

Eindrapport Quick Reaction Force 2021

Samenvatting van activiteiten, voorbeeldresultaten en aanbevelingen voor stormseizoen 2022



Eindrapport Quick Reaction Force 2021

Samenvatting van activiteiten, voorbeeldresultaten en aanbevelingen voor stormseizoen 2022

Auteur(s)

Bart Grasmeijer

Joana van Nieuwkoop

Eindrapport Quick Reaction Force 2021

Samenvatting van activiteiten, voorbeeldresultaten en aanbevelingen voor stormseizoen 2022

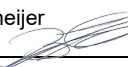


Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	de heer G. Burgers
Referenties	KPP-Versterking Onderzoek Waterveiligheid (VOW)
Trefwoorden	Quick Reaction Force

Documentgegevens

Versie	0.2
Datum	22-12-2021
Projectnummer	11206793-007
Document ID	11206793-007-ZWS-0002
Pagina's	35
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Bart Grasmeijer	
	Joana van Nieuwkoop	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.2	Bart Grasmeijer 	Ellen Quataert 	Bianca Peters 	
	Roel de Goede			
	Joana van Nieuwkoop			

Samenvatting

Het doel van de Quick Reaction Force (QRF) is om waterveiligheidskennis te verbeteren door betere verwerving, ontsluiting en gebruik van velddata rondom stormen en hoogwaters. 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 rondom stormen, en zo de samenwerking tussen partijen zoals Rijkswaterstaat, waterschappen, Deltares en universiteiten te bevorderen. Dit rapport beschrijft kort de beoogde en uitgevoerde QRF werkzaamheden in 2021, voorbeeldresultaten en aanbevelingen voor het seizoen 2022.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	6
1.1	Achtergrond en doelstelling QRF	6
1.2	Doel en inhoud van dit document	7
2	Activiteiten, voorbeeldresultaten en aanbevelingen QRF-kust	8
2.1	Inleiding	8
2.2	Beoogde en uitgevoerde activiteiten	8
2.2.1	Studiegebied Egmond aan Zee	8
2.2.2	Metingen	9
2.2.3	XBeach-model	12
2.3	Voorbeeldresultaten	12
2.3.1	Inleiding	12
2.3.2	Opzet XBeach-model	13
2.3.3	Stormcondities	15
2.3.4	Simulaties	15
2.3.5	Resultaten	16
2.4	Aanbevelingen voor QRF-kust in 2022	21
3	Activiteiten, voorbeeldresultaten en aanbevelingen QRF rivieren	23
3.1	Beoogde en uitgevoerde activiteiten	23
3.2	Voorbeeldresultaten	24
3.2.1	Stappenplan QRF rivieren en Quickscan rivieren	24
3.2.2	Metingen Hoogwater 2021	26
3.2.3	Validatiemetingen 2021	28
3.3	Aanbevelingen voor QRF-rivieren in 2022	32
	Referenties	33

1 Inleiding

1.1 Achtergrond en doelstelling QRF

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.

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 meer inzicht in het functioneren van het morfodynamisch systeem onder extreme omstandigheden. Vanuit Rijkswaterstaat Water Verkeer en Leefomgeving (RWS-WVL), Deltares en de kennisinstututen is er behoefte aan validatie van kennis over waterveiligheid. Bijvoorbeeld t.b.v. het toetsen, ontwerpen en onderhouden van waterkeringen en behoefte aan adequate informatie over de impact van de storm in het kader van de landelijke informatie voorziening.

Door de jaren heen is veel kennis ontwikkeld over de effecten van stormen op de kust. Deze kennis wordt direct toegepast bij de toetsing van de kust als waterkering. 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.

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, om zo de samenwerking tussen partijen te bevorderen. Dit omvat ontsluiting van velddata, de verwerving van (eventueel extra) metingen en voor het opstellen van gemeenschappelijke rapportages door de verschillende partijen rondom stormen. .

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 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 2021 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 2021, de voorbeeldresultaten en aanbevelingen voor het jaar 2022. De kust-gerelateerde activiteiten worden beschreven in paragraaf 2.1 en de rivieren-gerelateerde onder paragraaf 2.2.

