfde voor alle frequenties, wat niet overeenkomt met metingen. Het is de vraag of hier de correcte richtingsinformatie is gebruikt. In paragraaf 4.1 is aangegeven dat de richting van de inkomende golven in grote mate de voortplanting over de geulen bepaalt, omdat de kritieke hoek van refractie inkomende golven aan de geulwand kan blokkeren. De suggestie om de offshore golfrandvoorwaarden nader tegen het licht te houden komt overeen met eerder gedane aanbevelingen in het POV-Waddenzeedijken onderzoek, waar in het bijzonder de metingen bij SON zijn aangehaald (Steetzel et al., 2019).

4.9.3 Grove schets van de uit te voeren stappen

De basis voor de werkzaamheden wordt gevormd door de SWASH en SWAN-berekeningen ten behoeve van de DCTA-studie, zoals gerapporteerd in Rijnsdorp et al. (2022) en Deltares (2023). Hiermee worden de volgende werkzaamheden getrapd uitgevoerd:

- Controle van de opgelegde randvoorwaarden in de met SWAN uitgevoerde hindcasts en nagaan of deze overeenkomen met beschikbare meetdata die zijn gebruikt om de golfrandvoorwaarden te creëren. De focus is op de frequentieafhankelijkheid van de richtingsinformatie.
- Mochten de gemeten offshore golfrichtingen variatie vertonen over de frequenties, dan zullen zowel de SWAN als SWASH-berekeningen opnieuw worden uitgevoerd met aangepaste offshore golfrandvoorwaarden.
- Heranalyse van SWAN en SWASH-resultaten en nagaan of conclusies die in Deltares (2023) zijn getrokken, veranderen (en meer in lijn zijn met de verschillen tussen SWAN en SWASH-resultaten voor de Taman labcase, waarin SWASH veel beter presteerde dan SWAN).

4.9.4 Inschatting van de criteria

In onderstaande tabel is een inschatting van de criteria gegeven, aangevuld met een korte toelichting. Een aantal criteria zijn niet van toepassing. Deze activiteit wordt eerder gezien als no-regret, teneinde een mogelijke oorzaak van onverklaarbare resultaten in Deltares (2023) te kunnen vinden.

Criteria	Score	Toelichting
1. Verbetering modelresultaten	Hoog	Met deze activiteit wordt uitgesloten dat randvoorwaarden foutief zijn opgelegd in berekeningen en daaruit incorrecte conclusies zijn getrokken. Inzicht in modelresultaten wordt vergroot.

2. Verbetering fysica	N.v.t.	De weergave van de fysica (offshore randvoorwaarden) wordt verbeterd, niet zozeer de fysica zelf.
3. Rekeningtijd	N.v.t.	Geen invloed op rekeningtijden.
4. Doorlooptijd	Hoog	Dit is een actie van enkele weken.
5. Implementatie modellen	N.v.t.	Er worden geen nieuwe zaken in modellen geïmplementeerd.
6. Kosten	Hoog	Doorlooptijd en daarmee de kosten zijn beperkt.

4.9.5 De rol van metingen

Nieuwe metingen zijn hier niet relevant. In deze activiteit controleren we alleen bestaande metingen.

5 Rol van metingen

5.1 Inleiding

Er wordt in de eerder beschreven aanpak gebruik gemaakt van een combinatie van bestaande metingen en de doorlopende metingen van MVED. De bestaande metingen kunnen onderverdeeld worden in laboratoriummetingen en veldmetingen.

5.2 Bestaande metingen

5.2.1 Laboratoriummetingen

De laboratoriummetingen zijn toegespitst op bepaalde aspecten van de golftransformatie en met name de driegolfwisselwerkingen van zowel de deining als de infragravitygolven. De meeste experimenten zijn gedaan in een golfgoot, slechts een beperkt aantal in een golfbassin. Dit maakt de vertaling naar het veld uitdagend, onder andere vanwege ontbrekende processen, schaaleffecten, het effect van richtingsverspreiding en het gegeven dat zonder windforcering minder hoge golfsteilheden haalbaar lijken dan in het veld (zie bijvoorbeeld Bottema, 2022a). Verder zijn laboratoriumexperimenten voor de zeegaten niet beschikbaar.

5.2.2 Veldmetingen

Voor veel van de in het vorige hoofdstuk behandelde onderzoeksrichtingen zijn veldmetingen essentieel. Tegelijkertijd is het een feit dat veldmetingen in zeegaten beperkt beschikbaar zijn (New River Inlet, SEAWAD) in zowel locatie als duur. De focus is hierbij op de golftransformatie op de ebb-tidal delta, maar mist de doordringing van de deining en infragravitygolven in het achterliggende bekken. Naast bestaande meetprogramma's kan ook gekeken worden of windturbineparken op zee nieuwe kansen bieden, nu boorplatforms vaak juist op de slooplijst staan. Ook remote sensing (SAR/scatterometer) kan zinvolle golf- en windinfo opleveren.

De MVED zijn een unieke uitzondering op de bestaande metingen, waarbij het hele traject van buitengaats naar de dijk wordt gemeten over een lange periode. Veelal ontbreken waterstandsmetingen aan weerszijden van het zeegat, waardoor er geen meetinformatie beschikbaar is over wat waarschijnlijk de belangrijkste bron van golfopzet is voor de Waddenzee (zie ook bijvoorbeeld Bottema, 2019). Juist de samenwerking met MVED is daarom essentieel voor het doen slagen van het in dit PvA voorgestelde onderzoek.

5.3 MVED

De MVED-metingen zijn van grote meerwaarde door de metingen van het gehele frequentie-richtingspectrum, verkregen uit de nabewerking van ADCP-metingen en voorgenomen coherente drukmetingen. Deze kunnen direct vergeleken worden met de verbeterde SWAN-voorspellingen. Verder kunnen de metingen gebruikt worden voor een bispectrale analyse om de triad-interacties in beeld te brengen, inclusief de bijbehorende bifase ter verbetering en verificatie.

Het is belangrijk om de instrumenten strategisch te plaatsen, zodat met name transitiezones, bijvoorbeeld geul-plaatovergangen, goed bemonsterd worden. Hiervoor kunnen SWASH en/of SWAN-berekeningen (uitgevoerd binnen MVED of bij de uitvoering van dit PvA) gebruikt worden. Een verbeterd SWAN-model als resultaat van de uitvoering van dit PvA, kan op haar beurt gebruikt worden voor

hindcasts binnen MVED of het bepalen van hydraulische belastingen (zowel deining, zeevang als infragravitygolven) voor beoordeling of ontwerp van de keringen.

6 Prioritering onderzoeksrichtingen

6.1 Reductie aantal onderzoeksrichtingen

In dit hoofdstuk wordt, op basis van de scores zoals weergegeven in de tabellen per onderdeel in hoofdstuk 4, de prioritering opgesteld. De scores zijn nogmaals samengevat in Tabel 6.1. Voor een aantal onderdelen (numerieke aspecten, kruisende zeeën, Braggscattering en onzekerheden in bodemligging) is in hoofdstuk 4 reeds aangegeven dat deze niet relevant (genoeg) zijn. Deze onderdelen zijn daarom niet langer beschouwd.

6.2 Prioriteringen relevante onderzoeksrichtingen

Het resultaat komt terug in de tabel. De score in de laatste kolom is de som van de scores in de kolommen ervoor en gebaseerd op de volgende puntentelling: - is 1, o is 2 en + is 3.

Tabel 6.1. Prioritering relevante onderzoeksrichtingen o.b.v. scores voor de verschillende onderdelen.

	1. Modelresultaten	2. Fysica	3. Rekentijd	4. Doorlooptijd	5. Implementatie	6. Kosten	Totaal
1. Voortplanting bij geulwanden	o	o	+	o	+	+	15
3. Ondiepwaterfysica	+	+	+	o	+	o	16
4. IG-golven	+	+	+	o	+	o	16
5. Opzet en golf-stroominteractie	+	+	o	+	o	+	16
9. Golfrandvoorwaarden	+	n.v.t.	n.v.t.	+	n.v.t.	+	No-regret

De inschatting van de kans op succesvolle SWAN-verbeteringen binnen redelijke tijd en inspanning is de totaalscore voor de criteria. Mocht een verbeterde formulering voor de fysica van een bepaald aspect bijvoorbeeld niet haalbaar worden geacht, dan heeft dit aspect een lage score voor bijvoorbeeld criteria 2,4 en 5 gehad. Mocht de benodigde inspanning (te) groot zijn, dan zal dat onderdeel laag hebben gescoord op bijvoorbeeld criteria 4 en 6. De beschrijvingen en de scores voor elk van de onderdelen zijn weergegeven in hoofdstuk 4 en gebaseerd op expert judgement.

