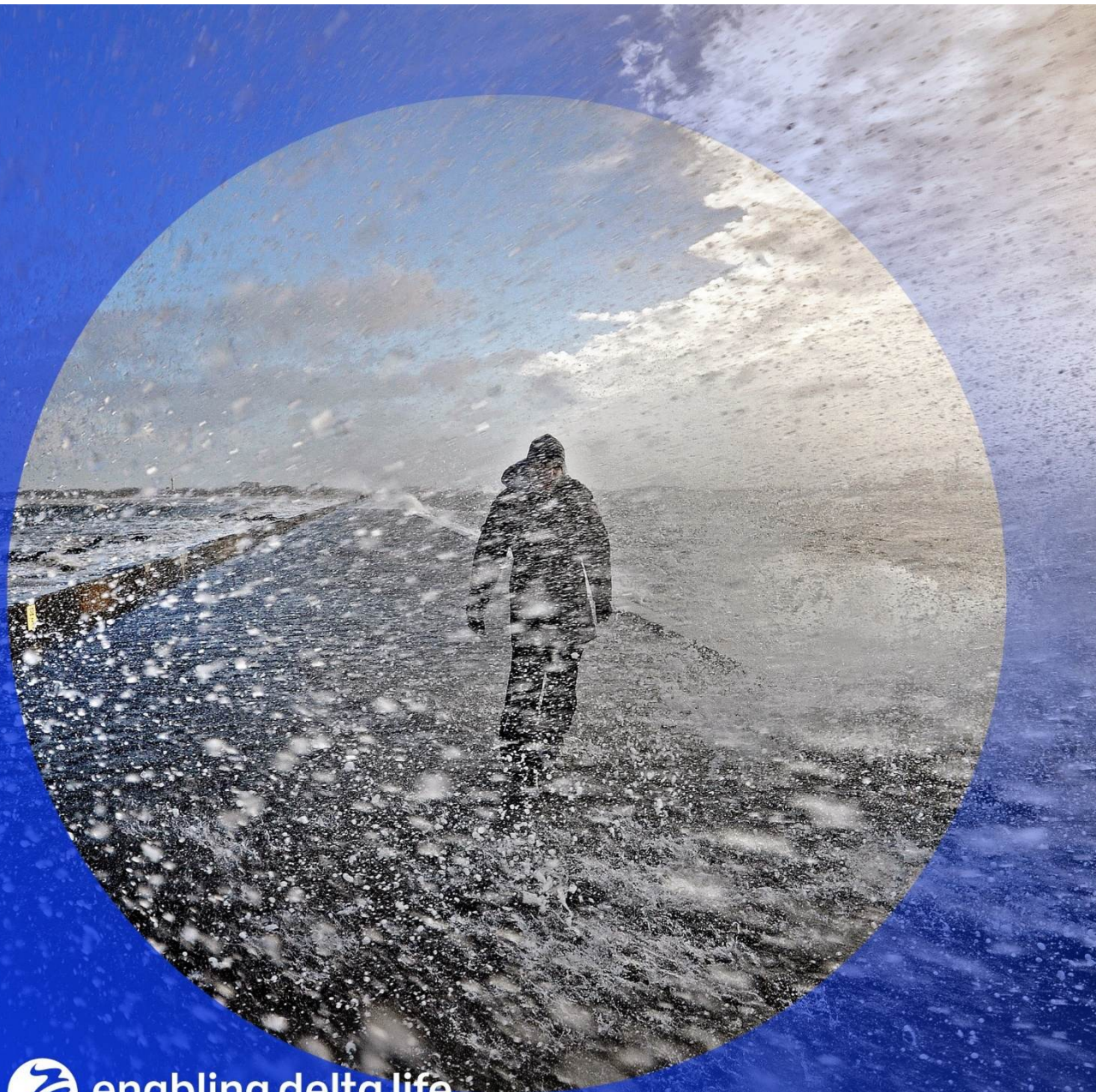


SWAN-model Grevelingen

t.b.v. BOI2023



SWAN-model Grevelingen
t.b.v. BOI2023

Auteur(s)

Madelief Doeleman
Joana van Nieuwkoop

SWAN-model Grevelingen

t.b.v. BOI2023

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	de heer M. Scholten
Referenties	Plan van Aanpak KPP 2021 project; MA07ab 2021 - Hydraulica schematisaties - zoet en zout
Trefwoorden	golven, modelschematisatie, SWAN, Grevelingen, BOI

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	07-10-2021
Projectnummer	11206814-006
Document ID	11206814-006-ZKS-0003
Pagina's	64
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Madelief Doeleman	
	Joana van Nieuwkoop	

Samenvatting

Dit rapport beschrijft de modelopzet van een SWAN-model voor het Grevelingenmeer, ook wel de Grevelingen genoemd. De SWAN modelschematisatie heet voorlopig swan-grevelingen-j19_6-v1a. Pas als de voorlopige uitvoerlocaties vervangen zijn door een definitieve set, waar momenteel een externe partij mee bezig is, zal het model de naam swan-grevelingen-hr2023 krijgen en geschikt zijn voor het uitvoeren van BOI-productieberekeningen.

Op basis van gevoeligheidstests met diverse roosters hebben wij gekozen voor een rechthoekig rekenrooster bestaande uit vierkante cellen met een roosterafstand van 20 m. De richtingsresolutie bedraagt 5° en bestaat uit 72 bins. Het model maakt gebruik van SWAN-versie 41.31A.1 en gebruikt de generieke instellingen zoals aanbevolen in Deltares (2020, 2021a). De wind en waterstand worden uniform over het hele domein verondersteld.

Er zijn zestien testberekeningen uitgevoerd voor de combinaties van hoge en lage windsnelheid (37 m/s en 10 m/s), hoge en lage waterstand (NAP+2 m en NAP-0.5 m) en vier windrichtingen (67.5°N, 180°N, 270°N, 337.5°N). De berekeningen hebben geen opvallende zaken aan het licht gebracht. Ons advies is om een maximum van 100 iteraties aan te houden en daarbij te controleren of de convergentie in het interessegebied en op de uitvoerlocaties in orde is.

Er zijn geen relevante metingen beschikbaar om het model te valideren. De resultaten zien er logisch uit en vertonen geen onvolkomenheden. Het model is – afgezien van de uitvoerlocaties – geschikt om in te zetten voor BOI productieberekeningen.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.1	Algemeen	7
1.2	Doelstelling	7
1.3	Aanpak	7
1.4	Leeswijzer	8
2	Uitgangspunten	9
2.1	Uitgangspunten vanuit BOI	9
2.2	Gegevens	10
2.3	Naamgeving en folderstructuur	10
3	Modelopzet	12
3.1	Inleiding	12
3.2	Rekenrooster	12
3.3	Spectrale ruimte	14
3.4	Bodem	15
3.5	Obstakels	15
3.6	Wind en waterstanden	17
3.7	Instellingen	18
3.7.1	Fysica	18
3.7.2	Numeriek	19
3.8	Uitvoerlocaties	19
3.9	SWAN-versie	19
4	Gevoeligheidstests	20
4.1	Inleiding	20
4.2	Rekenroosterresolutie	20
4.3	Richtingsresolutie	23
4.4	Convergentie	25
5	Hoekpuntenanalyse voor BOI	27
5.1	Methode	27
5.2	Resultaten	28
5.2.1	Mapuitvoer	28
5.2.2	Resultaten op de uitvoerlocaties	30
5.2.3	Uitvoerraaien	31

5.2.4	Spectra	32
5.3	Convergentie en rekestijden	34
5.4	Verificatie	37
5.4.1	Golfsteilheid	37
5.4.2	Ursell getal	38
5.4.3	Kahma en Calkoen groeicurve	39
6	Conclusies en aanbevelingen	41
7	Literatuur	42
A	SWAN invoer	44
B	Figuren gevoeligheidsanalyse	47
C	Figuren hoekpuntanalyse	53
C.1	Langs uitvoerlocaties en raaien	53
C.1.1	Windrichting 67.5°N	53
C.1.2	Windrichting 180°N	55
C.1.3	Windrichting 270°N	57
C.1.4	Windrichting 337.5°N	59
C.2	Convergentie	61

1 Inleiding

1.1 Algemeen

Om de veiligheid van de dijken te kunnen bepalen is het van belang om te weten welke golven te verwachten zijn. Hiervoor wordt het numeriek golfmodel SWAN ingezet dat voor een specifieke modelschematisatie berekent hoe golven onder bepaalde wind- en waterstandscondities de waterkering bereiken.

Voor het Grevelingenmeer, ook wel de Grevelingen genoemd, bestond nog geen SWAN-modelschematisatie en die is wel nodig voor de wettelijke beoordeling van de waterkeringen in het kader van het Rijkswaterstaatproject BOI ('Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium'). De SWAN berekeningen, die hiervoor gemaakt worden, betreffen een groot aantal combinaties van (veelal extreme) windsnelheden en waterstanden, de zogenaamde productieberekeningen.

Het KPP-project "MA07ab 2021 - Hydraulica schematisaties – zoet en zout" zorgt voor de hydraulische modelschematisaties voor Rijkswaterstaat en dus ook voor de SWAN-modelschematisatie van de Grevelingen. Het streeft, waar mogelijk, naar samenhang en consistentie, niet alleen tussen gebieden en toepassingen maar ook tussen waterbeweging en golven. Voor de waterbeweging is recent een D-HYDRO model gebouwd (Deltares, 2019).

De Grevelingen ligt op de grens van de provincies Zeeland en Zuid-Holland en is een voormalige zeearm van de Noordzee. Als onderdeel van de Deltawerken is de Grevelingen afgesloten door de bouw van de Grevelingendam in het oosten en de Brouwersdam in het westen. De spuisluis in de Brouwersdam (de Brouwerssluis), zorgt voor een directe verbinding met de Noordzee. Dit betekent dat de Grevelingen een zout-water meer is.

1.2 Doelstelling

Dit project heeft tot doel om een SWAN modelschematisatie te ontwikkelen van de Grevelingen ten behoeve van productieberekeningen voor BOI.

1.3 Aanpak

Als eerste zijn de eisen en wensen vanuit BOI in kaart gebracht en zijn relevante gegevens bekeken, zoals de bestaande ongestructureerde D-HYDRO schematisaties en oudere kromlijnige WAQUA schematisaties. Ook is bekeken welke gegevens in Baseline beschikbaar zijn.

Vervolgens is met de modelopzet begonnen. We hebben rechthoekige rekenroosters met verschillende resoluties met elkaar vergeleken. Voor elk rekenrooster is met BAS2SWAN een bijbehorend bodem- en obstakelbestand vanuit Baseline gemaakt. De bestaande uitvoerlocaties uit HYDRA-NL zijn aangevuld met zelf gekozen – voorlopige - locaties langs de oevers en in de geulen zodat de modelresultaten geanalyseerd kunnen worden. Er zijn gevoeligheidstests uitgevoerd om de geschikte resolutie in geografische en richtingsruimte te bepalen. Adviezen over wind, waterstanden en modelinstellingen zijn overgenomen uit voorgaande studies (Deltares, 2020 en 2021a).

Uiteindelijk hebben we zestien testberekeningen uitgevoerd om te controleren of de berekeningen stabiel verlopen, of de rekentijden hanteerbaar zijn en de resultaten realistisch. Deze testberekeningen betreffen de zogenaamde 'hoekpunten': de uiterste windsnelheden (10

en 37 m/s) en waterstanden (-0.5 en 2 m +NAP) voor de windrichtingen 67.5°N, 180°N, 270°N, 337.5°N uit de matrix van door te rekenen wind-waterstandscombinaties voor de productieberekeningen (Botterhuis et al, 2021).

Dit jaar worden ook nieuwe SWAN-schematisaties gemaakt voor de Veluwerandmeren (Deltares, 2021d), het Volkerak-Zoommeer (Deltares, 2021e) en het Markermeer en Gooi- en Eemmeer (Deltares, 2021f). Waar mogelijk worden gelijke instellingen gebruikt.

1.4 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 komen de uitgangspunten voor de modelopzet aan bod.

Vervolgens wordt in Hoofdstuk 3 ingegaan op verschillende aspecten van de modelopzet: rooster, bodem, wind en waterstanden, obstakels, instellingen en uitvoerlocaties. In Hoofdstuk 4 worden de gevoeligheidstests beschreven. Aansluitend is de hoekpuntanalyse gepresenteerd in Hoofdstuk 5.

Tot slot worden de conclusies, aanbevelingen en gebruikstips in Hoofdstuk 6 gepresenteerd.

2 Uitgangspunten

2.1 Uitgangspunten vanuit BOI

Onderstaande uitgangspunten voor de SWAN-schematisatie van de Grevelingen (en overigens ook van andere gebieden zoals Markermeer en Volkerak-Zoommeer) zijn gebaseerd op wensen vanuit BOI.

- **Consistentie**
Er wordt consistentie gezocht qua instellingen tussen het Grevelingen SWAN-model en andere SWAN en D-HYDRO modelschematisaties voor BOI en RWsOS. Voor de SWAN modellen geldt dat een consistente modellering van golfgeneratie (windgroei, whitecapping, vier-golfwisselwerking) en ondiep-water modellering (bodempwrijving, diepte-geïnduceerd breken en drie-golfwisselwerking) toegepast wordt. Voor D-HYDRO geldt dat er consistentie gezocht wordt wat betreft winddrag. Uitzonderingen op de consistentie-eis moeten beargumenteerd worden. Er wordt gebruik gemaakt van de adviezen ten aanzien van generieke instellingen, zoals beschreven in Deltares (2020 en 2021a). Deze bevatten naast de generieke aspecten ook gebiedsspecifieke instellingen en modelinvoer.
- **Nauwkeurigheid**
Er wordt gestreefd naar een zo nauwkeurig mogelijk SWAN resultaat op de uitvoerlocaties langs de dijk. Een vergelijking met golfmetingen zou hiervoor een uitkomst bieden. Op het Grevelingenmeer ligt in de Middelpaathaven de Schouwenbank meetboei (RWS, 2021b). Echter, omdat de boei in een afgeschermd havenkom ligt geeft deze geen inzicht in de modelprestaties van het Grevelingen model. Om deze reden worden de metingen van de Schouwenbank boei niet verder beschouwd. Doordat er geen relevante golfmetingen op de Grevelingen beschikbaar zijn, kan de nauwkeurigheid van het model niet gekwantificeerd worden. Wel kan met gevoeligheidsberekeningen bekeken worden wat het effect is van bijvoorbeeld een hogere resolutie in de ruimte of in de richting. Een verschil van orde 5 centimeter in de significante golfhoogte of 0.1 seconde in de periode wordt als significant gezien. Daarnaast is van belang dat de geulen in het modelgebied voldoende nauwkeurig gemodelleerd worden, zodat de golfdoordringing in de geulen of het 'oversteken' van de golven van de geulen voldoende nauwkeurig gemodelleerd kan worden. Ook dit zal worden bepaald aan de hand van gevoeligheidsberekeningen.
- **Convergentie**
In RWS (2021a) wordt een eis voor de convergentie gegeven: "Zo goed dat er niet nog 2e orde verschillen zijn door een te slechte convergentie."
Voor de golfhoogte stellen we dat de convergentie voldoende is als de verschillen tussen laatste en op-één-na-laatste golfhoogte orde millimeter zijn. Voor de golfperiode is de convergentie voldoende als de verschillen in golfperiode tussen laatste en op-één-na-laatste golfperiode in de orde van 10 milliseconde zijn.
- **Rekentijd**
Er wordt gestreefd naar een acceptabele rekestijd voor BOI toepassing. Naar verwachting moeten hiervoor orde 1000 productieberekeningen worden uitgevoerd. Dit betekent dat de rekestijd van 1 berekening niet langer dan een aantal uren mag zijn.

- SWAN-versie
Gebruik bij voorkeur de meest recente SWAN versie. Concreet betekent dit dat we Deltares versie 41.31A.1 gebruiken.
- SWAN-Modelinstellingen
Gebruik zoveel mogelijk de generieke modelinstellingen, zoals aangeraden in Deltares (2020 en 2021a).
- Uitvoerlocaties
De definitieve set BOI uitvoerlocaties wordt in een vervolgstudie bepaald. Voor de modelopzet en testberekeningen gaan we uit van een tijdelijke set uitvoerlocaties waarvan sommige punten zelf gekozen zijn en sommige punten uit HYDRA-NL komen.
- Gegevens
Gebruik Baseline en BAS2SWAN om op een consistente en reproduceerbare wijze bodem- en obstakelbestanden te maken.

2.2 Gegevens

Bij het maken van de modelschematisatie gaan we uit van baseline-nederland-j19_6-v1. Echter, aangezien de conversie met BAS2SWAN voor de standaard baselineboom niet lukte, is door Lievense een special gemaakt, gebaseerd op baseline-nederland-j19_6-v1 (Nederland_6_land_18mei2021\mm_gre_special_lievense). Met deze special is de conversie naar SWAN uitgevoerd. Dit had alleen betrekking op de programmatuur, niet op de Baselinegegevens zelf. De toegepaste Baseline-versie is 6.2.0.2247, met ArcGis 10.5. Intussen is er een nieuwere Baselineversie beschikbaar.

Concreet betekent dit dat we de volgende uitgangspunten hanteren:

- Modelgebied
Door toepassen van de clipcontour is baseline-grevelingen-j19_6-v1 verkregen. De modelbegrenzing is gebaseerd op Clipcontour_modelbound_j19_6-v1 van Grevelingen.
- Bodem
Voor de bodem gaan we uit van de bodem die met BAS2SWAN op basis van de Baseline-special gegenereerd is. Wijzingen in het modelgebied, die nog niet in Baseline zitten, zullen niet meegenomen worden.
- Obstakels
Voor de obstakels gaan we uit van de obstakels die met BAS2SWAN op basis van de Baselinespecial gegenereerd zijn.

2.3 Naamgeving en folderstructuur

De modelschematisatie heet swan-grevelingen-j19_6-v1a. De naamgeving en folderstructuur die wij hier voorstellen volgt enigszins de structuur voor D-HYDRO zoals beschreven in de memo Deltares (2021c).

- boundary_conditions	\ wave	\ *.bnd
	\ meteo	\ *.wnd of *.nc
	\ flow	\ *.vel of *.nc
		\ *.lev of *.nc
- computations	\ <i>bulkrunid</i>	\ <i>runid</i> \ *.swn

	\ <i>bulkrunid</i>	\ <i>runid</i>	\ <i>results</i> \
- geometry	\ *.grd		(=grid ofwel rekenrooster)
	\ *.bot		(=bottom ofwel bathymetrie)
	\ *.fxw		(=fixed weirs ofwel obstakel)
	\ output_locations\ *.xyn		
- initial_conditions	\ *.nc		
- general	\		

De modelschematisatie bevat een invoerbestand (.swn) in de map *computations* met een obstakel- (.fxw) en bodembestand (.bot) in de map *geometry*. Er is geen rekenroosterbestand (.grd), aangezien het rechthoekige rekenrooster is beschreven in het invoerbestand (.swn). De uitvoerlocaties zijn gegeven in de map *geometry/output_locations/*. De uitvoer van de berekening komt terecht in de submap *results* in de *runid* map binnen *computations*. De mappen *boundary_conditions*, *initial_conditions* en *general* worden niet gebruikt binnen deze modelschematisatie. Golfrandvoorwaarden worden immers niet opgelegd op het Grevelingenmeer.

De 'runid' is de runidentificatie. In de huidige studie houden we de volgende naamgeving aan: <gebied>U<windsnelheid>D<windrichting>L<positief 'p' of negatief 'm'><waterstand>V<variant>. Dus bijvoorbeeld run 'greU27D203Lp100Va' heeft een windsnelheid van 27 m/s, windrichting van 202.5 °N (afgerond 203°N), een positieve waterstand van 100 cm+NAP. De laatste letter betreft de variant, om onderscheid te kunnen maken als er eventueel nog aanpassingen gedaan worden. Deze naam kan ook worden toegepast in de sommengenerator (SGWM) om een set van sommen op te zetten.

De 'bulkrunid' is een extra folder om een overzichtelijke indeling mogelijk te maken, vrij te kiezen door de gebruiker.

Specifiek voor de Grevelingen is de naamgeving van de modelschematisatie voor bovengenoemd voorbeeld (greU32D270Lp200Va) als volgt ingevuld:

- computations	\ serie00	\ U32D270Lp200Va	\ greU32D270Lp200Va.swn
	\ serie00	\ U32D270Lp200Va	\ <i>results</i> \
- geometry	\ gre-j19_6-v1a_20m.bot		(=bottom ofwel bathymetrie)
	\ gre-j19_6-v1a_20m.fwx		(=fixed weirs ofwel obstakel)
	\ output_locations\ gre-j19_6XX1.xyn		(nog nader te bepalen)
	\ output_locations\ gre-j19_6XX2.xyn		(nog nader te bepalen)
	\ output_locations\ gre-j19_6XX3.xyn		(nog nader te bepalen)

3 Modelopzet

3.1 Inleiding

Het BOI SWAN model voor de Grevelingen is opgezet voor stationaire berekeningen met uniforme wind- en waterstanden, volgens het advies in Deltares (2020, 2021a). Omdat er geen golven van elders het gebied bereiken wordt er geen gebruik gemaakt van golfrandvoorwaarden. De golven worden door de lokale wind gegenereerd.

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de modelopzet. De modelopzet is zo veel mogelijk consistent met de Veluwerandmeren, zie Deltares (2021d), het Volkerak-Zoommeer (Deltares, 2021e) en het Markermeer, inclusief Gooi- en Eemmeer (Deltares, 2021f). In Bijlage A is een voorbeeld gegeven van een SWAN invoerbestand.

3.2 Rekenrooster

Het modelgebied bevat het Grevelingenmeer gelegen tussen de Brouwersdam en Grevelingendam (zie Figuur 3.1). De rand van het domein is gedefinieerd op basis van de zogenaamde modelbound uit Baseline.



Figuur 3.1: Domein Grevelingen SWAN-schematisatie. De groene lijn geeft de modelbound uit Baseline weer.

Het gebied is gediscretiseerd met een rechthoekig rekenrooster met vierkante cellen van 20 m x 20 m. Deze relatief kleine celmaat bleek nodig om het gebied – dat gekenmerkt wordt door een complexe bathymetrie door de aanwezige geulen, platen, strekdammen en eilanden - ruimtelijk te beschrijven. De aangelegde watersport-recreatie eilanden Ossehoek, Archipel (nabij de Brouwersdam) en Mosselbank (niet ver van de Grevelingendam) zijn orde grootte 300 bij 300 meter en de breedte van de geulen loopt op van 150 meter tot een kilometer. Met een resolutie van 20 m is het mogelijk om de meeste geulen en bodemgradiënten in het gebied goed weer te geven. Met een gevoeligheidsanalyse is gekeken of het 20 m rekenresolutie voldoende fijn is. De gevoeligheidsanalyse van de rekenroosterresolutie is beschreven in Paragraaf 4.2.

Er is gekozen voor een rechthoekig rekenrooster in plaats van een kromlijng rooster, wat samenhangt met een sneller convergerend model (Deltares, 2018). Het model is opgezet in Rijksdriehoekskoördinaten. Het rekenrooster is als volgt gedefinieerd:

X_0 = 46200 m x-coördinaat van de oorsprong van het gebied (linkeronderhoek)
 Y_0 = 417800 m y-coördinaat van de oorsprong van het gebied (linkeronderhoek)
Rotatie = -25° (cartesisch dus negatief wil zeggen met de klok mee)
Lengte (x-richting) = 1240 cellen x 20 m = 24800 m
Breedte (y-richting) = 620 cellen x 20 m = 12400 m

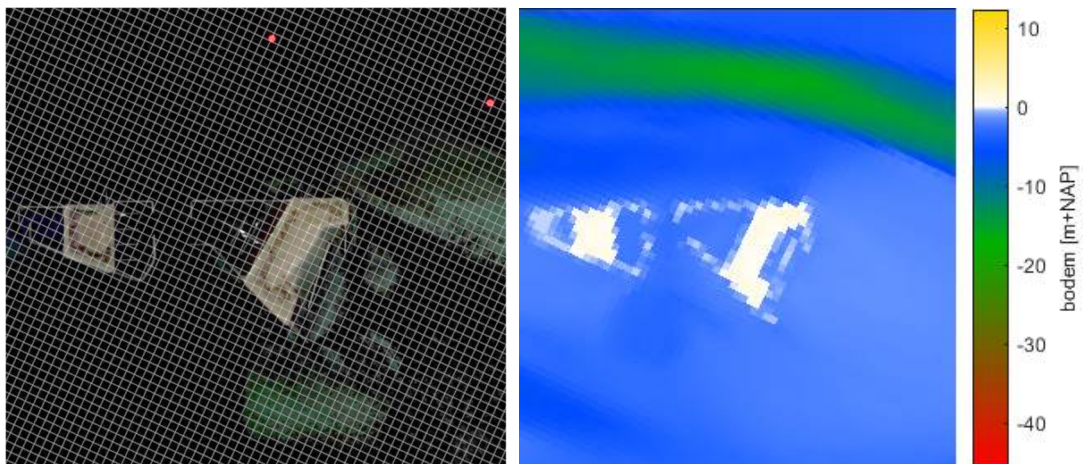
In Figuur 3.2, Figuur 3.3 en Figuur 3.4 zijn enkele details weergegeven van het rekenrooster. De locaties, de haven van Den Osse en Herkingen en de Mosselbank, zijn terug te vinden in Figuur 3.1. De groene lijn betreft de modelbound uit Baseline, de rode markers de voorlopige uitvoerlocaties en de blauwe lijn geeft de obstakels weer, die zijn gegenereerd met BAS2SWAN op basis van het Baseline model. In Figuur 3.2 zijn de sterke bodemgradiënten rondom de plaat 'Dwars in Den Weg', rechts in de figuur, en de smalle doorgang daartussen te zien. Figuur 3.3 en Figuur 3.4 laten zien dat een aantal golfbrekers en strekdammen niet zijn meegenomen als obstakel in de modelschematisatie. Om de sterke bodemgradiënten (door de complexe bathymetrie én door de aanwezigheid van dammen die alleen worden meegenomen in de bathymetrie) in het model mee te kunnen nemen, is te zien dat het relatief fijne rooster nodig is. De dammen die niet zijn meegenomen in BAS2SWAN als obstakel, zijn in Baseline niet geïdentificeerd als 'kades'.



Figuur 3.2: Detailoverzicht van het rekenrooster bij de haven van Den Osse. De groene lijn betreft de modelrand uit Baseline, de rode markers de voorlopige uitvoerlocaties en de blauwe lijn geeft de obstakels weer.