2 Activiteiten, voorbeeldresultaten en aanbevelingen QRF-kust

2.1 Inleiding

Voor het jaar 2020 stond uitbreiding van samenwerking met de Universiteit Utrecht (UU) centraal in een langlopend project bij Egmond aan Zee. Binnen deze samenwerking was beoogd om snel golfhoogtegegevens en 3D-ruimtelijke gegevens in te winnen en te vergelijken met een voor dit gebied opgezet XBeach-model. Figuur 2.1 toont het studiegebied. In het originele studiegebied zijn metingen beschikbaar in hoge temporele en ruimtelijke resolutie vanaf 2013 (Ruessink, 2019). In 2020 is het studiegebied uitgebreid met het interessegebied van Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK). In 2021 werd de samenwerking met UU en HHNK voortgezet en is samenwerking gestart met het nationale programma BOI ('Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium') op basis waarvan nieuwe standaard instellingen voor XBeach werden afgeleid en rekentijden werden geoptimaliseerd.



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 Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK).

2.2 Beoogde en uitgevoerde activiteiten

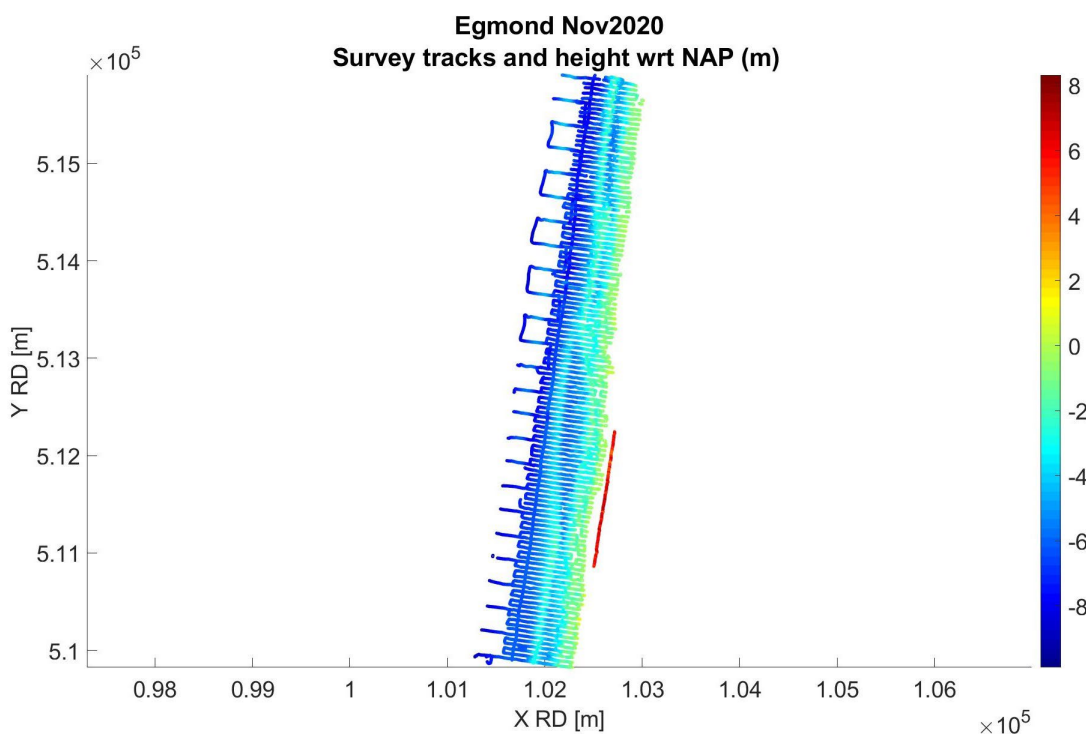
2.2.1 Studiegebied Egmond aan Zee

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 kunnen de 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 (MSL), verandert het in een steile helling (1: 2.5) van het voorduin. Op 14 tot 17 m + NAP, vertoont het profiel een abrupte verandering in helling en gaat verder naar de top van het voorduin op een hoogte van 20 tot 25 m +NAP. 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 embryoduinen zich ontwikkelen aan de teen van het voorduin. Het goed gesorteerde zand (weinig variatie in korrelgrootte) heeft een gemiddelde korrelgrootte van 250 - 300 μm , met een neiging om in de landwaartse richting af te nemen.

2.2.2 Metingen

Voorafgaand aan het stormseizoen 2020/2021 is op 15, 16, 17 oktober 2020 het strand en de duinen bij Egmond aan Zee ingemeten met mobile terrestrial laser scanning (MLS) en op 19 oktober 2020 de bathymetrie van de vooroever met RTK-GPS gecombineerd met een single beam echosounder gemonteerd op een jetski. De metingen zijn beschreven door Shore Monitoring (2020). Figuur 2.2 toont de bodemligging langs de survey tracks. Figuur 2.3 toont een detail van de puntenwolk gemeten door middel van MLS. Deze metingen voorafgaand aan het stormseizoen noemen we een pre-storm survey. Ook zijn vijf golfhoogtemeters op het strand geplaatst met voldoende batterijen om het gehele stormseizoen 2020/2021 te meten.