Uit de tabel blijkt dat de verschillen in waardering voor de overgebleven onderdelen uiterst beperkt zijn. Het onderdeel golfrandvoorwaarden betreft een vrij korte no-regret actie. Deze dient voorafgaand aan de overige onderdelen uitgevoerd te worden.

6.3 Definitie van gecombineerde onderzoekssporen

Niet elke onderzoeksrichting is los van de overige richtingen te beschouwen en sommige voorgestelde stappen kunnen bijdragen aan verschillende

onderzoeksrichtingen. Om een planning en inschatting van de kosten te kunnen maken, zijn op basis van de onderzoeksrichtingen daarom onderzoekssporen gedefinieerd. Vanwege de sterke raakvlakken, overeenkomsten en zelfs deels overlappende activiteiten tussen de ondiepwatervysica en IG-golven, bijvoorbeeld voor wat betreft de triads en bifase, wordt voorgesteld onderdelen 3 en 4 samen te beschouwen.

Uiteindelijk leidt dit dan tot een viertal onderzoekssporen (A t/m D), welke - rekening houdend met de volgorde waarin ze uitgevoerd zouden kunnen worden - bestaan uit:

- A. Golftrandvoorwaarden (no-regret);
- B. Ondiepwatervysica en IG-golven;
- C. Golfvoortplanting;
- D. Opzet en golf-stroominteractie.

7 Kosten en doorlooptijd

7.1 Kostenraming en doorlooptijd

Per onderzoeksspoor, zoals gedefinieerd in paragraaf 6.3, worden de activiteiten in Tabel 7.1 voorzien. Voor detailinformatie over deze activiteiten wordt naar de betreffende paragraaf in hoofdstuk 4 verwezen. In onderstaande tabel is een ruwe schatting gegeven van de doorlooptijd en kosten van de activiteiten. Hierin zitten zaken als het opstellen van een werkplan, rapportage en projectmanagement impliciet verwerkt. De kosten zijn echter niet meer dan een indicatie, die verfijnd zal worden wanneer het verzoek tot uitvoering van het plan wordt gegeven. In de volgende paragraaf worden deze in een tijdspad geplaatst en ingedeeld in fasen, inclusief go-no-go-momenten, waarbij de kosten ook per fase worden gegeven, in plaats van per onderzoeksspoor.

Tabel 7.1. Activiteiten, doorlooptijd en kosten per onderzoeksspoor.

Onderwerp	Activiteiten	Doorlooptijd (weken)	Kosten (kE ex. btw)
A - Golfstrandvoorwaarden		6	13
	Controle meetdata	1	3
	SWAN en SWASH-berekeningen	3	5
	Herevaluatie analyse en rapportage	2	5
B - Ondiepwaterfysica en IG-golven		72	200
	Bispectrale analyse van bestaande SWASH-berekeningen voor SEAWAD	2	5
	Bispectrale analyse van MVED-metingen	2	5
	Verbeteren van de beschrijving van golfbreken	4	20
	Nieuwe 1D en 2D SWASH-berekeningen	12	20
	Bispectrale analyse van de SWASH-berekeningen	12	20
	Verbeteren van de beschrijving van triads en bifase	12	40
	Implementatie in SWAN	8	40
	Kalibratie	8	20
	Vergelijking SWAN met bestaande labmetingen	4	10
	Vergelijken met MVED-metingen	8	20
C - Golfvoortplanting		15	58
	Inschatting effect diffractie o.b.v. SWASH	1	3
	Uitdenken methode diffractie	8	25
	Inbouwen methode diffractie	2	10
	Kalibratie, validatie methode	2	10
	Toepassing methode	2	10

D - Opzet en golf-stroominteractie		14	32
	Inschatting effect stroming en verhoogde waterstand	3	15
	Inschatting mate opzet	10	12
	Advies BOI	1	5

De geschatte kosten tellen op tot 303 k€ excl. BTW voor het totaalpakket aan activiteiten. Mogelijk is niet dit volledige bedrag nodig, bijvoorbeeld bij een no-go voor een bepaald onderzoeksspoor. De doorlooptijd sommeert tot 100 weken, maar diverse activiteiten kunnen parallel worden uitgevoerd. Daar wordt in de volgende paragraaf nader op ingegaan. Desalniettemin kunnen niet alle activiteiten in 1 jaar worden uitgevoerd.

7.2 Indicatieve planning

De onderzoekssporen zijn in Tabel 7.2 in een tijdspad geplaatst en ingedeeld in fasen, inclusief go-no-go-momenten en kosten per fase. De planning is zodanig opgesteld dat deze het in hoofdstuk 1 gedefinieerde iteratieve karakter volgt, waarbij gedurende het proces het onderzoek steeds verder wordt aangescherpt.

De drie fasen hebben een totale geschatte lengte van 17 maanden. Zoals de scores in het vorige hoofdstuk ook al lieten zien, is het op dit moment onmogelijk aan te geven welk van de geprioriteerde sporen het meest kansrijk is. Daarom wordt in fase 1 nog gestart met alle sporen. Binnen en na afloop van fase 1 zijn er vervolgens enkele go-no-go-momenten, waarop kan worden bepaald of het nog zinvol is om door te gaan met een bepaald onderzoeksspoor. Juist deze opdeling in fasen en definitie van go-no-go-momenten geven tijdig inzicht in het feit welke sporen wel of geen succesvolle verbeteringen in SWAN op zullen leveren. Dit betekent dus ook dat niet noodzakelijkerwijs alle - in fasen 2 en 3 gedefinieerde - acties (en de daarbij behorende kosten) ook daadwerkelijk zullen worden uitgevoerd.

Per fase is tevens een indicatie van de kosten gegeven, op basis van de kostenschattings uit Tabel 7.1. Vanwege het iteratieve karakter, is het dus ook niet vooraf duidelijk of de 142 k€ en 122.5 k€ voor fasen 2 en 3 ook daadwerkelijk nodig zijn. Dit zal tijdens de uitvoering blijken. Voorafgaand aan de uitvoering zal nog in meer detail worden nagedacht over de verdeling van budgetten. Zo kan bijvoorbeeld nog gedacht worden aan het verschuiven van budget van minder kansrijke naar meer kansrijke sporen. Ook de budgetverdeling over de consortiumpartijen zal dan verder worden uitgewerkt.

Een tijdsduur van zo'n 1,5 jaar betekent dat verbeteringen in SWAN op tijd komen voor zowel bijvoorbeeld BOI als MVED. BOI heeft een wat langere tijdshorizon dan MVED, omdat de metingen al lopen. Vanuit het project is aangegeven dat verbeteringen idealiter de komende twee jaar beschikbaar komen, zodat ze nog meegenomen kunnen worden binnen het project, dat in principe tot 2030 loopt.

Zoals vermeld, is onderzoeksspoor A (golfrandvoorwaarden) een relatief korte no-regret-actie, om na te gaan of realistischere golfrandvoorwaarden op de Noordzeeranden van de modellen leiden tot verbeterde doordringing van laagfrequente energie en andere conclusies die zijn getrokken in de DCTA-studie (Deltares, 2023).

De ondiepwaterfysica en infragravitygolven zijn sterk met elkaar verweven. De bifase speelt binnen dit onderzoeksspoor een grote rol. Na de eerste twee acties met bispectrale analyses, kan worden bepaald of de metingen voldoende informatie bevatten om de bifaseformuleringen te kunnen verbeteren. Daarom is op dit moment een go-no-go-moment ingebouwd. Hetzelfde geldt voor het verbeteren van de beschrijvingen van triads en bifase. Als uit deze stap blijkt dat een verbeterde schatting voor de bifases in SWAN ook tot verbeterde golfdoordringing zal leiden, wordt – na een go-no-go-moment - doorgedaan met de volgende stappen.

Iets dergelijks geldt ook voor onderzoekssporen C en D. Met de eerste stappen wordt bepaald of de effecten van diffractie, golfopzet en stroming inderdaad significant bijdragen aan de golfdoordringing. Voor onderzoeksspoor C is nog een extra go-no-go-moment ingebouwd, waarbij wordt gekeken of een verbeterde methode voor de diffractie daadwerkelijk mogelijk is binnen het fasegemiddelde SWAN-model.



RWS INFORMATIE

Tabel 7.2 Indicatie planning, inclusief indeling in fases, go-no-go-momenten en geschatte kosten per fase.