Figuur 3.3: Detailoverzicht van het rekenrooster bij de haven van Herkingen. In het linker paneel is een satelliefoto weergegeven waar de groene lijn de modelrand uit Baseline betreft, de rode markers de voorlopige uitvoerlocaties en de blauwe lijn de obstakels weergeeft. Het rechterpaneel geeft de bodem weer.



Figuur 3.4: Detailoverzicht van het rekenrooster bij het eiland de Mosselbank. In het linker paneel is een satelliefoto weergegeven waar met rode markers de voorlopige uitvoerlocaties zijn weergegeven. Het rechter paneel geeft de bodem weer.

3.3 Spectrale ruimte

De spectrale ruimte bestaat uit golffrequenties en golfrichtingen. Qua richtingen wordt de volledige cirkel beschouwd zodat golfenergie zich in elke richting kan verspreiden. De 360 graden zijn gediscrètiseerd met 72 richtingsbins van elk 5°. Dit is in overeenstemming met Deltares (2020) waar een dergelijke richtingsresolutie wordt aangeraden bij relatief smalle doorgangen en geulen. Zie Paragraaf 4.3 voor gevoeligheidstests die leiden tot deze richtingsresolutie.

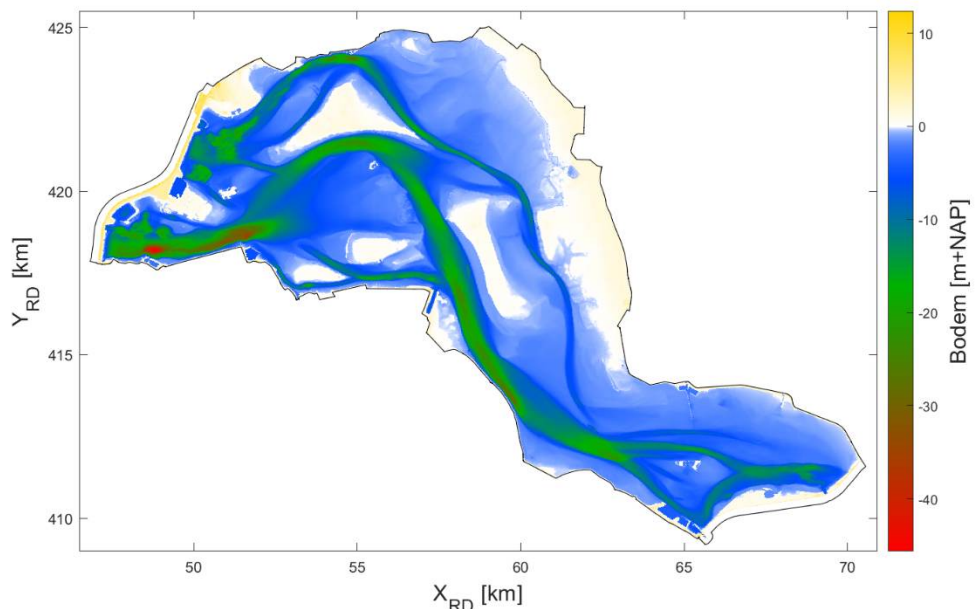
Het frequentiedomein loopt van 0.06 tot 2.4 Hz en is logaritmic verdelèd in 39 bins, conform Deltares (2020). Dit betekent dat golven met perioden tussen 0.4 en 16 seconden worden beschouwd, wat een voldoende ruim bereik is voor dit gebied.

3.4 Bodem

De hoogtegegevens uit Baseline zijn gebruikt om de bodem van de SWAN-modelschematisatie op te stellen. Hierbij is gebruik gemaakt van BAS2SWAN. De basisgegevens uit de gebruikte baseline versie (baseline-grevelingen-j19_6-v1) hebben een resolutie van 20 m voor de natte gebieden en ongeveer 35 m voor de gebieden die normaal gesproken droog liggen (bodempligging hoger dan $\approx 0\text{m}+\text{NAP}$).

In het bodembestand uit BAS2SWAN geven positieve waarden aan dat de bodem boven NAP ligt. SWAN verwacht juist dat de positieve waarden naar beneden gericht zijn. In de SWAN invoerfile moet dus worden aangegeven dat de bodemwaarden met -1 vermenigvuldigd worden.

Figuur 3.4 toont de bodempligging [m+NAP] van de Grevelingen modelschematisatie. Duidelijk te zien is dat de Grevelingen een complexe bathymetrie heeft met verschillende geulen, platen en eilanden. In de figuur is een hoofdgeul aan te wijzen die van Oost naar West door het gebied loopt. In deze geul bevindt zich tevens het diepste gedeelte van het meer, $-45\text{ m}+\text{NAP}$. Naast de hoofdgeul is een aantal kleinere, verbindende, geulen te zien in Figuur 3.4. Enkel met een relatief hoge waterstand van meer dan 2 meter + NAP, zal vrijwel het gehele gebied binnen de modelrand bestaan uit natte punten.



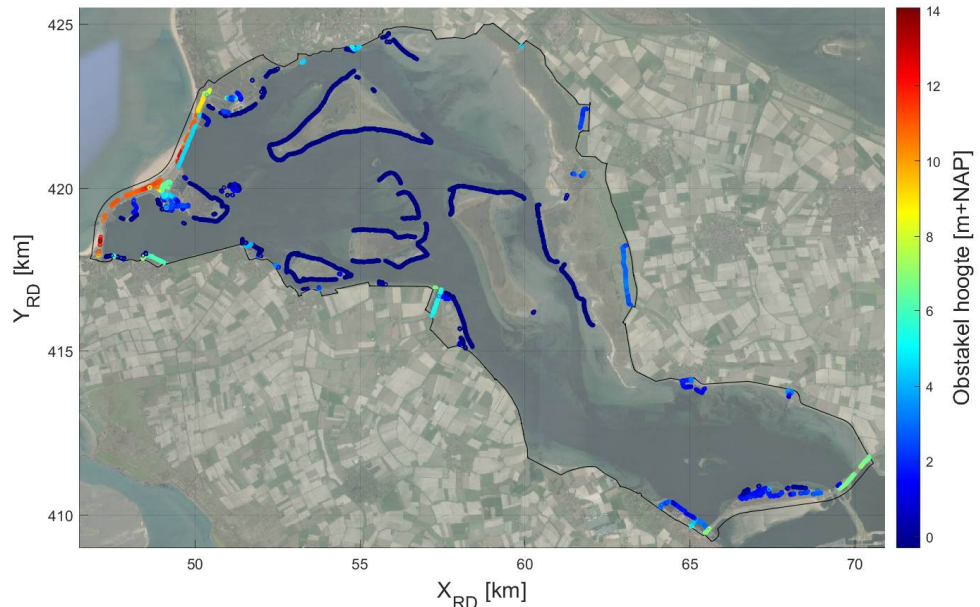
Figuur 3.5: Bodempligging van het model voor de Grevelingen. De modelrand is weergegeven met een zwarte lijn.

3.5 Obstakels

De meeste dammen en havenhoofden in het gebied zijn te klein om met de gekozen resolutie van $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ te beschrijven. Die havenhoofden, dammen en steile vooroevers zijn daarom beschreven met sub-rooster elementen (obstakels), zie Figuur 3.6. Met BAS2SWAN is op basis van het rekenrooster en de gegevens uit Baseline het obstakelbestand gemaakt (gre-j19_6-v1a-20m.fxw) met daarin de ligging en hoogte van de obstakels. Alle obstakels zijn als dam gedefinieerd volgens de Goda formulering met defaultwaarden ($\alpha=2.6$ en $\beta=0.15$) voor het bepalen van de transmissiecoëfficiënten, die afhankelijk zijn van de inkomende golf en de obstakelhoogte. Er wordt geen rekening gehouden met golfreflectie (reflectie=0). Merk op dat de processen, die spelen rond deze kleinschalige obstakels, in principe niet door SWAN gemodelleerd worden (reflectie en diffractie), maar door het toevoegen van de obstakels is de

invloed van deze kleinschalige geometrieën op de golfenergie toch versimpeld geschematiseerd door empirische relaties.

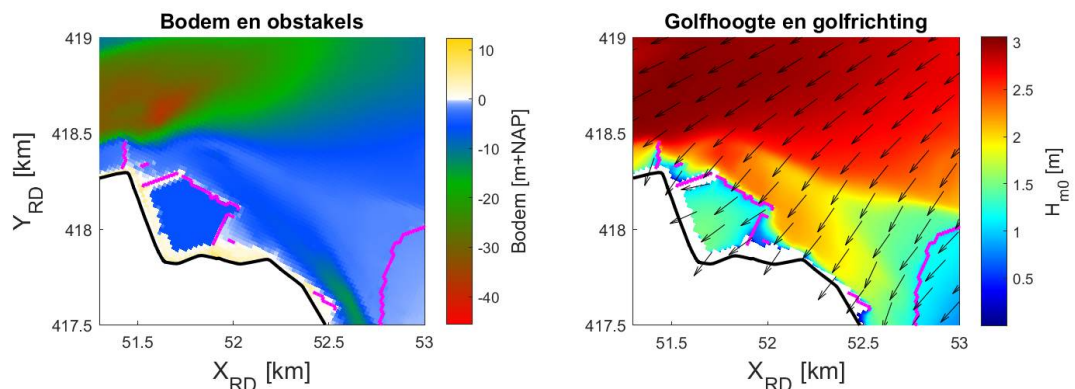
Wij bieden het obstakelbestand als apart bestand aan in de SWAN invoerfile (.swn) via de 'INCLUDE' optie.



Figuur 3.6: Ligging van obstakels met in kleur de hoogte, voor de Grevelingen. De modelrand is weergegeven met een zwarte lijn

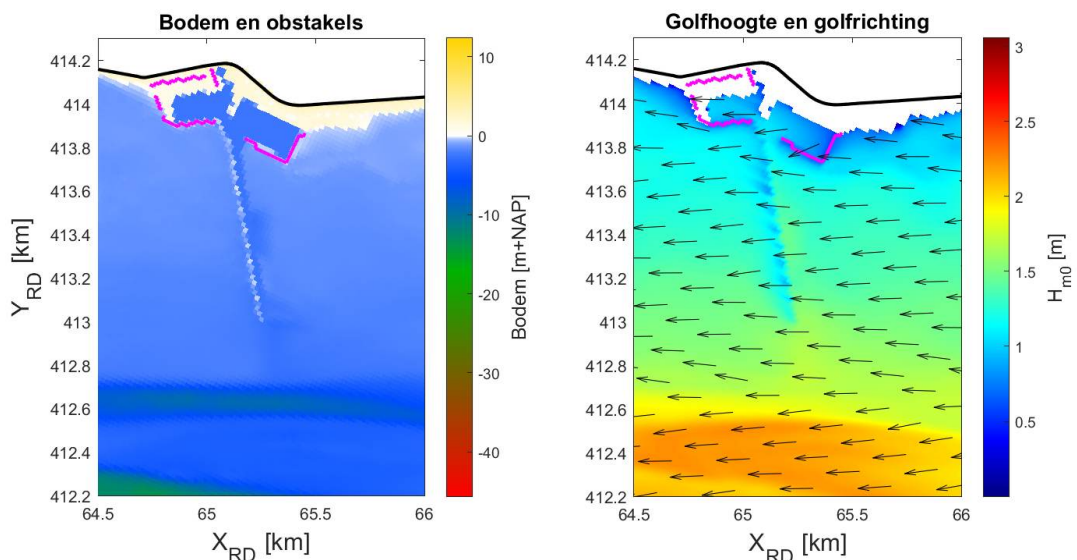
Ter verduidelijking is voor twee locaties de golfhoogte en golfrichting weergegeven voor een gebied met obstakels en complexe bodem. De locaties van de haven van Den Osse en Herkingen zijn weergegeven in Figuur 3.1. In Figuur 3.7 is een detail weergave van de haven bij Den Osse gepresenteerd. De golfbreker, gelegen rondom de haven, is geschematiseerd als een obstakel met een

hoogte variërend van NAP-0.25 m voor de golfbreker tot NAP+6m voor de noordwestelijk gelegen dijk. Duidelijk is te zien dat golven worden gedempt door de golfbreker en dat er transmissie plaats vindt. Dit laatste is logischerwijs te verklaren doordat een waterstand van NAP+0.75 m is toegepast, wat betekent dat de golfbreker ongeveer 0.5 meter onder water staat. Figuur 3.7 laat verder zien dat achter de golfbreker weer lokale golfgroei optreedt.



Figuur 3.7: Detail bodem met obstakels (linker paneel) en golfhoogte met golfrichting (rechter paneel) voor de haven van Den Ossse. De modelrand is weergegeven als zwarte lijn en de obstakels zijn weergegeven met een roze lijn. De berekening betreft een windsnelheid van 42 m/s, een waterstand van NAP+0.75 m en een windrichting van 68°N.

Figuur 3.8 geeft eenzelfde detailfiguur weer bij de haven van Herkingen. In het linker paneel is te zien dat de golfbreker rondom de haven geschematiseerd is als obstakel (roze lijn). De strekdam lopend vanaf de haven richting het zuiden is meegenomen in de bodem, maar niet geschematiseerd als obstakel. Het rechter paneel in Figuur 3.8 laat duidelijk een verschil zien in het golfhoogteverloop tussen de golfbreker gelegen rondom de haven (wel als obstakel meegenomen) en de strekdam (niet meegenomen als obstakel). Rondom het obstakel is in tegenstelling tot de strekdam een duidelijke aaneengesloten donkerblauwe lijn (kleinere golfhoogtes ten opzichte van de omgeving) te zien. Figuur 3.8 laat verder zien dat het relatief fijne grid van 20 m x 20 m nodig is om grote bodemgradiënten die ontstaan door de strekdam mee te kunnen nemen.



Figuur 3.8: Detail bodem met obstakels (linker paneel) en golfhoogte met golfrichting (rechter paneel) voor de haven van Herkingen. De modelrand is weergegeven als zwarte lijn en de obstakels zijn weergegeven met een roze lijn. De berekening betreft een windsnelheid van 42 m/s, een waterstand van NAP+0.75 m en een windrichting van 68°N.

3.6 Wind en waterstanden

Het model maakt gebruik van uniforme wind- en waterstandsvelden waarvan de waarden in de SWAN-invoerfile opgegeven worden. SWAN interpreteert de opgelegde windsnelheid als de lokale wind op 10 m hoogte (U_{10}). Het is aan de gebruiker om eventueel andere windinvoer (potentiele wind, windschuifspanning, ...) om te rekenen naar U_{10} . Indien men gebruik wil maken van een andere winddrag dan beschikbaar in SWAN dan kan men dat oplossen via een zogenaamde pseudowind (zie Deltares, 2020). Uitwerking hiervan valt niet onder de huidige modelbouw.

Voor de winddrag gebruiken we de bij $C_D = 2.75 \cdot 10^{-3}$ en windsnelheid $U_{10} = 30$ m/s afgekapte Wu formulering, zie Deltares (2021b). Deze afkapping is consistent met wat in de DHYDRO-BOI-berekeningen wordt toegepast, maar de gehanteerde relatie zelf is in DHYDRO net iets anders (Smith & Banke; Cdbreakpoints 0,0014 en 0,00275; Windspeedbreakpoints 7.8 en 30.85 m/s). Daarnaast gebruikt DHYDRO een andere waarde voor de luchtdichtheid namelijk 1.2265 kg/m^3 terwijl SWAN een vaste waarde van 1.28 kg/m^3 heeft. Dat hier niet precies dezelfde winddrag en luchtdichtheid gebruikt worden is vanwege het feit dat enerzijds in DHYDRO sommige modellen en parameters al gecalibreerd zijn met deze waarden en dat anderzijds SWAN niet de optie biedt om bij deze waarden aan te sluiten.

Er wordt geen stroming toegepast in de modelschematisatie. Dit is conform het advies van Deltares (2021a) voor grote meren. Hiernaast wordt er geen gebruik gemaakt van golfrandvoorwaarden.

Indien een gebruiker dat wenst kan men de SWAN invoerfile aanpassen zodat ruimtelijk variërende wind- en/of waterstandsvelden ingelezen kunnen worden.

3.7 Instellingen

3.7.1 Fysica

Voor de fysische instellingen maken we volledig gebruik van de aanbevelingen zoals beschreven in Deltares (2020, 2021a en 2021b). Dit betekent dat de formuleringen voor windgeneratie en whitecapping van Van der Westhuysen (2007) en de formulering voor ondiep water breken van Van der Westhuysen (2010) worden gebruikt. Destijds zijn deze instellingen ook gebruikt voor de WTI2011 en WBI2017 berekeningen. Verschillen ten opzichte van WBI2017 betreffen de triadformulering en de winddrag afkapping van de Wu formulering.

De fysische instellingen worden als volgt aangegeven in de SWAN-invoerfile:

```
GEN3 WESTH
WCAP WESTH cds2=5.0e-05 br=0.00175 p0=4.0 powst=0.0 powk=0.0 &
nldisp=0.0 cds3=0.8 powfsh=1.0
QUAD iqad=2 lambda=0.25 Csh1=5.5 Csh3=-1.25
BREA WESTH alpha=0.96 pown=2.5 bref=-1.39630 shfac=500.0
FRICTION JONSWAP CFJON 0.038
TRIAD itriad=11 trfac=0.05 cutfr=2.5 (NB trfac=0.1 voor productieberekeningen!)
```

- Voor windgeneratie en whitecapping de formulering van Van der Westhuysen et al. (2007). Dit is anders dan de default SWAN instellingen voor versie 41.31A.1;
- De default instellingen voor quadruplets;
- Voor diepte-geïnduceerd breken de formulering van Van der Westhuysen (2010). Dit is anders dan de default SWAN instellingen voor versie 41.31A.1.
- Voor bodemwrijving de default waarde 0.038;
- Voor triads is de triad formulering te weten LTA-OCA gebruikt, wat betekent dat de LTA van Eldeberky (1996) is geïmplementeerd. Dit geeft men aan met itriad=11. Als proportionaliteitscoëfficiënt is trfac=0.05 gebruikt in plaats van de defaultwaarde 0.8, naar aanleiding van bevindingen gerapporteerd in Deltares (2021a). Dit is niet noodzakelijkerwijs een optimale waarde, zoals ook in Deltares (2021a) gemeld, maar zolang geen alternatieve waarde beschikbaar is zullen we uitgaan van trfac = 0.05. Opgemerkt moet worden dat de keuze van de triad formulering is gemaakt doordat de berekeningen zijn uitgevoerd met SWAN versie 41.31A.1, waar (foutief) default gerekend werd met de OCA (itriad=11) implementatie voor triads. Aangezien itriad niet expliciet was opgegeven in de invoerfiles zijn alle berekeningen in dit rapport dan ook uitgevoerd met itriad = 11.

Tijdens uitvoering van deze studie (nadat de berekeningen waren uitgevoerd) is besloten welke triadformulering, met bijbehorende waarde voor trfac, gebruikt zal worden voor de BOI productieberekeningen. Dit betreft: itriad=11 trfac=0.1 cutfr=2.5 (RWS, 2021c). De invloed van de keuze voor trfac=0.05 of trfac=0.1 is naar verwachting klein.

Daarnaast maken we gebruik van:

- De drag relatie van Wu (1982). Dit is geen default in versie 41.31A.1.

- Wind drag afkapping bij $C_d=0.00275$, dit komt overeen met een windsnelheid van 30 m/s. Dit is geen default in versie 41.31A.1.
- Waterdichtheid 1025 kg/m^3 (zout water; default in 41.31A.1)

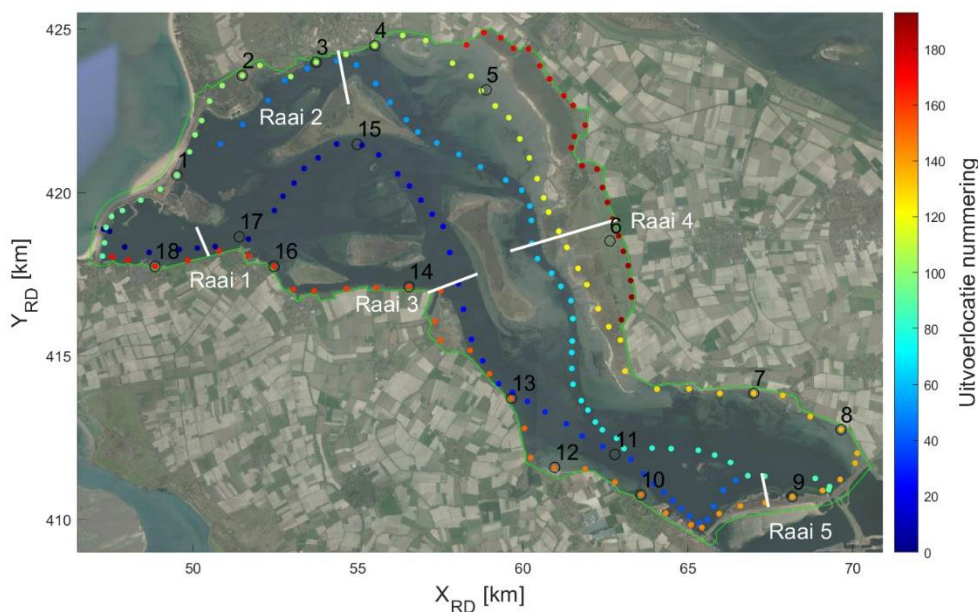
3.7.2 Numeriek

Voor de numerieke instellingen maken we gebruik van de aanbevelingen zoals beschreven in Deltares (2021a), maar zonder de daarin abusievelijk weergegeven $dabs=0.0$. Hiernaast is het aantal iteraties opgeschroefd van de aanbevolen 80 naar $mxitst = 100$ om het model voldoende te laten convergeren. Dit is verder toegelicht in Paragraaf 4.4. Het wordt aangeraden om de convergentie van het model te controleren aan de hand van testuitvoer.

NUM STOPC $dabs=0.005$ $drel=0.01$ $curvat=0.001$ $npnts=101$. &
STAT mxitst=100 $alfa=0.001$

3.8 Uitvoerlocaties

De uitvoerlocaties voor de BOI productieberekeningen worden later gekozen. Vooralsnog werken wij met een zelf gedefinieerde set, zie Figuur 3.9. De set bestaat uit uitvoerlocaties langs de modelrand dijk en verbindende kering), de geulen (hoofdgeul en noord) en in het noordoosten langs de ondiepte om ook in dit gebied bij lagere waterstanden uitvoer te kunnen analyseren. In dezelfde figuur zijn vijf raaien aangegeven waarlangs de golfcondities worden geanalyseerd.



Figuur 3.9: Hoofduitvoerlocaties met locatienummer in kleur; genummerde zwarte cirkels geven uitvoerlocaties voor de convergentie check weer. In het wit zijn de locaties van vijf raaien aangegeven.

3.9 SWAN-versie

De meest recente bij Deltares beschikbare SWAN versie wordt gebruikt. Bij uitvoering van de studie was dit SWAN versie 41.31A.1. Dit is een Deltaresversie en in tegenstelling tot de officiële TU-Delft versie bevat deze wel alle instellingen, die gebruikt zijn voor WB12017, zoals de formulering van Van der Westhuysen (2010) voor breken.

4 Gevoeligheidstests

4.1 Inleiding

Om tot het model te komen zoals beschreven in Hoofdstuk 3, zijn een aantal gevoeligheidstests uitgevoerd met betrekking tot de resolutie in geografische ruimte en in richtingsruimte. Ook wordt het convergentiegedrag van het model besproken.

De tests zijn allemaal uitgevoerd voor een windsnelheid van 16 en 42 m/s, een waterstand van NAP+0m en NAP+0.75m en voor twee verschillende windrichtingen te weten 67.5°N en 180°N. Er is gekozen voor een stevige en extreme windsnelheid, een lage en redelijk hoge waterstand, een windrichting waarbij een maximale strijklengte in het noordelijk deel van de Grevelingen wordt bereikt (67.5°N) en een windrichting waarbij golven ontwikkelen in de hoofdgeul en vervolgens naar ondiepere delen propageren (180°N). Deze set van acht condities zal daarom een geheel beeld geven van de modelprestaties.

De fysische en numerieke instellingen zijn gehanteerd zoals beschreven in hoofdstuk 3. De uitvoer wordt beschouwd op de 193 uitvoerlocaties en vijf raaien (zie Figuur 3.9), waar afhankelijk van de waterstand een aantal locaties droog kunnen vallen (geen uitvoer geven).

Aangezien er geen validatiedata beschikbaar is om de modeluitkomsten mee te vergelijken, vergelijken we de verschillende simulaties met elkaar. Voor het beschouwen van de uitvoer maken we gebruik van de relatieve bias en scatter index die als volgt zijn gedefinieerd:

$$rel.bias = \frac{\sum(x - y)}{\sum y}$$

$$SCI = \frac{\sqrt{\langle (x - y)^2 \rangle}}{\langle y \rangle}$$

De x waardes worden vergeleken met de y waardes waarbij x staat voor de waarden met de hoogste resolutie (20 m en 144 richtingsbins) en y voor de variant (40 of 80 m en 72 en 36 richtingsbins). De scatter index en relatieve bias zijn gebaseerd op de berekeningen met twee verschillende windsnelheden, waterstanden en windrichtingen en de voorlopige set uitvoerlocaties.

Naast het effect van de resolutie op golfhoogte en golfperiode beschouwen we ook de rekentijd.

De gevoeligheidsberekeningen, beschreven in dit hoofdstuk, en de hoekpuntenanalyse (Hoofdstuk 5) zijn uitgevoerd met SWAN-versie 41.31A.1. Deze versie is gelijk aan de definitieve modeloplevering.

4.2 Rekenroosterresolutie

In deze paragraaf worden de modelresultaten van een 20 m, 40 m en 80 m rekenrooster besproken. De verschillen worden beschouwd aan de hand van het fijne 20 m rooster. Om de grovere roosters ook ruimtelijk te vergelijken met het fijnere rooster worden de resultaten lineair geïnterpoleerd naar het 20 m rooster. De resolutie van de bodemroosters is gelijk aan die van de rekenroosters. Hiernaast is een richtingsresolutie van 72 bins (5°) toegepast voor alle sommen die worden beschouwd in deze paragraaf. Het aantal geforceerde iteraties is gezet op 80, wat afwijkt van het aantal iteraties beschreven in Hoofdstuk 3, $m_{xist} = 100$. Er is

aangenomen dat dit verschil geen significant effect heeft op de keuze van de rekenroosterresolutie.

