

## Eindrapport Quick Reaction Force 2024



## Eindrapport Quick Reaction Force 2024

### **Auteur(s)**

Bart Grasmeyer  
Joana van Nieuwkoop  
Frans Buschman

## Eindrapport Quick Reaction Force 2024

<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
<b>Contactpersoon</b>	Stefan Pluis
<b>Referenties</b>	SITO-PS Versterking Onderzoek Waterveiligheid (VOW)
<b>Trefwoorden</b>	Quick Reaction Force, Kust, Rivieren

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.0
<b>Datum</b>	20-12-2024
<b>Projectnummer</b>	11210365-007
<b>Document ID</b>	11210365-007-ZWS-0001
<b>Pagina's</b>	37
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

	Bart Grasmeijer Joana van Nieuwkoop Frans Buschman	

# Samenvatting

De Quick Reaction Force (QRF) heeft als doel de waterveiligheidskennis te vergroten door het verbeteren van de verwerving, ontsluiting en het gebruik van velddata rondom stormen en hoogwater. Om dit te realiseren, biedt de QRF een kader voor betere samenwerking en afstemming tussen betrokken stakeholders. Dit omvat het ontsluiten van velddata, het uitvoeren van aanvullende metingen en het opstellen van gezamenlijke rapportages over extreme weersomstandigheden en hun impact.

Dit rapport biedt een samenvatting van de geplande en uitgevoerde QRF-werkzaamheden in 2024, verdeeld over QRF-kust en QRF-rivieren.

In 2024 zijn voor QRF-kust metingen uitgevoerd van golfhoogtes en bodemhoogtes op de vooroever, het strand en in de duinen. Deze gegevens zijn gebruikt om de effecten van suppleties te analyseren, zoals de invloed op duinerosie, en om de gevoeligheid voor stormsequenties te bepalen. Uit de analyses blijkt dat zandsuppleties effectief zijn in het verminderen van de snelheid van duinerosie. Dit draagt bij aan een verbeterde bescherming tegen overstromingen tijdens stormsequenties en onderstreept het belang van suppleties in duurzaam kustbeheer. Echter, aanvullende metingen van het bodemniveau tussen stormen zijn noodzakelijk om de resultaten van deze analyses beter te koppelen aan het gedrag in de praktijk en om het XBeach-model verder te kalibreren voor de simulatie van meerdere stormen. In 2025 zullen de metingen ook worden ingezet voor de verdere ontwikkeling en verfijning van Golfgebaseerde Satellite Derived Bathymetry (G-SDB) in de kustzone, een veelbelovende techniek voor het monitoren van erosie, sedimentatie en morfologische veranderingen in kustgebieden, wat essentieel is voor effectief kustbeheer.

Voor QRF-rivieren is een SWAN model opgezet en zijn SWAN berekeningen uitgevoerd voor verschillende condities (afvoeren, windsnelheden en windrichtingen) op de Waal. De golfberekeningen geven inzicht in de golven bij de voorgestelde meetlocaties voor golfmetingen (meetvoorstel van Deltares, zoals in 2023 opgeleverd voor QRF rivieren). Op basis van de golfberekeningen is het meetvoorstel aangescherpt. Tot slot is ook een haalbaarheidsstudie ten behoeve van de afvoerbepaling op rivieren uitgevoerd. Dit om na te gaan hoe de afvoer tijdens een (extreme) hoogwater beter bepaald kan worden op basis van huidige meettechnieken en verwerkingsmethoden. Op basis van de locatie Lobith is de haalbaarheid verder uitgewerkt en is een voorstel gedaan hoe de afvoer in het winterbed gemeten kan worden tijdens hoogwater.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>6</b>
1.1	Achtergrond en doelstelling	6
1.2	Doel en inhoud van dit document	7
<b>2</b>	<b>QRF-kust</b>	<b>8</b>
2.1	Inleiding	8
2.2	Beoogde en uitgevoerde activiteiten QRF-kust	8
2.2.1	Studiegebied Egmond aan Zee	9
2.2.2	Metingen	9
2.2.3	XBeach-model	13
2.3	Aanbevelingen voor QRF-kust in 2025	14
<b>3</b>	<b>QRF-rivieren</b>	<b>16</b>
3.1	Inleiding	16
3.2	Beoogde en uitgevoerde activiteiten	16
3.3	SWAN model Waal en analyse	17
3.3.1	Aanleiding	17
3.3.2	Meetvoorstel	17
3.3.3	Golfmodel	18
3.3.4	SWAN resultaten voor $Q_{Lobith}$ 6000 m <sup>3</sup> /s en 10 m/s wind	18
3.3.5	Aanpassing meetplan op basis van SWAN berekeningen	21
3.3.6	Verschillen tussen Bretschneider en SWAN bij hogere afvoeren	22
3.4	Afvoeren in uiterwaarden	25
3.4.1	Inleiding	25
3.4.2	Huidige situatie	26
3.4.3	Doelstelling	26
3.4.4	Aanpak en uitgangspunten	26
3.4.5	Overzicht van de meettechnieken	27
3.4.6	Plan voor afvoerbepaling in uiterwaarden bij Lobith	28
3.5	Aanbevelingen voor QRF-rivieren in 2025	31
<b>4</b>	<b>Conclusies</b>	<b>32</b>
4.1	QRF-kust	32
4.2	QRF-rivieren	33
	<b>Referenties</b>	<b>34</b>
<b>A</b>	<b>Meetvoorstel meten op rivieren</b>	<b>35</b>
<b>B</b>	<b>Memo: Verbetering afvoerbepaling Lobith bij overstroomde uiterwaarden: haalbaarheidsstudie en plan</b>	<b>36</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond en doelstelling

Door het Delta Programma Waddengebied is aanbevolen een Quick Reaction Force (QRF) op te stellen, waarin meerdere partijen samenwerken bij het inwinnen, delen en ontsluiten van data van fysische processen tijdens extreme natuurlijke gebeurtenissen (stormen; cf. IMARES, 2014). Dit om voor, tijdens en na stormen zo optimaal mogelijk kennis te vergaren voor het beantwoorden van beheerdersvragen en het adresseren van kennisleemtes op het gebied van waterveiligheid. Kennis van natuurlijk herstel in de rustige periode tussen stormen is daarbij ook van belang.

Vanuit verschillende beheerders (Rijkswaterstaat, Waterschappen Noorderzijlvest en Hollands Noorderkwartier) is de behoefte geuit om snel na een storm een analyse te kunnen maken over het effect ervan op de toestand van het beheerareaal. Beheerders hebben behoefte aan een adequate informatievoorziening (die soms van verschillende partijen moet komen) na een storm, en willen inzicht hebben of het daadwerkelijke effect ervan aansluit op de verwachtingen. Deze verwachtingen zijn gebaseerd op enerzijds de ervaring van de beheerder, anderzijds op basis van de beschikbare modellen.

Afgezien dat extra monitoring nodig kan zijn om acute risico's in te schatten (cf. dijkwacht door de waterschappen), geeft het, bijvoorbeeld tijdens stormen, meer inzicht in het onder extreme omstandigheden functioneren van het morfodynamisch systeem. Vanuit Rijkswaterstaat Water Verkeer en Leefomgeving (RWS-WVL), Deltares, en diverse beheerders is er behoefte aan validatie van kennis over waterveiligheid, bijvoorbeeld voor het beoordelen, ontwerpen en onderhouden van waterkeringen. Ook is er behoefte aan adequate informatie over de impact van stormen in het kader van de landelijke informatievoorziening.

Door de jaren heen is veel kennis ontwikkeld over de effecten van stormen op Nederlandse waterkeringen. Deze kennis wordt direct toegepast bij de beoordeling van waterkeringen. Echter, het grootste deel van deze kennis is afkomstig uit laboratoriumproeven, onder andere in de Deltagoot van WL|Delft Hydraulics (nu Deltares). Er is maar beperkt validatiemateriaal beschikbaar dat gebaseerd is op veldmetingen. Hier komt de Quick Reaction Force in beeld.

Het doel van de Quick Reaction Force (QRF) is om waterveiligheidskennis te verbeteren door betere verwerving, ontsluiting en gebruik van velddata rondom stormen. Om dit te bereiken, biedt de QRF een structuur voor een betere afstemming tussen de betrokken stakeholders over ontsluiting van velddata, de verwerving van (eventueel extra) metingen en voor het opstellen van gemeenschappelijke rapportages door de verschillende partijen rondom stormen, en zo de samenwerking tussen partijen te bevorderen.

Binnen de QRF zijn vier onderzoeksthema's gedefinieerd:

- 1 Gedrag kustfundament en plaat-geul interacties;
- 2 Dynamiek strand, duinen, kwelders en overwash gebieden;
- 3 Voorspelbaarheid hoogwater Delfzijl.
- 4 Golfhoogtes en afvoeren in uiterwaarden van rivieren

Vanwege samenwerking met twee langlopende projecten en om het beschikbare budget zo efficiënt mogelijk in te zetten, heeft de QRF zich in 2024 gericht op Onderzoeksthema's 2 en 4.

## 1.2 Doel en inhoud van dit document

Dit rapport beschrijft kort de beoogde en uitgevoerde QRF werkzaamheden in 2024 (i.e., een soort “notulen” van werkzaamheden), enkele voorbeeldresultaten van analyses en aanbevelingen voor het jaar 2025. De kust-gerelateerde activiteiten (Onderzoeksthema 2) worden beschreven in Hoofdstuk 2 en de rivieren-gerelateerde (Onderzoeksthema 4) in Hoofdstuk 3.

## 2 QRF-kust

### 2.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft de QRF-kust activiteiten in het jaar 2024, voorbeeldresultaten en aanbevelingen voor Onderzoeksthema 2: “Dynamiek strand, duinen, kwelders en overwash gebieden”. Verschillende beheerders, zoals Rijkswaterstaat, Waterschappen Noorderzijlvest en Hollands Noorderkwartier, hebben de behoefte geuit om snel na een storm een analyse te kunnen maken van het effect ervan op het beheerareaal. Zij hebben behoefte aan adequate informatievoorziening na een storm en willen inzicht in hoeverre het daadwerkelijke effect overeenkomt met de verwachtingen op basis van hun ervaring of beschikbare modellen.

Het doel van QRF-kust is om waterveiligheidskennis te verbeteren door verwerving, ontsluiting en het gebruik van velddata rondom stormen en hoogwaters. Egmond aan Zee is geselecteerd om meer kennis te ontwikkelen over de dynamiek van vooroever, strand en duinen. Sinds 2013 worden hier metingen uitgevoerd door de Universiteit Utrecht. Vanaf 2019 werkt de Quick Reaction Force samen met de Universiteit Utrecht om deze meetgegevens uit te breiden. Het specifiek doel voor 2024 was om de effecten van suppleties te analyseren, zoals de invloed op duinerosie, en om de gevoeligheid voor stormsequenties te bepalen.

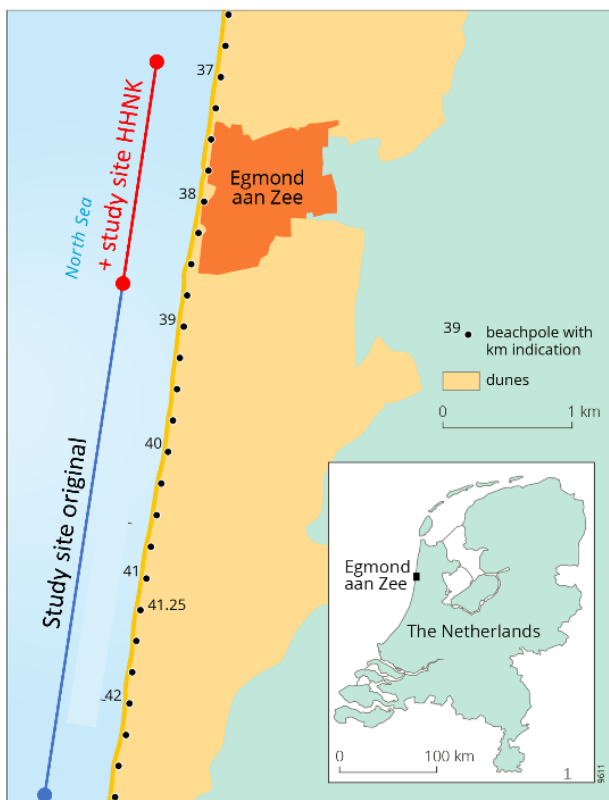
### 2.2 Beoogde en uitgevoerde activiteiten QRF-kust

In Noord-Holland worden door QRF op het strand en in de duinen bodemhoogtemetingen en golfhoogtemetingen uitgevoerd in samenwerking met Universiteit Utrecht (UU). De bodemhoogtemetingen worden vooral uitgevoerd met een zogenaamde Terrestrial Laser over een strandgebied van 4 km kustlangs vanaf december 2013 tot op heden. De metingen zijn aanvullend op KustLiDAR door Rijkswaterstaat. Naast de Terrestrial Laser wordt ook de zogenaamde Structure for Motion (SfM) techniek toegepast. Naast bodemhoogtemetingen worden door de UU op het strand van Egmond tijdens het stormseizoen ook golfhoogtemetingen uitgevoerd met 14 druksensoren.