Onderwerp	Activiteit	fase maand na start	1			2						3						
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
A - Golfbrandvoorwaarden																		
	Controle meetdata		x	go/nogo														
	SWAN en SWASH-berekeningen		x	x														
	Herevaluatie analyse en rapportage			x														
B - Ondiepwatervysica en IG-golven																		
	Bi-spectrale analyse bestaande SWASH berekeningen SEAWAD				x													
	Bi-spectrale analyse van de MVED metingen			x	go/nogo										x			
	Nieuwe 1D en 2D SWASH berekeningen				x	x	x											
	Bi-spectrale analyse van de SWASH berekeningen					x	x	x										
	Verbeteren van de beschrijving van triads en bi-fase									x	x	x	go/nogo					
	Verbeteren van de beschrijving van golfbreken				x	x												
	Implementatie in SWAN												x	x				
	Kalibratie														x	x		
	Vergelijking SWAN met bestaande lab metingen												x					x
	Vergelijken met de MVED metingen																x	x
C - Golfvoortplanting																		
	Inschatting effect diffractie o.b.v. SWASH			x	go/nogo													
	Uitdenken methode diffractie				x	x	go/nogo											
	Inbouwen methode diffractie												x					
	Kalibratie, validatie methode												x					
	Toepassing methode													x				
D - Opzet en golf-stroominteractie																		
	Inschatting effect stroming en verhoogde waterstand			x	go/nogo													
	Inschatting mate opzet							x										
	Advies BOI								x									
	kosten per fase		38.5					142							122.5			



RWS INFORMATIE

7.3 Vervolgstappen

Met het huidige Plan van Aanpak, inclusief de indicatieve planning en kostenraming in de vorige paragrafen, is de verwachting dat op een efficiënte manier toegewerkt kan worden richting de oplossing van de onderschatting van de laagfrequente golfenergie in SWAN. Dit vanwege het iteratieve proces dat binnen dit PvA reeds is doorlopen (van 13 naar 9 naar 5 onderzoeksrichtingen naar uiteindelijk 4 relevante onderzoekssporen), maar ook in het vervolg tot uitdrukking komt in de planning met fasen en go-no-go-momenten. Op deze manier zijn kansrijke en haalbare activiteiten gedefinieerd en geprioriteerd, waarbij niet onnodig lang in een bepaalde richting wordt gelopen.

Voorafgaand aan het opstellen van dit PvA is gesproken met de programmaleiders van Kennis voor Keringen (KvK) en de projectleiders van Meerjarige Veldmetingen Eems-Dollard (Waterschap Noorderzijlvest en HWBP). Vanwege de sterke raakvlakken tussen MVED en (vervolg)onderzoek naar de doordringing van de laagfrequente energie, is destijds besloten om de kosten voor dit onderzoek gelijkmatig te verdelen tussen KvK en MVED.

In verband met het lastige proces rond uitbestedingen, heeft dit uiteindelijk geresulteerd in een aanpak waarbij de kosten voor dit PvA geheel door KvK zijn gefinancierd. De kosten voor een vervolg worden dan voor hetzelfde bedrag eerst door MVED betaald en het restant wordt – vanaf dan – gelijkmatig verdeeld tussen MVED en KvK. Hiermee zou ook aan de wens van HWBP (die MVED financieren) worden voldaan om de financiering door twee partijen te laten plaatsvinden.

Dit PvA zal wederom worden voorgelegd aan KvK en MVED. Indien akkoord wordt gegeven op (een deel van) het plan, kan in 2025 worden gestart. De auteurs van dit PvA zijn graag bereid om hiervoor werkplannen op te stellen en daarin aan te geven wie welke taak op zich neemt en welke producten hierbij horen.

Een koppeling van MVED en KvK voor dit onderzoek wordt nog steeds gezien als zeer kansrijk. De focus ligt op complexe kustsystemen en de Waddenzee is er daar een van. Hier ligt voor MVED de nadruk op. Daarnaast is er aansluiting op de doelstelling van MVED: "MVED heeft als doel om meer kennis en inzichten in de hydraulische belasting rond en op waterkeringen te ontwikkelen. De verworven inzichten kunnen worden gebruikt voor het beter ontwerpen en beoordelen van de waterkeringen in de Nederlandse kustzone. Uiteindelijk zal dit leiden tot meer doelmatigheid, en tot mogelijke kostenbesparingen voor het gehele HWBP, omdat naar verwachting de huidige onzekerheidstoelagen in de hydraulische belastingen kunnen worden gereduceerd". MVED wil dit bereiken door middel van meten en modelleren, om uiteindelijk verbeteringen in de modellen (bijvoorbeeld SWAN) en methoden (voor bijvoorbeeld ophoop en overslag) door te kunnen voeren. De wisselwerking tussen MVED en het beoogde project is groot. Enerzijds is MVED essentieel voor het hier voorgestelde onderzoek, vanwege de unieke meetdataset, en anderzijds leidt de informatiebehoefte in dit onderzoek tot gerichte meetvragen aan MVED. Een verbeterd SWAN-model kan op haar beurt gebruikt worden voor de

hindcasts binnen MVED en uiteindelijk voor een verbeterde kwantificering van de versterkingsbehoefte.

7.4 Aanbevelingen onderzoek buiten huidige PvA

Naast de binnen dit Plan van Aanpak behandelde onderzoeksrichtingen en geprioriteerde onderzoekssporen, zijn er een aantal aspecten die raken aan het huidige project, maar buiten de scope van dit project vallen. Het is van belang dit elders op te pakken. Het gaat hierbij bijvoorbeeld om:

- Het herzien van de offshore-golfrandvoorwaarden voor de zachte kust, gegeven de sterke aanwijzingen dat - ten gevolge van een foute correlatieaannname - de golfperiodes te hoog uitvallen en de steilheden te laag (zie Bottema, 2022b).
- Werken aan een generieke toepassing en een generieke kalibratie voor de SWAN-infragravitygolfmodellering, aangezien deze kalibratie nu nog locatie- en deels ook caseafhankelijk is.
- De problematiek van gootmetingen, die qua golfsteilheid zowel het lage bereik van veldmetingen (infragravitygolven) als het hoge bereik (steile kortkammige jonge golven) niet weten te reproduceren, en daarmee ook een significant deel van het BOI-toepassingsbereik.
- Onzekerheden en variaties in bodemligging op de tijdschalen van een storm [ontgronding], een 12-jaars-BOI-beoordelingscyclus en de langjarige cycli van buitendeltamigratie en de impact van de laatste op golfdoordringing. Dit zijn alle drie zeer relevante schematiseringsgerelateerde kennisvragen voor BOI.

Referenties

Akaawase, B., L. Romero and A. Benetazzo (2024). Directional breaking kinematics observations from 3D stereo reconstruction of ocean waves, submitted to Geophys. Res. Letters.

Akrish, G., A.J.H.M. Reniers, P.B. Smit and M. Zijlema (2024). Quadwave 1D: An optimized quadratic formulation for spectral prediction of coastal waves. *Coast. Eng.*, Vol 191.

Alkyon (2009). SWAN hindcast in the Storm of 9 November 2007 Eastern Wadden Sea and Eems-Dollard estuary. Alkyon report A2191, November 2009 (G.Ph. van Vledder, J. Adema, O. Koop).

Arcadis (2014). Een rekenexperiment voor de Waddenzee, de storm van 5 & 6 december 2013. Arcadis rapport C03041.001941.0100 (Adema, J., Geleynse, N., & Telenta, B.).

Arcadis (2015). Een Rekenexperiment voor de Waddenzee, 4 stormen van 2006, 2007, 2013 en 2014. Arcadis rapport C03041.001941.0200 (Adema, J., Geleynse, N., & Telenta, B.).

Beji S. and J.A. Battjes (1993). Experimental investigation of wave propagation over a bar. *Coast. Eng.*, 19 (1-2), pp. 151-162.

Bottema, M. (2019). Informatiebehoefte WBI-BOI Veldmetingen vanaf 2018, met focus op Wadden en IJsselmeergebied. Rijkswaterstaat rapport, versienummer 2.0, 6 februari 2019.

Bottema, M. (2022a). Relevantie van schuine golfval en kortkammigheid voor golfoverslag, en de representativiteit van golfgootproeven – een quick scan van de literatuur. Rijkswaterstaat rapport, versienummer 3.2, 7 november 2022.

Bottema, M. (2022b). Zijn de WBI-golfperiodes duinen te conservatief? Analyse en oplossingsrichtingen. Rijkswaterstaat memo, 1^e concept, 25 november 2022.

Chawla, A. and J. T. Kirby (1998). Experimental study of wave breaking and blocking on an opposing current. *Proc. 26th Int. Conf. Coastal Eng.*, pp. 759-772.

Chawla, A and J. T. Kirby (2002). Monochromatic and random wave breaking at blocking points. *J. Geophys. Res.* 107(C7), 4.1-4.19.

Deltares (2007a). Sensitivity analysis of SWAN for the Amelande Zeegat. Deltares report H4918.41, September 2007 (A.J. van der Westhuysen and G.Ph. van Vledder).

Deltares (2007b). Evaluation and development of wave-current interaction in SWAN. Deltares report H4918.60, November 2007 (A. J. van der Westhuysen and G. Lesser).