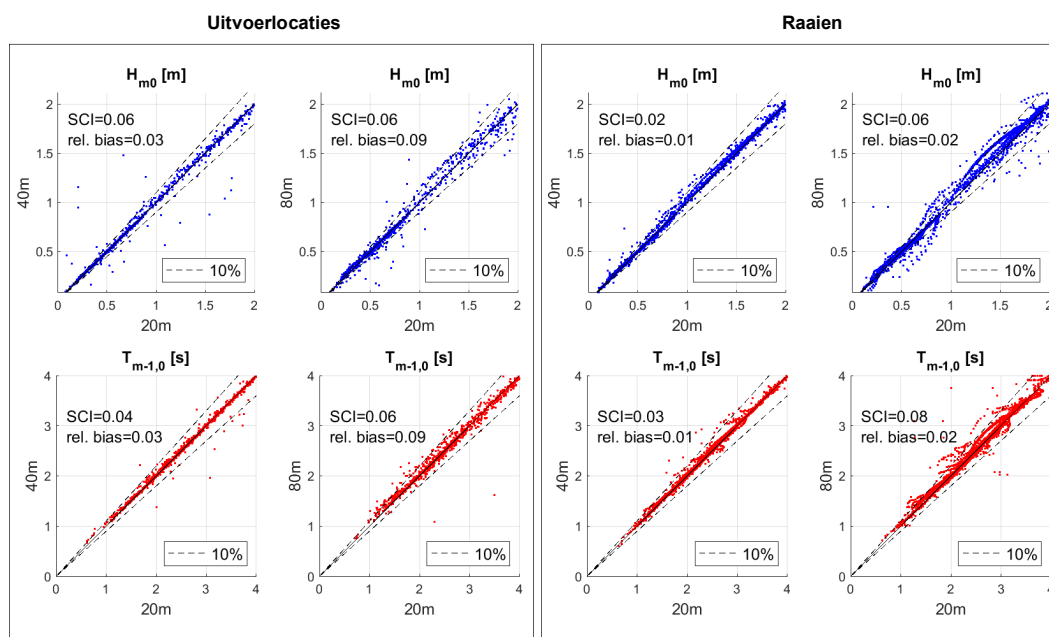
De bias en scatter index zijn weergegeven in Figuur 4.1. Het verschil in relatieve bias ten opzichte van het 20 m rekenrooster op de uitvoerlocaties neemt significant af door de roosterafstand van 80 m te halveren tot 40 m, zowel voor golfhoogte als periode. De hoeveelheid scatter (spreiding) tussen het 20 m rekenrooster en de roostervarianten is van vergelijkbare orde. Voor de raaien neemt zowel de scatter als de relatieve bias duidelijk af bij verkleining van de roosterafstand. De waarden in de tabel zijn eveneens gepresenteerd in Figuur 4.1. Opvallend in deze figuur zijn de uitschieters in golfhoogte op de uitvoerlocaties bij het 20 m versus 40 m rooster. Dezelfde uitschieters zijn niet zichtbaar in de vergelijking van het 20 m met het 80 m rooster. Een oorzaak hiervoor is dat op het 40 meter rooster meer uitvoerlocaties zijn meegenomen dan op het 80 m rooster, omdat juist die uitschieters bij de grovere 80 m bodemresolutie vaak 'droog' staan. Dit effect is duidelijk te zien in Figuur 4.2, waar het 80 m rooster minder ver doorloopt in de richting van de dijk (rechts in de figuur) dan de fijnere 40 m en 20 m roosters. Dit verklaart waarom de scatter (SCI=0.06) voor de golfhoogte niet afneemt tussen het 80 m en 40 m rooster terwijl in Figuur 4.1 duidelijk te zien is dat (los van de enkele uitschieters) de uitvoer met 40 m resolutie meer op een lijn ligt dan met het 80 m rooster.

Tabel 4.1: Gemiddelde reketijden en statische scores (t.o.v. resultaten op het 20 m rooster) voor diverse rekenrooster- en bodemresoluties op de geselecteerde uitvoerlocaties en raaien

	Rekenrooster-resolutie	Verschil t.o.v. 20 m rekenrooster				Gemiddelde reketijd [min] ¹
		H _{m0} SCI [-]	H _{m0} Rel. bias [-]	T _{m-1,0} SCI [-]	T _{m-1,0} Rel. bias [-]	
	20 m	0	0	0	0	120
Uitvoerlocaties	40 m	0.06	0.03	0.04	0.03	30
	80 m	0.06	0.09	0.06	0.09	7
Raaien	40 m	0.02	0.01	0.03	0.01	-
	80 m	0.06	0.02	0.08	0.02	-

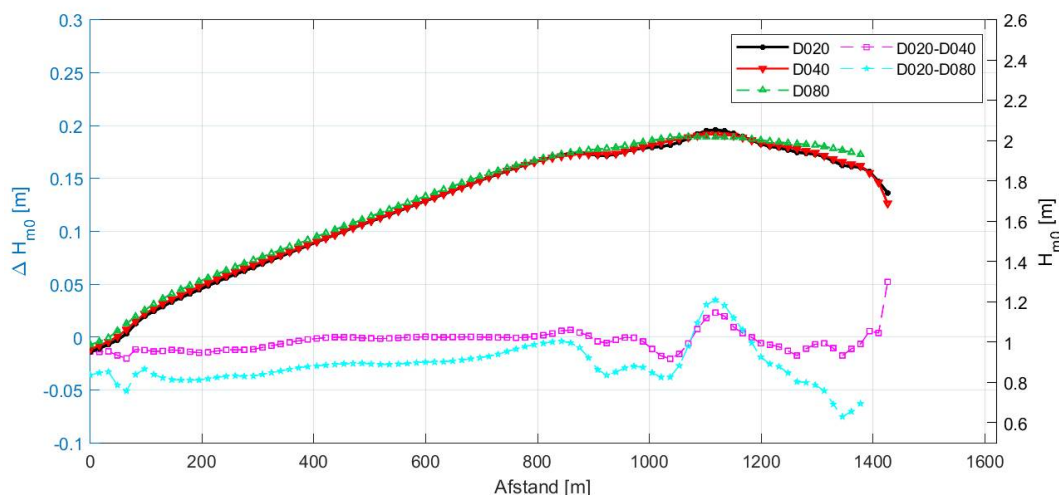
In Figuur 4.1 zijn naast de waarden van de scatter en relatieve bias ook de reketijden van de verschillende roosterresoluties getoond. Het is te zien dat de reketijd met ongeveer een factor 4 toeneemt bij de halvering van de roosterafstand van 80 m naar 40 m. De reketijd neemt hierna nog een factor 4 toe om het fijne 20 m model uit te rekenen. Het totale verschil in reketijd tussen het 80 m en 20 m rooster is dus ongeveer een factor 16.

¹ Het linux rekencluster bestaat uit de volgende hardware: Intel Xeon CPU E5-2667 v3 @ 3.20GHz



Figuur 4.1: Scatter plot van de golfhoogte (blauw) en spectrale periode (rood) bij verschillende rooster- en bodemresoluties. De vier linker panelen betreffen de losse uitvoerlocaties, de vier rechter de uitvoer op de raaien. Op de x-as van alle figuren staan de modeluitkomsten op het 20 m rooster, op de y-as die van het 40 m of het 80 m rooster

Naast de analyse van de scatter en relatieve bias is ook gekeken naar het effect van het rekenrooster op het verloop van de integrale golfparameters golfhoogte en golfperiode. Figuur 4.2 toont het verloop van de significante golfhoogte op raai 3 (Figuur 3.9) voor een berekening met een windsnelheid van 42 m/s, een windrichting van 67.5°N (dat is min of meer in de richting van de raai) en een waterstand van NAP+0m. De figuur laat zien dat het verschil in golfhoogte berekend op het 20 m en 40 m rooster heel klein is en alleen in de laatste cel nabij de oever neemt het toe tot orde 5 cm. Verschillen tussen het 80 m en 20 m rooster zijn beduidend groter en bovendien loopt de uitvoer op het 80 m rooster minder dicht tot de oever door. In Bijlage B (figuur B.4.1 – B.4.4) zijn aanvullend de (verschillen in) golfhoogte en golfperiode voor de laatste 250 m nabij de oever voor raai 1,3 en 5 (alle op de zuidoever) opgenomen met een windrichting van 67.5°N en 42 m/s. Afgezien van het laatste roosterpunt nabij de oever zijn in het algemeen de verschillen tussen het 20 m en 40 m rooster op de laatste 100 m niet meer dan circa 5 – 10 cm en meestal kleiner. We verwachten dan ook dat een verdere verfijning van het 20 m rooster weinig meerwaarde zal opleveren.



Figuur 4.2: Overzicht significante golfhoogte voor de drie beschouwde roosterresoluties (rechter-as) en de verschillen in significante golfhoogte ten opzichte van het fijne 20 m rooster (linker-as) voor raai 3. De locaties op de x-as lopen vanaf het meer ($x=0$) in de richting van de dijk ($x=1600$). De berekening betreft een windsnelheid van 42 m/s, een waterstand van NAP+0 m en een windrichting van 67.5°N.

De spectra op een aantal geselecteerde uitvoerlocaties zijn gepresenteerd in Bijlage B. Figuur B.4.5 (windrichting 67.5°N) laat zien dat de spectra voor het 20 m en 40 m rooster vrijwel over elkaar heen liggen. Het 80 m rooster wijkt licht af van de fijnere roosters. In Figuur B.4.6 (windrichting 180°N) zijn op een aantal locaties veel grotere afwijkingen te zien tussen de spectra van de drie de roosters maar dat betreft aflandige locaties met minimale strijklengte die niet relevant zijn.

Conclusie

We achten het fijne 20 m rooster als meest geschikte voor de BOI-berekeningen. De rekentijd per berekening bedraagt daarmee gemiddeld ongeveer twee uur. De resultaten op het 40 m rooster (rekentijd gemiddeld een half uur) verschillen in veel gevallen niet meer dan enkele procenten maar er zijn ook locaties waar de verschillen meer dan 10 centimeter en secondes bedragen, daarom is het 40 m rooster minder geschikt. Bovendien is het risico bij het 40 m rooster groter dat het uitvoerpunt in de laatste natte cel ligt en dat is ongewenst. Het 80 m rooster (rekentijd gemiddeld 7 minuten) geeft op de beschouwde uitvoerlocatie gemiddeld bijna 10% afwijking ten opzichte van het 20 m rooster en is daarmee onvoldoende betrouwbaar. Omdat uit gevoeligheidstests voor het Volkerak-Zoommeer (Deltares, 2021e) is gebleken dat extra verfijning naar een 10 m rooster weinig effect had op de berekende golfhoogte en golfperiode, passen wij voor de Grevelingen geen verdere verfijning toe. Daar komt bij dat een 10 m rooster qua geheugen te groot zou worden om in één keer te berekenen en te veel rekentijd zou kosten indien genest moet worden.

4.3 Richtingsresolutie

In deze paragraaf bepalen we welke richtingsresolutie, het meest geschikt is voor het Grevelingenmodel met zijn sterke bodemgradiënten, diepe geulen en scherpe bochten. We doen gevoeligheidsberekeningen met richtingsbins van 10°, 5° en 2.5°, respectievelijk 36, 72, 144 richtingsbins en beschouwen zowel de nauwkeurigheid als de rekentijd.

De overige instellingen zijn zoals beschreven in Hoofdstuk 3 met uitzondering van het aantal iteraties, $m_{\text{xitst}} = 150$ in plaats van 100, om te voorkomen dat eventuele convergentieissues de resultaten voor verschillende richtingsresoluties vertroebelen. Bovendien kunnen we zo ook het convergentiegedrag van het model analyseren (zie Paragraaf 4.4). Er is aangenomen dat

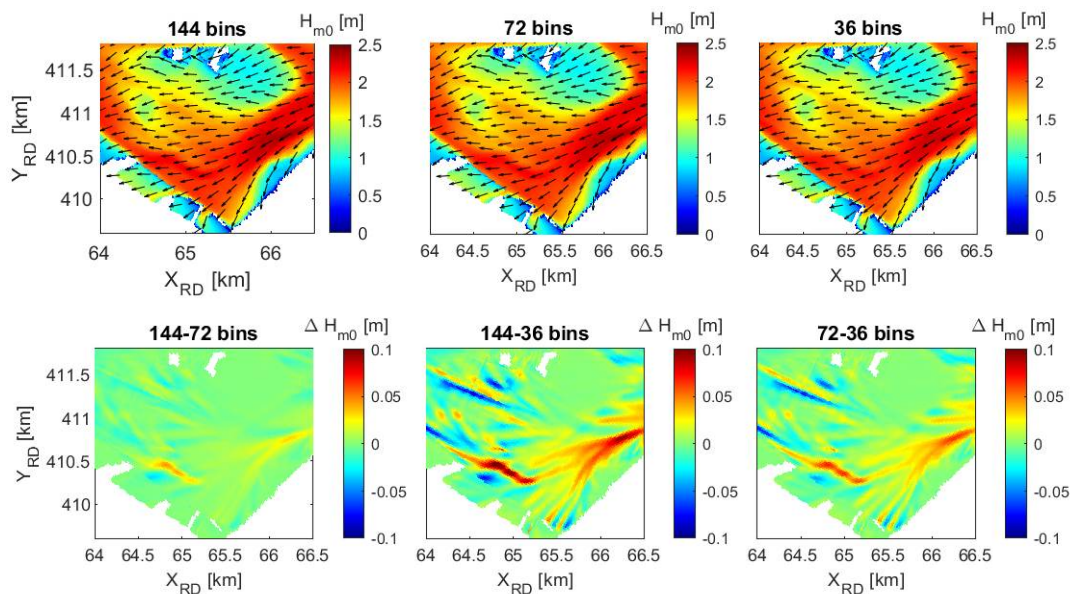
deze keuze geen effect heeft op de keuze van de richtingsresolutie. Hiernaast is het rekenrooster van 20 m x 20 m toegepast.

Het effect van de richtingsresolutie op de statistische parameters van H_{m0} en $T_{m-1,0}$ over alle uitvoerlocaties is heel klein (zie Tabel 4.2). Het effect op de rekentijd is een kleine factor 2 wanneer het aantal bins wordt verdubbeld. Maar de gemiddelde bias en de scatter zeggen niet alles over lokale uitschieters. Daarom is het zinnig om de verschillen ook ruimtelijk en langs de uitvoerlocaties te bekijken.

Tabel 4.2: Rekentijden en statische scores voor de variaties in de richtingsresolutie voor alle uitvoerlocaties en raaien met 150 iteraties.

Richtingsresolutie	Verschil t.o.v. 144 bins				Gemiddelde Rekentijd [min] ²
	H_{m0} SCI [-]	H_{m0} Rel. bias [-]	$T_{m-1,0}$ SCI [-]	$T_{m-1,0}$ Rel. bias [-]	
144 bins (2.5°)	0.00	0.00	0.00	0.00	380
72 bins (5°)	0.00	0.00	0.02	0.00	215
36 bins (10°)	0.01	0.00	0.09	0.00	130

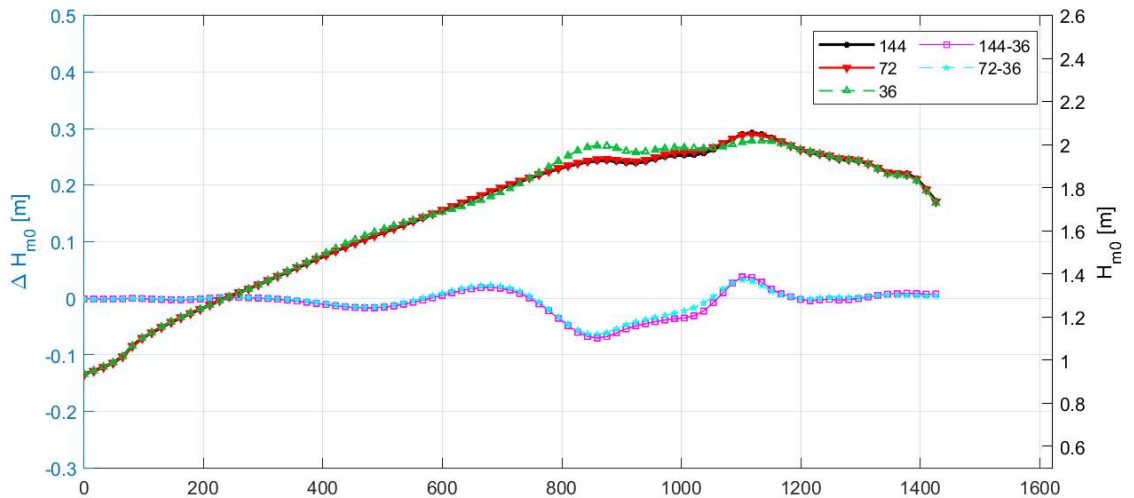
Figuur 4.3 toont (het verschil in) golfhoogte voor 144, 72 en 36 richtingsbins nabij de haven van Bruinisse (zie Figuur 3.1). Opvallend is het significante verschil, > 5 cm, tussen 36 en 72 richtingsbins. Figuur 4.2 laat ook een verschil in golfhoogte zien tussen 144 en 72, deze is significant kleiner, maximaal orde 3 cm. De golfrichtingen zijn bekeken aan de hand van ruimtelijke verschilplaatjes. Deze zijn niet opgenomen in het rapport. Het verschil in de gemiddelde golfrichting met 72 en 36 bins is over het algemeen orde grootte 3 graden met uitschieters van meer dan 10 graden. Het verschil in gemiddelde golfrichting tussen 144 en 72 graden is kleiner, orde grootte van een graad. Bij de berekening met minder wind (U16) zijn zeer lokaal uitschieters van meer dan 10 graden te zien.



Figuur 4.3: Detail ruimtelijke verschillen significante golfhoogte bij diverse richtingsresoluties (144x2.5°, 72x5°, 36x10°) voor de haven van Bruinisse. De berekening betreft een windsnelheid van 42 m/s, een windrichting van 67.5° en een waterstand van NAP+0.75m. De bovenste panelen tonen de golfhoogte en richting. De onderste panelen tonen het verschil tussen de richtingsresoluties.

² Het linux rekencluster bestaat uit de volgende hardware: Intel Xeon CPU E5-2667 v3 @ 3.20GHz

Figuur 4.4 laat (het verschil in) golfhoogte langs uitvoerraai 3 zien voor 144, 72 en 36 bins. De figuur is representatief voor de overige raaien en uitvoerlocaties. Duidelijk te zien is dat wederom de modeluitvoer met 36 richtingsbins (groene lijn) significant afwijkt van de modelresultaten met 72 en 144 bins. Het verschil tussen 72 en 144 bins is klein.



Figuur 4.4: Overzicht significante golfhoogte voor de drie beschouwde richtingsresoluties (rechter-as) op het 20 m rooster en de verschillen in significante golfhoogte ten opzichte van 144 bins (linker-as) voor raai 3. x-as geeft afstand in meters (dijk nabij x=1400 m). De berekening betreft een windsnelheid van 42 m/s, een waterstand van NAP+0.75 m en een windrichting van 67.5°N.

Figuur B.4.3 en B.4.4 laat de spectra zien met de drie richtingsresoluties op een aantal uitvoerlocaties. De spectra komen zo goed als overeen met als uitzondering de variant met 36 bins voor een aantal locaties gelegen aan hogewal.

Conclusie

Rekening houdend met nauwkeurigheid en rekentijd stellen wij een richtingsresolutie van 72 bins (5°) als meest geschikt voor BOI toepassingen in dit gebied.

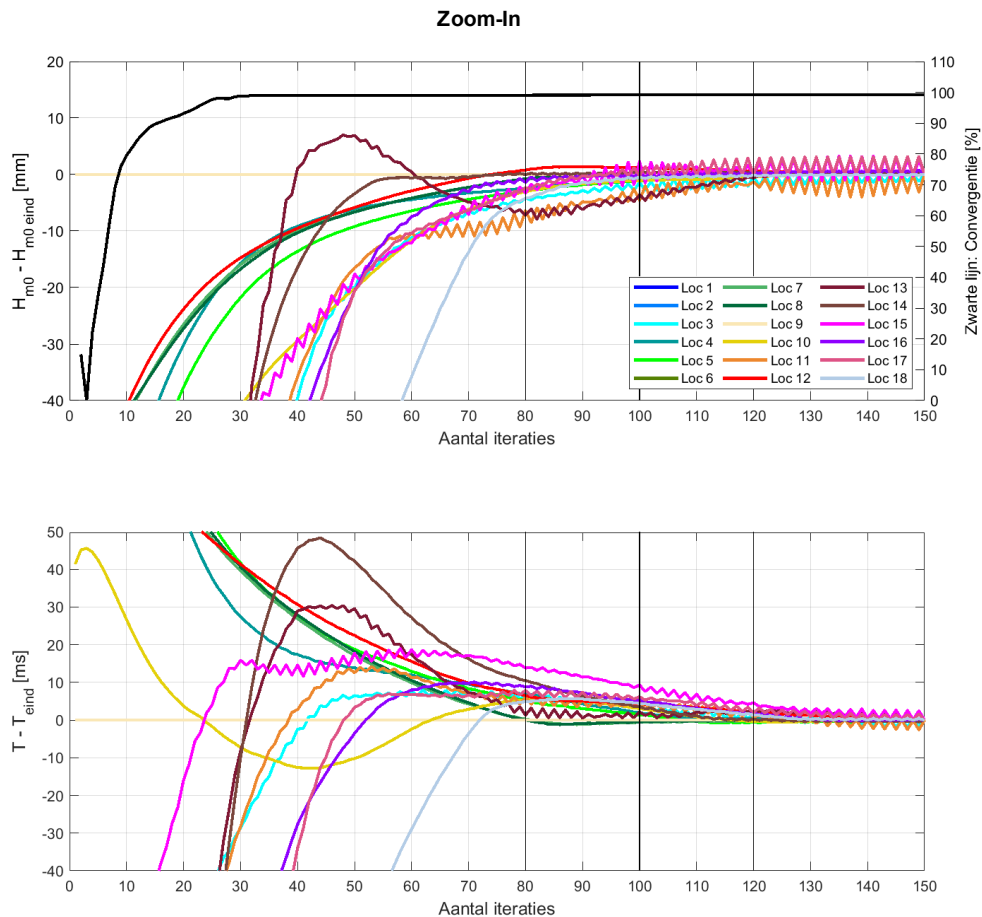
4.4 Convergentie

Zoals beschreven in Hoofdstuk 3 kijkt het aantal iteraties dat wij voor de Grevelingen adviseren (mxiitst = 100), af van het aantal geadviseerde iteraties op de overige meren, mxiitst = 80 (Deltares, 2021d, 2021e, 2021f). In deze paragraaf wordt deze keuze toegelicht door het convergentiegedrag van het model met een roosterresolutie van 20 m en 72 richtingsbins te bespreken. In Paragraaf 5.3 wordt de convergentie van de hoekpuntenberekeningen nog uiteengezet.

Figuur 4.5 laat voor een berekening met 42 m/s wind uit 180°N per iteratie het verschil zien in golfhoogte en golfperiode ten opzichte van de uiteindelijke waarde (na 150 iteraties), waarbij verticaal sterk is ingezoomd op de waarde van de laatste iteratie. De uitvoerlocaties zijn weergegeven in Figuur 3.9 als genummerde zwarte cirkels. Figuur 4.5 laat voor diverse locaties duidelijke oscillaties zien vanaf iteratie 30. Vooral locaties 3, 11, 13, 15, 16 en 17 convergeren ten opzichte van de andere uitvoerpunten minder goed. Opvallend is dat voor een windrichting uit 67.5°N dezelfde locaties minder goed convergeren. Figuur 3.9 laat zien dat deze uitvoerlocaties zich in of op de rand van een geul bevinden. Bij 80 iteraties is het verschil in de golfhoogte en golfperiode nog orde 8 mm en 10 ms respectievelijk. Na 100 en 120 iteraties is de afwijking afgenomen tot orde enkele millimeters en milliseconden.

Bij beschouwing van alle acht condities (zie Paragraaf 4.1) en achttien locaties valt op dat de afwijking ten opzichte van 150 iteraties niet altijd eenduidig afneemt bij toenemend aantal iteraties (tot 150). Dit onvoorspelbare convergentiegedrag blijkt te verbeteren door meer diffusie toe te passen bij het numerieke schema voor de richtingsveranderingen (cdd=1.0 ipv default cdd=0.5) en hangt in theorie dus samen met refractie ten gevolge van de complexe bodemgeometrie van de Grevelingen. Figuur 5.1 laat echter duidelijk zien dat de lastig convergerende gebieden (dHs) niet enkel locaties betreft waar refractie plaatsvindt (dir-winddir veranderlijk) wat betekent dat meer processen een rol spelen in de convergentie van het model.

We raden aan om vast te houden aan het default numerieke schema (cdd=0.5) omdat het verhogen van de diffusie weliswaar tot robuustere maar veelal ook tot minder nauwkeurige oplossingen leidt. Wel adviseren we voor de Grevelingen 100 iteraties per berekening te doorlopen (terwijl voor de andere gebieden 80 is aangeraden). Vanwege consistentie zou men kunnen overwegen om voor de andere gebieden ook 100 iteraties toe te passen.



Figuur 4.5: *Verskil in golfhogte (bovenste figuur) en golfperiode (onderste figuur) ten opzichte van het aantal iteraties. De uitvoerlocaties zijn weergegeven in Figuur 3.9 als genummerde zwarte cirkels. De berekening betreft een windsnelheid van 42 m/s, een waterstand van NAP+0m en een windrichting van 180°N.*

5 Hoekpuntenanalyse voor BOI

5.1 Methode

Om te controleren of het SWAN model voor de Grevelingen toegepast kan worden voor BOI-productieberekeningen, doen we enkele testberekeningen om te kijken of de berekeningen stabiel verlopen, de reketijden hanteerbaar zijn en de resultaten realistisch.

Voor deze testberekeningen kiezen we voor een aantal relevante windrichtingen de (bijna) uiterste windsnelheden en waterstanden (de zogenaamde 'hoekpunten') uit de matrix van door te rekenen wind-waterstandscombinaties voor de productieberekeningen (zie stochastenrapport Botterhuis et al., 2021). De uiterste windsnelheden en waterstanden betreffen 10 m/s, 47 m/s en NAP-0.5 en NAP+2.0. Voor onze hoekpuntenanalyse beschouwen we de waarden zoals weergegeven in Tabel 5.1. Merk op dat deze hoekpunten niet per se realistische condities zijn, maar wel van belang voor het vullen van de matrix aan condities. Het is daarom van belang dat het SWAN model ook toegepast kan worden voor deze (onrealistische) hoekpunten. Het is de verwachting dat als het model voor deze hoekpunten geen problemen geeft in de stabiliteit en het convergentiegedrag en leidt tot realistische resultaten, dat dit ook geldt voor de tussenliggende combinaties.