Op basis van gezamenlijk ingewonnen meetgegevens is door QRF en UU in 2019 een XBeach-model opgezet. Het model werd in 2020 geëvalueerd op zijn gevoeligheid voor de bodemhoogte van de vooroever tijdens een storm. Het model werd hierbij niet gekalibreerd maar ingezet met de zogenaamde BOI-instellingen. De QRF-metingen van bodemhoogte van vooroever, strand en duinen en golfhoogtes op het strand werden in 2021 gebruikt om de prestaties van het model tijdens een storm te verbeteren.

In de periode tot en met 2024 is de samenwerking met UU verder voortgezet. Er worden golfhoogtegegevens en 3D-ruimtelijke gegevens ingewonnen en vergeleken met een voor dit gebied opgezet XBeach-model. In het originele studiegebied zijn metingen beschikbaar in hoge temporele en ruimtelijke resolutie vanaf 2013 (Ruessink, 2019). Het studiegebied is in 2020 uitgebreid met het interessegebied van Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK), zie Figuur 2.1.





Figuur 2.1 Locatie van het studiegebied met RSP-nummering. De oorsprong van het hier gebruikte lokale coördinatensysteem is strandpaal 41.25, met respectievelijk positieve x en y in de zeewaartse en zuidelijke richting. In 2020 is het studiegebied uitgebreid met het interessegebied van HHNK (rood).

## 2.2.1 Studiegebied Egmond aan Zee

Egmond aan Zee ligt aan de ongeveer 120 km lange Noord-Zuid georiënteerde Hollandse kust (Figuur 2.1). Het is een door golven gedomineerde kustlocatie. De jaargemiddelde offshore significante golfhoogte  $H_{m0}$  en periode  $T_{m02}$  zijn respectievelijk ongeveer 1,3 m en 4,5 s. Tijdens de winter is de maandelijkse gemiddelde  $H_{m0}$  aanzienlijk hoger dan in de zomer (1,8 versus 0,9 m). Tijdens noordwestelijke stormen kan  $H_{m0}$  oplopen tot meer dan 7 m. Het getij heeft een doottij- en springtijbereik van respectievelijk ongeveer 1,4 en 1,8 m. Stormvloed en waterstand met meer dan 1 m verhogen, vooral wanneer de wind uit noordwestelijke tot noordelijke richting komt. De meest voorkomende winden komen echter uit het zuidwesten. Het intergetijdestrand is flauw hellend (1:40). Landwaarts van het hoogwaterniveau wordt het profiel steiler en op een hoogte van ongeveer 3 m boven het gemiddelde zeeniveau (ongeveer gelijk aan NAP), verandert het in een steile helling (1: 2.5) van het voorduin. Op NAP + 14–17 m, vertoont het profiel een abrupte verandering in helling en gaat verder naar de top van het voorduin op een hoogte van NAP + 20–25 m. Vooral dit laatste, meer zacht glooiende deel van de voorduin is dicht bedekt met Europees helmgras (*Ammophila arenaria*). De steile voorduinelling is het gevolg van eerdere duinerosiegebeurtenissen, waarbij de verandering in helling de locatie markeert waarnaar het voorduin is geërodeerd door afglijding. De variabiliteit langs de kust in de vorm en hoogte van het voorduin is klein. Gedurende meerdere jaren zonder duinerosie, kunnen embryodünen zich ontwikkelen aan de teen van het voorduin. Het goed gesorteerde zand (weinig variatie in korrelgrootte) heeft een gemiddelde korrelgrootte van 250–300  $\mu\text{m}$ , met lichte afname in de landwaartse richting.

## 2.2.2 Metingen

Het stormseizoen van 2023/2024 kenmerkte zich door een aantal actieve weersystemen die regelmatig verhoogde waterstanden langs de Nederlandse kust veroorzaakten.

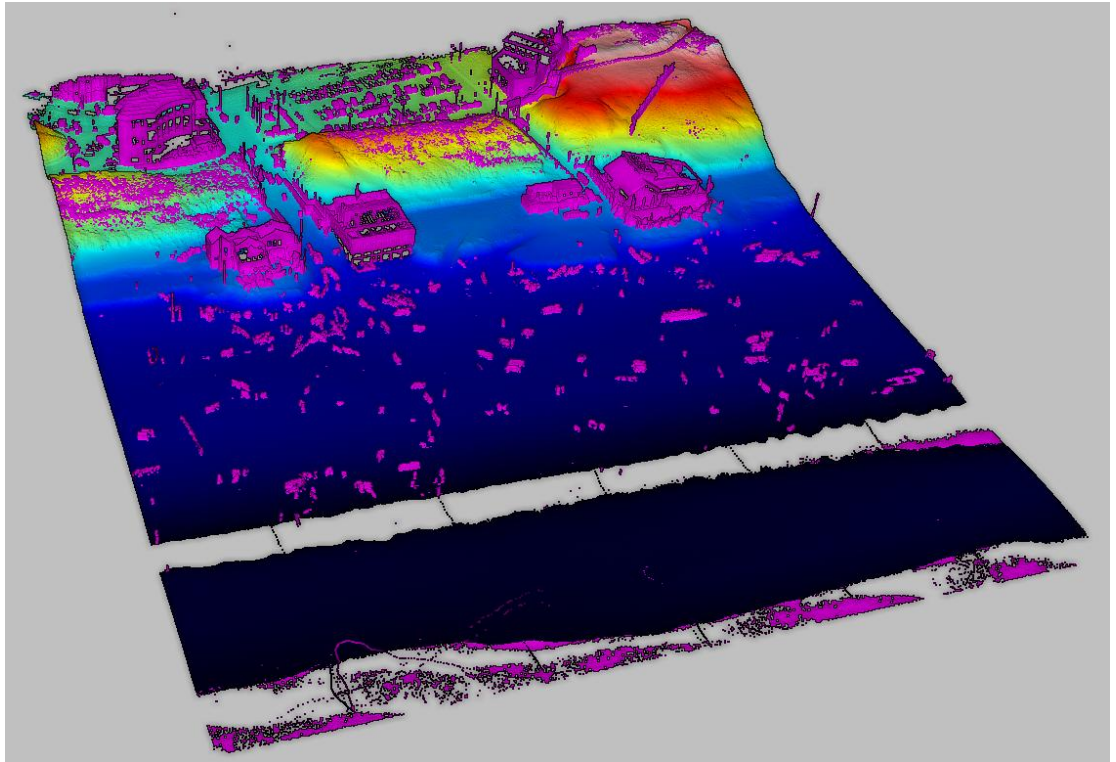
- **14 oktober 2023:** Een stormdepressie trok over Zuid-Scandinavië en leidde tot verhoogde waterstanden langs de Nederlandse kust. De waterstanden bleven echter onder uitzonderlijke niveaus.
- **23 en 24 november 2023:** Een omvangrijk lagedrukgebied verplaatste zich vanuit Scandinavië naar het zuidoosten, waardoor een uitgestrekt windveld boven de Noordzee ontstond. Dit resulteerde in waterstanden die in meerdere kustsectoren boven de waarschuwningsniveaus uitkwamen.
- **21 en 22 december 2023:** Het sterk uitdiepende lagedrukgebied *Pia* trok van Scandinavië in zuidoostelijke richting. Het uitgestrekte windveld boven de Noordzee veroorzaakte waterstanden die in verschillende kustgebieden zowel waarschuwnings- als alarmeringsniveaus overschreden.
- **14 en 15 januari 2024:** Een lagedrukgebied bewoog van Zuid-Noorwegen via Zuid-Zweden naar de Baltische Staten. Het bijbehorende windveld veroorzaakte verhoogde waterstanden langs de gehele Nederlandse kust.
- **23 en 24 januari 2024:** De storm *Jocelyn* trok van Schotland naar Noorwegen. Het windveld boven de Noordzee zorgde op woensdagmiddag en -avond voor licht verhoogde waterstanden, voornamelijk in het noordelijke kustgebied.
- **19 en 20 november 2024:** Een lagedrukgebied verplaatste zich van Zuid-Engeland naar de Baltische Zee, waarbij het windveld verhoogde waterstanden veroorzaakte langs de westkust van Nederland.
- **5 en 6 december 2024:** Een randstoring trok over de Noordzee. Het bijbehorende windveld leidde tot verhoogde waterstanden langs de Hollandse kust en in het Waddengebied.

Tijdens het stormseizoen zijn vijf golfhoogtemeters op het strand geplaatst, uitgerust met voldoende batterijen om het hele seizoen 2023/2024 metingen te verrichten.

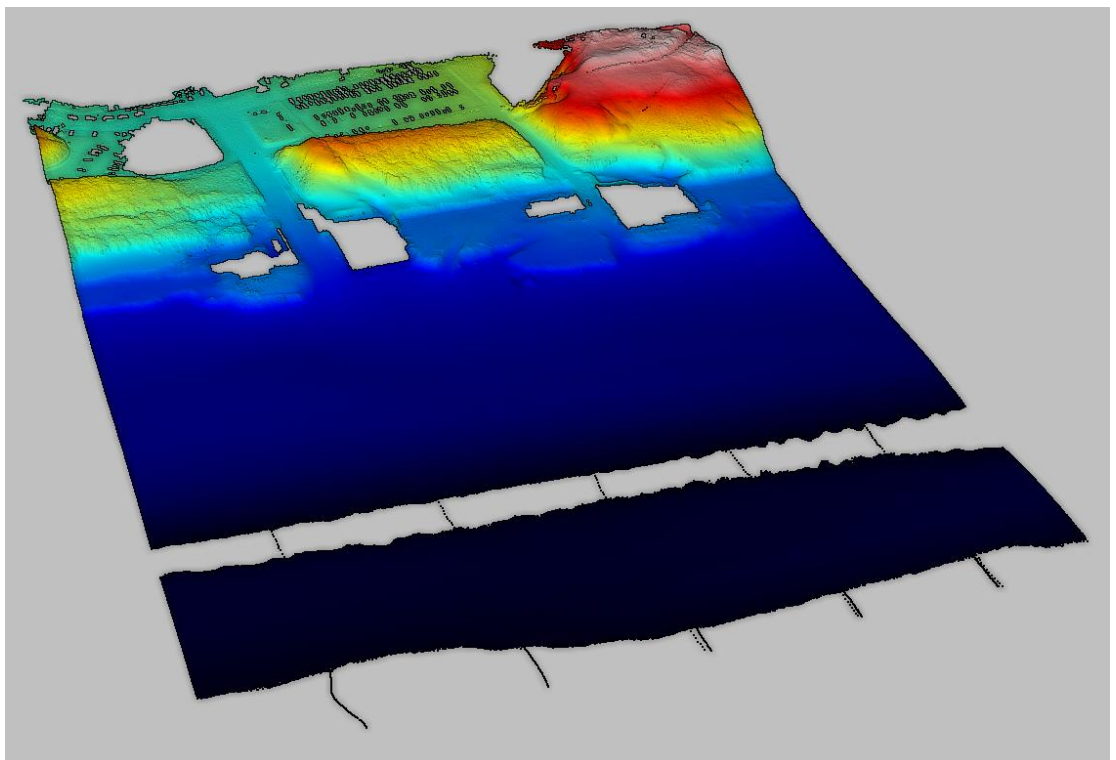
Voorafgaand aan het stormseizoen, op **19 oktober 2023**, werden het strand en de duinen bij Egmond aan Zee ingemeten met mobiele terrestrische laserscanning (MLS). De bathymetrie van de vooroever werd ingemeten met behulp van RTK-GPS, gecombineerd met een single-beam echosounder gemonteerd op een jetski. Deze metingen zijn beschreven in het rapport van Shore Monitoring (2023).

Na afloop van het stormseizoen, op **26 maart 2024**, werden de topografie en bathymetrie van strand, duinen en vooroever opnieuw ingemeten met dezelfde methoden. Figuur 2.2 toont een detail van de puntenwolk, gemeten met MLS. Hierin worden objecten zoals strandtenten, mensen en paaltjes in magenta aangegeven, die uiteindelijk uit de bodemhoogtekaart zijn verwijderd. Figuur 2.2 toont de resulterende puntenwolk zonder deze objecten, en Figuur 2.3 geeft de bodemligging langs de survey tracks weer. Deze metingen zijn beschreven in het rapport van Shore Monitoring (2024a).