Deltares (2008). Impact of bed level changes during an extreme storm on the wave characteristics at the Frisian dikes. Deltares report H5107.32, November 2008 (A.C.S. Mol, A.P. Luijendijk).

Deltares (2023). Study on low frequency wave penetration in SWAN. Validation of DCTA method. Deltares report 11208057-017-GEO-0003, April 2024 (M. Doeleman and J. Groeneweg).

De Wit, F., M.F.S. Tissier and A.J.H.M. Reniers (2024). Wave-shape evolution from a phase-averaged spectral model. *J. Mar. Sci. Eng.*, 12(6), 944.

Doering, J.C.; Bowen, A.J. Parametrization of orbital velocity asymmetries of shoaling and breaking waves using bispectral analysis. *Coast. Eng.* 1995, 26, 15–33.

Donelan, M.A. (1987). The Effect Of Swell On The Growth Of Wind Waves. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 8(1).

Dusseljee, D., Klopman, G., Van Vledder, G.P., & Riezebos, H.J. (2014, dec). Impact of harbor navigation channels on waves: A numerical modelling guideline. In *Coastal engineering proceedings* (Vol. 1, p. 58). Seoul, Korea: American Society of Civil Engineers. doi: 10.9753/icce.v34.waves.58

Eldeberky, Y.; Battjes, J.A. Phase lock in waves passing over a bar (1994). In Proceedings of the International Symposium: Waves—Physical and Numerical Modeling, Vancouver, BC, Canada, pp. 1086–1095.

Eldeberky (1996). Non-linear wave transformation in the nearshore. PhD thesis, Delft University of Technology.

Groeneweg, J., Van Gent, M.R.A., Van Nieuwkoop, J., & Toledo, Y. (2015). Wave Propagation into Complex Coastal Systems and the Role of Nonlinear Interactions. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 141(5), 04015003. doi: 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000300

Guzman Mardones, C. (2011). *Impact of access channel geometry on wave penetration in harbours* (MSc Thesis, Technische Universiteit Delft). <http://resolver.tudelft.nl/uuid:1ba13e2e-ba4e-4802-9366-92f7fc00bdfa>

Hanson, J.L., & Phillips, O.M. (1999). Wind Sea Growth and Dissipation in the Open Ocean. *Journal of physical oceanography*, 29(8), 1633-1648. https://journals.ametsoc.org/view/journals/phoc/29/8/1520-0485_1999_029_1633_wsgadi_2.0.co_2.xml?tab_body=fulltext-display

Haskoning (2006). Advies locatiekeuze meetpalen Waddenzee. Rapportage Haskoning 9R8673.A0, April 2006 (S. Jacobse, E. Arnold).

Hasselmann, K.; Munk, W.; MacDonald, G. (1963). *Bispectra of Ocean Waves*; Time Series Analysis; Rosenblatt, M., Ed.; Wiley: Hoboken, NJ, USA, pp. 125–139.

Haus, B. K. (2007). Surface current effects on the fetch-limited growth of wave energy. *J. Geoph. Res.*, 112, C03003, doi:10.1029/2006JC003924.

Janssen, T.T., J.A. Battjes and A.R. van Dongeren (2013). Long waves induced by short-wave groups over a sloping bottom, *J. Geophys. Res.*, 108 C(8).

Klein, M.D. en J. Kroon (2011). Productieberekeningen Waddenzee voor WTI-2011: rapportage Fase 1. HKV Lijn in Water / Svasek Hydraulics rapport PR1872.20, mei 2011.

Kroon, J. en M.D. Klein (2011). Productieberekeningen Waddenzee voor WTI-2011: rapportage Fase 2. HKV Lijn in Water / Svasek Hydraulics rapport PR1872.20, mei 2011.

Lashley, C.H., S.N. Jonkman, J. van der Meer, J.D. Bricker and V. Vuik (2022). The influence of infragravity waves on the safety of coastal defences: A case study of the Dutch Wadden Sea. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 22, 1–22.
<https://doi.org/10.5194/nhess-22-1-2022>.

Liu, J. (2009). *Swell propagation in a natural coastal channel in the SWAN model* (MSc Thesis, Technische Universiteit Delft).
<http://resolver.tudelft.nl/uuid:5daeea85-556a-408c-8a70-d3c3498d1ba2>

Magne, R., Belibassakis, K.A., Herbers, T.H.C., Ardhuin, F., O'Reilly, W.C., & Rey, V. (2007, jan). Evolution of surface gravity waves over a submarine canyon. *Journal of Geophysical Research*, 112(C01002), 1–12. doi: 10.1029/2005JC003035

Mitsuyasu, H., & Yoshida, Y. (1991). The Effect of Swell on the Growth of Wind Waves. *Elsevier oceanography series*, 54, 381-392. doi:
[https://doi.org/10.1016/S0422-9894\(08\)70110-7](https://doi.org/10.1016/S0422-9894(08)70110-7)

Mitsuyasu, H., & Yoshida, Y. (2005). Air-Sea Interactions under the Existence of Opposing Swell. *Journal of oceanography*, 61, 141-154.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s10872-005-0027-1>
<https://link.springer.com/article/10.1007/s10872-005-0027-1>

Nwogu, O. (1994). Nonlinear evolution of directional wave spectra in shallow water. 24th International Conf. Coast. Eng., Kobe, Japan.

Oosterlo, P. (2021). *Nearshore waves and related wave overtopping in complex estuaries*. Proefschrift, Technische Universiteit Delft. doi: 10.4233/uuid:884cbc96-ebcd-488a-a820-0daae3962bb1

Reniers, A.J.H.M. and M. Zijlema (2022). SWAN Surfbeat-1D. *Coast. Eng.*, Vol. 172.

Reniers et al. (2024). IG bi-phase parameterization. Manuscript in preparation.

Rijnsdorp, D., Reniers, A., & Zijlema, M. (2021). *Interim report – verification of SWASH in simulating wave propagation at the scale of a tidal inlet* (Technisch Rapport). Delft, Nederland: Technische Universiteit Delft.

Rijnsdorp, D., Reniers, A., & Zijlema, M. (2022). *Validation phase SWASH - Analysis of swell penetration into tidal inlets and the influence of sea level rise* (Technisch Rapport). Delft, Nederland: Technische Universiteit Delft.

Rijnsdorp, D., P.B. Smit and R.T Guza (2022). A non-linear non-dispersive energy balance for surfzone waves: Infragravity wave dynamics on a sloping beach. *J. Fluid Mech.* (2022), vol. 944, A45, doi:10.1017/jfm.2022.512.

Roelvink, J.A., A. Reniers, A. van Dongeren, J. van Thiel de Vries, R. McCall and J. Lescinski (2009). Modeling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Eng.*, 56(11-12), 1133-1152.

Samon, J.E., L.H. Holthuijsen, M. Zijlema, G.Ph. van Vledder and J.D. Pietrzak (2015). Scaling depth-induced wave-breaking in two-dimensional spectral wave models, *Ocean Modeling* 87, pp. 30-47.

Smale, A. (2022). *Afleiding_prop_theta*. Deltares, Delft, Nederland.

Smith, J. Mckee and C.L. Vincent (1992). Shoaling and decay of two wave trains on a beach. *JWPCOE*, Vol 118, issue 5.

Steetzel, H. J., N. Geleynse, J. van Nieuwkoop, V. Vuik, H. van de Brink, G. van Vledder en M. Jansen. Risicoanalyse HR – onderzoeksrapportage Fase C. Rapport C03011.000625, December 2016.

Suastika, I. K. (2004). Wave blocking, Ph.D Thesis. Technical report, Fac. of Civil Engineering, Delft University of Technology.

Svasek (2018). Verkennende studie naar het belang van golfopzet voor WBI2023. Svasek Hydraulics rapport 1917/U17324/B/BE, 16 januari 2018 (B.J.O. Eikema, Y. Attema en H. Talstra).

Van der Reijden, I.M. (2020). *Modelling refraction of waves over tidal channels. A numerical study focusing on the performance of spectral wave models with respect to bottom refraction* (MSc thesis, Technische Universiteit Delft).
<http://resolver.tudelft.nl/uuid:f89e52d0-009d-4a69-9b06-f4216cc065db>

Van Prooijen et al., (2020). Measurements of hydrodynamics, sediment, morphology and benthos on Ameland ebb-tidal delta and lower shoreface, *Earth System Science Data Discussions*, pp. 1-18.

Van der Westhuysen, A.J., A.R. van Dongeren, J. Groeneweg, G.Ph. van Vledder, H. Peters, C. Gautier and J.C.C. van Nieuwkoop (2012). Improvements in spectral wave modelling in tidal inlet seas. *J. Geoph. Res.*, 117, C00J28, doi:10.1029/2011JC007837.