Zoals in Tabel 5.1 te zien is de hoogste windsnelheid die we gebruiken in deze hoekpuntenanalyse 37 m/s in plaats van 47 m/s, omdat 47 m/s een zeer kleine kans van voorkomen heeft. Toch moet het model daar ook goed mee om kunnen gaan en dat is – hoewel niet in deze rapportage opgenomen – wel degelijk gecontroleerd. Het convergentieverloop, de vorm van de spectra en de variatie in uitvoermaps is vergelijkbaar met de resultaten van de berekeningen met 37 m/s windsnelheid.

Tabel 5.1: Variaties voor de hoekpuntenanalyse

	runid	Windsnelheid [m/s]	Windrichting [°N]	Waterstand [m+NAP]
1	greU10D068Lm050Va	10	67.5	-0.5
2	greU10D068Lp200Va	10	67.5	2.0
3	greU10D180Lm050Va	10	180	-0.5
4	greU10D180Lp200Va	10	180	2.0
5	greU10D270Lm050Va	10	270	-0.5
6	greU10D270Lp200Va	10	270	2.0
7	greU10D338Lm050Va	10	337.5	-0.5
8	greU10D338Lp200Va	10	337.5	2.0
9	greU37D068Lm050Va	37	67.5	-0.5
10	greU37D068Lp200Va	37	67.5	2.0
11	greU37D180Lm050Va	37	180	-0.5
12	greU37D180Lp200Va	37	180	2.0
13	greU37D270Lm050Va	37	270	-0.5
14	greU37D270Lp200Va	37	270	2.0
15	greU37D338Lm050Va	37	337.5	-0.5
16	greU37D338Lp200Va	37	337.5	2.0

Uit de zestien windrichtingen (van 22.5° met stappen van 22.5° tot 360°) selecteren we 67.5°N, 180°N, 270°N en 337.5°N. De laatste windrichting gaat gepaard met een maximale strijklengte over het gehele domein.

Voor de hoekpuntenanalyse passen we de windsnelheden toe als ware het de open water wind U10, maar in de productieberekeningen betreft het mogelijk potentiële wind en zou er nog een omrekening gemaakt moeten worden naar U10.

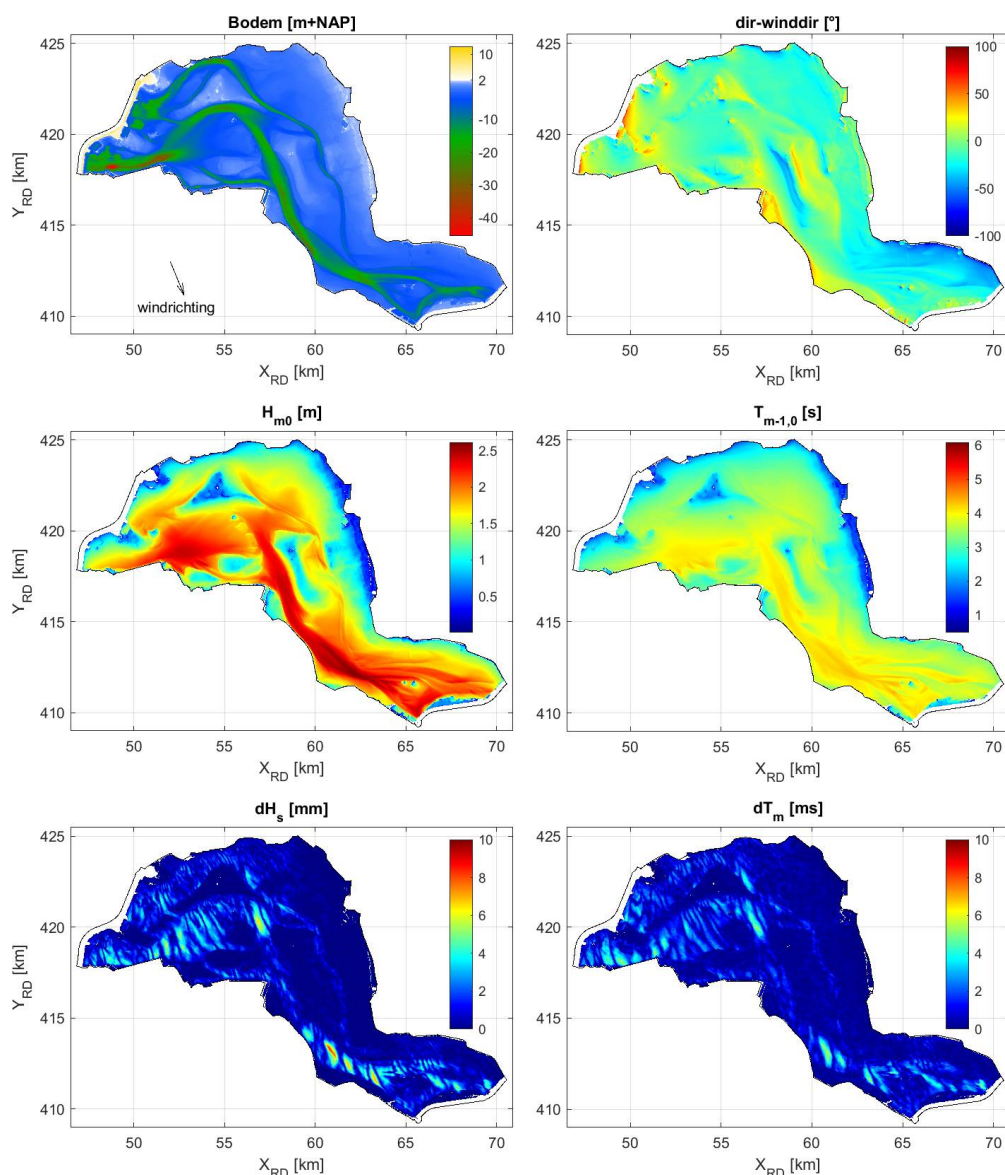
In dit hoofdstuk worden niet alleen de resultaten op de uitvoerlocaties beschouwd, maar ook het algemene golfbeeld aan de hand van ruimtelijke map-uitvoer.

5.2 Resultaten

5.2.1 Mapuitvoer

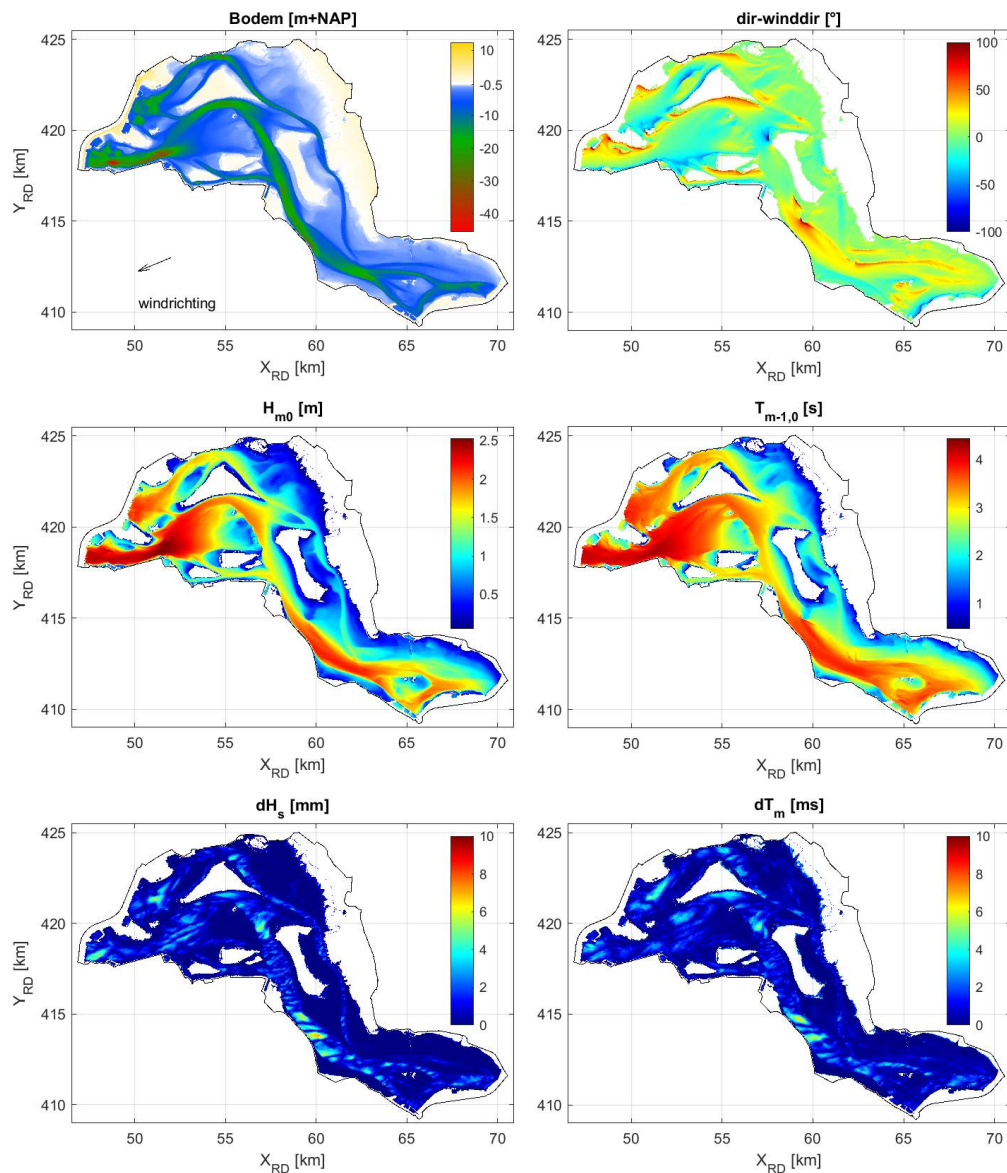
Van alle zestien berekeningen is een overzichtsfiguur gemaakt van zes parameters, te weten de bodemligging, de golfrichting ten opzichte van de windrichting (dit geeft vooral een beeld waar veel refractie optreedt), golfhoogte H_{m0} , golfperiode $T_{m-1,0}$ en dH_s en dT_m . Deze laatste twee parameters geven het verschil in golfhoogte respectievelijk golfperiode T_{m01} tussen de laatste en voorlaatste iteratie. Daarmee is te zien waar de convergentie goed of minder goed is en het geeft een schatting van de numerieke nauwkeurigheid.

Als voorbeeld is in Figuur 5.1 het resultaat van berekening U37D338Lp200 weergegeven (37m/s wind uit 337.5°N, waterstand 2m+NAP). De golfhoogte loopt in deze berekening op tot ruim 2.5 m en de periode is daarbij orde 4 s. Opvallend is echter de convergentie van de golfhoogte in het linker onderste paneel op $x = 61$ km. Hier is het absolute verschil tussen laatste en voorlaatste iteratie het grootst (ongeveer 1 cm). Omdat de golfhoogte hier maximaal is, is deze afwijking procentueel echter niet groter dan orde 0.5%. Omdat de condities van Figuur 5.1 (U37D338Lp200) van alle hoekpuntberekeningen de grootste waarden voor dH_s geven en die maxima zeer lokaal en niet dichtbij de dijken te vinden zijn, wordt deze uitvoer als acceptabel gezien. Het paneel rechtsboven in Figuur 5.1 laat zien dat er geen grote verschillen in golf- en windrichting optreden dus dat de refractie over het algemeen niet heel groot is. Refractie speelt lokaal dicht langs de dijk en de platen waar de diepte afneemt en de windrichting schuin op de kering/ondiepte staat wel een rol (orde 50° verschil tussen wind- en golfrichting).



Figuur 5.1: Resultaten U37D338Lp200 (37m/s wind uit 337.5°N, waterstand 2m+NAP). De bovenste panelen laten de bodem en de golfrichting relatief ten opzichte van de windrichting zien. De middelste (en onderste) panelen geven (het verschil in laatste en voorlaatste iteratie van) de golfhoogte en golfperiode weer.

Figuur 5.2 toont de ruimtelijke uitvoer van een berekening met een windsnelheid van 37 m/s, wind uit 67.5°N en een waterstand van -0.5m+NAP. Duidelijk te zien is dat door de lage waterstand een aanzienlijk deel van het gebied droog ligt. De middelste panelen laten zien dat de golfhoogte en golfperiode toenemen in de richting van de wind. De maximale golfhoogte bedraagt 2.5 meter en de maximale golfperiode 4 seconden. De onderste panelen tonen wederom de convergentieparameters (dHs en dTm). Net als in Figuur 5.1 zijn in Figuur 5.2 dezelfde lastig convergerende gebieden aan te wijzen. De uitschieters zijn kleiner dan in Figuur 5.1.

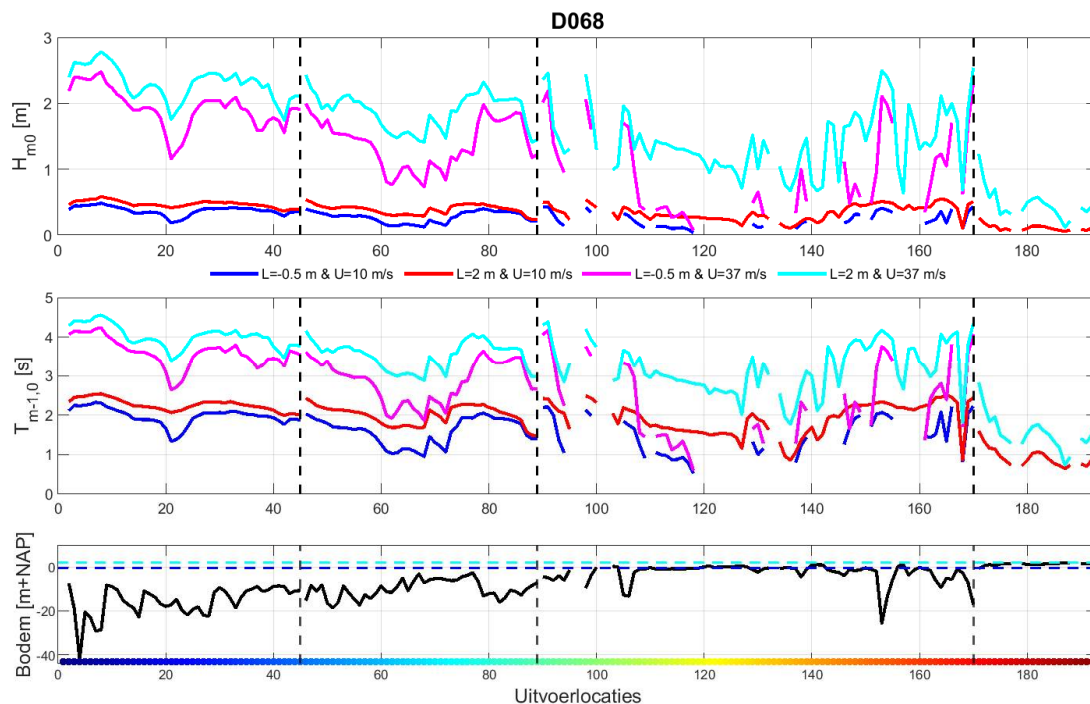


Figuur 5.2: Resultaten U37D068Lm050 (37m/s wind uit 67.5°N, waterstand -0.5m+NAP). De bovenste panelen laten de bodem en de golfrichting relatief ten opzichte van de windrichting zien. De middelste en onderste panelen geven (het verschil in laatste en voorlaatste iteratie van) de golfhoogte en golfperiode weer.

Over het algemeen zijn de modelresultaten realistisch voor alle berekeningen. De maximale golfhoogtes en perioden zijn te vinden waar de strijklengtes lang zijn en de waterdiepte relatief groot is. De golfrichting ten opzichte van de windrichting wijkt af wanneer er sprake is van refractie door gradiënten in het bodemprofiel.

5.2.2 Resultaten op de uitvoerlocaties

Een overzicht van de op de uitvoerlocaties berekende golfhoogte en golfperiode van vier runs bij een windrichting van 67.5°N is compact weergegeven in Figuur 5.3. De resultaten voor de overige windrichtingen worden gepresenteerd in Bijlage C (C.5.1, C.5.2 en C.5.3). De resultaten zijn vergeleken voor dezelfde uitvoerlocaties zoals beschreven in Hoofdstuk 4 en getoond in Figuur 3.9.



Figuur 5.3: SWAN resultaten van golfhoogte (bovenste paneel), golfperiode (middelste paneel) en bodemligging (onderste paneel) ter plaatse van de uitvoerpunten voor vier berekeningen met windrichting 67.5°N . De kleurenband in het onderste paneel komt overeen met de locaties weergegeven in Figuur 3.9. De blauwe en lichtblauwe stippellijn geven NAP-0.5m en NAP+2m respectievelijk aan om (on)diepte weer te geven. De zwarte gestreepte verticalen geven de overgang tussen vier subsets, hoofdgeul, geul noord, omliggende en de noordoostelijke rand weer.

In één oogopslag is te zien dat er geen extreme uitschieters zijn en dat de maximale waarden in significante golfhoogte en spectrale golfperiode (respectievelijk ca 2.8 m en 4.5 s) conform de verwachting zijn. Ook is te zien dat een verhoging in de windsnelheid voor alle locaties tot een toename in de golfhoogte en spectrale periode leidt. Hetzelfde geldt voor de waterstand, waar een verhoging van de waterstand resulteert in hogere en langere golven. Daarnaast is zichtbaar in het onderste paneel dat bij de lage waterstand van -0.5 m+NAP een aantal locaties droog komen te staan, waardoor zij geen resultaten hebben. Omdat de ligging van de locaties ten opzichte van oever en windrichting sterk varieert is er geen duidelijk verband te zien tussen golfhoogte of -periode en bodemligging.

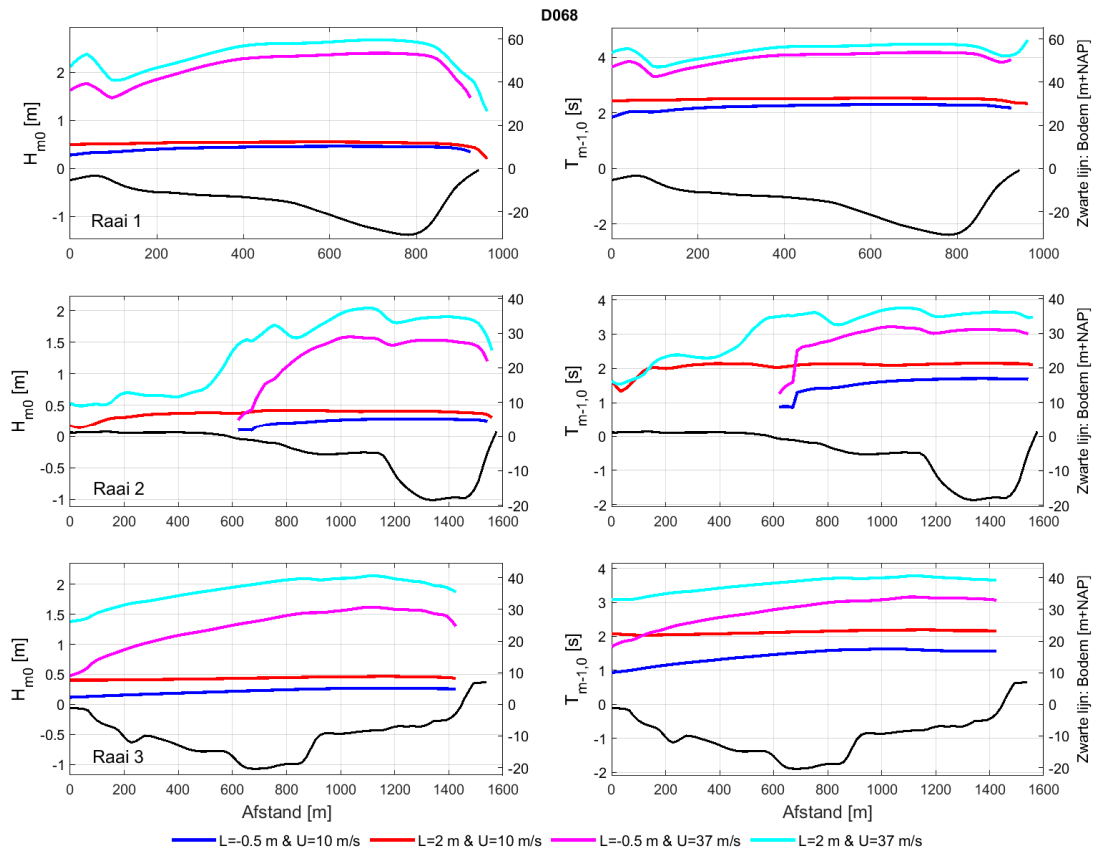
Het effect van de windrichting op de golfparameters is niet direct af te lezen in Figuur 5.3. Wel is duidelijk, met behulp van Figuur 3.9, dat locaties met een langere strijklengte grotere golfhoogtes en golfperiodes laten zien. Dit is een logisch resultaat.

5.2.3 Uitvoerraaien

Om te zien hoe het verloop in significante golfhoogte en spectrale periode van dieper water naar de oevers toe verloopt zijn onderstaande raai-figures gemaakt, zie Figuur 5.4. Ze tonen voor drie raaien (raai 1, raai 2 en raai 3, zie Figuur 3.9) het golfverloop bij een ONO wind (67.5°N) met hoge (37 m/s) en lage (10 m/s) windsnelheid en hoge (NAP+2m) en lage (NAP-0.5m) waterstand. De windrichting staat loodrecht op raai 1 en 2 en staat parallel aan raai 3. De zwarte lijn geeft de bodem ten opzichte van NAP weer. Voor raai 2 geldt dat de lage waterstand resulteert in droogval (van de plaat 'Hompelvoet'), waardoor er op deze locaties geen uitvoer is. De raaien lopen vanaf het meer ($x=0$) tot aan de dijk. Vlak voor de dijk bij raai

1 en 2 is een geul aanwezig. Bijlage C bevat figuren van raai 4 en 5 voor de beschouwde windrichting en de figuren van de raaien 1-5 voor de overige windrichtingen.

Figuur 5.4 laat over het algemeen zien dat daar waar de diepte constant is of dieper wordt, de golfhoogte en golfperiode toeneemt. Dit hangt samen met windgroei. Uitzondering hierop is het begin van raai 1, waar een ondieper deel zorgt voor grotere golven. Dit is te verklaren door shoaling van golven. Daar waar het ondieper wordt is duidelijk te zien dat met name de golfhoogte sterk afneemt. Dit is te wijten aan bodemwrijving en breking.



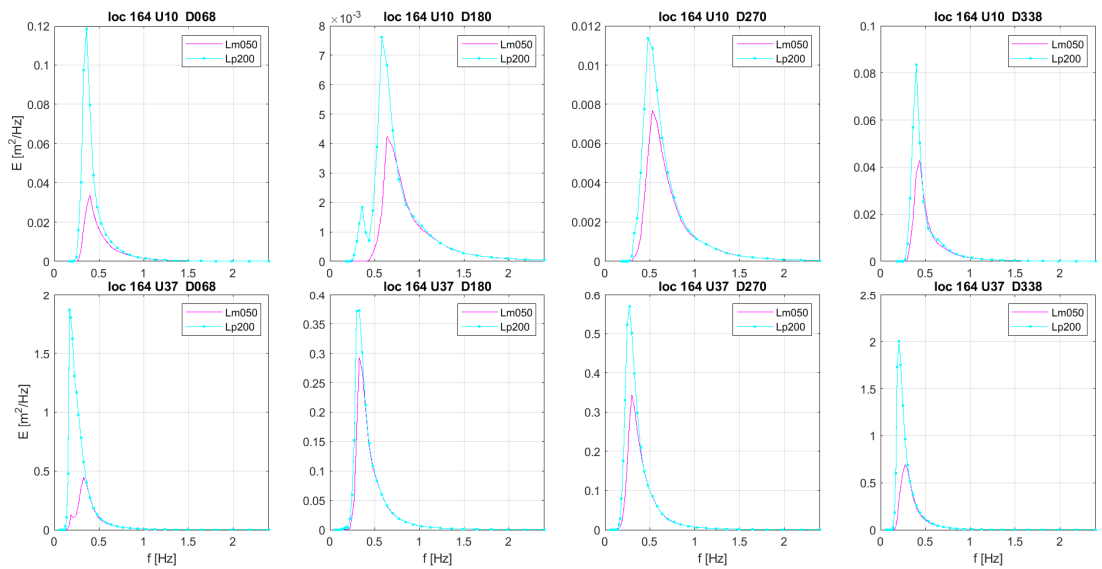
Figuur 5.4: SWAN resultaten golfhoogte (links) en golfperiode (rechts) op uitvoerraaien 1, 2 en 3 (67.5°N windrichting; 10 m/s en 37 m/s windsnelheid; NAP+2m en NAP-0.5 m waterstand). De zwarte lijn geeft de bodem ten opzichte van NAP weer. De raaien lopen vanaf het meer ($x=0$ m) in de richting van de dijk (voor raai 3 $x=1600$ m).

5.2.4 Spectra

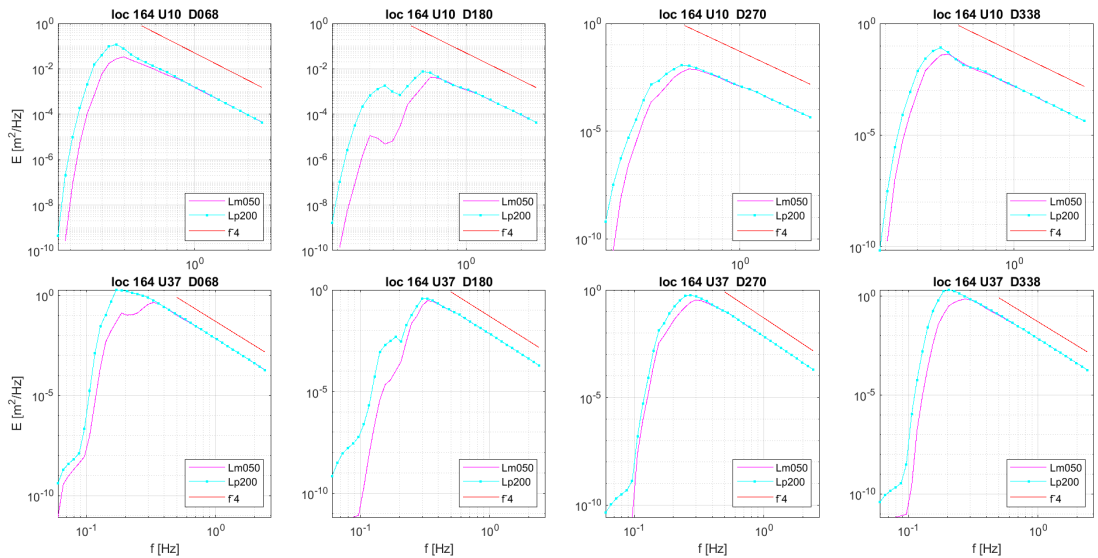
De golfspectra laten zien hoe de golfenergie over de frequenties is verdeeld. Figuur 5.5 toont de spectra voor uitvoerlocatie 164, die hiernaast gelijk is aan de zwart omcirkelde locatie nummer 16 (zie Figuur 3.9) bij lage windsnelheid (bovenste panelen; 10 m/s) en hoge windsnelheid (tweede rij panelen; 37 m/s), voor de twee waterstanden (NAP-0.5m en NAP+2m) en vier verschillende windrichtingen (67.5°N , 180°N , 270°N en 337.5°N) de golfspectra. Dit is ter controle om te zien of het frequentiedomein van 0.06 tot 2.4 Hz voldoende is en of de spectra er logisch uitzien. Voor andere locaties is dit ook bekeken maar de figuren zijn niet in dit rapport opgenomen. Te zien is dat de waterstand vooral effect heeft op de lagere frequenties. Bij hogere waterstanden kunnen de golven verder doorgroeien en treden dieptegeïmpliceerde dissipatieprocessen minder op. De rechterflank van het spectrum wordt er nauwelijks door beïnvloed.