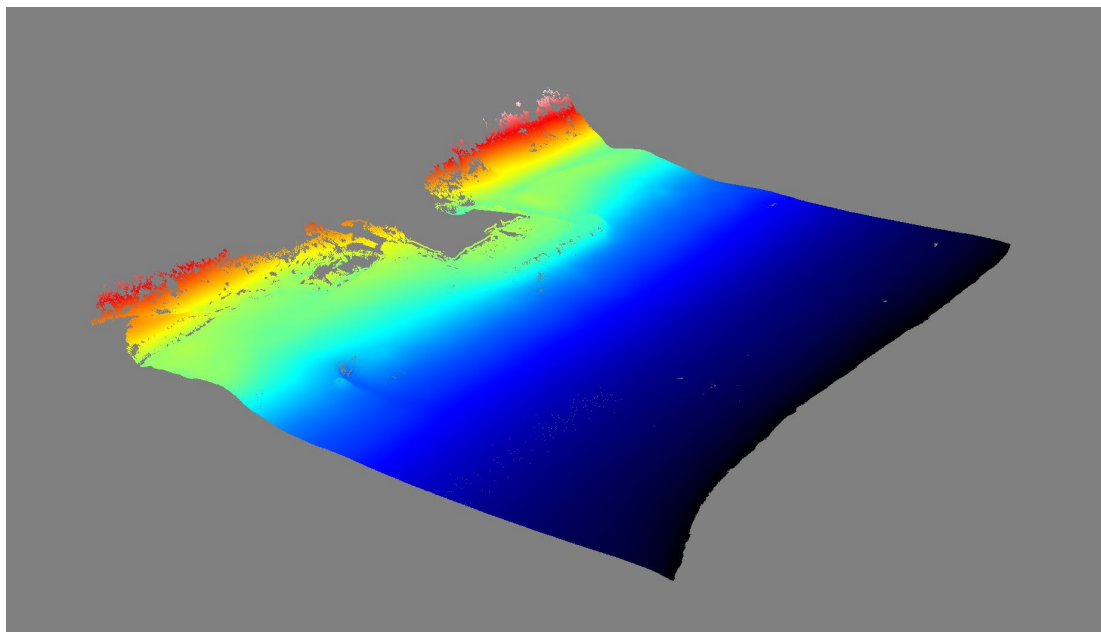
Figuur 2.2 Bodemligging langs survey paden in oktober 2020

Gedurende het stormseizoen 2020/2021 zijn de omstandigheden nauwlettend gevolgd om te zien of er zich een storm zou voordoen volgens de criteria zoals beschreven in het QRF protocol¹. Het belangrijkste criterium is de waterstand IJmuiden Buitenhaven die boven de NAP 1.80 m uit moet komen om in actie te komen. Hoewel er zich gedurende het stormseizoen