Van der Westhuysen, A.J., M. Zijlema, J.A. Battjes (2007). Nonlinear saturation-based whitecapping dissipation in SWAN for deep and shallow water, *Coastal Engineering*, Volume 54, Issue 2, Pages 151-170, ISSN 0378-3839, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2006.08.006>.

Van Vledder, G. P., & Koop, O. (2009). *Analysis of wave penetration into the Eastern Wadden Sea* (Technisch Rapport A2302). Marknesse, Nederland: Alkyon.

Vincent, C.L., Thomson, J., Graber, H.C., & Collins III, C.O. (2019). Impact of swell on the wind-sea and resulting modulation of stress. *Progress in Oceanography*, 178, 102164. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079661118302209>

Wu, L., Sahlée, E., Nilsson, E., & Ruthersson, A. (2024). A review of surface swell waves and their role in air–sea interactions. *Ocean Modelling*, 102397. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2024.102397>.

Zijlema, M. (2020). *On grid dependence of refraction in SWAN*. Delft, Nederland.

Zijlema, M. (2023). *The role of triad and biphasic on the penetration of low-frequency waves in tidal inlets (Memo)*. Delft, Nederland: Technische Universiteit Delft.

Zijlema, M. (2024). *Swan manual, SWAN*,
<https://swanmodel.sourceforge.io/download/download.htm>

Bijlage A: Detailuitwerking ondiepwaterfysica in een richtingsgespreid golfveld

A.1 Inleiding

De uitwerking van het onderwerp "ondiepwaterfysica in een richtingsgespreid golfveld" (paragraaf 4.3) is uitgewerkt in een aantal deelonderwerpen (triads, bifase en dieptegeïmiteerd breken). Deze nadere uitwerking is onderstaand in deze bijlage gepresenteerd en in de hoofdttekst wordt een samenvatting gepresenteerd.

Met ondiepwaterfysica worden hier de brontermen bedoeld in de actiebalansvergelijking, die dominant zijn in ondiepe gebieden. Dit zijn dieptegeïnduceerde golfbreking, driegolfwisselwerkingen (triads), bodemwrijving en Braggverspreiding (scatter)². Hier worden andere brontermen dus verwaarloosd. In eerdere studies zijn deze processen veelvuldig genoemd als mogelijke oorzaken voor de onderschatting van lange golven (WTI 2011; Groeneweg et al., 2015; Oosterlo, 2021).

Om het onderwerp van ondiepwaterfysica in een richtingsgespreid golfveld toe te lichten, wordt de eendimensionale golfenergievergelijking voor stationaire condities geïntroduceerd, gegeven door:

$$\frac{dE(f, \theta, x)c_{g,x}(f, \theta, x)}{dx} + \frac{dE(f, \theta, x)c_{\theta}(f, \theta, x)}{d\theta} = S_{nl3}(f, \theta, x) + S_{break}(f, \theta, x) + S_{fric}(f, \theta, x)$$

waarbij $E(f, \theta, x)$ de variantiedichtheid is als functie van frequentie f en richting θ , met x de afstand loodrecht op de kust en $c_{g,x}$ als de groepsnelheid in de x -richting. De linkerkant van de vergelijking beschrijft de refractie en shoaling van de golven. De rechterkant correspondeert met de triads, S_{nl3} , de dissipatie van golfenergie door dieptegeïmiteerd breken, S_{break} en dissipatie door bodemwrijving S_{fric} .

Het kernprobleem is dat deze processen grotendeels gezamenlijk optreden (dit geldt vooral voor dieptegeïnduceerde golfbreking en triads), sterk niet-lineair van karakter zijn (en daarmee inconsistent met de fundamentele uitgangspunten van SWAN) en daardoor onderling afhankelijk. Verbeteringen in de formulering van een proces, zullen daardoor altijd in samenhang met andere formuleringen moeten worden bekeken. Daarbij komt dat een aantal processen zich moeilijk laat beschrijven in lokale integrale spectrale parameters door afhankelijkheid van de evolutie in tijd en ruimte van specifieke golfcomponenten.

Tot slot speelt dat fysische formulering van deze processen sterk leunt op kennis op basis van golfgootmetingen. Deze metingen bieden de mogelijkheid om op systematische wijze de invloed van deze processen voor een scala aan omstandigheden te beschrijven in een gecontroleerde omgeving. Een belangrijke tekortkoming van deze aanpak, is het ontbreken van de invloed van richtingsverspreiding en ontbreken van windforcering. Recentelijk is aannemelijk gemaakt dat deze omissie een belangrijke bron van onzekerheden is (Salmon et al., 2015; Bottema, 2022).

² Braggverspreiding wordt separaat beschouwd in paragraaf 4.7 en daarom in deze paragraaf verder buiten beschouwing gelaten.

In onderstaande paragrafen worden de stand van zaken en voorgestelde verbeteringen voor de belangrijkste processen afzonderlijk beschreven.

A.2 Triads

A.2.1 Beschrijving

Triads (driegolfwisselwerkingen) zorgen voor een uitwisseling van de energie binnen het spectrum, waarbij energie van de zogenoemde primaire golven naar de (gebonden) secundaire golven gaat. Karakteristieke observaties die hiermee geassocieerd worden, zijn:

- Herverdeling van energie zonder netto toe- of afname;
- Het ontstaan van een toename van energie bij golven met een tweemaal hogere of lagere frequentie dan de piekfrequentie;
- Het (dieper in de brandingszone) verdwijnen van pieken in het spectrum en convergentie met een graduele vorm van het spectrum;
- Interacties tussen golven met een ongelijke richting;
- Een toename van energie-uitwisseling in ondieper water (geassocieerd met niet-dispersiviteit van de betrokken golfcomponenten);
- Het (grotendeels) gezamenlijk optreden met dieptegelimiteerd breken.

Het fysische proces wordt beschreven in termen van resonante interacties tussen drie golven (uitgedrukt in het golfgetal \bar{k}_i , een functie van frequentie, richting en plaats), die in ondiep water tot significante onderlinge uitwisseling van energie leiden. Omdat in water van eindige diepte op grond van lineaire golftheorie geen exacte resonantie kan optreden, wordt in de praktijk het probleem gedefinieerd als quasi-resonantie, waarbij een kleine mismatch wordt toegestaan. Een secundaire golf is daarmee een of andere functie van de eerste twee primaire en een mismatch Δk ,

$$\bar{k}_3 = f(\bar{k}_1, \bar{k}_2, \Delta k)$$

waardoor de algemene vorm van de brontermformulering is:

$$S_{nl3}(\bar{k}_1, \bar{k}_2, x) = \iiint^{\bar{k}_1, \bar{k}_2} f(\bar{k}_1, \bar{k}_2, \bar{k}_3) d\bar{k}_1 d\bar{k}_2$$

Omdat de fase van golven bij dit proces van belang is (zie onderstaande paragraaf over de bifase), zijn de basisvergelijkingen van een fasegemiddeld spectraal golfmodel (zoals bijvoorbeeld SWAN) onvoldoende om de overdracht tussen golven te berekenen. De fasegemiddelde effecten van triads zijn echter (met wisselend succes) geparametriseerd aan dit type modellen toegevoegd.

Op het ogenblik zijn er vier alternatieven in SWAN om de driegolfwisselwerkingen in het zee-deiningspectrum uit te rekenen, de SPB-methode, de DCTA, de LTA (en de FTIM).

LTA

In het meest simpele geval, de LTA, kan dat beschreven worden als :

$$S_{nl3}(2f_p, \theta) = \alpha c_{g,p} c_p R^2 \left[E_{f_p, \theta} E_{f_p, \theta} - 2E_{f_p, \theta} E_{2f_p, \theta} \right] \sin(\beta)$$

met de golfenergie bij frequentie f_p en hoek θ : $E_{f_p, \theta}$, groepssnelheid $c_{g,p}$, fase snelheid c_p , interactiecoëfficiënt R^2 , kalibratiecoëfficiënt α en bifase β .

De LTA beschrijft de interactie tussen golven en hun eerste hogere harmonische. Interacties met lagere harmonische en niet-harmonische golven ontbreken, alsmede niet-collineaire interacties.

FTIM

Het Full Triad Interaction Model (FITM) is een uitbreiding van de LTA, gebaseerd op het werk van Eldeberky (1996) en beschouwt naast de zelfinteracties van de LTA alle som- en verschilinteracties in een gegeven richting (Zijlema, 2024):

$$S_{nl3}(f_p) = 2 \alpha_{FTIM} c_{g,p} \left[\sum_{m=1}^{p-1} R_{(m,p-m)} \frac{\Delta f_m}{|k_{p-m} + k_m - k_p|} Q(f_m, f_{p-m}) \sin(-\beta_{m,p-m}) - 2 \sum_{m=1}^{\infty} R_{(p+m,-m)} \frac{\Delta f_m}{|k_p + k_m - k_{p+m}|} Q(f_m, f_p) \sin(-\beta_{m,p}) \right]$$

met verschillende interactiecoëfficiënten voor de som- en verschilinteracties en de bijbehorende bifasen. De interactie hangt verder af van de variantiedichtheid in de betrokken frequenties, gegeven de richting, weergegeven door Q . Interacties tussen componenten uit verschillende richtingen zijn hier dus nog niet in meegenomen.