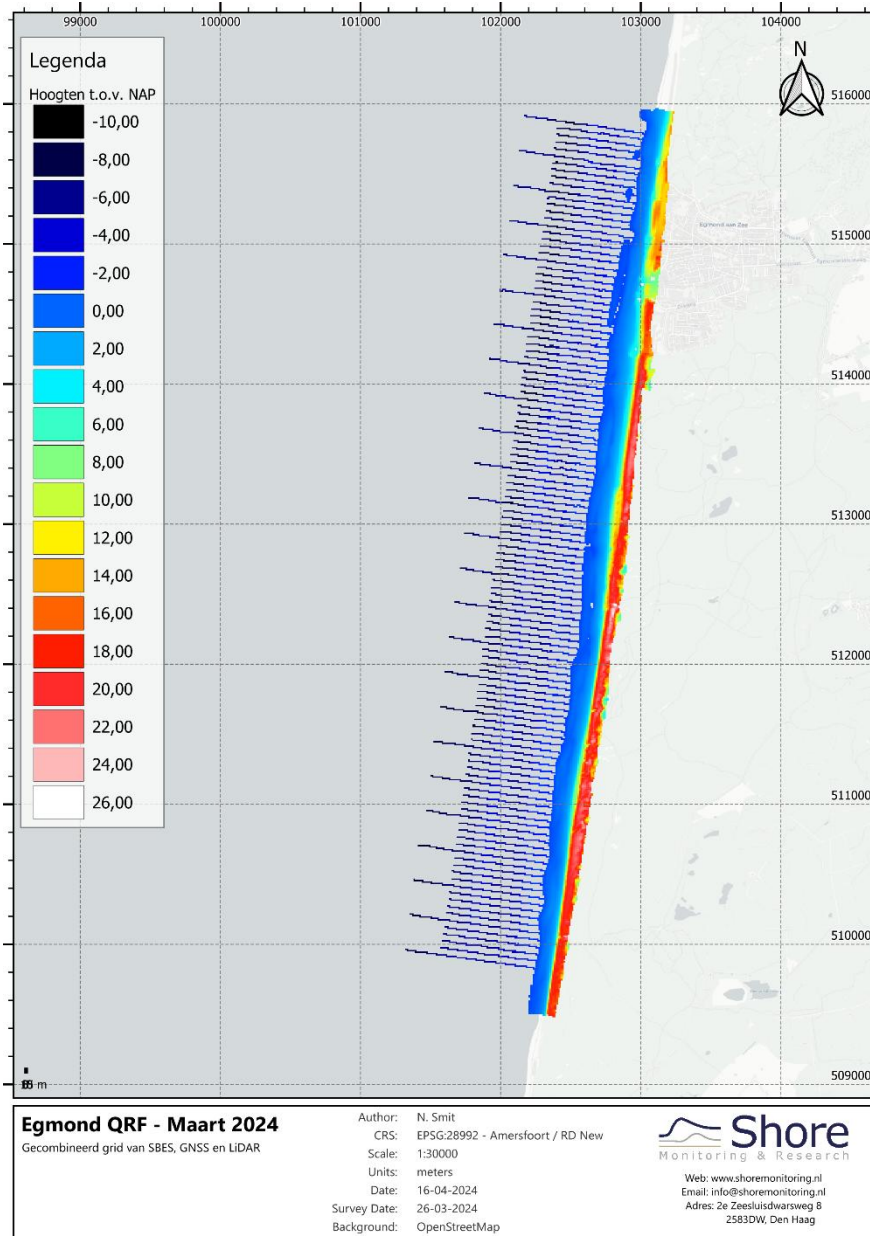
Tot slot werd voorafgaand aan het stormseizoen van 2024/2025, op **20 september 2024**, opnieuw de topografie en bathymetrie van strand, duinen en vooroever bij Egmond ingemeten. Deze metingen zijn beschreven in het rapport van Shore Monitoring (2024b).



*Figuur 2.2 Detail LiDAR puntenwolk. Magenta zijn de verwijderde objecten (strandtenten, mensen, paaltjes).*



*Figuur 2.3 Detail LiDAR puntenwolk. Alleen punten met grondklasse zichtbaar.*



Figuur 2.4 Bodemligging langs de surveytracks. Resultaat van SBES (punten), GNSS-loop (punten), MBES (grid) en LiDAR (grid) op een OSM achtergrond.

De bodemhoogtemetingen zijn geleverd aan Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier en Universiteit Utrecht. Deltares zal deze in 2025 gebruiken voor de verdere ontwikkeling en verbetering van **Golfgebaseerde Satellite Derived Bathymetry (G-SDB)** in de kustzone. Deze innovatieve techniek combineert de fysische eigenschappen van golven met informatie uit optische en radar-satellietbeelden om nauwkeurige schattingen van de bathymetrie te maken.

In vergelijking met traditionele bathymetrische meetmethoden biedt G-SDB belangrijke voordelen:

- **Kostenbesparing:** Het gebruik van satellietbeelden vermindert de kosten van dataverzameling aanzienlijk.
- **Grotere dekking:** Satellieten kunnen grote en moeilijk toegankelijke gebieden bestrijken.

- **Hogere resolutie in ruimte en tijd:** Dit maakt het mogelijk om gedetailleerde en frequente updates van kustdynamiek te verkrijgen.

Dankzij deze voordelen is G-SDB een veelbelovende tool voor het monitoren van erosie, sedimentatie en morfologische veranderingen in kustgebieden, wat essentieel is voor effectief kustbeheer.

### 2.2.3 XBeach-model

In 2020 is een XBeach model (versie XBeachX release<sup>1</sup>) opgezet voor het gebied ten zuiden van Egmond aan Zee, bij RSP-raai 41.25 met een grootte van 4.5 km kustlangs en 2.5 km in kustdwarse richting. Het rekenrooster heeft kustlangs een constante celgrootte van 5 m en in kustdwarse richting een variërende celgrootte van 1 tot 25 m.

Ten opzichte van het oorspronkelijke model uit 2020 zijn er in 2021 verschillende optimalisaties getest. Voor de modelinstellingen voor hydrodynamische en morfologische processen werden voorheen de WTI instellingen (Deltares, XBeachWTI2017, revision 4509. Quality status report, 2015) gebruikt. Als onderdeel van het nationale programma BOI ('Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium') is XBeach op meerdere fronten ontwikkeld. Relevant voor deze studie zijn met name het afleiden van nieuwe standaard instellingen (Deltares/Arcadis, 2021) en optimalisatie van rekestijden (Deltares, XBeach BOI -Approaches to reduce calculation time. Tech. report11205758-029-GEO-0012, 2021e). De (voorlopige) nieuwe instellingen zijn getest in combinatie met een volgens BOI richtlijnen opgezet grid. Bovendien wordt met het oog op het operationeel draaien van het model gekeken of de rekestijd ingekort kan worden. Hiervoor worden zowel optimalisaties van het 2D grid in overweging genomen als een 1D aanpak. De modelresultaten werden gevalideerd met de topografische LiDAR bodemmeting van het strand en duinen op 10 januari 2019 (Deltares, 2021). Metingen van bodemhoogte, waterstanden en golfhoogten zijn beschikbaar voor verschillende jaren om het model verder te verbeteren.

In 2022 werd een eenvoudig systeem opgezet waarmee de invoer voor het XBeach-model voorafgaand aan een storm snel, d.w.z. binnen enkele minuten, opgezet kan worden op basis van voorspellingen van operationele modellen. Dit is mogelijk met de volgende MATLAB-scripts die gereed staan in de QRF repository<sup>2</sup>:

- P11208034\_retrieve\_waves\_from\_matroos\_and\_make\_xbeach\_input.m
- P11208034\_retrieve\_waterlevels\_from\_matroos\_make\_xbeach\_input.m

In het script voor golven kan een keuze gemaakt worden uit de stations Europlatform, IJ-geul stroompaal 1 en Platform K13a. Voorwaarde voor zinvolle toepassing van dit systeem is dat het XBeach model altijd gereed staat met de meest recente ingemeten bodem.

### Onderzoeken in 2024

In 2024 zijn onderzoeken uitgevoerd naar het effect van suppleties op duinerosie tijdens een stormsequentie, gebruikmakend van het XBeach-model en QRF-metingen bij Egmond aan Zee (Niemeijer, 2024; Van der Waal, 2024). Hierbij werden twee aspecten onderzocht:

- 1 Het verschil in duinerosie tussen een gesuppleerd en een niet-gesuppleerd kusttraject (subdoel 1).
- 2 Het beschermende effect van verschillende suppletieontwerpen (subdoel 2).

<sup>1</sup> XBeach wiki: <https://publicwiki.deltares.nl/display/XBEACH/XBeach>

<sup>2</sup> QRF repository: <https://repos.deltares.nl/repos/MCS-AMO/trunk/matlab/projects/P11208034-quick-reaction-force>

## Resultaten

De resultaten van de simulaties laten zien dat de duinerosie tijdens de stormsequentie consistent lager was op de gesuppleerde locatie dan op de niet-gesuppleerde locatie. Dit verschil wordt toegeschreven aan een verhoogde golfdissipatie door de ondiepere en verder landinwaarts gelegen subtidale zandbanken op de gesuppleerde locatie. Bovendien waren de infragravitatiegolfhoogten tijdens stormpieken groter op de niet-gesuppleerde locatie.

De ruimtelijke variabiliteit van duinerosie langs de kust correleerde sterk met de strandhelling: steilere stranden gingen gepaard met meer duinerosie. Op de niet-gesuppleerde locatie werd een hardnekkige erosiehotspot waargenomen. Deze hotspot viel samen met een dieper gebied (tot NAP-6 m) in de nabijgelegen nearshore bathymetrie, waar korte golven zich verder landinwaarts voortplantten voordat ze braken.

Het toevoegen van verschillende ontwerpen voor zandsuppleties had een beperkte invloed op de duinerosie tijdens de stormsequentie. Dit suggereert dat de effecten van zandsuppleties op duinerosie zich ontwikkelen over langere tijdschalen dan één storm. Strandsuppleties hadden daarentegen een directer effect, doordat ze het strand en de hoogte van de duinvoet verhoogden.

## Conclusie

De studies concluderen dat zandsuppleties effectief zijn in het verminderen van de snelheid van duinerosie. Dit draagt bij aan een verbeterde bescherming tegen overstromingen tijdens stormsequenties en onderstreept het belang van suppleties in duurzaam kustbeheer. Echter, aanvullende metingen van het bodemniveau tussen stormen zijn noodzakelijk om de resultaten van deze studies beter te koppelen aan het gedrag in de praktijk en om het XBeach-model verder te kalibreren voor de simulatie van meerdere stormen.

## 2.3 Aanbevelingen voor QRF-kust in 2025

In voortzetting van het afgelopen stormseizoen stelt QRF voor om aanvullend op de stormmetingen door Universiteit Utrecht (UU) ten minste twee keer per jaar metingen uit te voeren van de bodemhoogte van de ondiepe vooroever, het strand en de duinen. Deze metingen zijn noodzakelijk voor de validatie van kennis over waterveiligheid, bijvoorbeeld voor het beoordelen, ontwerpen en onderhouden van waterkeringen. Bovendien leveren ze waardevolle informatie over de impact van stormen binnen de landelijke informatievoorziening.

De metingen zullen worden uitgebreid in samenwerking met Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK). Het interessegebied bestrijkt een kustlengte van 6 km tussen RSP 37.000 en 43.000 en een kustdwars gebied vanaf de duinvoet tot 1 km zeewaarts.

Het doel van het QRF-onderzoek bij Egmond aan Zee is om de sinds 2013 verzamelde meetgegevens door UU en HHNK te continueren en toe te passen in samenwerking met het SITO-PS-project *Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium (BOI) voor Primaire Waterkeringen*. Dit geldt ook voor kusttrajecten met bebouwing (Niet-Waterkerende Objecten, NWO's), waar erosie een bedreiging kan vormen.

### Doelen voor het stormseizoen 2025

- Het snel toepassen van het XBeach-model voor stormscenario's om voorafgaand aan een storm de verwachte erosie te berekenen, deze na de storm te valideren en het model waar nodig te verbeteren.
- Verdere ontwikkeling en verbetering van *Golfgebaseerde Satellite Derived Bathymetry (G-SDB)* in de kustzone. Deze innovatieve techniek combineert de fysische eigenschappen van golven met informatie uit optische en radar-satellietbeelden om nauwkeurige schattingen van de bathymetrie te genereren.

- Golfloop en duinerosie niet alleen voorafgaand en na een storm meten, maar ook tijdens een storm. Dit biedt unieke inzichten in de dynamiek van kusterosie.

#### **Voorgestelde inzet door QRF**

- **Verbetering van het XBeach-model voor Egmond aan Zee:**

De concept-BOI-instellingen zijn veelbelovend. Inmiddels zijn diverse morfologische parameters aangepast. Het is waardevol om te onderzoeken of deze aanpassingen de modelresultaten verder verbeteren op basis van nieuw ingewonnen meetgegevens.