Op het eerste gezicht lijkt het aangenomen frequentiedomein voldoende. Bij nadere inspectie, ook op de andere niet getoonde locaties, blijkt dat indien die locatie hogerwal (korte strijklengte) ligt en de wind relatief zwak is, er ook spectrale energie aanwezig is in de hoge frequenties (groter dan 1.5 Hz). Omdat op deze locaties jonge, kleine golven voorkomen bevat het spectrum weinig energie. Zie als voorbeeld paneel U10D180 en U10D270. De locaties met een grotere hoeveelheid energie tonen een logische spectrale vorm. Verder is duidelijk te zien dat de spectra geforceerd met kleinere windsnelheid en lage waterstand minder energie bevatten dan de spectra met een grotere windkracht en hoge waterstand. Uitzondering hierop is wederom paneel U10D180 (en U37D180) waar de strijklengte zeer kort is, waardoor de wind weinig invloed kan uitoefenen. Voor de hoge waterstand is in dit spectrum ook een opmerkelijke laag-frequente piek waarneembaar. Omdat het hier niet om maatgevende condities gaat, is dit niet verder onderzocht.

In Figuur 5.6 is dezelfde informatie als in Figuur 5.5 getoond maar dan op log-schaal. De hoogfrequente flank verloopt ongeveer volgens f^{-4} zoals te verwachten is bij de gehanteerde windgroeiformulering van Van der Westhuisen, zie ook Deltares (2021a).



Figuur 5.5: Variantiedichtheidsspectra [m^2/Hz] ter plaatse van locatie 164 (zie Figuur 3.9) van de zestien hoekpuntenberekeningen. De frequentie is geplot van 0 tot 2.4 Hz.

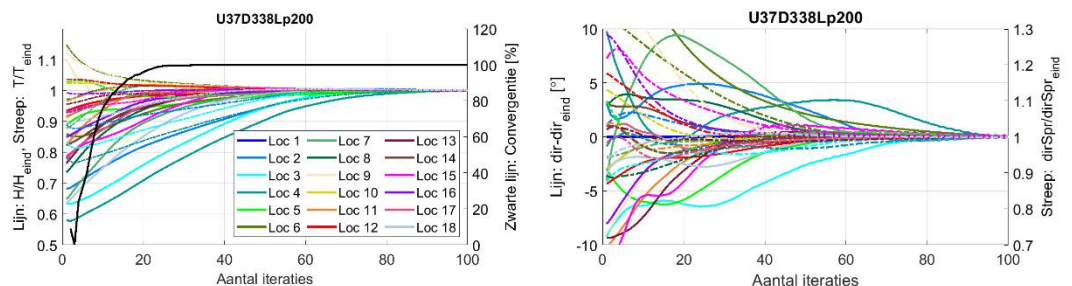


Figuur 5.6: Spectra [m^2/Hz] op log schaal ter plaatse van locatie 164 (zie Figuur 3.9) van de zestien hoekpuntenberekeningen; Met de rode lijn is een f^4 staart geplot.

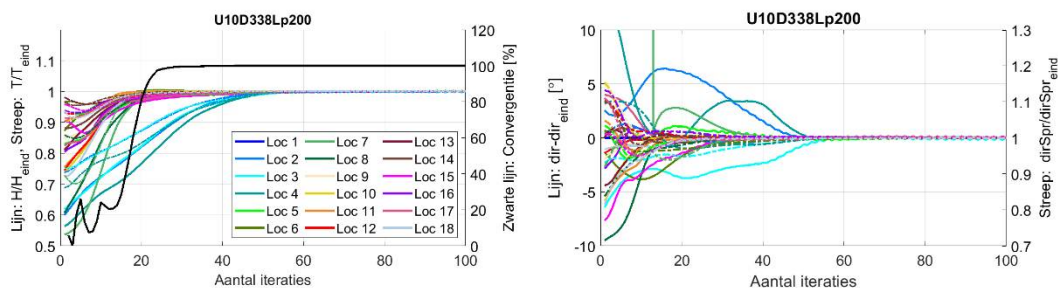
5.3 Convergentie en rekentijden

Voor de controle van de convergentie van de hoekpuntberekeningen wordt de uitvoer op de genummerde zwart omcirkelde locaties bekeken, zie Figuur 3.9. Op deze, in totaal achttien locaties, wordt aan de hand van het verloop van golfhoogte H_{m0} , golfperiode T_{m01} , richting en richtings spreiding als functie van de iteraties de controle uitgevoerd.

In Figuur 5.7 is een typisch verloop van de convergentie voor een extreme windsnelheid van 37 m/s weergegeven. Alle hoekpunt berekeningen hebben 100 iteraties doorlopen. Duidelijk te zien is dat de gebruikelijke 80 iteraties onvoldoende zijn, en dat voor deze berekening locatie 4 lastig (veel iteraties vergt) convergeert. Dit is te verklaren om het feit dat locatie 4 hogerwal (korte strijklengte) en op een complexe ondiepe bathymetrie ligt. Dit gedrag, waar een of een aantal uitvoerlocaties lastig convergeren, komt voor bij de berekeningen met een hoge windsnelheid. Figuur 5.7 laat zien dat op 100 iteraties ook de lastige locatie 4 redelijk (orde millimeter en milliseconde voor de golfhoogte en golfperiode respectievelijk) convergeert. De berekeningen met een kleinere windsnelheid (U10) convergeren sneller, 'al' na ongeveer 60 iteraties. Dit is weergegeven in Figuur 5.8. Verder laten Figuur 5.7 en Figuur 5.8 zien dat de golfhoogte en golfperiode sneller convergeren dan de golf richting en richtings spreiding.



Figuur 5.7: Convergentiegedrag voor U37D338Lp200 voor de significante golfhoogte (lijn, linker paneel), spectrale golfperiode T_{m01} (gestreepte lijn, linker paneel), percentage geconvergeerde roosterpunten (zwarte lijn bovenste paneel), richting (lijn, rechter paneel) en richtings spreiding (gestreepte lijn, rechter paneel).



Figuur 5.8: Convergentiegedrag voor U10D338Lp200 voor de golfhoogte, golfperiode, richting en richtingspreiding

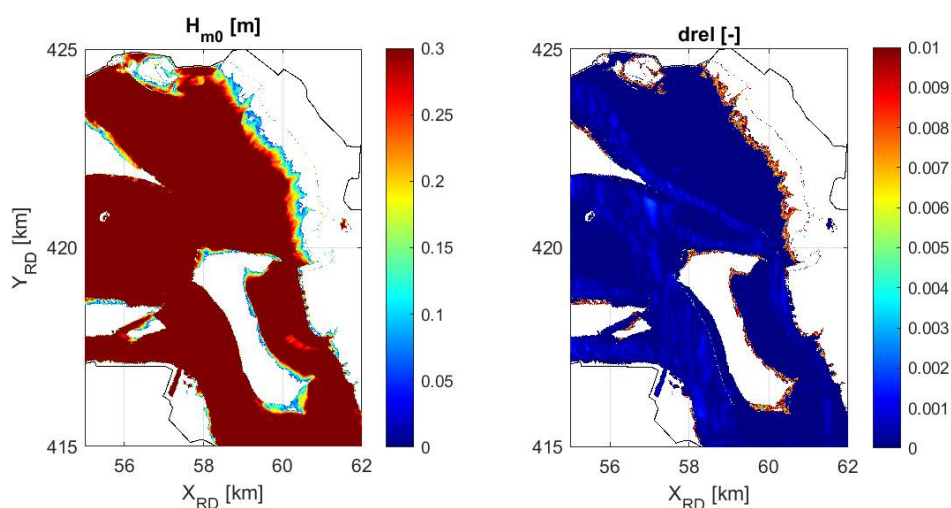
Het convergentie gedrag van de berekeningen met een hoge windsnelheid, Figuur 5.7 roept de vraag op of er meer iteraties geforceerd moeten worden. Zoals uiteengezet in Paragraaf 4.4 wordt niet verwacht dat meer iteraties tot een aanzienlijk beter resultaat leiden. Hiernaast neemt bij meer iteraties de rekentijd toe. Aanvullend is gebleken dat de locaties die relatief veel iteraties vergen, hogerwal en op een ondiepte liggen (H_{m0} kleiner dan 1 meter), en daardoor niet maatgevend zullen zijn voor BOI toepassingen. In bijlage C zijn de convergentie figuren van de overige berekeningen met een hoge windsnelheid (U37) gevoegd. Deze figuren laten zien dat zelfs de lastige locaties (op een complexe bodem en met kleine golfhoogtes) convergeren.

Onderstaande tabel geeft een overzicht van het percentage geconvergeerde roosterpunten na 100 iteraties en rekentijd per berekening. Het is logisch dat over het algemeen de berekeningen met lage waterstand korter duren, omdat het aantal roosterpunten door droogval kleiner is. Het is onduidelijk waarom er verschil zit in de rekentijden per waterstand omdat het aantal uitgevoerde iteraties in alle gevallen 100 is en de waterstand, en dus het aantal natte roosterpunten hetzelfde.

Het default convergentie criterium in SWAN is 99.5%. Bij hoge waterstanden is dit bij alle acht berekeningen gehaald, bij de lage waterstanden in combinatie met hoge windsnelheid niet. Bij deze berekeningen wordt een gemiddelde convergentie van 99.1% behaald, wat nog redelijk in de buurt ligt van 99.5%. Om een idee te geven waar de grootste verschillen in golfhoogte tussen laatste en voorlaatste iteratie optreden verwijzen we naar Figuur 5.1 en Figuur 5.2. De oorzaak van het verschil in convergentie tussen berekeningen met een hoge en lage waterstand is geïllustreerd in Figuur 5.9 en Figuur 5.10. Deze figuren laten de resultaten zien van een berekening met een windsnelheid van 37 m/s en een windrichting van 180 °N voor een waterstand van NAP-0.5 m en NAP+2 m respectievelijk. Deze berekening heeft het grootste verschil in convergentie tussen een hoge en lage waterstand, zie Tabel 5.2. Duidelijk te zien is dat bij een lage waterstand de waarde voor drel (dHs/H_{m0}) groot is aan de randen van het model. Op deze locaties is het ondiep en zijn de golven relatief klein. Deze combinatie zorgt ervoor dat de roostercellen minder goed convergeren waardoor het percentage geconvergeerde natte roosterpunten kleiner is bij de lage waterstand dan bij de hoge waterstand. Overigens zal de combinatie van hoge windsnelheid en lage waterstand vooral voorkomen aan de lizijde van het meer waar door afwaaiing de waterstand laag is. Daar zullen de golven niet maatgevend zijn. Figuur 5.9 en Figuur 5.10 laten zien dat de roostercellen langs de dijken, met voldoende diepte, goed convergeren.

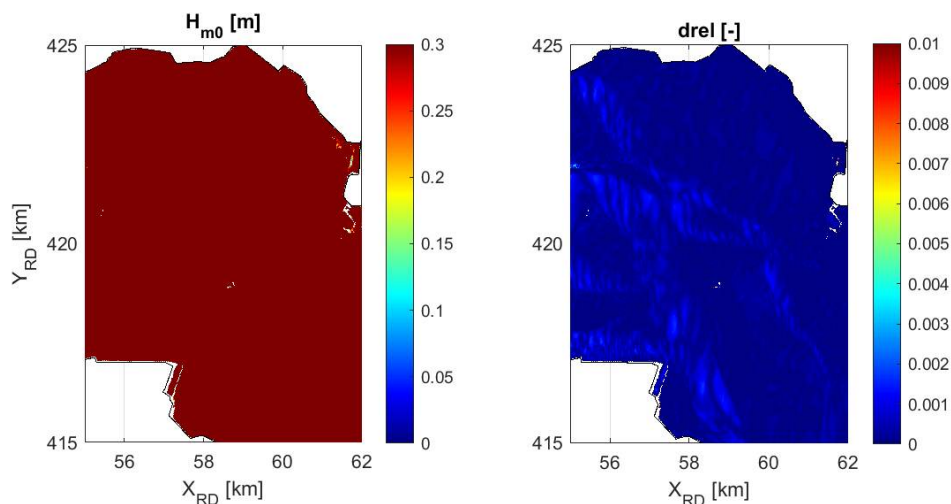
Tabel 5.2: Rekentijden³ en percentage geconvergeerde natte roosterpunten.

	Lm050 (NAP-0.5 m)		Lp200 (NAP+2 m)	
	rekening [minuten]	convergentie [%]	rekening [minuten]	convergentie [%]
U10D068	94	99.99	118	100
U10D180	110	100	134	99.99
U10D270	107	99.99	124	100
U10D338	93	99.99	159	100
U37D068	93	99.27	133	99.92
U37D180	93	98.88	131	99.93
U37D270	122	99.21	121	99.94
U37D338	109	99.06	123	99.92



Figuur 5.9: Detail figuur ingezoomd op het midden van de Grevelingen voor berekening U37D180Lm050. Het linker paneel toont de significante golfhoogte voor golfhoogtes kleiner dan 0.1 m. rechts: verschil in golfhoogte bij laatste en voorlaatste iteratie ten opzichte van de golfhoogte (dH_s/H_{m0}).

³ Het linux rekencluster bestaat uit de volgende hardware: Intel Xeon CPU E5-2667 v3 @ 3.20GHz



Figuur 5.10: Detail figuur ingezoomd op het midden van de Grevelingen voor berekening U37D180Lp200. Het linker paneel toont de significante golfhoogte voor golfhoogtes kleiner dan 0.1 m. rechts: verschil in golfhoogte bij laatste en voorlaatste iteratie ten opzichte van de golfhoogte(dH_s/H_{m0}).

Ons advies is om een maximum van 100 iteraties aan te houden en daarbij te controleren of de convergentie in het interessegebied en op de uitvoerlocaties in orde is. Dit kan bijvoorbeeld door in de ruimtelijke figuren te controleren hoeveel het verschil tussen laatste en voorlaatste iteratie bedraagt (dH_s , dT_m) en voor relevante testlocaties te controleren of de iteratiecurve (golfhoogte, golfperiode, golfrichting als functie van de iteratie) afgevlakt is. Indien elke uitvoerlocatie als testlocatie wordt aangemerkt kan dit voor alle uitvoerlocaties gecontroleerd worden maar mogelijk levert dit erg grote uitvoerbestanden op en kost het extra 'wegschrijf'-tijd.

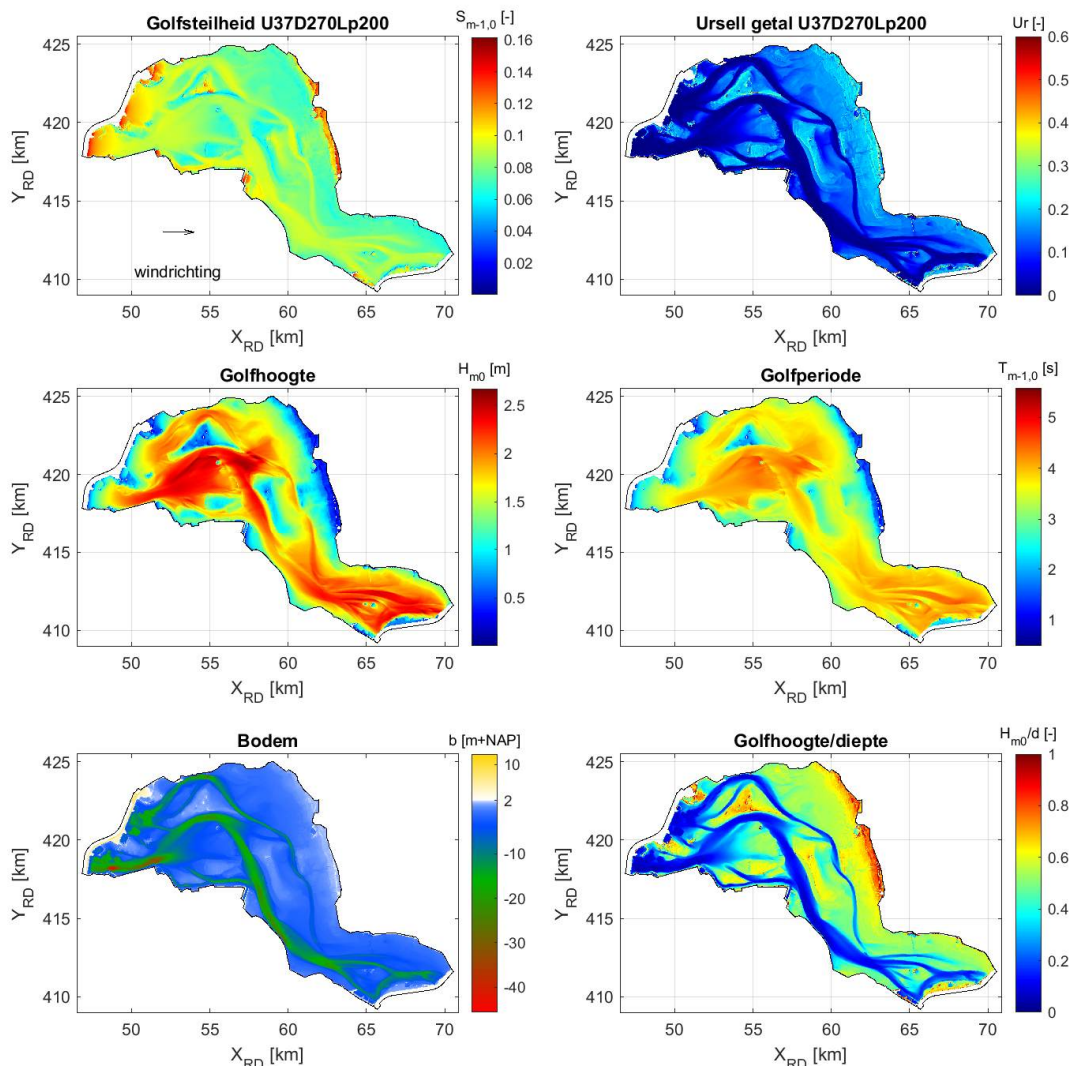
5.4 Verificatie

Ter verificatie beschouwen we een aantal fysische parameters nader, zoals de golfsteilheid en het Ursell getal. We beschikken niet over metingen op het Grevelingenmeer. Om na te gaan of de berekende golfhoogtes enigszins realistisch zijn vergelijken we deze met de golfhoogtes berekend met de groeikromme van Kahma en Calkoen. De focus is daarbij op strijklengtebeperkte locaties.

5.4.1 Golfsteilheid

De diepwater golfsteilheid is op basis van de diepwater golf lengte ($S=H/L_{m-1,0}$ met $L_{m-1,0} = \frac{g}{2\pi} T_{m-1,0}^2$), berekend. Voor een windrichting van $270^\circ N$ met een windsnelheid van 37 m/s en een waterstand van NAP+2m zijn de resultaten weergegeven in Figuur 5.11. De golfsteilheid is weergegeven in het paneel linksboven. In deze som is er golfgroei van west naar oost, waardoor de golfsteilheid relatief hoog is in het westen ($S_{m-1,0} \approx 0.15$). Dit komt voornamelijk doordat de strijklengte daar nog kort is, de golven jong en de golfperiode daardoor ook erg kort is. Naarmate de golven groeien neemt de golfperiode toe en daarmee de golfsteilheid af. Bij de ondiepe schorren in het oosten, neemt de golfsteilheid weer toe. Dit is te verklaren door het optreden van shoaling. De berekende golfsteilheden voor alle varianten levert waarden voor SWAN op van 0 tot maximaal 0.16, maar deze hoge uitschieters komen alleen voor bij heel kleine golven. Gemiddeld wordt voor een windsnelheid van 16 en 37 m/s een steilheid van 0.062 en 0.096 respectievelijk berekend. Volgens Deltares (2012) kunnen deze relatief hoge waarden voortkomen uit de beschouwing van extreme omstandigheden, een groot gebied met korte strijklengtes en dus jonge golven en het meenemen van triads. Duidelijk te zien in Figuur

5.11 is dat er aan de westkant van de modelrand en de platen, zoals de Hompelvoet, hoge golfsteilheden berekend worden doordat de golven op deze locaties nog niet volledig ontwikkeld zijn. In het oosten zijn de golfsteilheden aanzienlijk lager. Bij hoge golfsteilheden (groter dan 0.09) blijft het belangrijk om na te gaan of de verkregen golfsteilheid (o.b.v. golfhoogte en bijbehorende periode) fysisch realistisch is.



Figuur 5.11: Golfsteilheid (linksboven) en Ursell getal (rechtsboven) voor de berekening met een windsnelheid van 37 m/s, een windrichting van 270 °N en een waterstand van 2m+NAP. Voor een betere duiding zijn in de middelste panelen de golfhoogte en golfperiode weergegeven. In de onderste panelen wordt de golfhoogte gedeeld door de diepte en de golfhoogte gedeeld door de golfhoogte volgens de Kahma en Calkoen groeicurve weergegeven.

5.4.2 Ursell getal

Het Ursell getal is een maat voor de niet-lineariteit van het golfveld en is sterk afhankelijk van de waterdiepte. Een hoog Ursell getal geeft aan dat de golven sterk niet-linear zijn, waardoor de bijdrage van triads belangrijk wordt.

Het is berekend met de formulering zoals toegepast in SWAN (zie SWAN technical documentation):,

$$U_r = \frac{g}{8\sqrt{2}\pi^2} H_s T_{m01}^2 / d^2$$

Waarbij g de zwaartekrachtversnelling is, H_s de significante golfhoogte is, T_{m01} de gemiddelde absolute golfperiode is en d de totale waterdiepte.

Het paneel rechtsboven in Figuur 5.11 geeft het Ursell getal weer voor een berekening met een windsnelheid van 37 m/s, een windrichting van 270 °N en een waterstand van 2m+NAP. Door de sterke diepte afhankelijkheid zijn relatief hoge waarden van het Ursell getal vooral zichtbaar in gebieden waar de diepte sterk afneemt (en de golven daardoor breken). Op de diepere gedeeltes in de Grevelingen is het Ursell getal klein (<0.1) en daar zullen niet lineaire drie-golfwisselwerkingen (triads) nauwelijks een rol spelen. Het effect van triads is lokaal en alleen van belang in de ondiepere gebieden.

5.4.3 Kahma en Calkoen groeicurve

Om – ondanks het ontbreken van metingen als validatiemateriaal – toch enigszins inzicht te krijgen in de kwaliteit van de modelresultaten, vergelijken we op een aantal locaties de SWAN-golfhoogtes met golfhoogtes die we berekenen met de groeikromme van Kahma en Calkoen (1992).

De Kahma en Calkoen vergelijkingen zijn hieronder weergegeven. De tilde geeft dimensieloze parameters weer, F de strijklengte, U_{10} de windsnelheid op 10 meter hoogte en H_{m0KC} de significante golfhoogte volgens Kahma en Calkoen. Aangezien de vergelijking diepte-onafhankelijk is, geldt die niet in diepte gelimiteerde situaties. De strijklengte is de afstand tussen de modelrand en de uitvoerlocatie in de richting van de wind⁴.

$$H_{m0KC} = \frac{\widetilde{H}_{m0} U_{10}^2}{g} \quad \text{met} \quad \widetilde{H}_{m0} = 2.88 * 10^{-3} \widetilde{F}^{0.45} \quad \text{en} \quad \widetilde{F} = \frac{gF}{U_{10}^2}$$

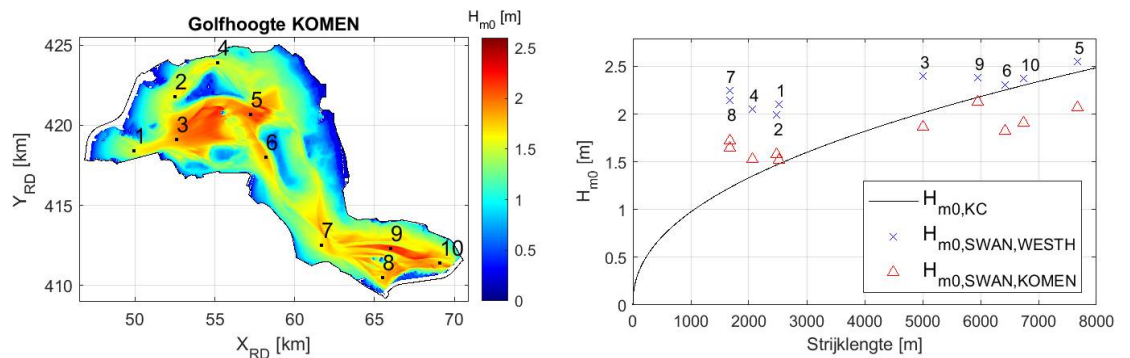
De beschouwde locaties zijn weergegeven in het linkerpaneel van Figuur 5.12, de golfhoogtes bepaald met SWAN en op basis van de groeikrommes staan in het rechterpaneel als functie van de strijklengte. De blauwe kruisjes geven de golfhoogtes weer volgens de SWAN instellingen gespecificeerd in paragraaf 3.7.1. Windgeneratie en whitecapping worden dus gemodelleerd met de formuleringen van Van der Westhuysen (WESTH). Opvallend is dat voor relatief korte strijklengtes, tot 4 kilometer, de golfhoogtes berekend met SWAN mee dan 0.5 m groter zijn dan de golfhoogtes op basis van Kahma en Calkoen. Voor grotere strijklengtes nemen de verschillen af tot minder dan 10%. Omdat de groeikromme geen rekening houdt met dieptegerelateerde beperkingen in golfhoogte zou men eerder verwachten dat die hoger uitkomt dan SWAN.