DCTA

De DCTA is een heuristische formulering van triad-interacties met twee belangrijke kenmerken: het beschouwen van een uitgebreide verzameling van interacties tussen discrete spectrale componenten en het relaxeren naar een spectrale evenwichtsvorm.

$$S_{nl3}(f_p, \theta_p) = \alpha d^{-2} \hat{k}^{1-n} \sin(\beta) \int^{f_q} \int^{\theta_q} D^2 G^2 [\sigma_q c_{g,q} k_q^n N_r N_q - \sigma_p c_{g,p} k_p^n N_r N_p]$$

Met waterdiepte d , (triad)gemiddeld golfgetal \hat{k} , macht van het evenwichtsspectrum $1/n$, golfhoekfrequentie σ en golfactie N .

Het toevoegen van verschilinteracties, hogere niet-harmonische en niet-collineaire interacties biedt in aanleg de mogelijkheid om de fysische processen nauwkeuriger te beschrijven. Een belangrijk nadeel is de schaling van de sterkte van interacties die slechts losjes is gebaseerd op fysische principes.

SPB

De SPB-methode in SWAN is qua functionaliteit vergelijkbaar met de FTIM (zie hierboven) maar maakt in plaats van de bifase gebruik van een relaxatieterm K om de triadbronterm uit te rekenen:

$$S_{nl3}(f_p) = 2 \alpha_{SPB} K c_{g,p} \left[\sum_{m=1}^{p-1} R_{(m,p-m)} \frac{\Delta f_m}{\Delta k_{m,p-m}^2 + K^2} Q(f_m, f_{p-m}) - 2 \sum_{m=1}^{\infty} R_{(p+m,-m)} \frac{\Delta f_m}{\Delta k_{m,p}^2 + K^2} Q(f_m, f_p) \right]$$

De ideale fysische formulering voor triad-interacties is compleet (d.w.z. beschouwt alle relevante interacties), vereist beperkt rekenkracht, is gebaseerd op fysische uitgangspunten en reproduceert een groot bereik van beschikbare metingen.

De LTA beschouwt daarvoor in de huidige implementatie te weinig relevante interacties. Deze beperking is niet aanwezig voor de FTIM, waarbij alle som- en verschilinteracties voor een gegeven richting worden meegenomen. De rekentijd is langer dan de LTA, maar door numerieke optimalisatie toch beperkt en daarmee vergelijkbaar met de DCTA. Het voordeel van deze methode is de op fysica gebaseerde schaling van de verschil en sominteracties.

De SPB heeft als nadelen dat de rekentijd erg lang is vergeleken met de andere formuleringen, door het grote aantal benodigde iteraties en dat de berekeningen niet convergeren. Verder is de relaxatieparameter geen direct meetbare grootheid wat de benodigde kalibratie in de weg staat (zie de Wit et al., 2024).

De DCTA scoort goed op de vereiste som- en verschilinteracties en de rekentijd, zeker omdat het de enige formulering is inclusief niet-collineaire interacties. Ook kalibratie, waarbij onderscheid tussen het sub- en super harmonische deel wordt gemaakt, wordt als een kansrijke verbetering gezien. Zoals eerder opgemerkt is de schaling een aandachtspunt.

Een belangrijke omissie in de verbetering en verificatie van de diverse formuleringen is een systematische vergelijking met metingen en niet-hydrostatische berekeningen inclusief richtingsverspreiding.

Als daarbij ook de schaling gebaseerd kan worden op meer fysische uitgangspunten (zie o.a. de bifase in de volgende paragraaf) is dit een goede kandidaat voor een significante verbetering van de voorspelling van laagfrequente golven in de Waddenzee.

A.2.2 *Grove schets van de uit te voeren stappen*

We nemen de ontwikkeling van de DCTA als uitgangspunt. Er zijn een aantal wensen:

1. Een op fysica gebaseerde schaling, inclusief het effect van richtingsverspreiding;
2. Een systematische vergelijking met metingen en/of modelresultaten onder geïdealiseerde omstandigheden;
3. Validatie met realistische (veld)metingen.

Voor de eerste stap wordt voorgesteld om gebruik te maken van een combinatie van FITM en DCTA om een verbeterde schaling van de interacties in de DCTA te verkrijgen. Dit is mogelijk omdat beide formuleringen gebruik maken van de bifase en alle som- en verschilinteracties meenemen. Met een correcte schaling heeft de DCTA als voordeel dat ook niet-collineaire interacties meegenomen kunnen worden. Hoewel de schaling in FTIM wel een fysische onderbouwing heeft, is het nog steeds van belang deze te verifiëren aan de hand van metingen en niet-hydrostatische berekeningen zoals beschreven door Akrish et al. (2024).

Voor de tweede stap wordt voorgesteld om een systematische vergelijking met SWASH-modelresultaten uit te voeren. In deze simulaties wordt voor een groot bereik aan geïdealiseerde situaties (golfrandvoorwaarden, waterstanden, bodemverloop) het verloop van de sterkte van golfbreking en de mate van uitwisseling (of de balans analoog aan Rijnsdorp et al., 2022) berekend en vergeleken met die in de DCTA en FTIM. Bij voorkeur worden ook de bispectra

berekend, hetgeen strenge eisen aan de lengte van de simulaties en de omvang van de modeluitvoer stelt. Het voorstel is om dit zowel voor situaties zonder als met richtingsverspreiding te doen, door (lateraal) cyclische randvoorwaarden in de berekeningen toe te passen. In de SWASH-berekeningen worden de resultaten gereproduceerd van De Wit et al. (2024) (1D) en de labmetingen van Smith and Vincent (1992) (1D), Beji-Battjes (1992) (1D) en Nwogu (1994) (2D), vanwege hun rol in de ontwikkeling van de bestaande triadformuleringen.

Voor de derde stap wordt begonnen met een verzameling aanleggen van bestaande metingen van golfcondities in golfbassins (2D). De ambitie is hierbij om een grote variatie van golfcondities (uni- en bimodaal, steilheid, richtingsverspreiding) en bodemverlopen (vlak, constante helling met verschillende hoek, onregelmatig) te verzamelen. Tot slot worden de metingen van MVED gebruikt voor validatie van de nieuwe inzichten in meer realistische situaties.

A.2.3 Inschatting van de criteria

Criteria	Score	Toelichting
1. Verbetering modelresultaten	Hoog	Een systematische vergelijking met model/en rekenresultaten levert (in het slechtste geval) een betere kalibratie op en daarmee een verbetering van de modelresultaten.
2. Verbetering fysica	Hoog	Naar verwachting levert het ook een verbeterde formulering op waarmee nog grotere verbeteringen te verwachten zijn.
3. Rekeningtijd	Midden	Het uitvoeren van SWASH-berekeningen vraagt enige rekeningtijd. Gezien de noodzaak om ook naar de evolutie van het spectrum te kijken, en de daaruit volgende vereiste om hogereordespectra te beschouwen, zijn lange simulaties vereist.
4. Doorlooptijd	Midden	Het verzamelen van metingen vraagt enige tijd.
5. Implementatie modellen	Hoog	Bepoort, alleen in geval van nieuwe fysica/schaling vraagt dit enige inspanning.
6. Kosten	Hoog	Modelberekeningen zijn relatief goedkoop, geen noodzaak voor aanvullende veldmetingen.