- **Verdere ontwikkeling van G-SDB:**

Door de fysische eigenschappen van golven te combineren met gegevens uit satellietbeelden (optisch en radar) worden nauwkeurige en efficiënte schattingen van de bathymetrie mogelijk gemaakt.

- **Metingen van de bathymetrie van de ondiepe vooroever bij Egmond (twee keer per jaar):**

Dit gebeurt in samenwerking met Shore Monitoring, waarbij de gegevens worden gedeeld met UU en HHNK. Deze metingen worden gebruikt voor de verdere ontwikkeling en verbetering van *Golfgebaseerde Satellite Derived Bathymetry (G-SDB)* in de kustzone.

#### **Samenwerking binnen QRF**

Deltares blijft samenwerken met UU en HHNK door:

- Het uniformeren van dataopslag.
- Het delen van data.
- Het gezamenlijk opstellen van stormeffectrapportages voor Egmond aan Zee.

## 3 QRF-rivieren

### 3.1 Inleiding

Voor het bepalen van hydraulische condities in rivieren speelt de vraag hoe goed de kwaliteit van golf- en stromingsberekeningen is met de huidige instrumentaria (bijv. BOI). Daarnaast zijn er voor rivieren geen of nauwelijks windgolf- en stromingsmetingen beschikbaar om modelsimulaties en voorspellingen te verifiëren en te verbeteren. Om deze reden zijn drie centrale onderzoeksvragen bepaald:

- 1 Hoe kan de kwaliteit van stromings- en windgolfvoorspellingen worden bepaald?
- 2 Welke gegevens moeten hiervoor worden ingewonnen en hoe kunnen deze voldoende betrouwbaar worden bepaald?
- 3 Wat is de kwaliteit van stromings- en windgolfvoorspellingen?

De QRF-rivieren draagt bij aan het beantwoorden van een deel van deze onderzoeksvragen. Het korte termijn doel (2023 en 2024) van de QRF was als volgt gedefinieerd:

- Een meetvoorstel opzetten voor windgolfmetingen op rivieren tijdens hoogwater.
- Methodes ontwikkelen om afvoeren op rivieren te meten, zodat deze ingezet kunnen worden om de afvoeren in het winterbed beter te kunnen meten tijdens hoogwater.

### 3.2 Beoogde en uitgevoerde activiteiten

Er zijn verschillende metingen uitgevoerd in 2018 en 2021, zowel op de Waal als de Westerschelde. Dit waren video opnamen, foto's en C-drone metingen. Daarnaast zijn tijdens de storm Ciara in februari 2020 en storm Pia in december 2023 foto's en video opnamen van verzameld (via RWS, Deltares en Waterschappen) en zijn webcamera beelden bij Varik opgeslagen. In de afgelopen jaren zijn verschillende beeldverwerkingstechnieken getest om windgolven en afvoeren uit video-opnamen en Lidar metingen te berekenen. Daarnaast is een meetvoorstel opgesteld voor het meten van golven op rivieren, zie Appendix A.

Voor 2024 waren de volgende activiteiten voorzien:

- 1 Modelopzet SWAN voor de Waal  
Een SWAN model opzetten van de Waal om SWAN berekeningen uit te voeren voor verschillende condities (afvoeren, windsnelheden en windrichtingen) op de Waal. Het doel van dit SWAN model is in eerste instantie om met de SWAN resultaten een beeld van het golfveld nabij de voorgestelde meetlocaties (Deltares, 2023) voor het meten van golven te krijgen. De vraag die hierbij speelt is: zijn de golfcondities op de voorgestelde meetlocaties vergelijkbaar als met de Bretschneider formules of worden de golven door ruimtelijke factoren lager of hoger. Daarnaast worden de SWAN resultaten ingezet om een beter beeld te krijgen van de verschillen tussen SWAN en de Bretschneider golfgroeiformules<sup>3</sup> bij verschillende afvoeren.

---

<sup>3</sup> De golfhoogtes van de Bretschneider golfgroeiformules zijn in voorgaande jaren al in kaart gebracht op Beoordelings- en Ontwerp Instrumentarium (BOI) uitvoerlocaties nabij de winterdijk.



- 2 Haalbaarheidsstudie ten behoeve van afvoerbepaling  
Nagaan hoe de afvoer tijdens een (extreem) hoogwater beter bepaald kan worden op basis van huidige meettechnieken en verwerkingsmethoden. Hierbij is het van belang om de afvoerverdeling van het winterbed en zomerbed beter te kennen. Op basis van de locatie Lobith is de haalbaarheid verder uitgewerkt.

### 3.3 SWAN model Waal en analyse

#### 3.3.1 Aanleiding

In het huidige BOI instrumentarium is de rol van windgolven in het rivierengebied belangrijker geworden door aangescherpte normen en het hanteren van faalpaden. Echter, het probleem is dat er weinig kennis is van windgolven op rivieren en er is een gebrek aan golfmetingen. In het huidige instrumentarium worden de windgolven op rivieren met een sterk vereenvoudigd model berekend, namelijk de golfgroeiformules van Bretschneider. Deze golfgroeiformules zijn niet geschikt om de complexe golfpatronen en de invloed van stroming en obstakels in het rivierengebied te modelleren (zie bijvoorbeeld Figuur 3.1). Daarnaast is de modelonzekerheid relatief groot, met mogelijk het gevolg dat het aandeel van de golven wordt overschat. Een meer complex golfmodel (SWAN) zou hiervoor geschikter zijn, maar golfmetingen ontbreken in de stap naar acceptatie van een dergelijke overstap.

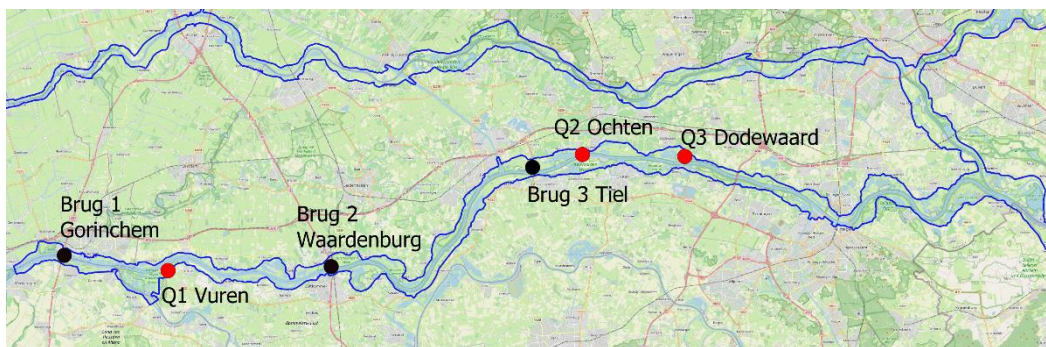


*Figuur 3.1 Voorbeeld van golven op de Waal. Links: storm op 18-01-2018,  $U_{10} \sim 22$  m/s, westelijke windrichting en dus tegenstroming, afvoer bij Lobith, normaal,  $3621$  m<sup>3</sup>/s. Rechts: verhoogde afvoer op de Waal op 24-01-2018,  $U_{10} \sim 10$  m/s, zuidwestelijke windrichting en dus tegenstroming, afvoer bij Lobith, verhoogd,  $5779$  m<sup>3</sup>/s*

#### 3.3.2 Meetvoorstel

Het meetvoorstel (Deltares, 2023) geeft een voorstel voor golfmetingen op rivieren om meer inzicht te krijgen in het gedrag van golven op rivieren. De rivier de Waal lijkt de meest geschikte rivier om te meten vanwege de relatief grote breedte en daardoor relatief hoge golfhoogtes vergeleken met andere delen van het bovenrivierengebied. Figuur 3.2 geeft een selectie van meetlocaties weer die interessant zijn om golven te meten.

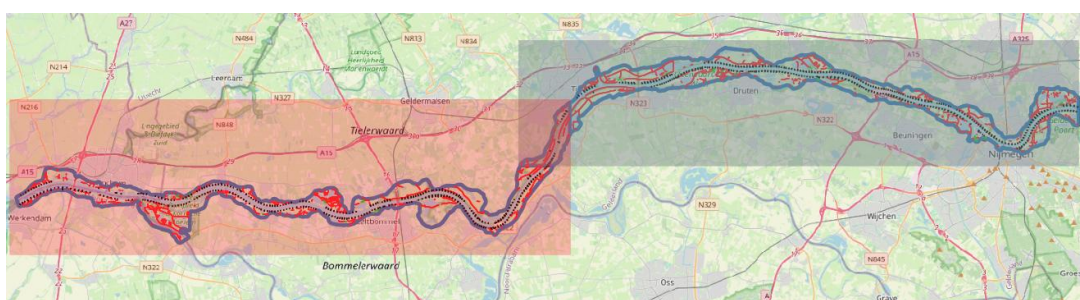
De voorgestelde meetlocaties uit het meetvoorstel (Deltares, 2023) zijn gebaseerd op een quickscan uitgevoerd met de golfgroeiformules van Bretschneider. Aangezien o.a. stroming, obstakels en hoogwatervrije gebieden de golfvelden aanzienlijk kunnen veranderen, is het noodzakelijk om de golven in de voorgestelde meetlocaties ook te modelleren met SWAN. In dit geval wordt SWAN gezien als een beter model dan de Bretschneider formules, die alleen golfgroei beschouwen en geen fysica zoals golf-stroom interacties, refractie van golven of dissipatie door ruimtelijke objecten. Echter, ook SWAN geeft niet het werkelijke golfveld en zou idealiter eerste gevalideerd moeten worden met metingen voor toepassing op rivieren.



Figuur 3.2 Overzicht van de gekozen locaties

### 3.3.3 Golfmodel

Om de golven op de voorgestelde meetlocaties te kunnen modelleren is een SWAN model opgezet. Er is gekozen om met twee SWAN modeldomeinen van de Waal te werken: : een westelijk en een oostelijk model, zie Figuur 3.3. Dit is gedaan om voor een hoge ruimtelijke resolutie te kunnen kiezen, maar niet tegen geheugen aan te lopen. Beide modellen hebben een ruimtelijke resolutie van 20 x 20 m, zodat de grote ruimtelijke variatie in het rivierengebied goed gemodelleerd kan worden. De bodem en obstakels zijn gegenereerd met Bas2SWAN uit baseline j23\_6-v2a. Er zijn voor verschillende wind en afvoercondities stationaire SWAN berekeningen uitgevoerd om een zo compleet mogelijk beeld te krijgen van de mogelijke golfvelden op de geselecteerde meetlocaties. De waterstand en stroming invoer komen uit D-Flow FM (versie dflowfm2d-rijn-j22\_6-v1a) en worden opgelegd voor verschillende afvoeren: 6000, 8000, 16000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith. Hierbij geldt dat de afvoercondities op het moment van de piekafvoer worden genomen in een stationaire SWAN berekening. Voor de wind is een stationair en ruimtelijk uniform windveld aangenomen. Er is gekeken naar de windsnelheden  $U_{10} = 10$  en 15 m/s en windrichtingen  $U_{dir} = 180, 202.5, 225, 247.5, 270, 292.5, 315, 337.5, 360$  °N.



Figuur 3.3 Twee SWAN modellen van de Waal.