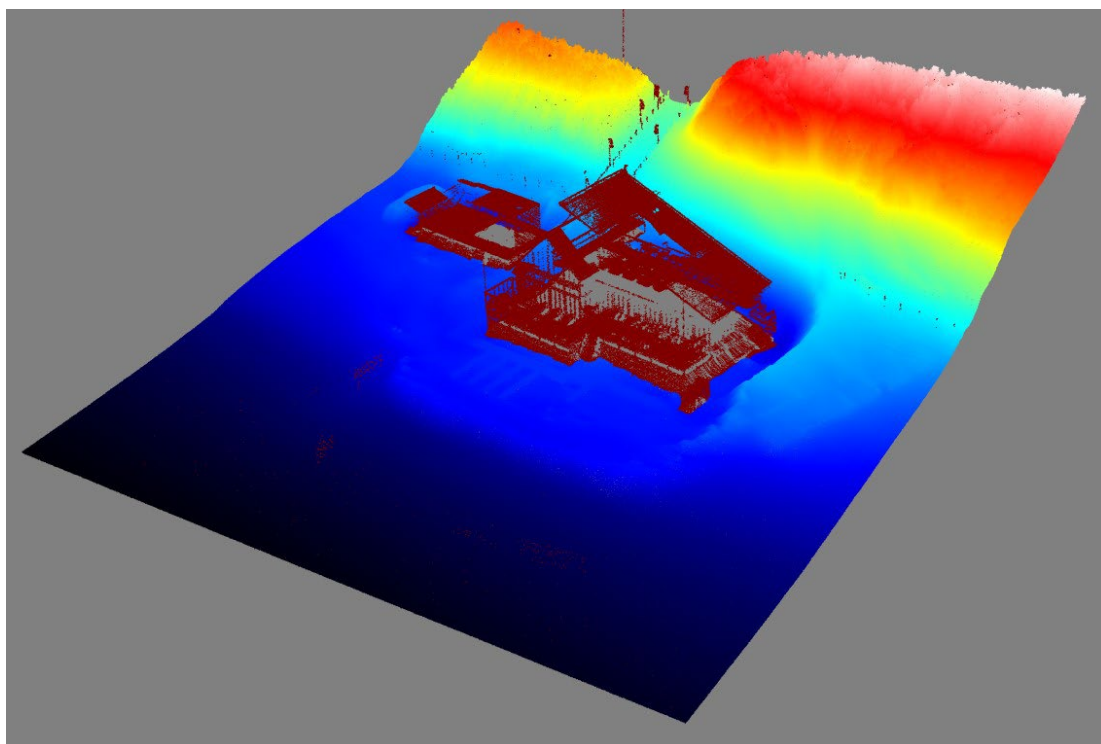
¹ Het QRF protocol is te vinden op de Quick Reaction Force website: <https://publicwiki.deltares.nl/display/QRF>

2020/2021 regelmatig stormachtige periodes hebben voorgedaan, was er geen storm die voldeed aan de QRF-criteria.

Figuur 2.4).



Figuur 2.3 Detail puntenwolk gemeten door middel van Mobile Terrestrial Laser Scanning in oktober 2020



Figuur 2.4 Detail puntenwolk gemeten door middel van Mobile Terrestrial Laser Scanning in maart 2021. Bruin zijn de verwijderde objecten (strandtenten, mensen, paaltjes).

duinvoet werd hier ongeveer 4 m (verticaal gemeten) afgegraven.



Figuur 2.5 Afgraven duinvoet t.b.v. plaatsing strandbebouwing.

Alle QRF-metingen bij Egmond aan Zee, inclusief de offshore golfddata en waterstanden, zijn opgenomen in de QRF database². Ruessink et al. (2019) beschrijft de meerjarige dataset van de topografie van strand en voorduin en externe forceringen voor deze locatie.

² QRF database: <http://repos.deltares.nl/repos/QuickReactionForce>, zie ook <https://publicwiki.deltares.nl/display/QRF/Quick+Reaction+Force+Home>

2.2.3 XBeach-model

In 2020 is een XBeach model (versie XBeachX release³) 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. Voor de initiële bodem in het model is de topografische LiDAR bodemmeting van het strand en duinen op 7 januari 2019 samengevoegd met de (meest recente) bodemhoogtemeting van de vooroever in november 2018.

De hydraulische randvoorwaarden die zijn toegepast in de berekeningen zijn afkomstig uit de MATROOS database (<http://noos.matroos.rws.nl/>), en zijn gebaseerd op de observaties in de IJ-geul op een diepte van 20 m. De berekeningen zijn uitgevoerd voor een periode van 36 uur van 8 januari 2019 00:00 tot 9 januari 2019 12:00uur. Gedurende deze periode was er een maximale waterstand van 2.1 m t.o.v. NAP, golfperiode (T_p) van 14.5 s en golfhoogte (H_{m0}) van 5 m. De gemiddelde golfrichting varieert van 270 tot 340 graden t.o.v. Noord.

In 2021 is er verder gewerkt aan het verbeteren en optimaliseren van het Egmond XBeach model. Voor de modelinstellingen voor hydrodynamische en morfologische processen werden voorheen de WTI instellingen (Deltares, 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 (concept)) en optimalisatie van rekentijden (Deltares, 2021d). De (voorlopige) nieuwe instellingen zijn getest in combinatie met een volgens BOI richtlijnen opgezet rekenrooster. Bovendien wordt met het oog op het operationeel draaien van het model gekeken of de rekentijd ingekort kan worden. Hiervoor worden zowel optimalisaties van het 2D rekenrooster in overweging genomen als een 1D aanpak. De modelresultaten worden gevalideerd met de topografische LiDAR bodemmeting van het strand en duinen op 10 januari 2019. Ook zijn er metingen van waterstanden en golfhoogten beschikbaar om de hydrodynamica in het model te valideren.