A.3 Bifase

A.3.1 Beschrijving

Bestaande bifaseparametrisaties die in SWAN gebruikt worden, zijn Doering & Bowen (1995) en Eldeberky & Battjes (1996). De eerste set is afgeleid op basis van veldmetingen en de tweede op basis van laboratoriumproeven. In beide gevallen wordt de bifase gegeven als functie van het Ursellgetal:

$$\beta = \frac{\pi}{2} \tanh\left(\frac{U_{r,c}}{U_r}\right) - \frac{\pi}{2}$$

met het Ursellgetal, U_r , als een maat voor de niet-lineariteit van een golf:

$$U_r = \frac{gH}{8\sqrt{2}} \left(\frac{T_{m,01}}{\pi d}\right)^2$$

en $U_{r,c}$ een kalibratieparameter. Deze parametrisaties zijn gebaseerd op bifases verkregen uit het bispectrum van de gemeten oppervlakte-uitwijking (Hasselmann et al., 1963):

$$B(f_m, f_n) = \frac{\varepsilon [C_m C_n C_p^*]}{\Delta f^2}$$

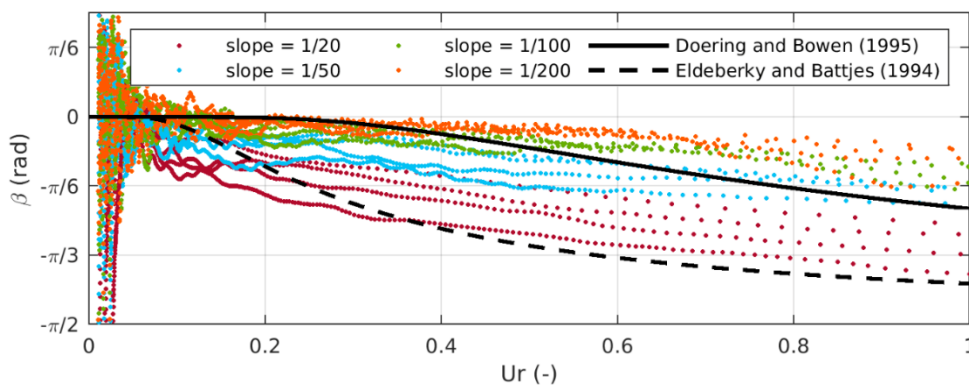
met C als de complexe amplitude en C^* als de complex geconjugeerde, Δf als de frequentieresolutie en ε als de verwachte waarde. De subscripten refereren aan de discrete frequenties in het amplitudespectrum. In het voorgaande geval van de zelfinteracties resulteert dit in:

$$B(f_p, f_p) = \frac{E[C_p C_p C_{2p}^*]}{\Delta f^2}$$

De bijbehorende bifase is gegeven door:

$$\beta(f_p, f_p) = \text{atan} \left(\frac{\text{Im}\{B(f_p, f_p)\}}{\text{Re}\{B(f_p, f_p)\}} \right)$$

Dit is dus een fysische parameter die geverifieerd kan worden op basis van metingen. Recent onderzoek laat zien dat de parametrisaties van de bifase in SWAN op basis van zowel Doering and Bowen (1995) alsook Eldeberky & Battjes (1996) niet goed overeenkomen met de gemeten bifase of SWASH-simulaties van onregelmatige golven op een constant talud (zie Figuur A.1). Dit heeft als gevolg dat er een grote variatie wordt gevonden in de kalibratieparameters $U_{r,c}$ en α en daarmee β afhankelijk van de golfcondities en de bodemhelling, wat uiteraard onwenselijk is voor een robuuste voorspelling van de driegolfwisselwerkingen.



Figuur A.1: Geschatte bifase uit SWASH-simulaties met verschillende piekperiodes en bodemhellingen (punten) vergeleken met de bestaande parametrisaties in SWAN (zwarte lijnen) als functie van het Ursellgetal (uit De Wit et al., 2024).

Op basis van de SWASH-resultaten van De Wit et al. (2024) is een eerste aanpassing gemaakt van bifaseschatting, waarbij het effect van de bodemhelling is meegenomen. Het is belangrijk op te merken dat de gebruikte bifaseparametrisaties zijn beperkt tot het spectrum van de zegang en deining en dat ze niet gebruikt kunnen worden voor de langere infragravitygolven. Verder is de invloed van richtingsverspreiding in het golfveld niet meegenomen, waarvan bekend is dat het een significante invloed heeft op de bifase voor zowel de zegang en deining alsmede de infragravitygolven (zie ook 3.3.4).

Er is duidelijk behoefte aan een betere schatting voor de bifase. Dit geldt zowel voor de shoalingzone als de brekerzone. In de shoalingzone kan een hellingsafhankelijke schatter afgeleid worden op basis van de evolutievergelijking van de bifase. Voor de loodrecht invallende infragravitygolven is dit reeds gedaan (Janssen et al., 2013) met een recente uitbreiding voor het geval van richtingsverspreiding in het golfveld (Reniers et al., 2024, in prep.). Een vergelijkbare aanpak is mogelijk voor de driegolfwisselwerkingen in het zeegang-/deiningsdomein door gebruik te maken van een toegespitste evolutievergelijking voor de bifase. In ondieper water, waar de driegolfwisselwerkingen resonant worden, is dit niet langer het geval. Er zijn dan twee opties. De eerste optie is de gekoppelde evolutievergelijking voor de bifase op te lossen (e.g. Reniers & Zijlema, 2023) wat beduidend meer rekenkracht vergt. Als alternatief kan een lokale parametrisatie afgeleid worden voor de brandingszone met een systematische vergelijking met metingen.

Voorwaarde voor de parametrisaties is de beschikbaarheid van een uitgebreide dataset met een representatieve variatie van de golfcondities, gedefinieerd door het richtingsverspreidingspectrum van de zeegang en deining over variabele bodemtopografie. Denk hierbij ook aan multimodale spectra, zowel in richting als frequentie. Dergelijke meetdata zijn zeer gelimiteerd en als alternatief zou een database van SWASH-simulaties geconstrueerd kunnen worden om de bifases af te schatten voor relevante condities. Dit is een significante uitbreiding van het werk dat gepresenteerd is door De Wit et al. (2024), vooral vanwege de toevoeging van de richtingsverspreiding, waarvoor een 3D-domein nodig is in plaats van een profielmodel. Deze dataset kan ook gebruikt worden om de verschillende formuleringen voor de driegolfwisselwerkingen, gebaseerd op de bifase (LTA, DCTA, FTIM), te verifiëren, verbeteren en te kalibreren (zie ook de vorige paragraaf).

Een belangrijk punt van aandacht hierbij, is de verificatie en validatie van SWASH in zeegaten. Een eerste aanzet hiervoor is gegeven door Rijnsdorp, Reniers, & Zijlema (2022) op basis van de SEAWAD-waarnemingen in het Amelanders Zeegat (Van Prooijen et al., 2020).

A.3.2 *Grove schets van de uit te voeren stappen*

Er is een aantal stappen te onderscheiden voor het verbeteren van de schatting van de bifase.

- In het geval van niet-resonante triadinteracties voor de zeegang en deining kan dit afgeleid worden van de evolutievergelijking (voor IG-triads is dit reeds beschikbaar). Als alternatief kan hier ook een vereenvoudigde parametrisatie afgeleid worden, zoals voor de condities nabij resonantie zoals hieronder beschreven.
- Voor condities dichtbij resonantie in ondiep water moet een aparte parametrisatie komen voor zowel de IG als de zeegang en deining. Dit kan op basis van machine learning. Hiervoor zijn een groot aantal SWASH-simulaties met variatie in forcering, bathymetrie en richtingsverspreiding nodig.
- Om SWASH als benchmark te gebruiken, is er een uitgebreide vergelijking nodig met veldmetingen, met de nadruk op de evolutie van de richtingsverspreidingspectra in zeegaten.

A.3.3 *Inschatting van de criteria*

Criteria	Score	Toelichting
----------	-------	-------------

1. Verbetering modelresultaten	Hoog	De bifase is sturend in de overdracht van energie naar andere frequenties en verbreedt het spectrum met name in ondiep water. Daarmee heeft het direct invloed op de doordringing van laagfrequente energie door deining en IG.
2. Verbetering fysica	Midden/Hoog	In het geval van een vereenvoudigde parametrisatie wordt geen fysica toegevoegd, de implementatie wordt echter sterk verbeterd. In het geval van een lokale benadering van de evolutievergelijking wordt de fysica verbeterd door rekening te houden met de individuele triadcomponenten.
3. Rekeningtijd	Hoog	De lokale benadering en de parameterisaties hebben weinig tot geen invloed op de rekeningtijd en in het geval van SWAN SurfBeat zal het juist leiden tot kortere rekeningtijden.
4. Doorlooptijd	Hoog/Laag	Hoewel het afleiden van de bifasebeschrijvingen in relatief korte tijd kan gebeuren, vereisen de SWASH-verificatie en benchmarksommen inclusief analyse meer tijd. Dat geldt met name in het geval van zeegaten waarbij de bathymetrie complex is. Hier is uiteraard wel een keuze in te maken, bijvoorbeeld met een getrapte aanpak, door te beginnen met minder complexe situaties.
5. Implementatie modellen	Hoog	De implementatie in SWAN is een uitbreiding van bestaande bifaseparametrisaties, dus de structuur is reeds aanwezig. Toepassing van SWASH in zeegaten is reeds met succes eerder gedaan.
6. Kosten	Midden	Metingen in zeegaten zijn reeds beschikbaar voor de verificatie/validatie van SWASH en SWAN. De eerste vergelijkingen met de metingen zijn positief. De kosten voor de SWASH-benchmarksommen en bijbehorende analyse hangen sterk af van het modeldomein.