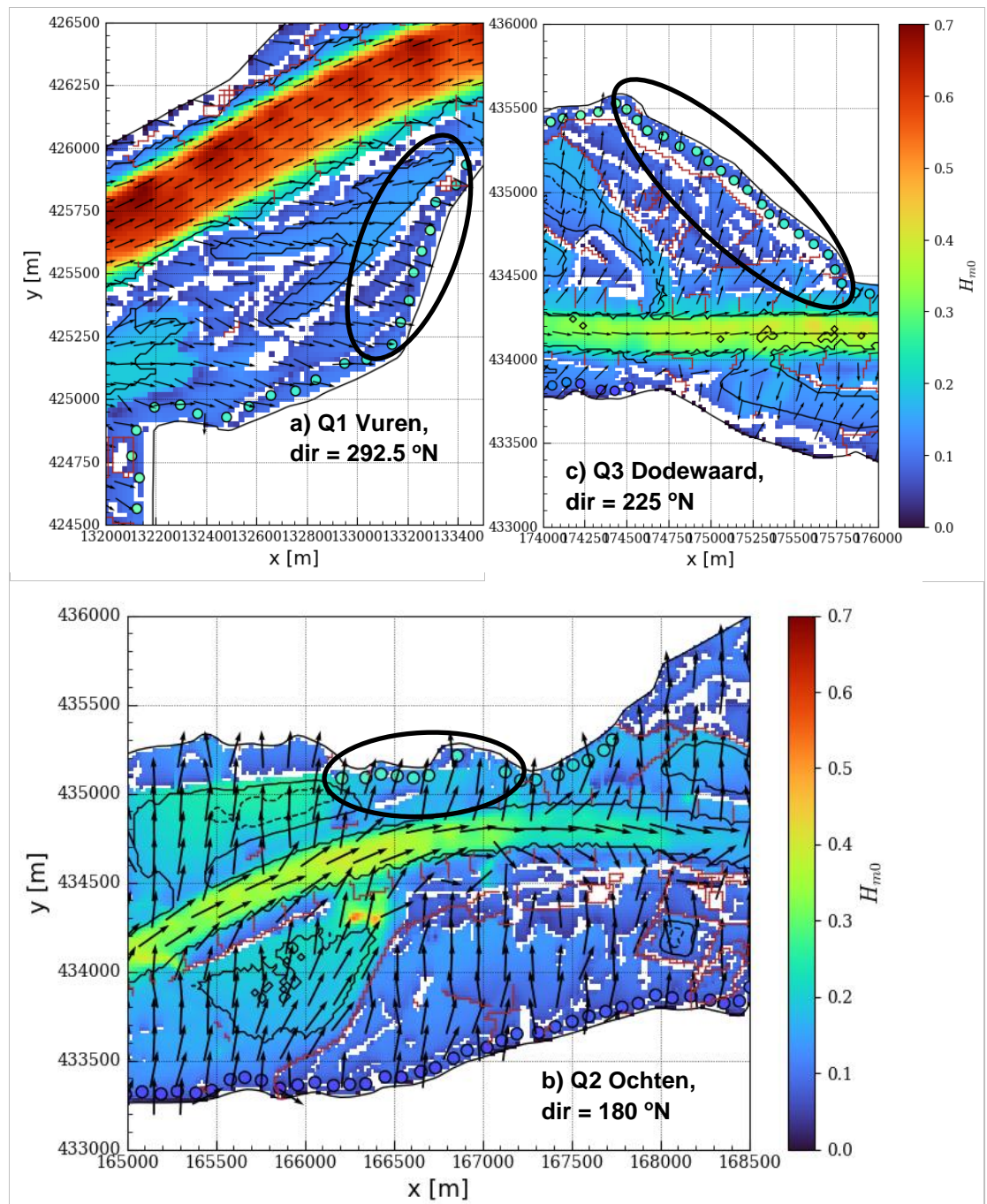
### 3.3.4 SWAN resultaten voor $Q_{Lobith} 6000$ m<sup>3</sup>/s en 10 m/s wind

Voor de verschillende windrichtingen zijn de golfhoogtevelden geplot voor de zes meetlocaties, zie Figuur 3.5 en Figuur 3.5 voor een selectie van windrichtingen. Daarbij zijn de golfhoogtes uit de golfgroeiformules van Bretschneider nabij de dijk ook weergegeven als gekleurde cirkels.

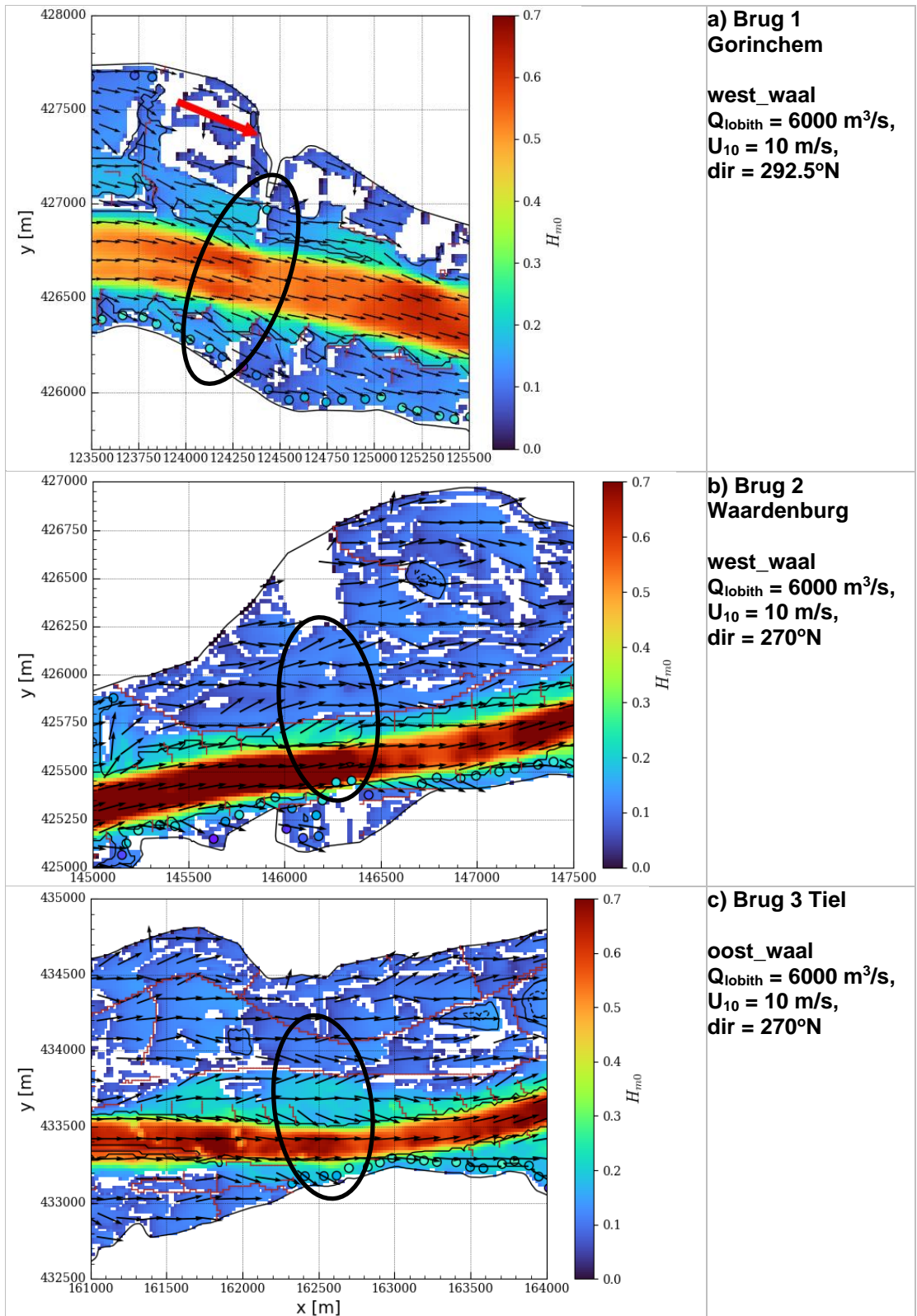
Wat opvalt is dat de Bretschneider golfgroeiformules vaak een hogere golfhoogte berekenen dan SWAN bij een afvoer van 6000 m<sup>3</sup>/s. Dit komt doordat delen van de uiterwaard toch nog droog liggen of afgeschermd worden door obstakels of hoogwatervrije gebieden. Ook speelt de stroming een rol.

Echter, voor de beoogde meetlocaties betekent dit dat een deel afvalt, aangezien de golven waarschijnlijk kleiner zijn dan 20 centimeter. De locaties die overblijven zijn Q2 bij Ochten, en de drie brug locaties.

Voor de drie brug locaties geldt dat ze voornamelijk interessant zijn bij de overgang van hoofdgeul naar uiterwaard. In de hoofdgeul is de golfhoogte vaak hoger door de tegenstroming (orde 50 – 80 centimeter bij 6000 m<sup>3</sup>/s en 10 m/s wind). Daarnaast zijn de golven in het gebied direct naast de hoofdgeul in de meeste gevallen ook nog tussen de 20 en 40 centimeter.



*Figuur 3.4* Significante golfhoogte  $H_{m0}$  voor drie voorgestelde meetlocaties a: Q1, b: Q2 en c: Q3 voor een  $Q_{lobith} = 6000 \text{ m}^3/\text{s}$  en  $U_{10} = 10 \text{ m/s}$ . De voorgestelde meetlocaties zijn in zwart omcirkeld. De golfrichting is per locatie verschillend (afhankelijk van de hoogste golven op die locatie). De golfhoogtevelden geven de uitvoer van SWAN weer, de gekleurde cirkels de Bretschneider resultaten. Voor zowel de SWAN als Bretschneider resultaten is dezelfde kleurschaal gehanteerd.



*Figuur 3.5* Significante golfhoogte  $H_{m0}$  voor drie voorgestelde meetlocaties bij de bruggen (a – c) voor een  $Q_{lobith} = 6000 \text{ m}^3/\text{s}$  en  $U_{10} = 10 \text{ m/s}$ . De voorgestelde meetlocaties zijn in zwart omcirkeld. De golfrichting is per locatie verschillend (afhankelijk van de hoogste golven op die locatie). De golfhoogtevelden geven de uitvoer van SWAN weer, de gekleurde cirkels de Bretschneider resultaten. Voor zowel de SWAN als Bretschneider resultaten is dezelfde kleurschaal gehanteerd.

### 3.3.5 Aanpassing meetplan op basis van SWAN berekeningen

Op basis van de met SWAN berekende golfvelden bij de voorgestelde meetlocaties (Deltares, 2023) wordt aanbevolen om te beginnen met meten op:

- één locatie bij de dijk: Q2 bij Ochten, gericht op het westen. De uiterwaard is goed te bereiken, is niet te groot (handig om zowel dijk als geul in beeld te hebben) en de verwachting is dat de golfhoogte ook bij een afvoer van  $6000 \text{ m}^3/\text{s}^4$  en wind van  $10 \text{ m/s}$   $20 - 25 \text{ cm}$  kan zijn.



*Figuur 3.6 Foto van de uiterwaard bij Ochten (overnachtingshaven IJzendoorn) tijdens het hoogwater van december 2023 (28-12-2023 10:56), bij een afvoer van  $7500 \text{ m}^3/\text{s}$  bij Lobith en  $11 \text{ m/s}$  bij Herwijnen met een windrichting van  $220^\circ\text{N}$ .*

- één locatie om de overgang van hoofdgeul naar uiterwaard te monitoren, bijvoorbeeld Brug 2 A2 Martinus Nijhoffbrug nabij Waardenburg. Er staat een deel van de noordelijke uiterwaard onder water bij een afvoer van  $6000 \text{ m}^3/\text{s}$ , er liggen kribben en er kan goed naar de golfdissipatie door tegenstroming gekeken worden.

---

<sup>4</sup> Een afvoer van  $6000 \text{ m}^3/\text{s}$  bij Lobith en wind van  $10 \text{ m/s}$  worden beschouwd, omdat deze combinatie van condities eens in de twee jaar voor kan komen en daarmee condities die het meest waarschijnlijk zijn dat ze in een meetperiode voorkomen. Alleen op locaties waarbij bij deze condities redelijke golven optreden is het de moeite waard om te gaan meten.



*Figuur 3.7 Foto van de uiterwaard bij de Martinus Nijhoffbrug nabij Waardenburg tijdens het hoogwater van december 2023 (28-12-2023 11:13), bij een afvoer van 7500 m<sup>3</sup>/s bij Lobith en 11 m/s bij Herwijnen met een windrichting van 220°N.*

Het meetvoorstel voor golven op rivieren (Deltares, 2023) is geüpdatet met de conclusies van de SWAN berekeningen. Het geüpdatet meetvoorstel is bijgevoegd in Appendix A<sup>5</sup>. Het meetvoorstel zal nog nader moeten worden uitgewerkt tot een detailplan door een uitvoerende partij. Dat zou de CIV van Rijkswaterstaat kunnen zijn, maar ook een marktpartij.

### 3.3.6 Verschillen tussen Bretschneider en SWAN bij hogere afvoeren

In Figuur 3.8 zijn de verschillen te zien tussen SWAN (westelijk en oostelijk model) en Bretschneider formules in een boxplot voor alle BOI uitvoerlocaties nabij de dijk voor verschillende windrichtingen bij a) 6000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith en 10 m/s windsnelheid, b) 16.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith en 10 m/s windsnelheid, c) 6.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith en 15 m/s windsnelheid en d) 16.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith en 15 m/s windsnelheid.