De grote verschillen vragen om nadere analyse en daarom is de SWAN-berekening ook uitgevoerd met andere instellingen, namelijk die van Komen in plaats van Van der Westhuysen voor windgroei en whitecapping en zonder winddrag afkapping (GEN3 KOMEN & WCAP KOMEN delta=1). Figuur 5.12 laat zien dat de golfhoogtes met KOMEN lager uitvallen dan met WESTH, ondanks de hogere wind drag in de berekeningen met Komen ($3.2 * 10^{-3}$ vs $2.75 * 10^{-3}$ bij de windsnelheid van 37 m/s). Deze bevindingen zijn in overeenstemming met eerdere studies op het IJsselmeer en de Oosterschelde waar de significante golfhoogte met Komen ook lager uitvalt dan met Van der Westhuysen (Deltares 2013; Svasek Hydraulics, 2016). Opvallend is dat voor het IJsselmeer - bij strijklengtes tot 1600 meter en windsnelheden van orde grootte 15 m/s - beide instellingen leidden tot onderschatting van gemeten golfhoogtes. terwijl ze juist hogere resultaten geven dan Kahma en Calkoen (Deltares, 2013). De studie

⁴ Een effectieve strijklengte bepaald met Brettpro geeft hetzelfde beeld als Figuur 5.12.

voor de Oosterschelde laat zien dat - gemiddeld over 13 stormmomenten en twee locaties - SWAN met Van der Westhuysen de gemeten significante golfhoogte overschat en met Komen onderschat (Svasek, 2016). De beschouwde windsnelheden en strijklengtes variëren in deze studie van 15 tot 26 m/s en van 6 tot ongeveer 30 kilometer respectievelijk.

We concluderen dat de SWAN-resultaten met Van der Westhuysen hoger zijn dan de groeikromme van Kahma en Calkoen en ook hoger dan de SWAN-resultaten met Komeninstellingen. Het verschil ten opzichte van de groeikromme neemt over het algemeen af bij toenemende strijklengte. Vooral bij strijklengtes korter dan 5 km zijn de verschillen groot (tot 50%). Naar verwachting treden de maatgevende condities juist op bij langere strijklengte. In hoeverre de SWAN-resultaten afwijken van de werkelijkheid is niet te zeggen op basis van deze vergelijking met de groeikrommes.



Figuur 5.12: Links: ligging uitvoerlocaties en de golfhoogte met KOMEN; rechts: Golfgroeikromme volgens Kahma en Calkoen en SWAN resultaten (obv WESTH en KOMEN) voor een berekening met een windsnelheid van 37 m/s, een windrichting van 270 °N en een waterstand van 2m+NAP.

6 Conclusies en aanbevelingen

We hebben een SWAN-model van de Grevelingen opgezet genaamd swan-grevelingen-beno19_6-v1a⁵, gebaseerd op baseline-grevelingen-j19_6-v1. Het domein beslaat het volledige Grevelingenmeer. Op basis van gevoeligheidstests met diverse roosters hebben wij gekozen voor een rechthoekig rekenrooster bestaande uit vierkante cellen met een roosterafstand van 20 m. De richtingsruimte is gediscrètiseerd met 72 richtingsbins van elk 5°.

Het model maakt gebruik van SWAN-versie 41.31A.1 en gebruikt de generieke instellingen zoals aanbevolen in Deltares (2020, 2021a) zoals windgroei en whitecapping volgens Van der Westhuysen (2007), ondiep water breken volgens Van der Westhuysen (2010). Daarnaast is in dit rapport uitgegaan van de OCA LTA triad formulering (itriad=11) en trfac=0.05⁶ maar voor de productieberekeningen moet trfac=0.1 worden gehanteerd (RWS, 2021c). Voor de winddrag gebruiken we de Wu formulering waarbij boven 30 m/s een vaste waarde van de dragcoëfficiënt wordt gehanteerd ($C_d=0.00275$). Het Grevelingenmeer is zout water dus we nemen als waterdichtheid de waarde 1025 kg/m³. Elke berekening doorloopt 100 iteraties. Het model maakt gebruik van uniforme wind- en waterstandsvelden en eventuele stroming wordt verwaarloosd.

Er zijn zestien testberekeningen uitgevoerd voor de combinaties van hoge en lage windsnelheid (37 m/s en 10 m/s), hoge en lage waterstand (NAP+2 m en NAP-0.5 m) voor vier windrichtingen (67.5°N, 180°N, 270°N, 337.5°N), de zogenaamde hoekpuntenanalyse. De situatie met 37 m/s wind uit het westen en een waterstand van NAP+ 2m is ook met een groeikromme bepaald. Bij strijklengtes minder dan 5 km zijn de SWAN-resultaten beduidend hoger dan wat men volgens Kahma en Calkoen (1992) zou verwachten. Bij grotere strijklengtes – die waarschijnlijk maatgevend zullen zijn – zijn de verschillen over het algemeen minder dan 10%. In hoeverre de SWAN-resultaten afwijken van de werkelijkheid is niet te zeggen op basis van de vergelijking met de groeikromme.

Niet alle berekeningen zijn volledig geconvergeerd na 100 iteraties maar verdere doorgroei is heel beperkt. Ons advies is om 100 iteraties aan te houden en daarbij te controleren of de convergentie in het interessegebied en op de uitvoerlocaties in orde is. Het model is – afgezien van de uitvoerlocaties – geschikt om in te zetten voor BOI productieberekeningen. De recent opgeleverde SWAN-modellen voor Volkerak-Zoommeer, Veluwerandmeren en Markermeer (Deltares, 2021d,e,f) gebruiken 80 iteraties zoals aanbevolen in Deltares, 2021a.

De rekentijd bedraagt gemiddeld 115 minuten op vier threads van het Deltares linux rekencluster⁷.

⁵ Pas als de voorlopige uitvoerlocaties vervangen zijn door een definitieve set zal het model de status grevelingen-hr2023 krijgen. Dit zal binnen enkele maanden gebeuren, een externe partij is momenteel bezig met het definiëren van de uitvoerlocaties.

⁶ Opgemerkt moet worden dat voor de berekeningen in dit rapport gerekend is met de oorspronkelijke OCA (itriad=11) implementatie voor triads in combinatie met itriad=0.05. Intussen is besloten om voor BOI de triads als volgt mee te nemen: itriad = 11 trfac = 0.1 cutfr=2.5.

⁷ Het linux rekencluster bestaat uit de volgende hardware: Intel Xeon CPU E5-2667 v3 @ 3.20GHz

7 Literatuur

Botterhuis, T., Stijnen, J., M. Benit en C. Gautier (2021). Update Stochasten BOI2023. Memo PR4440.10, d.d. 7 mei 2021 (concept)

Deltares (2012). Maximale significante golfhoogte bij ondiep water en maximale golfsteilheid. Deltares rapport 1204727-004-HYE-0001, April 2012 (S. Caires)

Deltares (2013). Evaluation of SWAN Spectra at Dutch Lakes. Deltares rapport 1206011-002-HYE-0002, Maart 2013 (P. Wellens en C. Gautier)

Deltares (2018). Detailed evaluation of the numerical implementation of SWAN. Deltares rapport 11202560-001-GEO-0002, December 2018 (A.J. Smale en M.J.A. Borsboom).

Deltares (2019). Modelontwikkeling D-HYDRO Grevelingen. Een zesde-generatie Rijkswaterstaatmodel. Deltares rapport 11203715-006-ZKS-0002, oktober 2019 (J. Groeneboom en F.M. Kleissen).

Deltares (2020). Generieke methode SWAN modellering voor BOI en andere RWS toepassingen. Deltares rapport 11205758-041-GEO-0001, oktober 2020 (J. Groeneweg en C. Gautier)

Deltares (2021a). Instellingen voor SWAN-meren. Deltares rapport 111206818-025-GEO-0001, maart 2021 (J. Groeneweg).

Deltares (2021b). Vergelijking SWAN brekerformuleringen. Deltares rapport 11206818-035-GEO-0001, juni 2021 (M. Doeleman, J. Groeneweg en J. van Nieuwkoop).

Deltares (2021c). Opzet structuur G6 repository. Deltares memo 1206814-002-ZKS-0001, CONCEPT, 21 april 2021 (D. Kerkhoven).

Deltares (2021d). SWAN model Veluwerandmeren. Deltares rapport 11206813-014-ZWS-0002, mei 2021 (J. van Nieuwkoop).

Deltares (2021e). SWAN-model Volkerak-Zoommeer. Deltares rapport 11206814-006-ZKS-0002, juli 2021 (C. Gautier en M. de Ridder)

Deltares (2021f). SWAN modelschematisatie Markermeer. Deltares rapport 11206814-013-ZKS-0001, juli 2021 (M. de Ridder en C. Gautier)

Eldeberky, Y. (1996). Nonlinear transformation of wave spectra in the nearshore zone (Ph. D. thesis). Netherlands: Delft University of Technology, Department of Civil Engineering.

Holthuijsen, L.H. (2007). Waves in oceanic and coastal waters. Cambridge: Cambridge University Press.

Kahma, K.K. and Calkoen, C.J. (1992). Reconciling discrepancies in the observed growth of wind-generated waves, Journal of Physical Oceanography, Vol 22, 1389-1405.

RWS (2021a). Uitgangspunten Hydraulische Belastingen BOI voor 2023. Beoordelings- en Ontwerp Instrumentarium (BOI). RWS document versie 0.9c CONCEPT, 6 april 2021.

RWS (2021b). Rijkswaterstaat Waterinfo. <https://waterinfo.rws.nl/#!/kaart/golfhoogte/>

RWS (2021c). Instellingen voor de driegolfwisselwerkingen (triads) in SWAN t.b.v. de productieberekeningen meren en benedenrivieren BOI2023 dd 26 juli 2021 door P. Oosterloo

Svasek Hydraulics (2016). SWAN hindcast berekeningen Oosterschelde Ten behoeve van WBI2023. Rapport 30 november 2016 (M.J.G. van den Boomgaard en B.J.O. Eikema)

Van der Westhuysen, A.J., M. Zijlema and J.A. Battjes (2007). Nonlinear saturation based whitecapping dissipation in SWAN for deep and shallow water, coastal engineering, Vol 54, 15-170

Van der Westhuysen, A.J. (2010). Modeling of depth-induced wave breaking under finite depth wave growth conditions, Journal of Geophysical Research, Vol 115, C01008, doi:10.1029/2011JC007837.

Wu, J. (1982). Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane. Journal of Geophysical Research: Oceans, 87(C12), 9704-9706.

A SWAN invoer⁸

```
$***** greU10D068Lm050Va *****

$ Model          : grevelingen-ben019-v1a
$ Gebied         : gre (Grevelingen)
$ Windsnelheid U10 voor SWAN : 10.00 m/s
$ Windrichting   : 67.50 gr
$ Waterstand t.o.v. N.A.P. : +-0.50 m
$ Variant        : Va
$ rooster resolutie 20 m x 20 m
$ template opgesteld voor SWAN-versie 41.31.A1 dd juni 2021
$ t.b.v. BOI berekeningen 2023 op de Grevelingen

$*****

PROJECT 'BOI2023','gre'

$----- algemeen -----

SET      LEVEL=-0.50 MAXERR=2 RHO=1025 CDCAP=0.00275 NAUTICAL
MODE     STATIONARY TWODIMENSIONAL
COORDS   CART

$----- invoer -----

CGRID    XPC=46200 YPC=417800 ALPC=-25  XLENC=24800 YLENC=12400 &
          MXC=1240 MYC=620   CIRCLE   MDC=72 FLOW=0.06 FHIGH=2.4

INPGRID  BOT XPINP=46200 YPINP=417800 ALPINP=-25 MXINP=1240 MYINP=620
DXINP=20. DYINP=20. EXC=999.0
READINP  BOT -1.0   '../.../geometry/grevelingen-j19_6-v1_20m.bot'
IDLA=5 NHEDF=0 FREE

WIND     10.00    67.50  DRAG  WU

INCLUDE  '../.../geometry/grevelingen-j19_6-v1_20m.fxw'

$----- fysica & numeriek -----

GEN3 WESTH
WCAP WESTH      CDS2=5.0e-05 BR=0.00175  P0=4.0    POWST=0.0 POWK=0.0
NLDISP=0.0 CDS3=0.8 POWFSH=1.0
QUAD  IQUAD=2   LAMBDA=0.25 CNL4=3.0e+07 CSH1=5.5  CSH3=-1.25
BREA  WESTH    ALPHA=0.96  POWN=2.5  BREF=-1.39630 SHFAC=500.0
FRIC  JONSWAP  CFJON=0.0380000
TRIAD ITRIAD=11.0 TRFAC=0.1  CUTFR=2.5

NUMERIC STOPC      DABS=0.005  DREL=0.01  CURVAT=0.001  NPNTS=101  STAT
MXITST=100 ALFA=0.001
```

⁸ De berekeningen in dit rapport zijn uitgevoerd met de oorspronkelijke OCA (itriad=11) implementatie voor triads in combinatie met itriad=0.05. Voor BOI wordt de volgende instellingen geadviseerd voor triads: itriad=11 trfac=0.1 en cutfr=2.5. Dit advies is overgenomen in deze appendix.

```

$----- uitvoer -----
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD 'results/greU10D068Lm050Va.nc' LAY-OUT 3 &
      XP YP DEP BOTLEV HSIG TPS RTP TMM10 TM01 TM02 DIR DSPR DHS
DRTM01 WATLEV WIND WLEN HSWELL PDIR QB URSELL &
DISSIP DISSURF DISWCAP DISBOT SETUP FORCE UBOT URMS WLEN

POINTS 'P1' FILE '../.../geometry/output_locations/gre-j19_6-
plgeulmidden.xyn'
POINTS 'P2' FILE '../.../geometry/output_locations/gre-j19_6-
p2geulnoord.xyn'
POINTS 'P3' FILE '../.../geometry/output_locations/gre-j19_6-
p3rondom.xyn'
POINTS 'P4' FILE '../.../geometry/output_locations/gre-j19_6-
p4noordoost.xyn'

TABLE 'P1' HEAD 'results/greU10D068Lm050Va_p1.tab' XP YP DEP HSIG TPS
RTP TMM10 TM01 TM02 DIR DSPR DHS DRTM01 WATLEV WIND WLEN DISSIP FORCE
UBOT URMS QB

TABLE 'P2' HEAD 'results/greU10D068Lm050Va_p2.tab' XP YP DEP HSIG TPS
RTP TMM10 TM01 TM02 DIR DSPR DHS DRTM01 WATLEV WIND WLEN DISSIP FORCE
UBOT URMS QB

TABLE 'P3' HEAD 'results/greU10D068Lm050Va_p3.tab' XP YP DEP HSIG TPS
RTP TMM10 TM01 TM02 DIR DSPR DHS DRTM01 WATLEV WIND WLEN DISSIP FORCE
UBOT URMS QB

TABLE 'P4' HEAD 'results/greU10D068Lm050Va_p4.tab' XP YP DEP HSIG TPS
RTP TMM10 TM01 TM02 DIR DSPR DHS DRTM01 WATLEV WIND WLEN DISSIP FORCE
UBOT URMS QB

SPEC 'P1' SPEC1D ABS 'results/greU10D068Lm050Va_p1.sp1'
SPEC 'P1' SPEC2D ABS 'results/greU10D068Lm050Va_p1.sp2'
SPEC 'P2' SPEC1D ABS 'results/greU10D068Lm050Va_p2.sp1'
SPEC 'P2' SPEC2D ABS 'results/greU10D068Lm050Va_p2.sp2'
SPEC 'P3' SPEC1D ABS 'results/greU10D068Lm050Va_p3.sp1'
SPEC 'P3' SPEC2D ABS 'results/greU10D068Lm050Va_p3.sp2'
SPEC 'P4' SPEC1D ABS 'results/greU10D068Lm050Va_p4.sp1'
SPEC 'P4' SPEC2D ABS 'results/greU10D068Lm050Va_p4.sp2'

CURve 'curve1' 5.00989345652834090e+04 4.18944470145115862e+05 100
5.04758187014631621e+04 4.18057683942339965e+05
CURve 'curve2' 5.47104281711863077e+04 4.22701893371876329e+05 100
5.43934240607513493e+04 4.24348768384623807e+05
CURve 'curve3' 5.86219732630670478e+04 4.17511670893184666e+05 100
5.71075808413234918e+04 4.16934759494425205e+05
CURve 'curve4' 5.96158071781665494E+04 4.18212375833994069E+05 100
6.28434456682221571e+04 4.19173942436410056e+05
CURve 'curve5' 6.72350466089495894e+04 4.11414226321834663e+05 100
6.74361530128065351e+04 4.10379964816284715e+05

TABLE 'curve1' HEAD 'results/greU10D068Lm050Va_c1.tab' XP YP DIST DEP
HSIG TMM10 DIR DSPR WATLEV WIND DHS DRTM01
TABLE 'curve2' HEAD 'results/greU10D068Lm050Va_c2.tab' XP YP DIST DEP
HSIG TMM10 DIR DSPR WATLEV WIND DHS DRTM01
TABLE 'curve3' HEAD 'results/greU10D068Lm050Va_c3.tab' XP YP DIST DEP

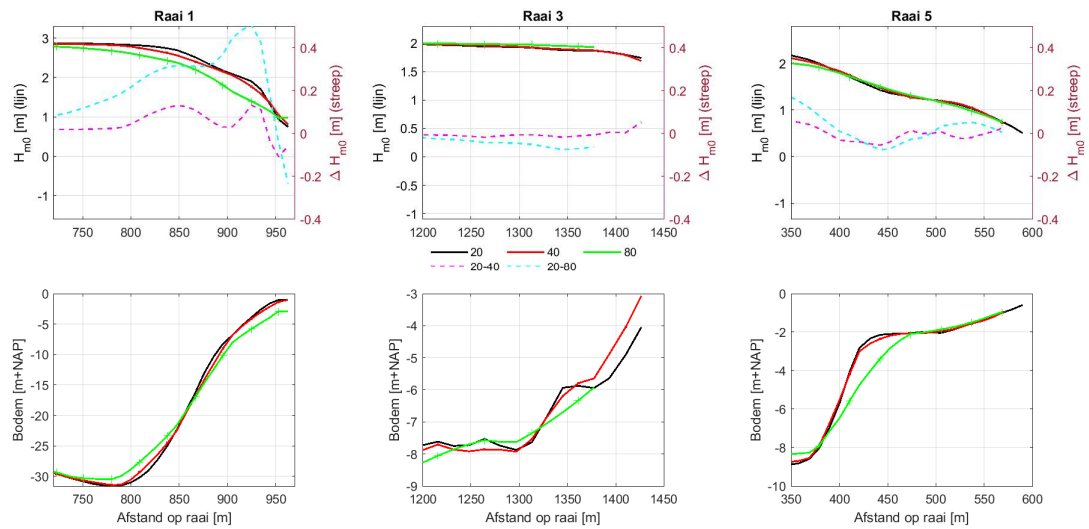
```

```
TABLE 'curve4' HEAD 'results/greU10D068Lm050Va_c4.tab' XP YP DIST  
DEP HSIQ TMM10 DIR DSPR WATLEV WIND DHS DRTM01  
TABLE 'curve5' HEAD 'results/greU10D068Lm050Va_c5.tab' XP YP DIST  
DEP HSIQ TMM10 DIR DSPR WATLEV WIND DHS DRTM01
```

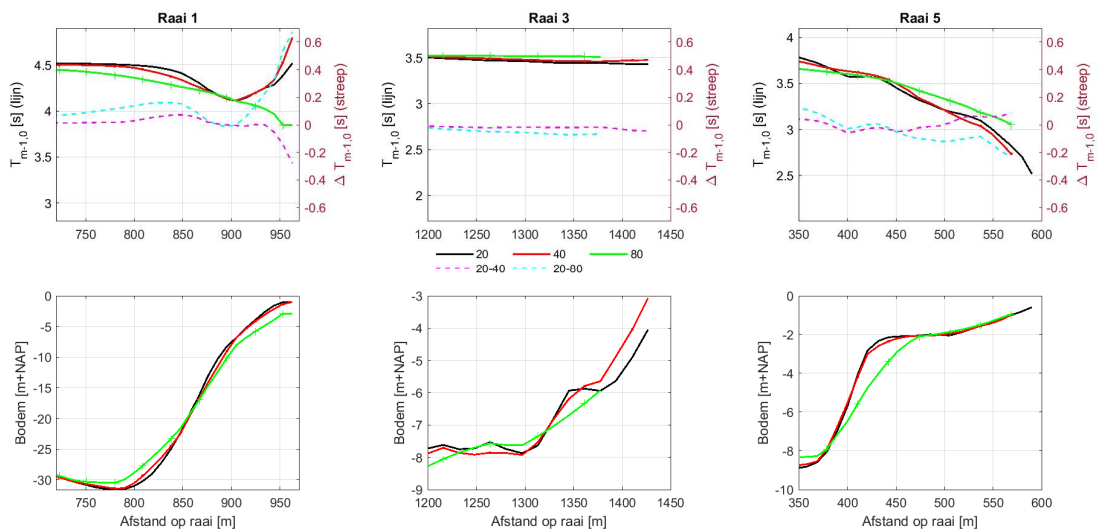
```
TEST 1 0 &  
POINTS XY &  
49512.84 420528.44 &  
51495.00 423580.00 &  
53731.00 423984.00 &  
55507.00 424492.00 &  
58882.12 423138.22 &  
62633.33 418519.68 &  
66988.00 413858.00 &  
69632.00 412748.00 &  
68159.19 410697.19 &  
63574.00 410755.00 &  
62779.34 411988.20 &  
60955.00 411592.00 &  
59648.00 413704.00 &  
56545.00 417118.00 &  
54973.00 421473.14 &  
52453.00 417740.00 &  
51400.15 418647.61 &  
48847.00 417740.00 &  
PAR 'results/greU10D068Lm050Va.tst' &  
S1D 'results/greU10D068Lm050Va.s1d' &  
S2D 'results/greU10D068Lm050Va.s2d'
```

```
COMPUTE STATIONARY  
STOP
```

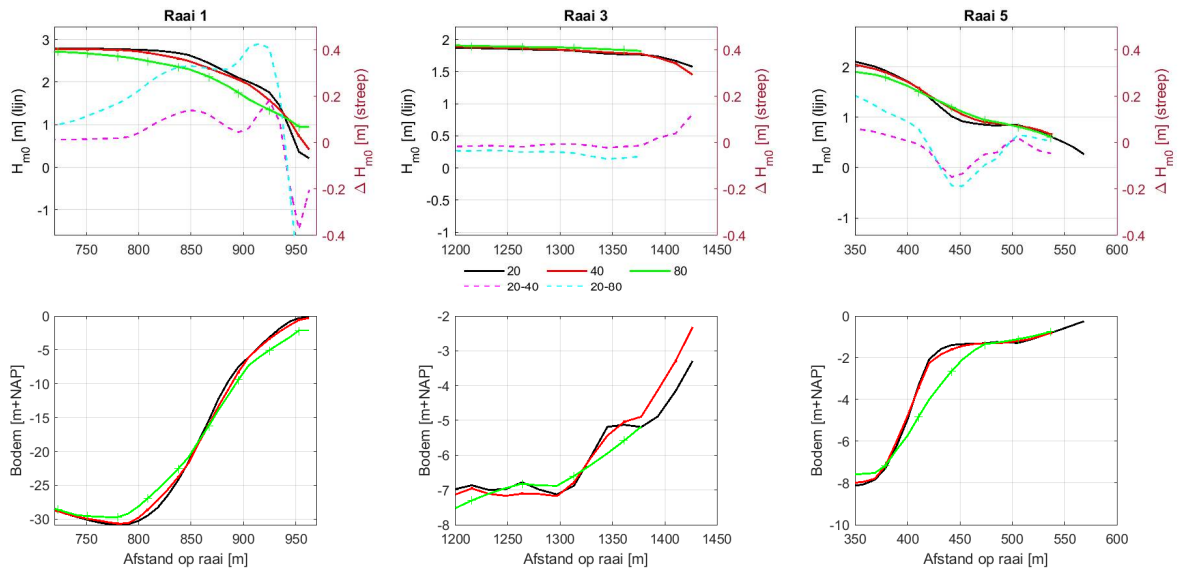
B Figuren gevoeligheidsanalyse



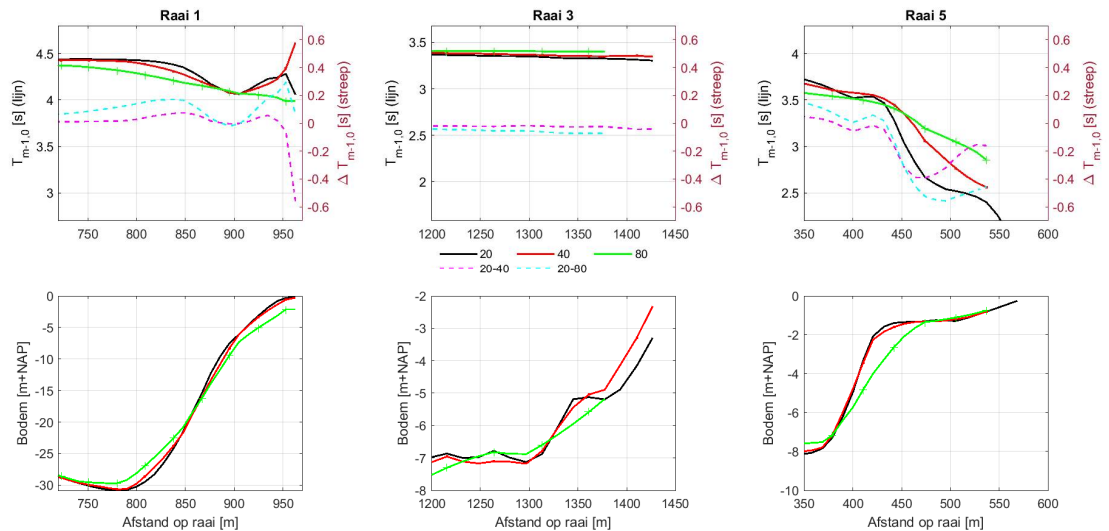
B.4.1: Raaiuitvoer golfhoogte (H_{m0}) voor een berekening met een windsnelheid van 42 m/s, windrichting uit $67.5^\circ N$ en een waterstand van NAP+0 m. De zwarte, rode en groene lijn geven de resultaten met een 20 m, 40 m en 80 m rooster respectievelijk weer. De verschillen, 20-40 m en 20-80 m rooster, zijn weergegeven met de gestreepte magenta en cyaan lijn.