A.4 Dieptegelimiteerd breken

A.4.1 Beschrijving

Het belang van golfbreken in een golfveld met richtingspreiding wordt besproken in Salmon et al. (2015), waarbij de dissipatie door dieptegelimiteerd breken wordt gegeven door:

$$S_{break}(f, K_\theta) = -\frac{1}{4} K_\theta \alpha_{BJ} \bar{f} Q_b \rho g H_{max}^2 \frac{E(f, K_\theta)}{E_{tot}}$$

met het aantal partities gegeven door:

$$K_\theta = \frac{\sigma_\theta}{\sigma_\theta^*}$$

waarbij σ_θ^* een referentiewaarde is voor de richtingspreiding van een deiningsspectrum:

$$\frac{1 - Q_b}{\ln Q_b} = - \left(\frac{H_{rms} / \sqrt{K_\theta}}{H_{max}} \right)^2$$

Het idee achter de partitie, is het feit dat het 1D-rollerdissipatiemodel dat ten grondslag ligt aan de probabilistische golfdissipatiemodellen niet representatief is voor golven met een grote richtingspreiding. In het laatste geval, zal de interferentie tussen de golven leiden tot kleinere verhoudingen tussen de snelheid van de golftop en de fasesnelheid en dus lokaal minder breken, en daarmee een onderschatting van de golfhoogte door modellen die uitgaan van 1D-rollerdissipatie. Dit zal met name van belang zijn op zandbanken en ebb-tidaldelta's, waar een deel van de golfenergie doordringt in het bekken. Salmon et al. (2015) laten zien dat voor het Amelander Zeegat zowel de bias als de scatter in de voorspelde golfhoogte significant afnemen als de richtingspartitie wordt meegenomen, resulterend in een sterkere doordringing van de golven in de Waddenzee (zie Figuur A.2). Deze resultaten zijn verkregen met een heuristische aanpak, waarbij de partitionering als kalibratie is gebruikt. Recent onderzoek naar whitecapping laat zien dat ook hier de richtingspreiding belangrijk is in de ontwikkeling van het spectrum (Akaawase et al., 2024). Dit kan wellicht gebruikt worden voor een betere fysieke onderbouwing van het richtingspreidingseffect in dieptegelimiteerd breken.

WAVE BREAKING PARAMETERIZATION							
Scatter index	#	BJ		Rue		$\beta - kd$	
		no correction		$\sigma_\theta = 15^\circ$	$\sigma_\theta = 25^\circ$	$\sigma_\theta = 25^\circ$	
SLOPE DATA SETS							
Slopes							
Wallingford*	25	0.08	0.09	0.11	(0.11)	(0.08)	(0.09)
Katsardi*	7	0.14	0.15	0.12	(0.12)	(0.14)	(0.15)
Smith*	31	0.08	0.10	0.07	(0.07)	(0.08)	(0.10)
Boers*	3	0.05	0.07	0.07	(0.07)	(0.05)	(0.07)
B-J*	2	0.05	0.07	0.10	(0.10)	(0.05)	(0.07)
Petten**	8	0.15	0.13	0.20	0.15	0.15	0.13
HORIZONTAL DATA SETS							
Horizontal							
Wallingford*	25	0.08	0.08	0.08	(0.08)	(0.08)	(0.08)
Katsardi*	5	0.10	0.11	0.05	(0.05)	(0.10)	(0.11)
Jessop*	25	0.21	0.26	0.08	(0.08)	(0.21)	(0.26)
AZG**	3	0.16	0.14	0.23	0.08	0.09	0.09
Osam	4	0.36	0.29	0.26	0.21	0.36	0.29
Haringvliet**	3	0.17	0.20	0.16	0.12	0.18	0.21
Lakes	5	0.76	0.02	0.02	0.05	0.12	0.05
AVERAGES							
slopes							
76		0.09	0.10	0.11	0.10	0.09	0.10
horizontal							
65		0.18	0.18	0.15	0.12	0.17	0.17
123		0.10	0.12	0.09	(0.09)	(0.10)	(0.12)
laboratory*							
18		0.21	0.19	0.22	0.16	0.19	0.18
field**							
141		0.14	0.14	0.13	0.11	0.13	0.14
		s.i.<0.10		0.10<s.i.<0.20		s.i.>0.20	

WAVE BREAKING PARAMETERIZATION							
Relative bias	#	BJ		Rue		$\beta - kd$	
		no correction		$\sigma_\theta = 15^\circ$	$\sigma_\theta = 25^\circ$	$\sigma_\theta = 25^\circ$	
SLOPE DATA SETS							
Slopes							
Wallingford*	25	0.06	0.07	0.08	(0.08)	(0.06)	(0.07)
Katsardi*	7	0.12	0.13	0.07	(0.07)	(0.12)	(0.13)
Smith*	31	0.00	0.04	0.04	(0.04)	(0.00)	(0.04)
Boers*	3	-0.02	-0.01	-0.04	(-0.04)	(-0.02)	(-0.01)
B-J*	2	0.00	0.03	0.07	(0.07)	(0.00)	(0.03)
Petten**	8	0.01	-0.01	-0.07	0.03	0.02	-0.01
HORIZONTAL DATA SETS							
Horizontal							
Wallingford*	25	0.04	0.05	-0.01	(-0.01)	(0.04)	(0.05)
Katsardi*	5	0.09	0.10	0.01	(0.01)	(0.09)	(0.10)
Jessop*	25	0.18	0.23	0.05	(0.05)	(0.18)	(0.23)
AZG**	3	-0.12	-0.08	-0.15	-0.04	-0.05	-0.03
Osam	4	-0.21	-0.12	-0.03	0.02	-0.19	-0.10
Haringvliet**	3	0.14	0.17	-0.07	0.09	0.15	0.18
Lakes	5	-0.76	0.01	-0.01	0.04	-0.12	0.05
AVERAGES							
slopes							
76		0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04
horizontal							
65		0.02	0.06	-0.04	0.02	0.04	0.07
123		0.06	0.08	0.03	(0.03)	(0.06)	(0.08)
laboratory*							
18		-0.04	-0.01	-0.08	0.02	-0.02	0.01
field**							
141		0.02	0.05	-0.02	0.02	0.03	0.06
		rel. bias > 0.10		rel. bias < 0.10			

Figuur A.2: Scatter index (links) en bias (rechts) voor verschillende datasets (figuren 10 en 11 uit Salmon et al., 2015). Resultaten voor het Amelander Zeegat (AZG) zijn aangegeven door de horizontale rode balk.

Ook hier kunnen de SWASH-simulaties gebruikt worden om inzicht te krijgen in het breken van richtingsgespreide golven, juist in combinatie met driegolfwisselwerkingen en de bijbehorende frequentieafhankelijkheid van de dissipatie. In de huidige opzet zijn de dissipatiefrequentie en richtingsonafhankelijk, hoewel er aanwijzingen zijn dat dat niet het geval hoeft te zijn. Veldmetingen van de transformatie van frequentie-richtingspreidingspectra zijn hierbij van groot belang, ter verificatie van de SWASH-simulaties.

A.4.2 *Grove schets van de uit te voeren stappen*

De eerste stap betreft het generaliseren van de richtingsafhankelijke golfdissipatie door breken, zoals beschreven door Salmon et al. (2015), door een betere fysische onderbouwing. De tweede stap is de verificatie op basis van SWASH-benchmarksommen.

A.4.3 *Inschatting van de criteria*

Criteria	Score	Toelichting
1. Verbetering modelresultaten	Hoog	Recent onderzoek op diep water alsmede verkennende berekeningen geven aan dat richtingsafhankelijke golfdissipatie belangrijk is voor de spectrale ontwikkeling en doordringing in zeegaten
2. Verbetering fysica	Hoog	De huidige heuristische beschrijving wordt vervangen door een generieke beschrijving of basis van fysica.
3. Rekentijd	Hoog	De verwachting is dat de implementatie niet zal leiden tot langere reketijden in SWAN.
4. Doorlooptijd	Hoog/Laag	Door gebruik te maken van recent onderzoek in de rol van richtings spreiding in whitecapping blijft de doorlooptijd beperkt. De vereiste SWASH-benchmarksimulaties en bijbehorende analyse vragen wel een significante inspanning
5. Implementatie modellen	Hoog	De implementatie in SWAN is een uitbreiding van bestaande heuristische beschrijving.
6. Kosten	Midden	Ook hier zijn metingen in zeegaten reeds beschikbaar voor de verificatie/validatie van SWASH en SWAN. De eerste vergelijkingen met de metingen zijn positief. De kosten voor de SWASH-benchmarksommen en bijbehorende analyse hangen sterk af van het modeldomein.