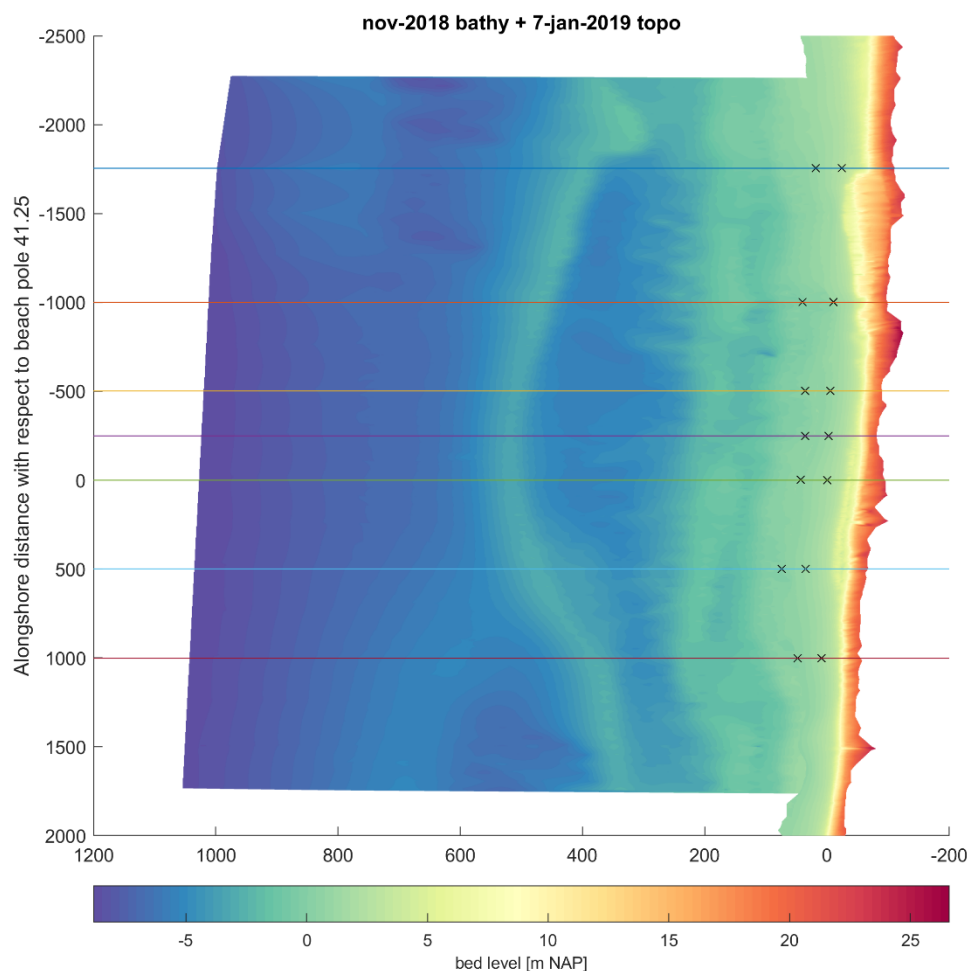
2.3 Voorbeeldresultaten

2.3.1 Inleiding

Met de zogenaamde WTI-instellingen werden de lange golven door het XBeach-model onderschat. In 2021 het XBeach model voor Egmond daarom verbeterd, in samenwerking met het Interreg BwN-project en het nationale programma BOI Zandige Keringen.

Om te beoordelen of de nieuwe XBeach-settings een verbetering opleveren voor Egmond, wordt gekeken naar gemeten en berekende golfhoogtes voor verschillende locaties op het strand. Verder vergelijken we gemeten en berekende bodemhoogteveranderingen in zeven kustdwarse raaien. Figuur 2.6 toont de pre-storm bathymetrie en topografie van het studiegebied, waarin de raaien zijn aangegeven met de horizontale lijnen. De druksensoren worden aangegeven door de kruisjes 'x'.