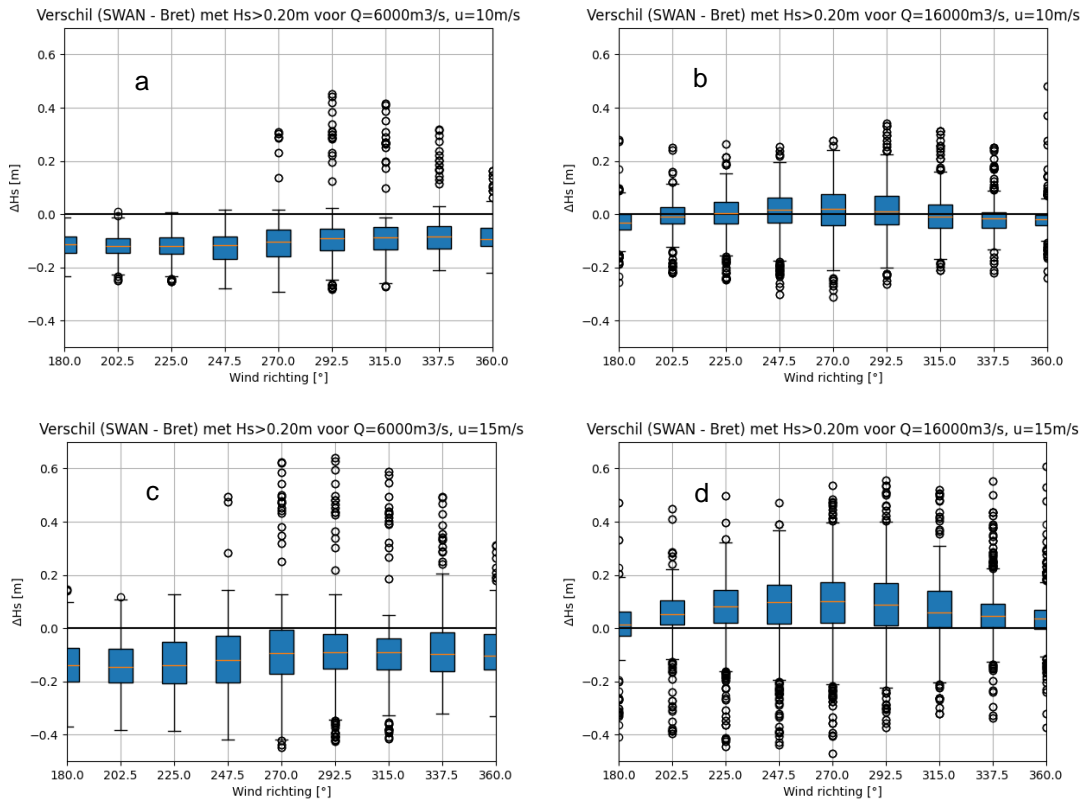
Er is te zien dat:

- SWAN, bij een afvoer van 6000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith en 10 m/s of 15 m/s windsnelheid, in de meeste gevallen een lagere golfhoogte geeft dan de Bretschneider golfgroeiformules.
- SWAN, bij een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith en 10 m/s windsnelheid, in veel gevallen vergelijkbaar is met de Bretschneider. Voor deze condities zijn in de boxplot wel grote afwijkingen te zien van het gemiddelde, zowel naar boven als naar beneden.
- SWAN, bij een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith en 15 m/s windsnelheid, in veel gevallen hogere golfhoogtes geeft dan met de Bretschneider. Voor deze condities zijn in de boxplot wel grote afwijkingen te zien van het gemiddelde, zowel naar boven als naar beneden.

Voor de SWAN simulaties met een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith en 10 of 15 m/s zien we, in tegenstelling tot een afvoer van 6000 m<sup>3</sup>/s, dat de golfhoogte minder vaak lager is dan Bretschneider door de invloed van stroming, obstakels of watervrije gebieden. Bij 16000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith staat de gehele uiterwaard (afgezien van hoogwatervrije gebieden) onder water en is de diepte in de uiterwaard groter. Hierdoor worden de golven minder beïnvloed door de 2D effecten in de uiterwaard.

Bij een afvoer van 16000 m<sup>3</sup>/s is veel vaker te zien dat de golfhoogte van SWAN hoger is dan Bretschneider. Dit komt omdat de golven in SWAN soms van richting veranderen door (stromings)refractie en daardoor bepaalde gebieden wel kunnen bereiken, terwijl dat volgens de strijklengte aanpak van Bretschneider niet mogelijk zou zijn.

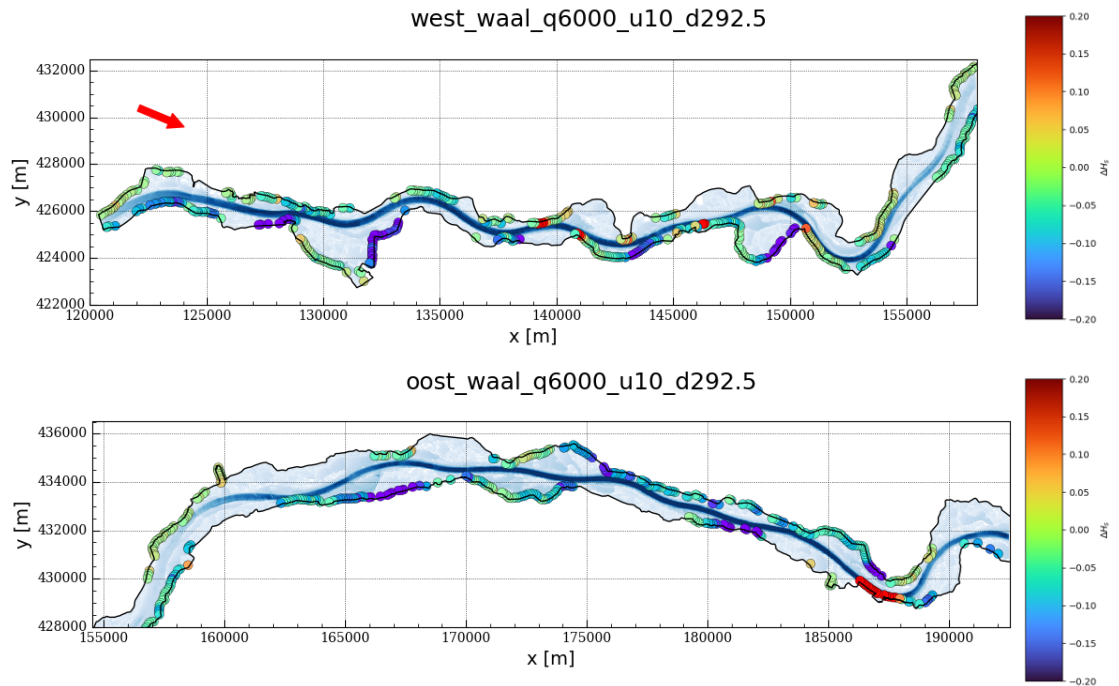
<sup>5</sup> Het geüpdatet meetvoorstel is nog niet gereviseerd, aangezien hier nog verder aan gewerkt zal worden in 2025.



**Figuur 3.8** Vergelijking SWAN resultaten op de Waal met Bretschneider resultaten in een boxplot voor a)  $Q_{Lobith} = 6000 \text{ m}^3/\text{s}$  en  $U_{10} = 10 \text{ m/s}$ , b)  $Q_{Lobith} = 16000 \text{ m}^3/\text{s}$  en  $U_{10} = 10 \text{ m/s}$ , c)  $Q_{Lobith} = 6000 \text{ m}^3/\text{s}$  en  $U_{10} = 15 \text{ m/s}$  en d)  $Q_{Lobith} = 16000 \text{ m}^3/\text{s}$  en  $U_{10} = 15 \text{ m/s}$ . De oranje lijn is de mediaan, de box geeft de waarden tussen het 1<sup>e</sup> en 3<sup>e</sup> kwartiel weer, de horizontale lijnen ('whiskers') laten de boven- en ondergrens van 1.5x de interkwartielafstand zien. Tot slot zijn de open cirkels de outliers.

Figuur 3.9 en Figuur 3.10 geven een voorbeeld van het ruimtelijk beeld van de verschillen tussen SWAN en Bretschneider voor een windrichting van 292.5°N.  $\Delta H_s$  is gedefinieerd als de golfhoogte van SWAN min de golfhoogte van Bretschneider op de betreffende BOI uitvoerlocatie. Figuur 3.9 laat de verschillen zien voor een afvoer van 6000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith en 10 m/s wind, terwijl Figuur 3.10 de verschillen laat zien voor een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith en 10 m/s wind.

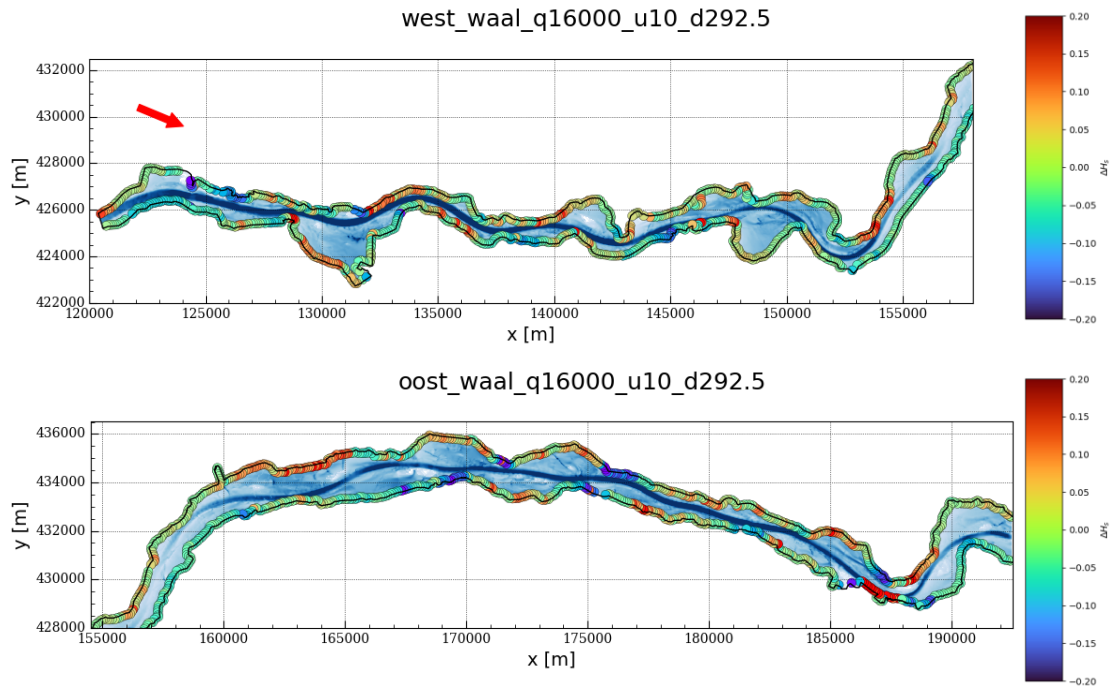
Voor de afvoer van 6000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith is te zien dat SWAN op veel locaties lagere waarden geeft dan Bretschneider. Dit komt doordat de golven in SWAN bij een relatief lage afvoer gehinderd worden door obstakels of beperkte waterdiepte. Alleen wanneer de hoofdgeul zeer dicht bij de dijk ligt (zoals bij Hurwenen, waar de BOI uitvoerlocatie bijna in de hoofdgeul ligt), is de golfhoogte van SWAN hoger dan Bretschneider. Dit komt omdat de golfhoogte in de hoofdgeul toeneemt door de tegenstroming bij de beschouwde windrichting. Overigens zijn bij een afvoer van 6000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith nog niet alle uitvoerlocaties overstroomd, waardoor er voor deze afvoer minder locaties kunnen worden vergeleken.



*Figuur 3.9 Voorbeeld van het verschil tussen SWAN en Bretschneider (in de gekleurde bolletjes) voor een windrichting van 292.5°N en een afvoer van 6000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith. De kleurenschaal laat het verschil in golfhoogte zien waarbij een positief verschil betekent SWAN > Bretschneider en een negatief verschil betekent Bretschneider > SWAN. Boven: het westelijke model, onder: het oostelijke model. De verschillen zijn afgekapt op 0.20 m en -0.20 m. De verschillen tussen SWAN en Bretschneider zijn geplot op het SWAN golfhoogte veld, waarbij lichtblauw lagere golfhoogtes weergeeft en donkerblauw hogere golfhoogtes.*

Voor een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith is te zien dat op alle uitvoerlocaties de verschillen tussen SWAN en Bretschneider kunnen worden vergeleken (zie Figuur 3.9). Er is te zien dat SWAN minder vaak lager is dan Bretschneider (zoals ook te zien was in Figuur 3.8). Aan de noordkant van de rivier zijn de golfhoogtes zeer klein. Echter, we zien wel dat SWAN hogere golfhoogtes geeft dan Bretschneider. Dit komt in de meeste gevallen door refractie van de net opgewekte golven, waardoor energie ten zuiden van de dijk afbuigt richting de dijk. Aan de zuidzijde worden door de langere strijklengte hogere golven verwacht. SWAN is hier vaak vergelijkbaar met Bretschneider, met verschillen in de orde van 1 – 5 cm. Grotere negatieve verschillen (SWAN < Bretschneider) komen vaak door hoogwatervrije gebieden en zijn zeer lokaal. Groter positieve verschillen (SWAN > Bretschneider) komen voor als de uitvoerlocatie nabij de hoofdgeul ligt of door refractie effecten.