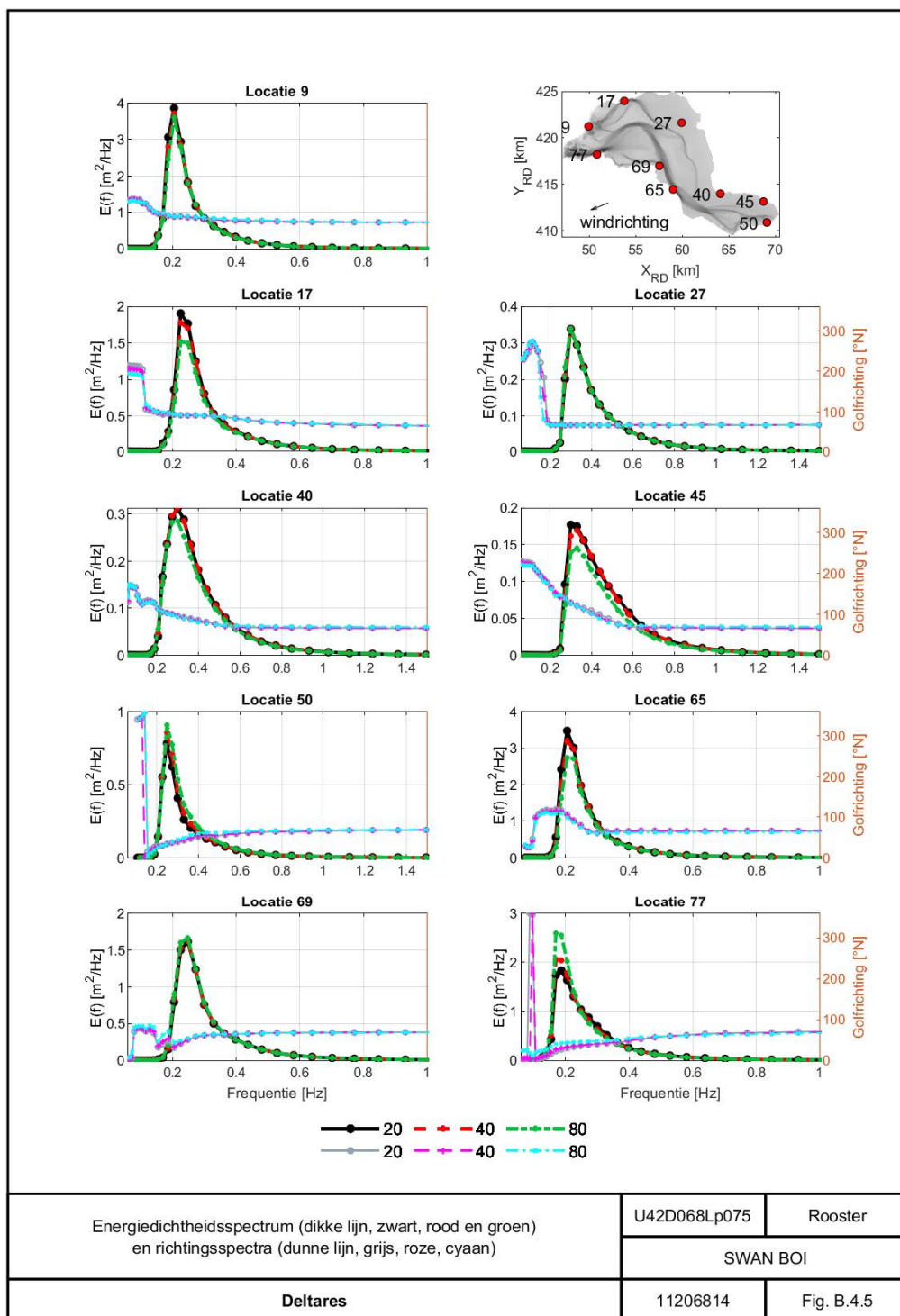
B.4.2: Raaiuitvoer golfperiode ($T_{m-1,0}$) voor een berekening met een windsnelheid van 42 m/s, windrichting uit $67.5^\circ N$ en een waterstand van NAP+0 m. De zwarte, rode en groene lijn geven de resultaten met een 20 m, 40 m en 80 m rooster respectievelijk weer. De verschillen, 20-40 m en 20-80 m rooster, zijn weergegeven met de gestreepte magenta en cyaan lijn.

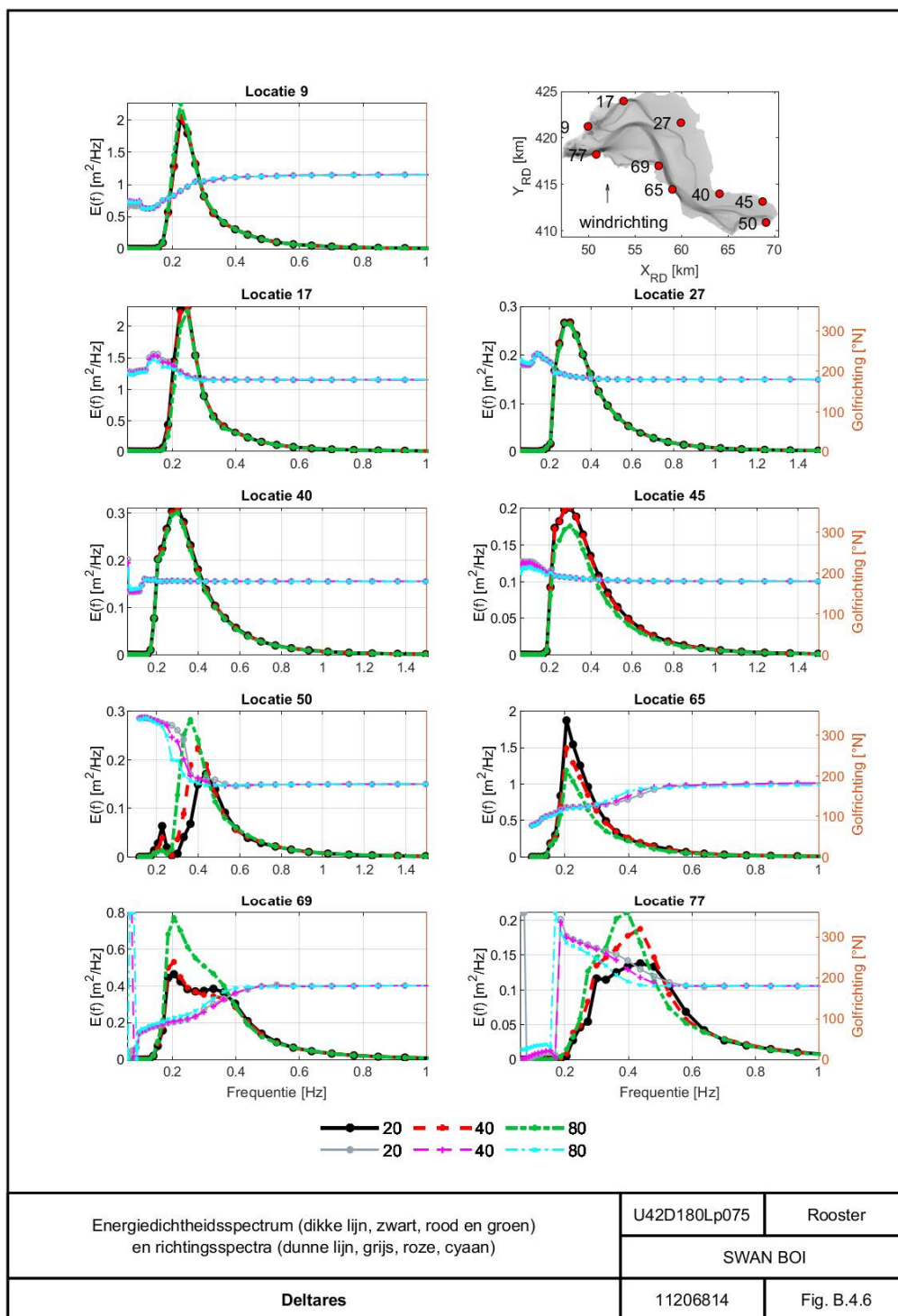


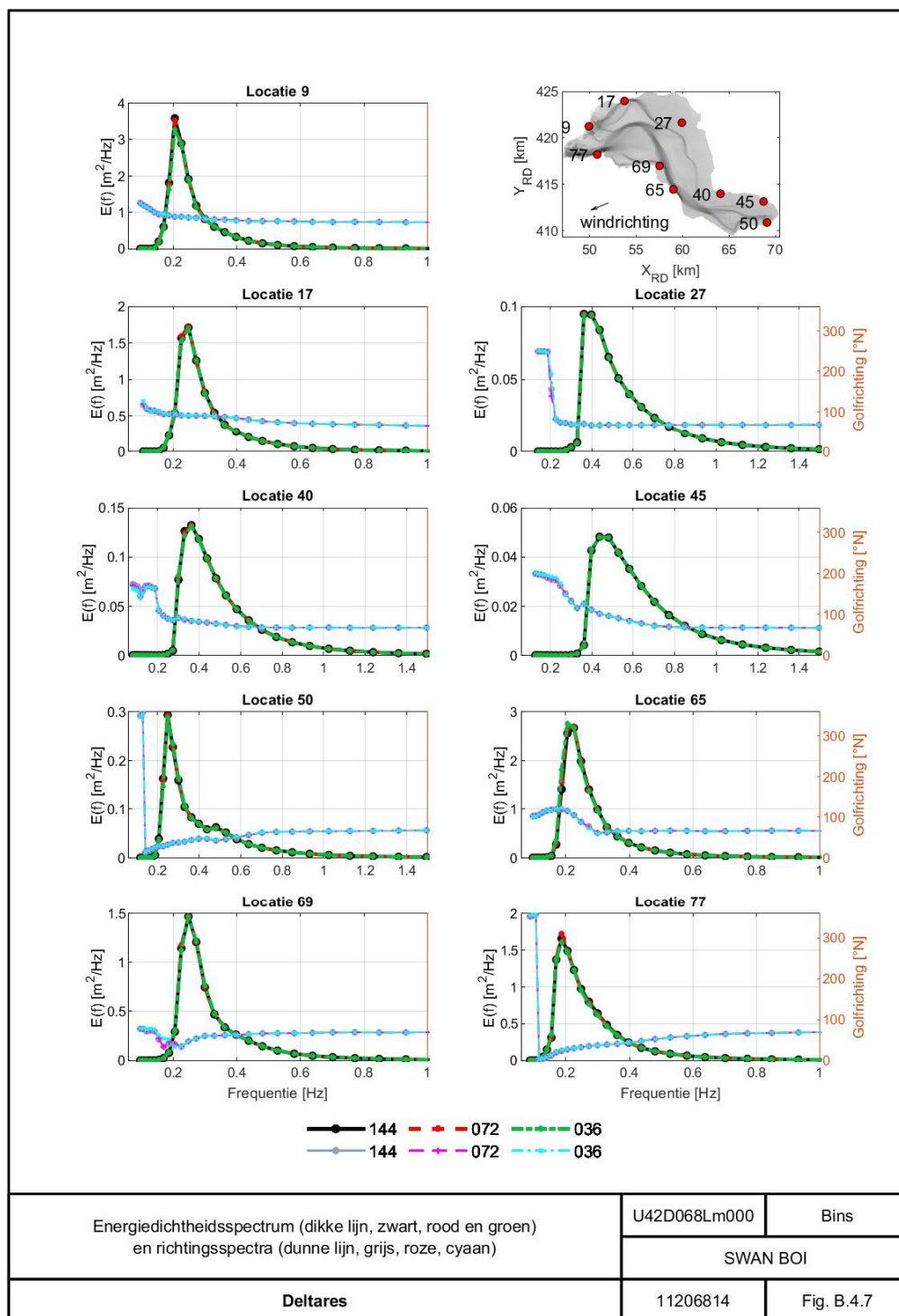
B.4.3: Raaiuitvoer golfhoogte ($H_{m,0}$) voor een berekening met een windsnelheid van 42 m/s, windrichting uit $67.5^\circ N$ en een waterstand van NAP+0.75 m. De zwarte, rode en groene lijn geven de resultaten met een 20 m, 40 m en 80 m rooster respectievelijk weer. De verschillen, 20-40 m en 20-80 m rooster, zijn weergegeven met de gestreepte magenta en cyaan lijn.

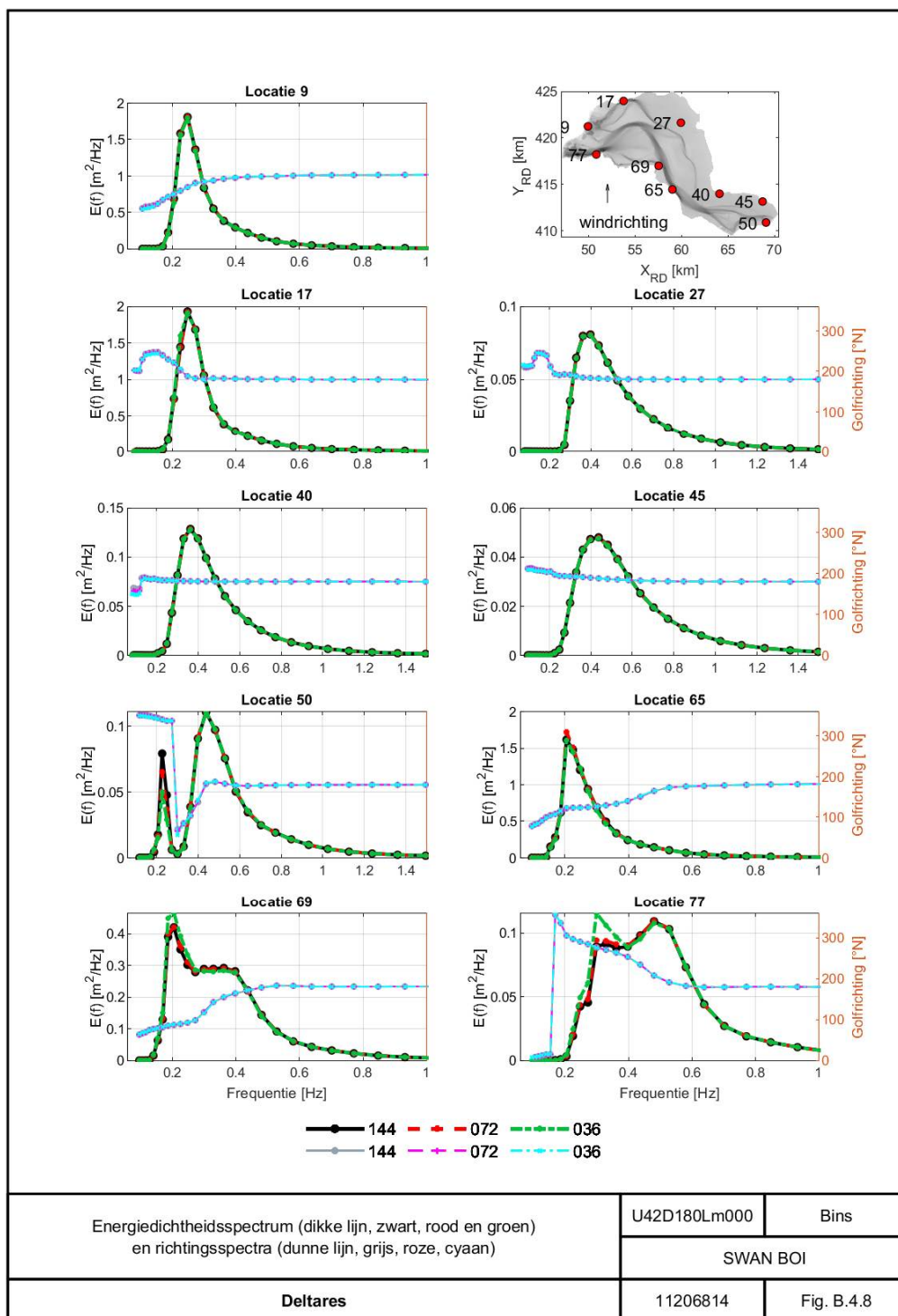


B.4.4: Raaiuitvoer golfperiode ($T_{m-1,0}$) voor een berekening met een windsnelheid van 42 m/s, windrichting uit $67.5^\circ N$ en een waterstand van NAP+0.75 m. De zwarte, rode en groene lijn geven de resultaten met een 20 m, 40 m en 80 m rooster respectievelijk weer. De verschillen, 20-40 m en 20-80 m rooster, zijn weergegeven met de gestreepte magenta en cyaan lijn.





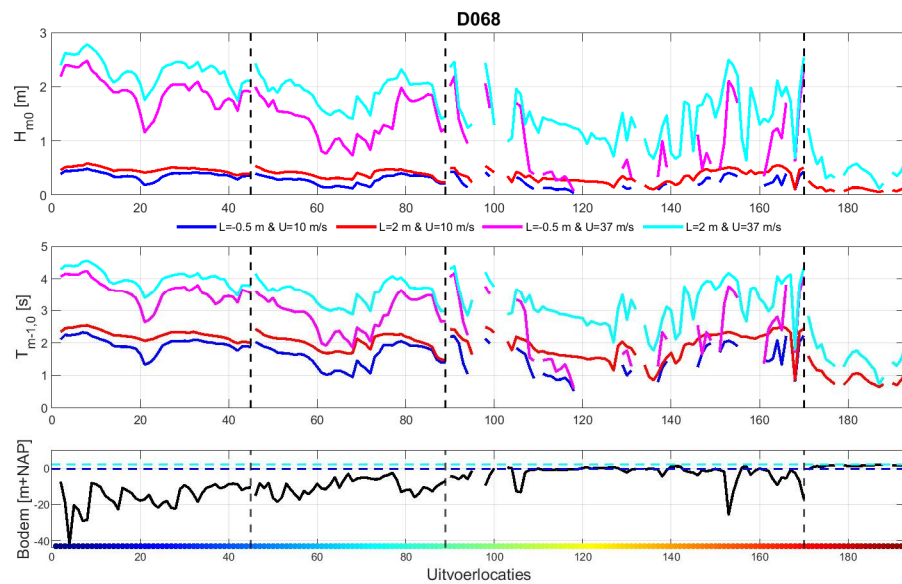




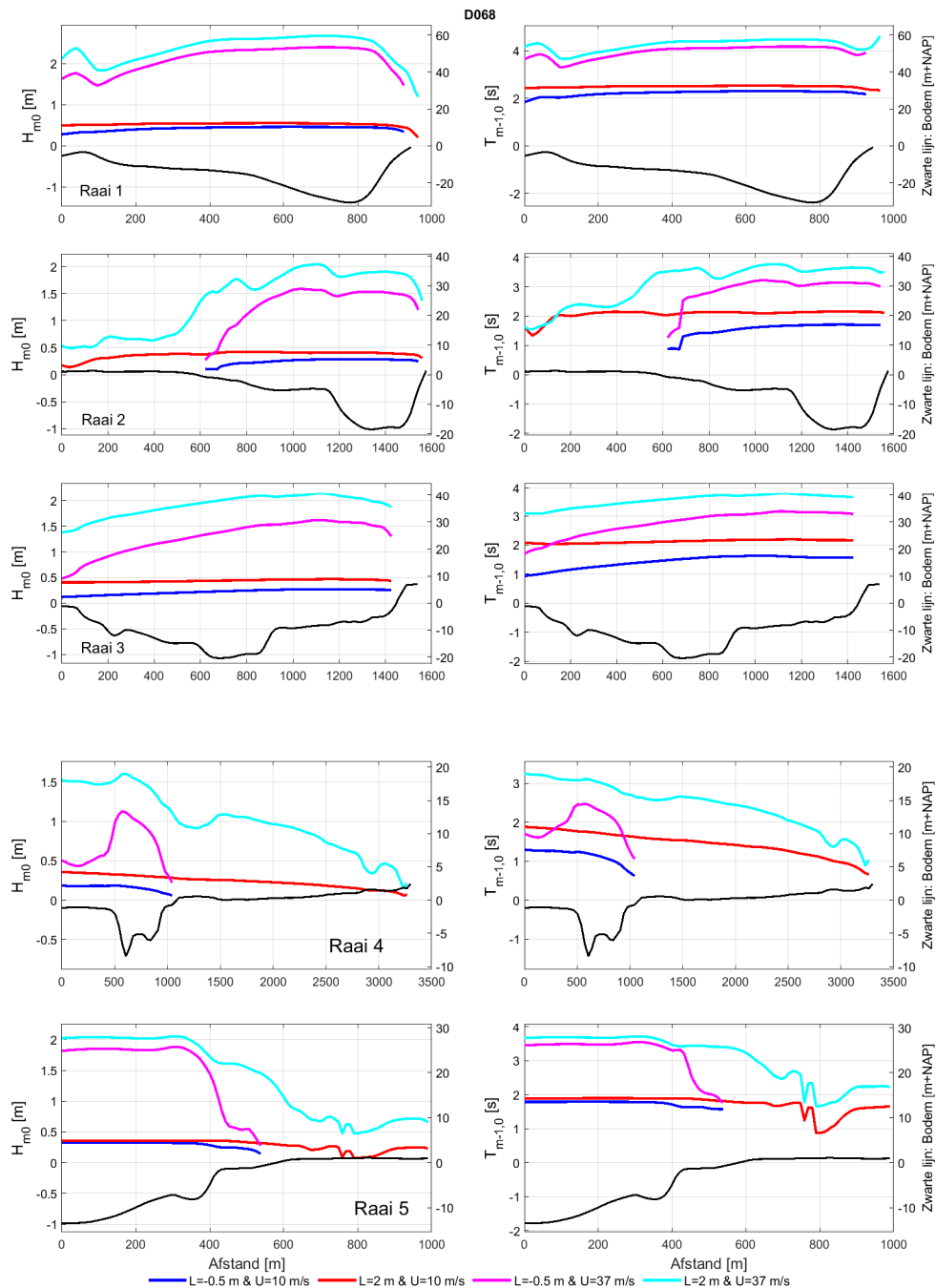
C Figuren hoekpuntanalyse

C.1 Langs uitvoerlocaties en raaien

C.1.1 Windrichting 67.5°N

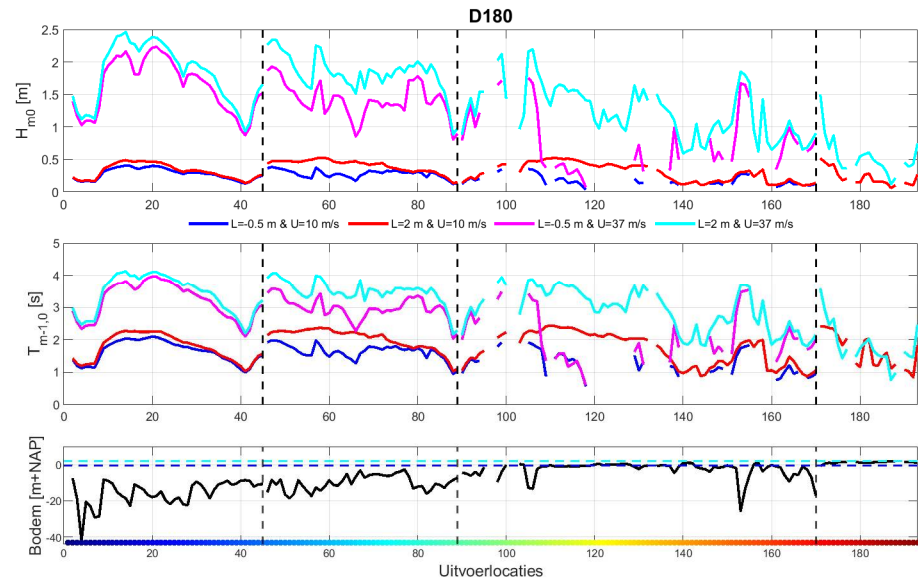


C. 1: SWAN resultaten van golfhoogte (bovenste paneel), golfperiode (middelste paneel) en bodemligging (onderste paneel) ter plaatse van de uitvoerpunten voor vier berekeningen met windrichting 67.5°N. De kleurenband in het onderste paneel komt overeen met de locaties weergegeven in Figuur 3.9. De blauwe en lichtblauwe stippellijn geven NAP-0.5m en NAP+2 respectievelijk aan om (on)diepte weer te geven. De zwarte gestreepte verticalen geven de overgang tussen vier subsets, hoofdgeul, geul noord, omliggende en de noordoostelijke rand weer.

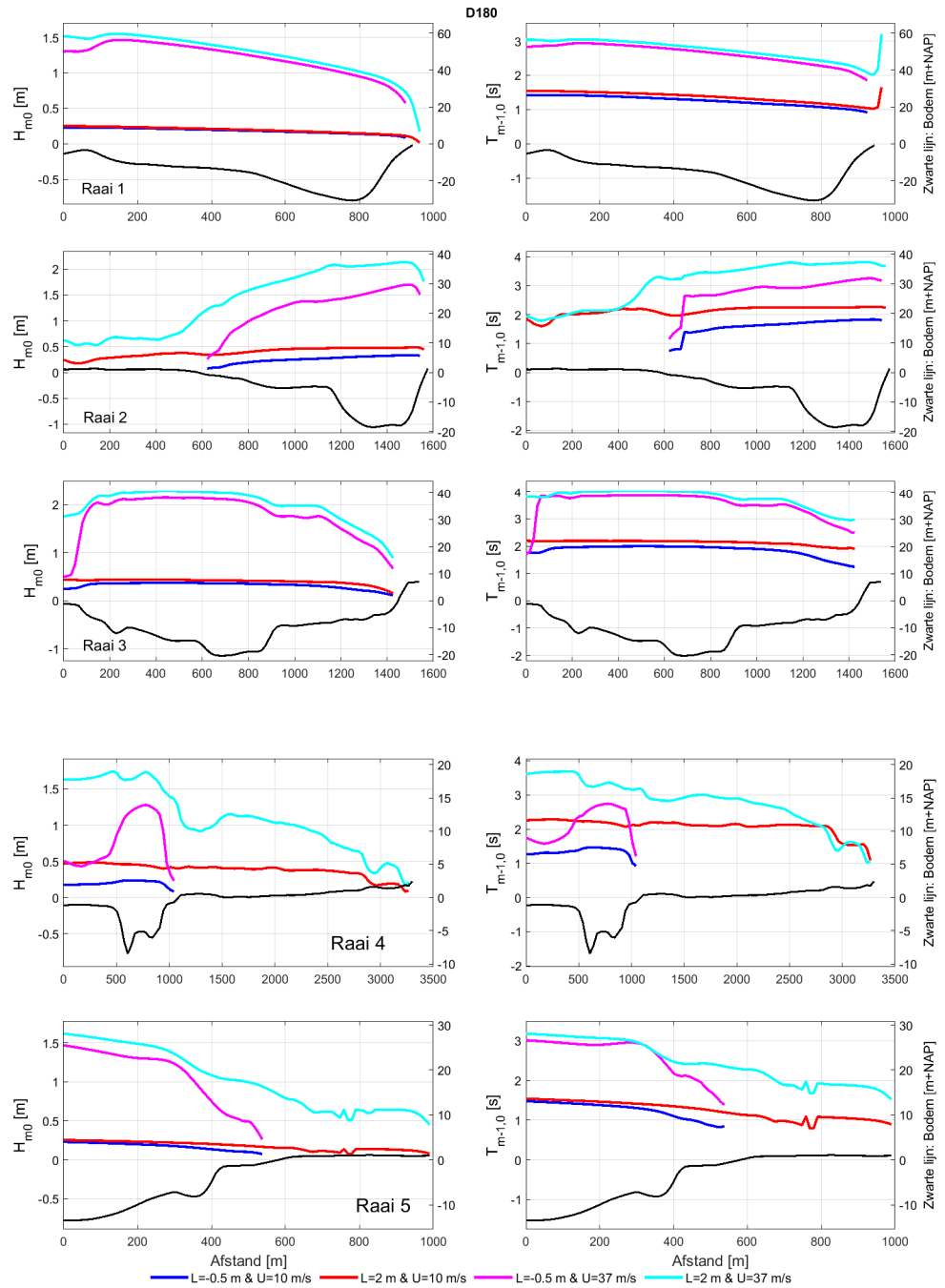


C. 2: SWAN resultaten golfhoogte (links) en golfperiode (rechts) op uitvoerraaien (67.5°N windrichting; 10 m/s en 37 m/s windsnelheid; NAP+2m en NAP-0.5 m waterstand). De zwarte lijn geeft de bodem ten opzichte van NAP weer.