³ XBeach wiki: <https://publicwiki.deltares.nl/display/XBEACH/XBeach>

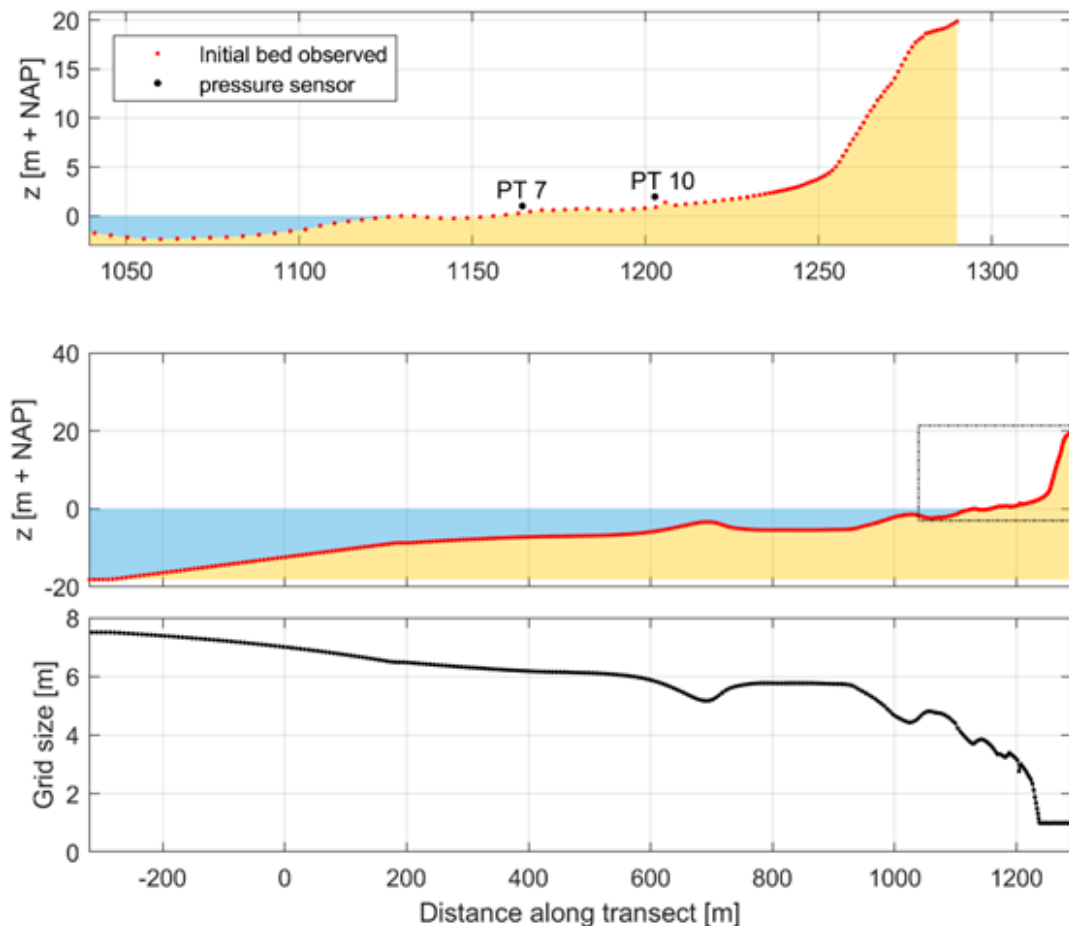


Figuur 2.6 Pre-storm Bathymetry (2018) en Topografie (2019) van het studiegebied met 7 geselecteerde raaien, die het dichtst liggen bij de druksensoren (weergegeven met 'x'). De y-locatie in het lokale assenstelsel zal gebruikt worden om te refereren naar de verschillende raaien.

2.3.2 Opzet XBeach-model

In deze studie is gebruik gemaakt van een voorlopige XBeach versie (version 1.23, officiële release pas in December 2021) in surfbeat-modus om de invloed van de bathymetrie op de hydrodynamica, het zandtransport en de resulterende duinerosie tijdens een enkele storm te onderzoeken. De topografie en bathymetrie zijn verwerkt en samengesteld door overlappende gegevenspunten te matchen en op het rekenrooster te interpoleren. De kustlangse gradiënt van de laterale randen is op nul gezet, terwijl de offshore-grens een zwak reflecterende rand vormt die alleen schuin invallende en schuin gereflecteerde golven doorlaat. Het model maakt gebruik van cyclische randvoorwaarden op de laterale begrenzingen van het raster (x-as) dat werkt alsof de twee grensgebieden fysiek met elkaar zijn verbonden om het ontstaan van schaduwzones te voorkomen.

Naar aanleiding van de bevindingen in Deltares (2021d) is de bathymetrie kunstmatig verdiept tot ongeveer 25 meter diepte. Bovendien is op basis van de aanbevelingen uit datzelfde rapport het grid in eerste instantie verfijnd ten opzichte van het model uit 2020. Als onderdeel van deze studie is onderzocht of deze verfijning van het rekenrooster (die gepaard gaat met een langere rekentijd) ook noodzakelijk geacht wordt. In Figuur 2.7 is te zien dat de gridgrootte in kustdwarse richting varieert van 7,5 m (offshore) tot 1 m bij de kust.