Figuur 3.10 Voorbeeld van het verschil tussen SWAN en Bretschneider voor een windrichting van 292.5°N en een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith. Boven: het westelijke model, onder: het oostelijke model. De verschillen zijn afgekapt op 0.20 m en -0.20 m.

## 3.4 Afvoeren in uiterwaarden

### 3.4.1 Inleiding

Binnen het project Quick Reaction Force (QRF) bereiden Rijkswaterstaat en Deltares monitoring voor, zodat tijdens een hoogwater meetgegevens en op basis daarvan kennis verzameld kunnen worden. In dit kader is geëvalueerd of de afvoer door uiterwaarden kan worden afgeleid uit Lidar-metingen die waren uitgevoerd langs de Maas tijdens het hoogwater in de zomer van 2021 (Buschman en Pronk, 2022). Dat is mogelijk gebleken bij overlaten in de uiterwaarden (bijvoorbeeld overstroomde wegen dwars op de stroomrichting). Wanneer de waterdiepte op de overlaat groter was dan 0,5 m, leek het resultaat plausibel. Een beperking is dat met deze methode afvoer alleen geschat kan worden op het moment van de vlucht, en dus niet continu.

Het is relevant om de afvoer door uiterwaarden te kennen, omdat deze aanzienlijk kan zijn bij hogere rivierafvoer. De verdeling van de totale afvoer door het zomerbed en door de uiterwaarden is vaak niet goed bekend, en de wens is deze verdeling mee te wegen in de hydrodynamische modellen. Om deze redenen is binnen het QRF project besloten om een haalbaarheidsonderzoek te doen naar mogelijke technieken en methoden om afvoer in uiterwaarden continu te bepalen. Omdat Lobith een belangrijke meetlocatie is voor Nederland, is gekozen om de haalbaarheid van (nieuwe) technieken aan te geven voor deze sleutellocatie.

**De wens voor Lobith is om continu de (totale) afvoer te bepalen uit stroomsnelheidsmetingen tot 16.000 m<sup>3</sup>/s** (waterstand is dan ongeveer 17,75 m NAP). De reeks wordt achteraf gevalideerd, indien nodig gecorrigeerd en online ontsloten. Net als voor andere meetlocaties in Nederland, is momenteel de **eis voor de onnauwkeurigheid gesteld op 10%** (stochastische en systematische fout samen), maar de wens is een kleinere relatieve onnauwkeurigheid. Wenselijk is vooral dat de systematische onnauwkeurigheid klein is.

Stochastische onnauwkeurigheid kan worden gereduceerd door aanpassing van de meetstrategie of middelingsperiode.

Over het algemeen is de afvoer in een uiterwaard moeilijker te meten dan de afvoer in het zomerbed. Om die reden zal over het algemeen de onnauwkeurigheid van de afvoer in de uiterwaard groter zijn dan die in het zomerbed. Om aan de wens voor de onnauwkeurigheid voor de totale afvoer te voldoen, zal de onnauwkeurigheid voor het zomerbed en voor de uiterwaarden uitgewerkt moeten worden op basis van wat mogelijk is.

Voor een uitgebreide beschrijving van de achtergrond van afvoerbepaling wordt verwezen naar het memo Deltares (2024) dat is toegevoegd aan Appendix B.

### 3.4.2 Huidige situatie

We constateren dat momenteel alleen incidenteel de afvoer wordt bepaald in het hoge bereik op basis van varende metingen, en dat er een risico is dat deze metingen niet uitgevoerd kunnen worden (vanwege bijvoorbeeld een vaarverbod). Met de Qf-relatie zal wel continu een afvoer bepaald kunnen worden, maar de onnauwkeurigheid in het hoge bereik is mogelijk aanzienlijk. Juist voor een dergelijke mogelijke extreme afvoer is een bepaling op basis van metingen gewenst.

Daarnaast zijn er drie andere redenen om de afvoerbepaling bij Lobith in de overstroomde uiterwaarden te verbeteren: (1) Prognoses geven aan dat hoge afvoer bij Lobith vaker voor gaat komen (waardoor ook de benodigde inspanning toe zal nemen), (2) Bij de extreemste hoge afvoeren heeft de afvoerbepaling waarschijnlijk een hogere relatieve onnauwkeurigheid en (3) er zijn nieuwe meettechnieken en -methoden beschikbaar gekomen waarmee de onnauwkeurigheid van afvoerbepaling mogelijk is te verkleinen.

### 3.4.3 Doelstelling

Het doel van de haalbaarheidsstudie is tweeledig:

- 1 Technieken en analysemethoden in kaart brengen waarmee continu de afvoer in overstroomde uiterwaarden bij Lobith bepaald kan worden.
- 2 Voor een of twee geselecteerde technieken een meetplan uitwerken, op basis waarvan bij de eerstvolgende overstroming van de uiterwaarden afvoer kan worden bepaald.

### 3.4.4 Aanpak en uitgangspunten

De aanpak is dat we in twee expertsessies de huidige situatie en passende technieken bespreken en uitwerken tot een plan.

Uitgangspunten die voor deze haalbaarheidsstudie gehanteerd zijn:

- 1 Hoewel ook tijdens een hoogwater de afvoer door het zomerbed aanzienlijk groter is dan die in de uiterwaarden, laten we de afvoer in het zomerbed buiten beschouwing. In ander kader bereidt Rijkswaterstaat al een project voor ter verbetering van de afvoerbepaling met een HADCP.
- 2 Voor deze haalbaarheidsstudie gaan we uit van afvoerbepaling bij de al bestaande ADCP hoogwaterraai en in de uiterwaarden.
  - a. De Altrhein bij Bimmen is een oude riviertak die kan meestromen. Ondanks dat deze dieper is dan de rest van de uiterwaarde, definiëren we de Duitse uiterwaarde als het hoger gelegen deel, exclusief de Altrhein.
  - b. Mogelijk kan bij de uitwerking van het plan blijken dat een andere meetlocatie tot betere (totale) afvoerbepaling leidt.

### 3.4.5 Overzicht van de meettechnieken

De verschillende meettechnieken en bijbehorende methoden om continu afvoer te bepalen in overstroomde uiterwaarden zijn samengevat in Tabel 3.1. Deze technieken zijn naar voren gekomen in een expertsessie in Arnhem op 28-8-2024. Per techniek worden de werking, methode om afvoer te bepalen, benodigdheden, voordelen, nadelen en eerdere toepassingen aangegeven. Ook is het Technology Readiness level (TRL) gegeven voor de techniek en de methode om afvoer te bepalen. De schaal loopt van 1 (er is een meetprincipe beschreven) tot 9 (de meetmethode wordt operationeel op verschillende plaatsen bij verschillende condities toegepast).

Een uitgebreide beschrijving van elke techniek is te vinden in Deltares (2024), bijgevoegd in Appendix B en is gebaseerd op recente rapporten en artikelen. Er is gebruik gemaakt van bestaande inventarisaties van technieken en methoden, waaronder:

- uitdagingen en methoden voor meten tijdens een hoogwater (Muste en Hoitink, 2017),
- meetmethoden voor de Rijn rondom de Duits-Nederlandse grens (Buschman et al., 2017),
- afvoerbepaling tot bij de hoogste afvoer en overstroomde vallei in de Roer (Wallerstein en Hoitink, 2023) en de Geul (Buschman en van Meerkerk, 2023).

Tabel 3.1 Overzicht van technieken en methoden om continu afvoer te bepalen in uiterwaarden

Techniek/methode	Bemeten deel dwarsdoorsnede	Continuïteit	TRL	Uitvoerbaarheid	Belangrijkste voordelen	Belangrijkste nadelen
Raai van ADCP's dwars op de hoofdstroom op/in de bodem	Een profiel per ADCP	Vanaf 1-2 m waterdiepte	8	Kan eenvoudig voor hoogwater geplaatst		Slechts enkele profielen in niet-uniforme stroming
Dwarsraai van K-band radars	1 meting per radar aan oppervlak	Goed, behalve bij harde regen	8	Een paal of brug nodig voor bevestiging	Robuust, want gewogen gemiddelde over ellipsvormig vlak	Wind kan leiden tot systematische fout
Langsprofiel van druksensoren	Verhang op 1 lijn langs uiterwaard	Heel goed.	9	Eenvoudig voor hoogwater te plaatsen	Robuust	Onnauwkeurig, ook door onregelmatige geometrie
Grootschalige PIV	Groot deel oppervlak	Bij daglicht bij gunstig weer	7	Bij hoogwater lastig: een groot wateroppervlak	Vlakdekkend en stroomsnelheidsvectoren	Referentiepunten nodig: lastig in brede rivier
UHF radar vanaf een paal	Groot deel oppervlak	Goed, behalve bij harde regen	7	NIET	Vlakdekkend	Zendvergunning wordt niet gegeven in Nederland.
Akoestische tomografie	Groot	Groot	7	Installatie vergelijkbaar met een looptijdmeter	Dwarsdoorsnede gemiddelde stroomsnelheid wordt gemeten	Alleen verkrijgbaar via Japan.
Extrapolatie of data-assimilatie meting met 3D numeriek model	Afhankelijk van keuze voor meetmethode	Mogelijk goed	7	Nog uit te werken	Fysisch gebaseerde extrapolatie en correctie	Investeringen in 3D model (en data-assimilatie) zijn nodig en kostbaar

### 3.4.6 Plan voor afvoerbepaling in uiterwaarden bij Lobith

Tijdens een tweede expertsessie zijn de verschillende technieken geëvalueerd voor de uiterwaard links en rechts<sup>6</sup> bij Lobith. We zijn er vanuit gegaan dat de afvoer door de kribvakken en door de Altrhein bepaald wordt samen met de afvoer in het zomerbed. Op basis van uitvoerbaarheid en het beperken van kosten is voor beide uiterwaarden een techniek geselecteerd om continu de afvoer te bepalen. Bijvoorbeeld zijn in beide uiterwaarden ter hoogte van de gekozen locatie, de ADCP hoogwaterraai, geen hoge palen aanwezig waar een radar of camera gemonteerd kan worden. Voor een andere locatie, bijvoorbeeld nabij een brug, kunnen deze technieken mogelijk wel kosteneffectief ingezet worden.

<sup>6</sup> Links en rechts van de hoofdgeul stroomafwaarts gekeken.

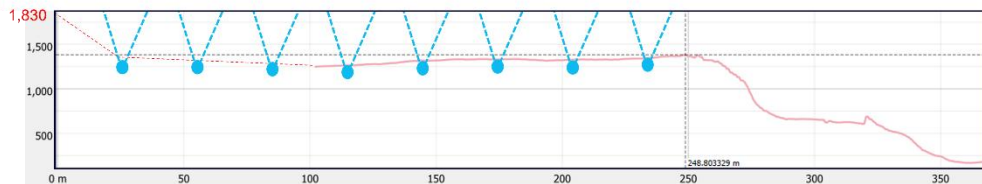
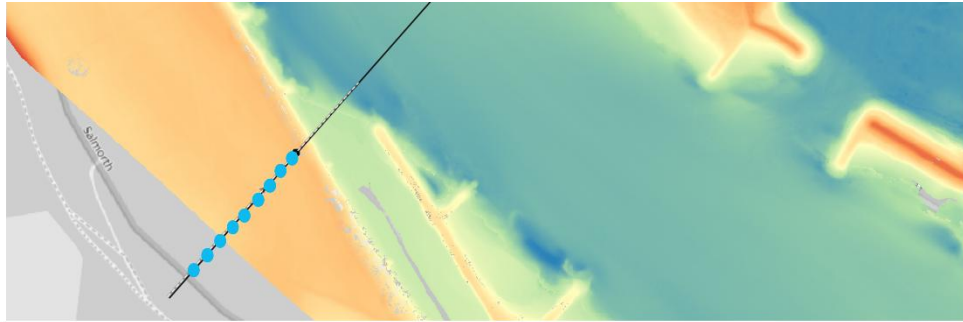
Voor de uiterwaarden links en rechts bij Lobith stellen we voor:

- 1 **Aquadopp ADCP's iedere 20-25 m in te graven op de hoogwaterraai kort voor een hoge(re) afvoer**, waarvoor de verwachting is dat de uiterwaarden gaan meestromen. De ADCP's blijven de gehele hoogwaterperiode het stroomsnelheidsprofiel ter plaatse meten. Voor een uitgebreide beschrijving Aquadopp ADCP's wordt verwezen naar het memo Deltares (2024) dat is toegevoegd aan Appendix B.
  - a. Omdat stroombanen kunnen voorkomen met een relatief hoge stroomsnelheid ten opzichte van de omgeving, zijn in totaal minimaal 12 Aquadopps nodig. Wanneer meer Aquadopps gebruikt worden, verkleint de onnauwkeurigheid van de bepaalde afvoer per uiterwaard.
  - b. Uit de gemeten verticale stroomsnelheidsprofielen kan de afvoer in de uiterwaard worden bepaald door horizontale interpolatie van de gemiddelde stroomsnelheid en extrapolatie naar (zomer)dijk, bodem en wateroppervlak.
  - c. Voordelen van het ingraven van de Aquadopps ten opzichte van het plaatsen van frames met ADCP's zijn (1) dat de stroomsnelheid al kan worden bepaald in 2 cellen vanaf een waterdiepte van ongeveer 0,5 m en (2) dat drijvend materiaal minder snel blijft hangen, omdat de bovenkant van de Aquadopps op een vergelijkbare hoogte als het maaiveld ligt.
- 2 **Incidenteel oppervlaktestroomsnelheid te bepalen met grootschalige PIV vanaf een drone**, wanneer de uiterwaarden (ruim) zijn overstroomd.
  - a. Door op een hoogte van ongeveer 120 m te vliegen kan het ruimtelijke stromingspatroon (aan het wateroppervlak) bepaald worden in ieder van de twee uiterwaarden, waarmee stroombanen goed zichtbaar worden. Voor een uitgebreide beschrijving van de PIV methode wordt verwezen naar het memo Deltares (2024) dat is toegevoegd aan Appendix B.
  - b. Inzicht in stroombanen uit deze PIV meting, en stroombanen berekend voor meerdere piekafvoeren met numerieke modellen, kan gebruikt worden om bij een volgende plaatsing van de Aquadopps rekening te houden met de stroombanen (bijvoorbeeld door te zorgen dat in het midden en op de randen van een stroombaan een Aquadopp wordt geplaatst).
- 3 Extra ADCP bootmetingen te doen wanneer de Aquadopps geplaatst zijn, zodat geëvalueerd kan worden wat de onnauwkeurigheid is van afvoer door een uiterwaard bepaald op basis van Aquadopp stroomsnelheidsprofielen.