C.1.2 Windrichting 180°N

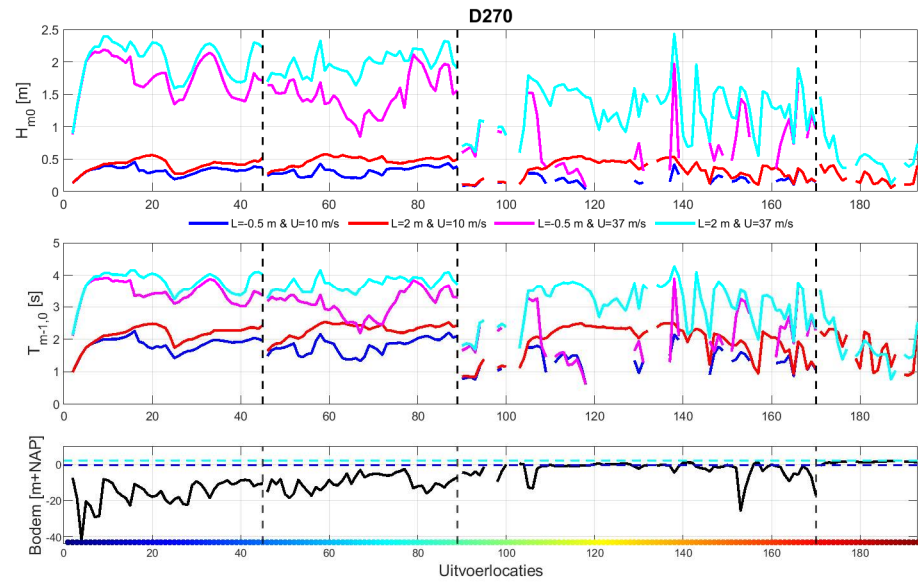


C. 3: SWAN resultaten van golfhoogte (bovenste paneel), golfperiode (middelste paneel) en bodemligging (onderste paneel) ter plaatse van de uitvoerpunten voor vier berekeningen met windrichting 180°N. De kleurenband in het onderste paneel komt overeen met de locaties weergegeven in Figuur 3.9. De blauwe en lichtblauwe stippellijn geven NAP-0.5m en NAP+2 respectievelijk aan om (on)diepte weer te geven. De zwarte gestreepte verticalen geven de overgang tussen vier subsets, hoofdgeul, geul noord, omliggende en de noordoostelijke rand weer.

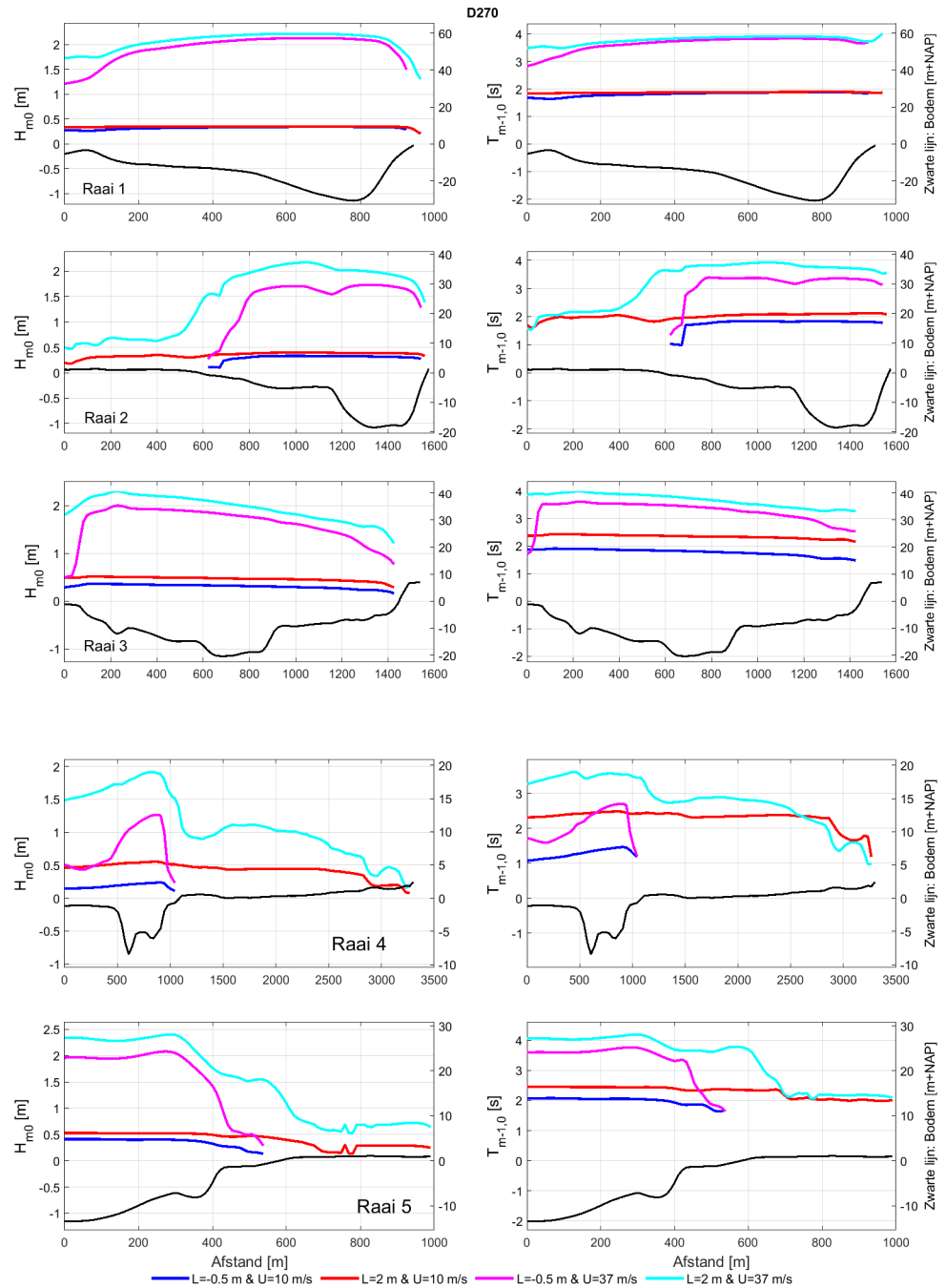


C. 4: SWAN resultaten golfhoogte (links) en golfperiode (rechts) op uitvoerraaien (180°N windrichting; 10 m/s en 37 m/s windsnelheid; NAP+2m en NAP-0.5 m waterstand). De zwarte lijn geeft de bodem ten opzichte van NAP weer.

C.1.3 Windrichting 270°N

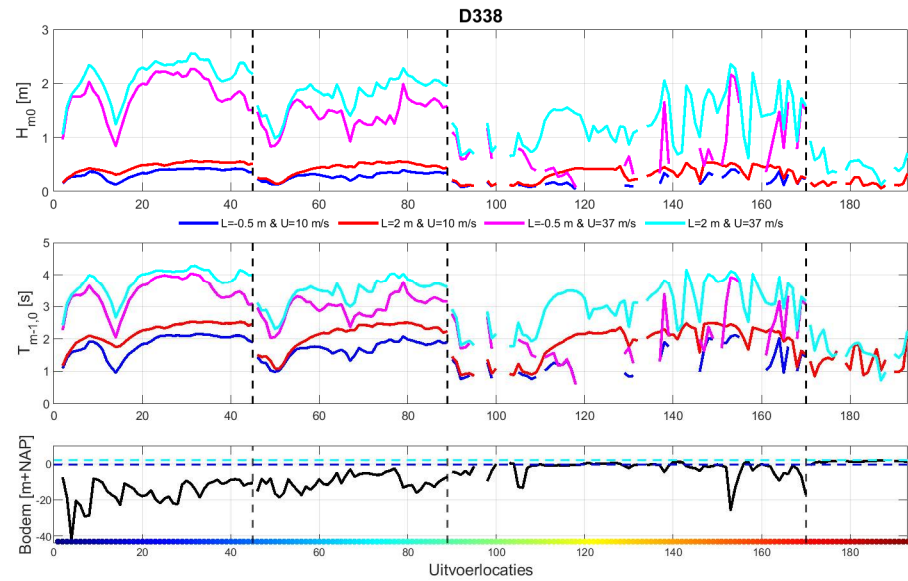


C. 5: SWAN resultaten van golfhoogte (bovenste paneel), golfperiode (middelste paneel) en bodemligging (onderste paneel) ter plaatse van de uitvoerpunten voor vier berekeningen met windrichting 270°N. De kleurenband in het onderste paneel komt overeen met de locaties weergegeven in Figuur 3.9. De blauwe en lichtblauwe stippellijn geven NAP-0.5m en NAP+2 respectievelijk aan om (on)diepte weer te geven. De zwarte gestreepte verticalen geven de overgang tussen vier subsets, hoofdgeul, geul noord, omliggende en de noordoostelijke rand weer.

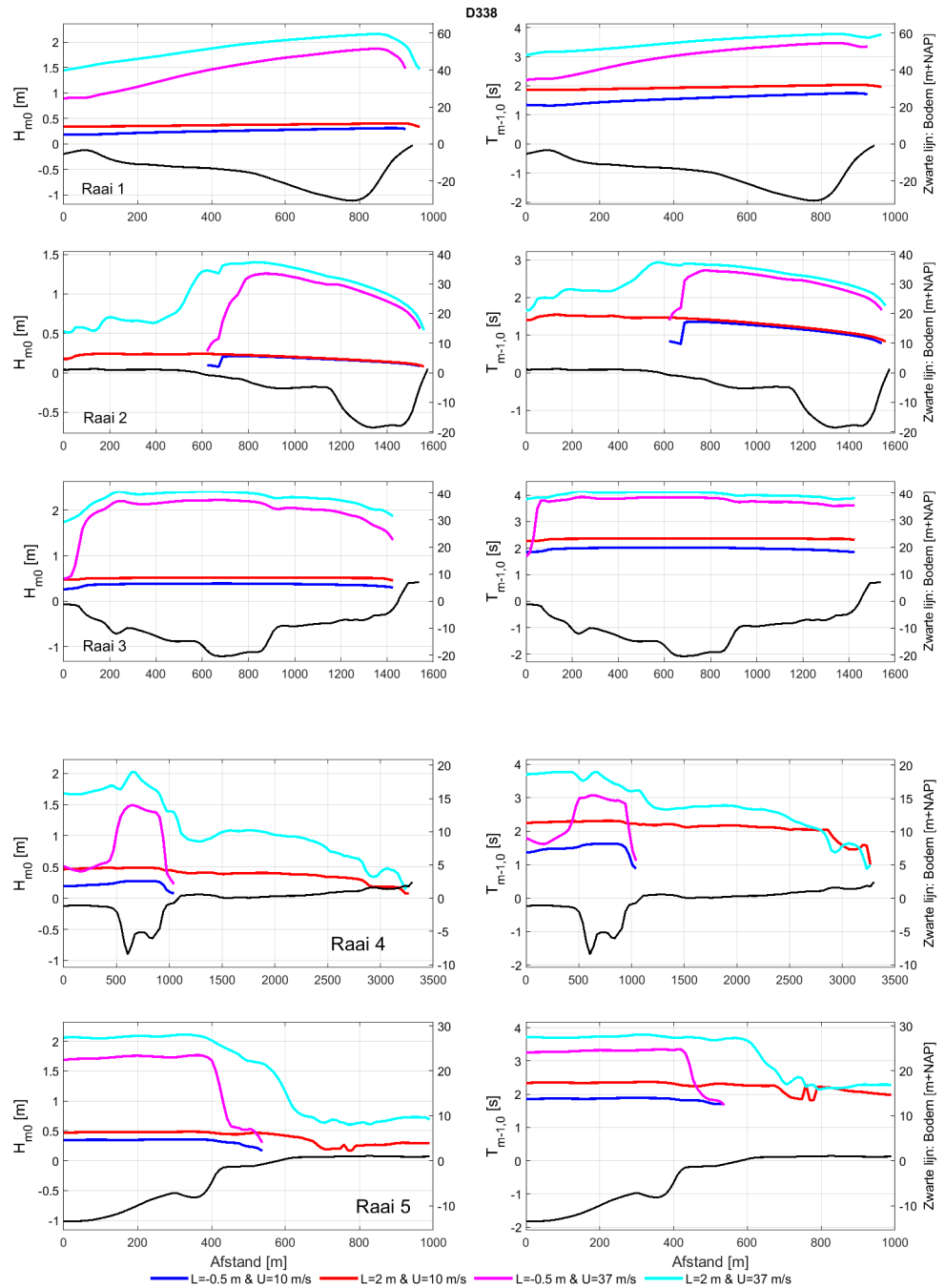


C. 6: SWAN resultaten golfhoogte (links) en golfperiode (rechts) op uitvoerraaien (67.5°N windrichting; 10 m/s en 37 m/s windsnelheid; NAP+2m en NAP-0.5 m waterstand). De zwarte lijn geeft de bodem ten opzichte van NAP weer.

C.1.4 Windrichting 337.5°N

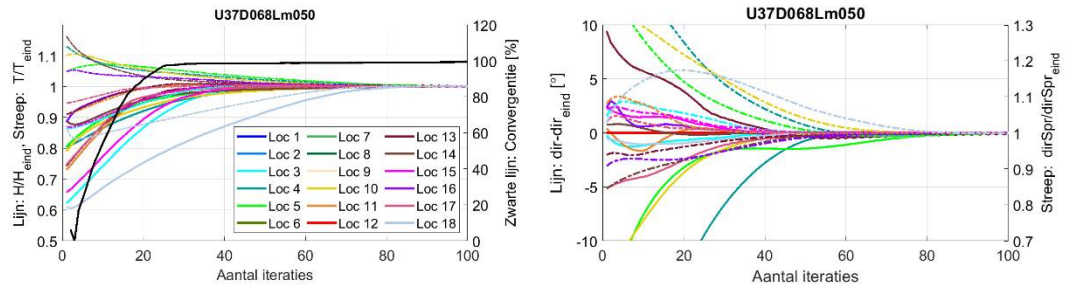


C. 7: SWAN resultaten van golfhoogte (bovenste paneel), golfperiode (middelste paneel) en bodemligging (onderste paneel) ter plaatse van de uitvoerpunten voor vier berekeningen met windrichting 337.5°N. De kleurenband in het onderste paneel komt overeen met de locaties weergegeven in Figuur 3.9. De blauwe en lichtblauwe stippellijn geven NAP-0.5m en NAP+2 respectievelijk aan om (on)diepte weer te geven. De zwarte gestreepte verticalen geven de overgang tussen vier subsets, hoofdgeul, geul noord, omliggende en de noordoostelijke rand weer.

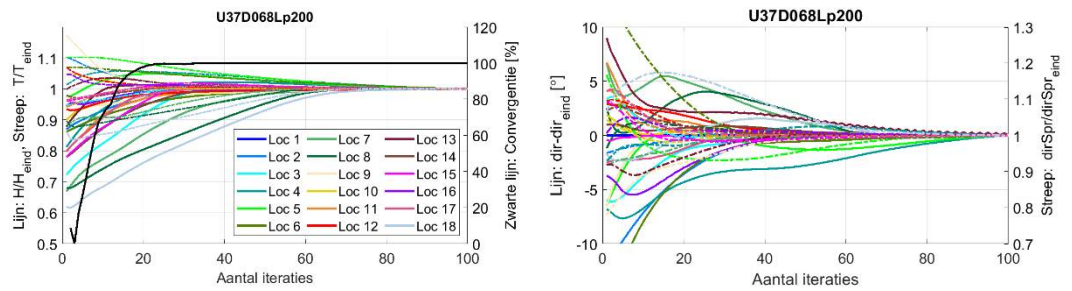


C. 8: SWAN resultaten golfhoogte (links) en golfperiode (rechts) op uitvoerraaien (67.5°N windrichting; 10 m/s en 37 m/s windsnelheid; NAP+2m en NAP-0.5 m waterstand). De zwarte lijn geeft de bodem ten opzichte van NAP weer.

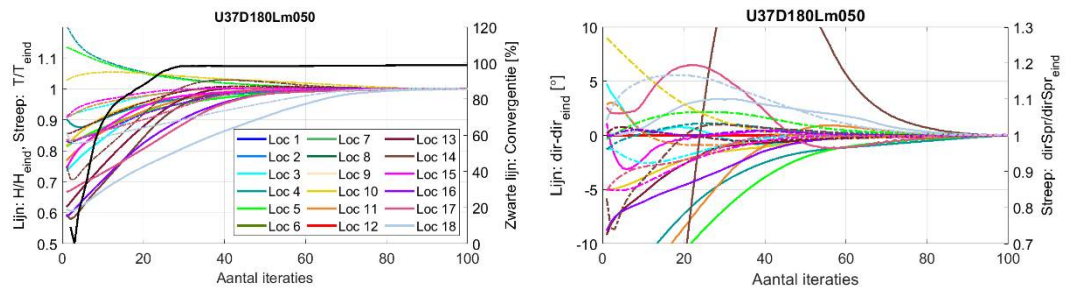
C.2 Convergentie



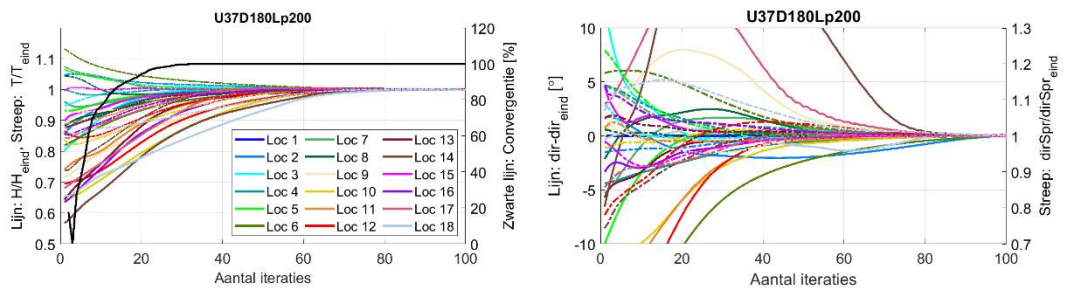
C. 9: *Convergentiegedrag voor de significante golfhoogte (lijn, linker paneel), spectrale golfperiode $Tm01$ (gestreepte lijn, linker paneel), percentage geconvergeerde roosterpunten (zwarte lijn linker paneel), richting (lijn, rechter paneel) en richtings spreiding (gestreepte lijn, rechter paneel).*



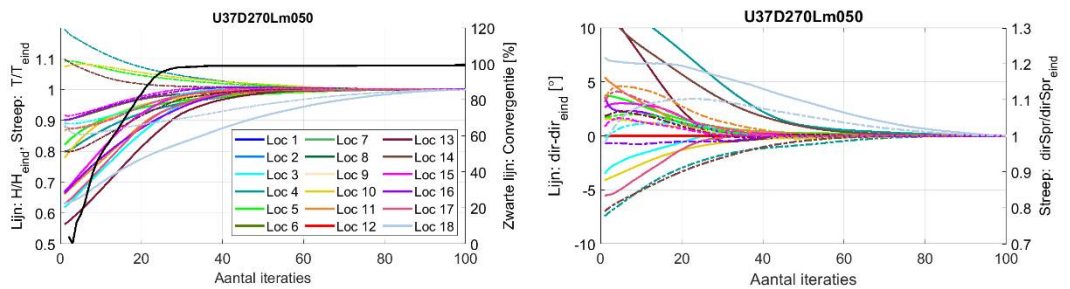
C. 10: *Convergentiegedrag voor de significante golfhoogte (lijn, linker paneel), spectrale golfperiode $Tm01$ (gestreepte lijn, linker paneel), percentage geconvergeerde roosterpunten (zwarte lijn linker paneel), richting (lijn, rechter paneel) en richtings spreiding (gestreepte lijn, rechter paneel).*



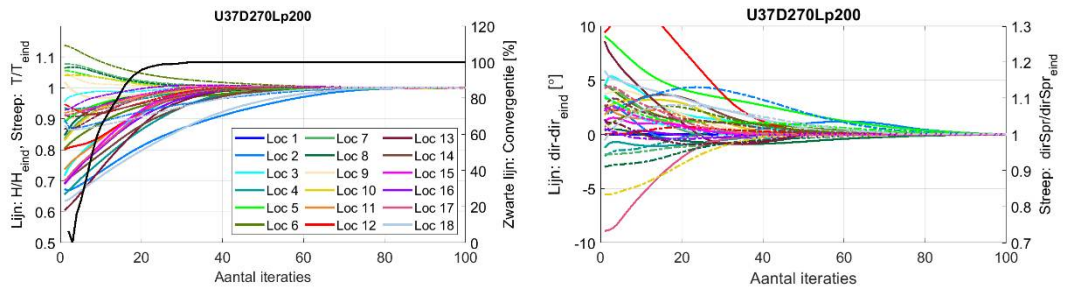
C. 11: *Convergentiegedrag voor de significante golfhoogte (lijn, linker paneel), spectrale golfperiode $Tm01$ (gestreepte lijn, linker paneel), percentage geconvergeerde roosterpunten (zwarte lijn linker paneel), richting (lijn, rechter paneel) en richtings spreiding (gestreepte lijn, rechter paneel).*



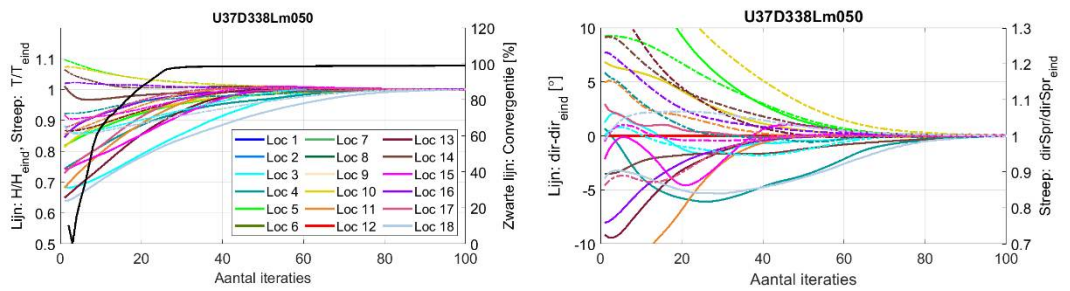
C. 12: *Convergentiegedrag voor de significante golfhoogte (lijn, linker paneel), spectrale golfperiode Tm01 (gestreepte lijn, linker paneel), percentage geconvergeerde roosterpunten (zwarte lijn linker paneel), richting (lijn, rechter paneel) en richtings spreiding (gestreepte lijn, rechter paneel).*



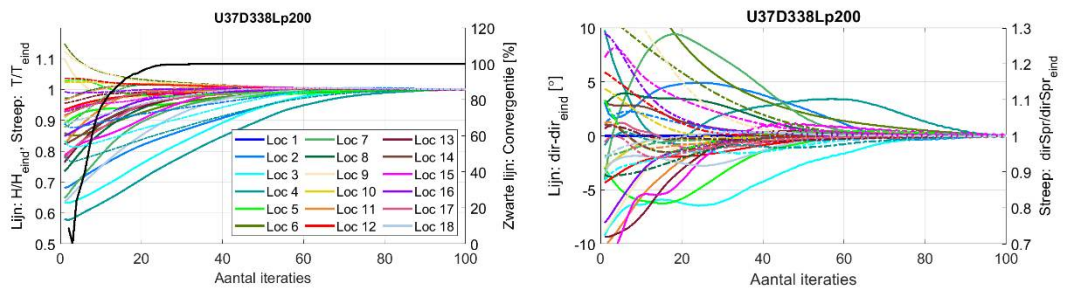
C. 13: *Convergentiegedrag voor de significante golfhoogte (lijn, linker paneel), spectrale golfperiode Tm01 (gestreepte lijn, linker paneel), percentage geconvergeerde roosterpunten (zwarte lijn linker paneel), richting (lijn, rechter paneel) en richtings spreiding (gestreepte lijn, rechter paneel).*



C. 14: *Convergentiegedrag voor de significante golfhoogte (lijn, linker paneel), spectrale golfperiode Tm01 (gestreepte lijn, linker paneel), percentage geconvergeerde roosterpunten (zwarte lijn linker paneel), richting (lijn, rechter paneel) en richtings spreiding (gestreepte lijn, rechter paneel).*



C. 15: *Convergentiegedrag voor de significante golfhoogte (lijn, linker paneel), spectrale golfperiode T_{m01} (gestreepte lijn, linker paneel), percentage geconvergeerde roosterpunten (zwarte lijn linker paneel), richting (lijn, rechter paneel) en richtings spreiding (gestreepte lijn, rechter paneel).*



C. 16: *Convergentiegedrag voor de significante golfhoogte (lijn, linker paneel), spectrale golfperiode T_{m01} (gestreepte lijn, linker paneel), percentage geconvergeerde roosterpunten (zwarte lijn linker paneel), richting (lijn, rechter paneel) en richtings spreiding (gestreepte lijn, rechter paneel).*

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

Deltares

www.deltares.nl