Figuur 2.7 Overzicht van de initiële bodem voor profiel $y=0$ in kustwarse richting (middelste paneel), waarin de rode punten de bodem per gridcel representeren, en in het onderste paneel een overzicht van de grid-grootte in kustwarse richting. In het bovenste paneel is de locatie van de druksensoren in deze raai weergegeven.

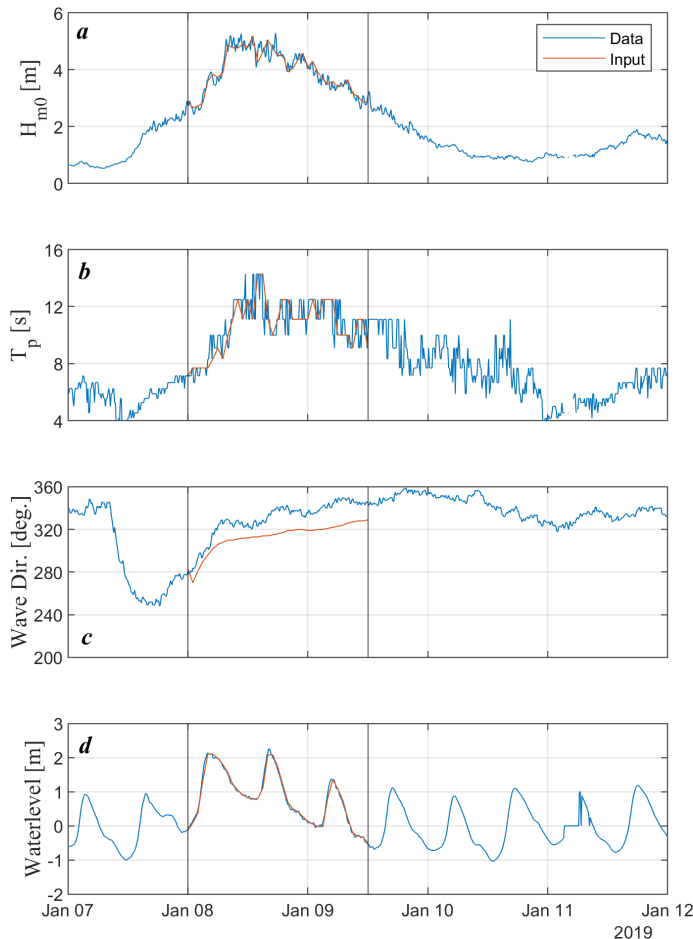
Tenslotte is gebruik gemaakt van de voorlopige (morfologische parameters herzien in December 2021) BOI-instellingen. De BOI-instellingen zijn net als de WTI-instellingen gekalibreerd op verschillende studielocaties in Nederland en gootexperimenten. Het Egmond model is niet gekalibreerd voor deze studie. In Tabel 2-1 zijn de belangrijkste verschillen tussen de WTI- en BOI-instellingen weergegeven. Voor meer informatie wordt verwezen naar Deltares/Arcadis (2021, concept).

Tabel 2-1 Overzicht van de belangrijkste verschillen tussen de WTI-parameters en de BOI-parameters.

Parameter	WTI-instellingen	BOI-instellingen
Golfbrekkingsmodel	Roelvink2	Roelvink_daly
Gamma	0,541	0,46
Gamax(WTI) /Gamma2(BOI)	2,364	0,34
Alpha	1,262	1,38
Wetslp	0,26	0,18
facAs	0,123	0,25
facSk	0,475	0,15
beta	0,138	0,08
bedfriction	Cf	Manning
Bedfriccoef	0,001	0,02
tidetype	velocity	hybrid

2.3.3 Stormcondities

Figuur 2.8 toont de golfgegevens en waterstanden zoals gebruikt als invoer voor het XBeach model. De storm vond plaats van 7 januari tot 10 januari 2019, de offshore significante golfhoogte (H_s) piekte net onder de 6 in de nacht van 8 op 9 januari en was constant boven de 2 m. De offshore piekperiode (T_p) volgde een soortgelijk patroon als de H_s en bereikte tijdens de piek van de storm periodes van 15 s. De golven vielen schuin in vanuit het westzuidwesten in het begin van de storm en de richting veranderde naar het noordwesten voor de rest van de storm. De waterstand op een diepte van NAP-20 m bereikte waarden van meer dan NAP+2 m, wat ruwweg een stormopzet van 1 m impliceert. Bijna de hele storm stond de waterstand ruim boven NAP+0 m.