### Links

De uiterwaard bij de linkeroever ter hoogte van de hoogwaterraai is ruim 200 m breed tot de oude riviertak de Altrhein. Bij de hoogste afvoer waarbij metingen gewenst zijn (16.000 m<sup>3</sup>/s) is de waterdiepte links van de zomerdijk 3-4 m. Het grootste deel van de uiterwaard is grasland, maar er zijn ook gebieden (onder andere rondom de Altrhein) met struiken en bomen, die een aanzienlijk hogere hydraulische ruwheid geven.

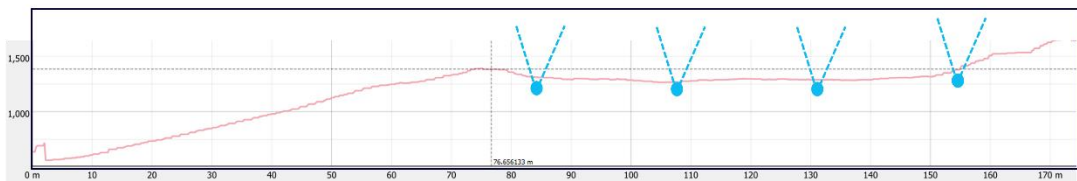
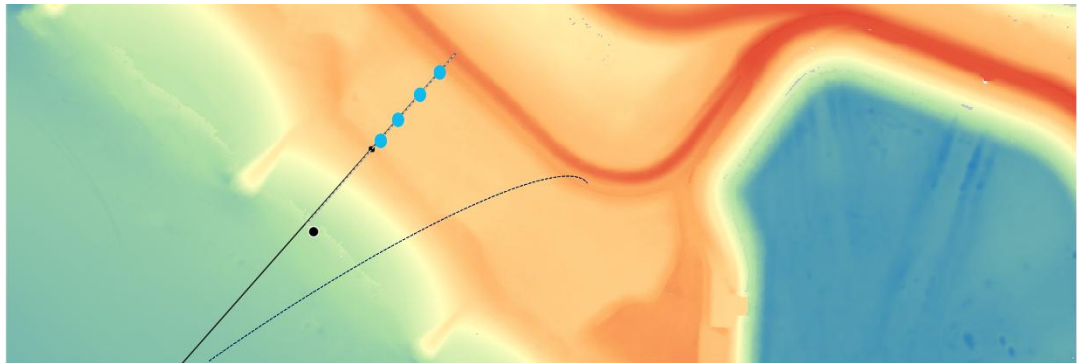
Figuur 3.11 toont een grof ontwerp voor de Aquadopps. Voor het bepalen van de precieze locaties stellen we voor rekening te houden met vegetatie, bodemhoogte en waar mogelijk stroombanen.



Figuur 3.11: Grof ontwerp voor plaatsing van 8 Aquadopp ADCP's in de uiterwaard links, met onder de dijkhoogte en geschatte bodemligging (cm + NAP).

### Rechts

De uiterwaard bij de rechteroever rondom de hoogwaterraai is ruim 100 m breed en grotendeels grasland. Figuur 3.12 toont een grof ontwerp voor het minimale aantal van 4 Aquadopp's. Wanneer de waterstand boven 16,0-16,5 m NAP komt, wordt de hoogwaterraai gekromd gevaren tot het hoge punt van de kade. In dat geval is het belangrijk dat toch ook de rechte hoogwaterraai gevaren wordt, zodat de stroomsnelheidsmetingen onderling vergeleken kunnen worden.



Figuur 3.12: Grof ontwerp voor plaatsing van 4 Aquadopp ADCP's in de uiterwaard rechts; Boven: de rechte hoogwaterraai en de gekromde raai (indicatief) die wordt gevaren bij waterstand hoger dan 16,0-16,5 m NAP; Onder: een profiel vanaf de meetpaal tot de kade die bij 1600-1650 cm NAP overstroomt.

### 3.5 Aanbevelingen voor QRF-rivieren in 2025

Voor 2025 wordt aanbevolen om het meetvoorstel (Deltares, 2023) voor meten van golven op rivieren verder uit te werken en uit te voeren. Concreet betekent dit dat de QRF-rivieren zal meedenken samen met RWS-WVL/CIV in de richting van de implementatie van het meetvoorstel. Daarnaast wordt gekeken wat de terugval opties zijn wanneer er niet door de CIV kan worden gemeten.

Daarnaast wordt aanbevolen om het plan voor afvoerbepaling in de uiterwaarden bij Lobith verder uit te werken. Het idee is dat de technieken die haalbaar zijn gebleken verder uitgewerkt kunnen worden en mogelijk in combinatie ingezet kunnen worden.

## 4 Conclusies

### 4.1 QRF-kust

Vanuit Rijkswaterstaat Water Verkeer en Leefomgeving (RWS-WVL), Deltares, en diverse beheerders is er behoefte aan validatie van kennis over waterveiligheid, bijvoorbeeld voor het beoordelen, ontwerpen en onderhouden van waterkeringen. Ook is er behoefte aan adequate informatie over de impact van stormen in het kader van de landelijke informatievoorziening.

In Noord-Holland worden hiervoor bodemhoogte- en golfhoogtemetingen uitgevoerd door QRF in samenwerking met Universiteit Utrecht (UU). Sinds december 2013 worden bodemhoogtemetingen uitgevoerd met een Terrestrial Laser en *Structure from Motion* (SfM) technieken over een strandgebied van 4 km langs de kust bij Egmond, die de KustLiDAR-metingen van Rijkswaterstaat aanvullen. Tijdens het stormseizoen voert de UU golfhoogtemetingen uit op het strand van Egmond met behulp van 14 druksensoren.

De gecombineerde meetgegevens van bodemhoogte en golfhoogtes hebben geleid tot de ontwikkeling van een XBeach-model door QRF en UU. In 2024 werden de metingen van de vooroever, het strand en de duinen, evenals de golfhoogtes op het strand, gebruikt om de effecten van suppleties en de gevoeligheid van de kust voor stormsequenties te analyseren. Uit de analyses blijkt dat zandsuppleties effectief zijn in het verminderen van de snelheid van duinerosie. Dit draagt bij aan een verbeterde bescherming tegen overstromingen tijdens stormsequenties en onderstreept het belang van suppleties in duurzaam kustbeheer. Echter, aanvullende metingen van het bodemniveau tussen stormen zijn noodzakelijk om de resultaten van deze analyses beter te koppelen aan het gedrag in de praktijk en om het XBeach-model verder te kalibreren voor de simulatie van meerdere stormen.

Voor 2025 worden de volgende activiteiten binnen QRF voorgesteld:

- 1 Snel toepassen van het model bij stormscenario's:  
Het model wordt ingezet om voorafgaand aan een storm de verwachte erosie te berekenen. Na de storm worden de voorspellingen gevalideerd en, indien nodig, gebruikt om het model te verbeteren.
- 2 Innovatieve meetmethoden:  
In 2025 willen we de golfloop en duinerosie niet alleen voorafgaand en na een storm meten, maar ook tijdens een storm. Dit biedt unieke inzichten in de dynamiek van kusterosie.
- 3 Verdere ontwikkeling Golfgebaseerde Satellite Derived Bathymetry (G-SDB):  
De techniek wordt verder verfijnd om de fysische eigenschappen van golven te combineren met optische en radar-satellietbeelden. Dit biedt een kosteneffectieve en efficiënte methode om bathymetrie in de kustzone nauwkeurig te schatten.

Deze inspanningen versterken de informatievoorziening voor kustbeheerders en ondersteunen een duurzaam kustbeheer door beter inzicht te bieden in de effecten van stormen en suppleties. Bovendien leveren ze het noodzakelijke validatiemateriaal voor de kennis over waterveiligheid, wat essentieel is voor het beoordelen, ontwerpen en onderhouden van waterkeringen.



## 4.2 QRF-rivieren

Om golf- en stromingsberekeningen op rivieren (bijv. van BOI) te verifiëren en te verbeteren zijn windgolf- en stromingsmetingen nodig. Echter, in het rivierengebied zijn nauwelijks metingen voor stroming en windgolven beschikbaar. De QRF-rivieren heeft als doel om bij te dragen aan het mogelijk maken van golf- en stromingsmetingen in het rivierengebied.

Het werk dat in 2024 is verricht was gericht op het doen van SWAN berekeningen om de golfcondities op de voorgestelde meetlocaties beter in kaart te brengen. De aanbevelingen uit de golfberekeningen zijn in het meetvoorstel van Deltares (2023) verwerkt.

Voor afvoeren is haalbaarheidsstudie voor de afvoerbepaling in de uiterwaarden met als case studie Lobith opgezet. Het idee in 2025 het plan verder uit te werken met de selectie van methodes die haalbaar zijn gebleken.

# Referenties

Deltares (2023). Meetvoorstel golven op rivieren. Deltares rapport 11209262-007-ZWS-0001, definitief 8 december 2023.

Buschman, Frans, Astrid Blom, Thaiënne van Dijk, Maarten Kleinhans en Rolien van der Mark (2017) Informatiebehoefte en aanbevelingen voor monitoring in de Bovendelta van de Rijn, NKWK-pilot 2016 - A2, Deltares kenmerk 11200356-000-ZWS-0004.

Buschman, Frans en Maarten Pronk (2022) Afvoerbepaling in uiterwaarden uit waterhoogte bepaald met LiDAR, Deltares kenmerk 11208034-007-ZWS-0003.

Buschman, Frans en Mike van Meerkerk (2023) Monitoring discharge continuously in the Geul: A feasibility study, Interreg EMfloodResilience project, Deltares reference 11209514-002-ZWS-0001, November 2023.

Muste, M. and T. Hoitink (2017) Measuring Flood Discharge, Oxford University Press. DOI: 10.1093/acrefore/9780199389407.013.121.

Niemeijer, M. R. (2024). How do storm sequences impact dune erosion? Modelling a 2022 storm group at Egmond aan Zee in XBeach. MSc. thesis. Utrecht University.

Shore Monitoring (2023). Veldrapport QRF Egmond 2023-10 N202310-01. Oktober 2023. Shore Monitoring & Research BV, Den Haag.

Shore Monitoring (2024a). Veldrapport QRF Egmond 2024 S24026. April 2024. Shore Monitoring & Research BV, Den Haag.

Shore Monitoring (2024b). Veldrapport QRF Egmond S24066. September 2024. Shore Monitoring & Research BV, Den Haag.

Van der Waal, J. B. (2024). The effect of nourishments on dune erosion during a storm sequence Modelling dune erosion with XBeach at Egmond aan Zee. MSc thesis. Utrecht University.

Wallerstein, Nick en Ton Hoitink (2023) Improving discharge measurement range on the lower Roer, Wageningen University, Interreg EMfloodResilience project, November 2023.

# A Meetvoorstel meten op rivieren

Meetvoorstel golven op rivieren, versie november 2024.

## B Memo: Verbetering afvoerbepaling Lobith bij overstroomde uiterwaarden: haalbaarheidsstudie en plan

Memo Verbetering afvoerbepaling in overstroomde uiterwaarden bij Lobith, versie december 2024.

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](http://www.deltares.nl)