Figuur 2.8 De golfgegevens en waterstanden zoals gebruikt als invoer voor het XBeach model. Het gesimuleerde deel van de storm wordt aangegeven door de verticale zwarte lijnen.

De golfcondities van de basisrun worden gecreëerd op basis van het JONSWAP-spectrum dat is gemaakt met behulp van de waarnemingen. Om dezelfde golfconditie voor elk van de verschillende runs te forceren, wordt het golfspectrum van de basisrun hergebruikt in de daaropvolgende simulaties. Voor de simulaties waarin een morfologische acceleratie actor wordt toegepast is dit niet mogelijk.

2.3.4 Simulaties

De simulaties uitgevoerd binnen deze studie zijn op te delen in drie delen. Allereerst is er een vergelijking gemaakt tussen de resultaten met de WTI-instellingen (model van 2020) en de BOI-instellingen. Ten tweede is gekeken of dit model versneld kon worden met behulp van een morfac (van 2 en 4) en grid-optimalisatie (22 m offshore). Tot slot is ook gekeken of met een

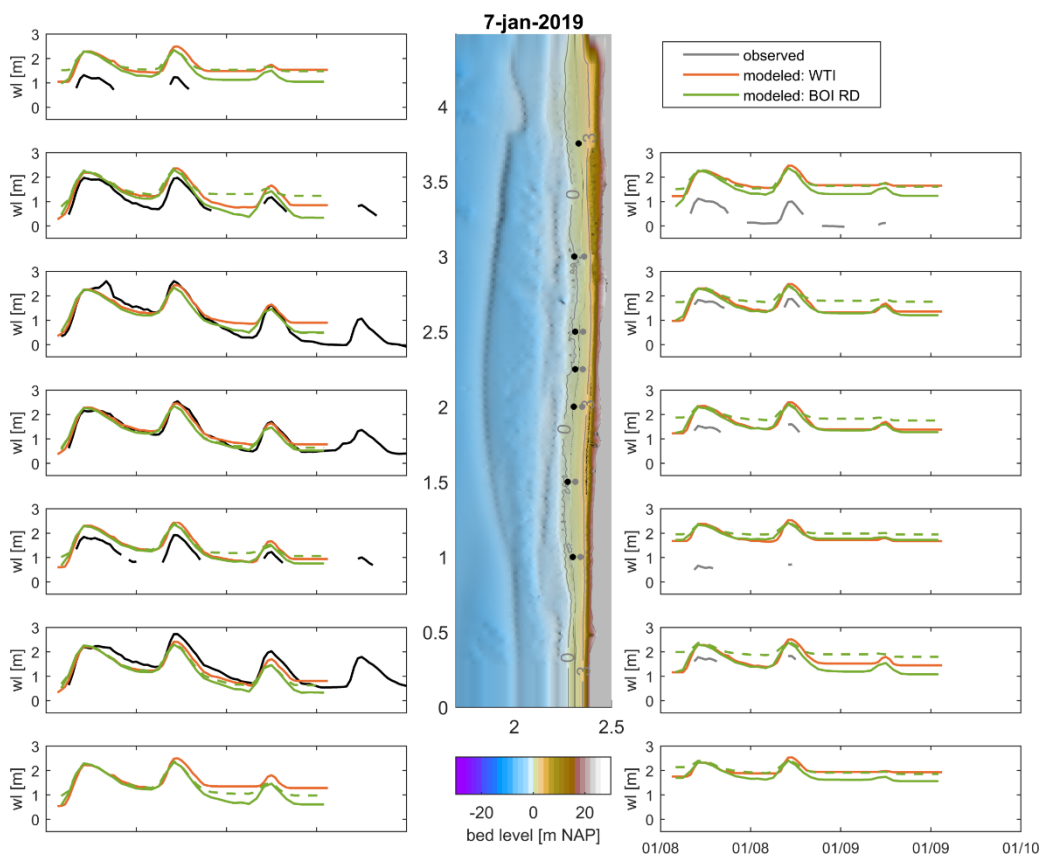
1D aanpak de hydrodynamica en morfodynamiek gereproduceerd kan worden. Dit is gedaan voor de zeven raaien, die dicht langs de druksensoren liggen, uit Figuur 2.6.

2.3.5 Resultaten

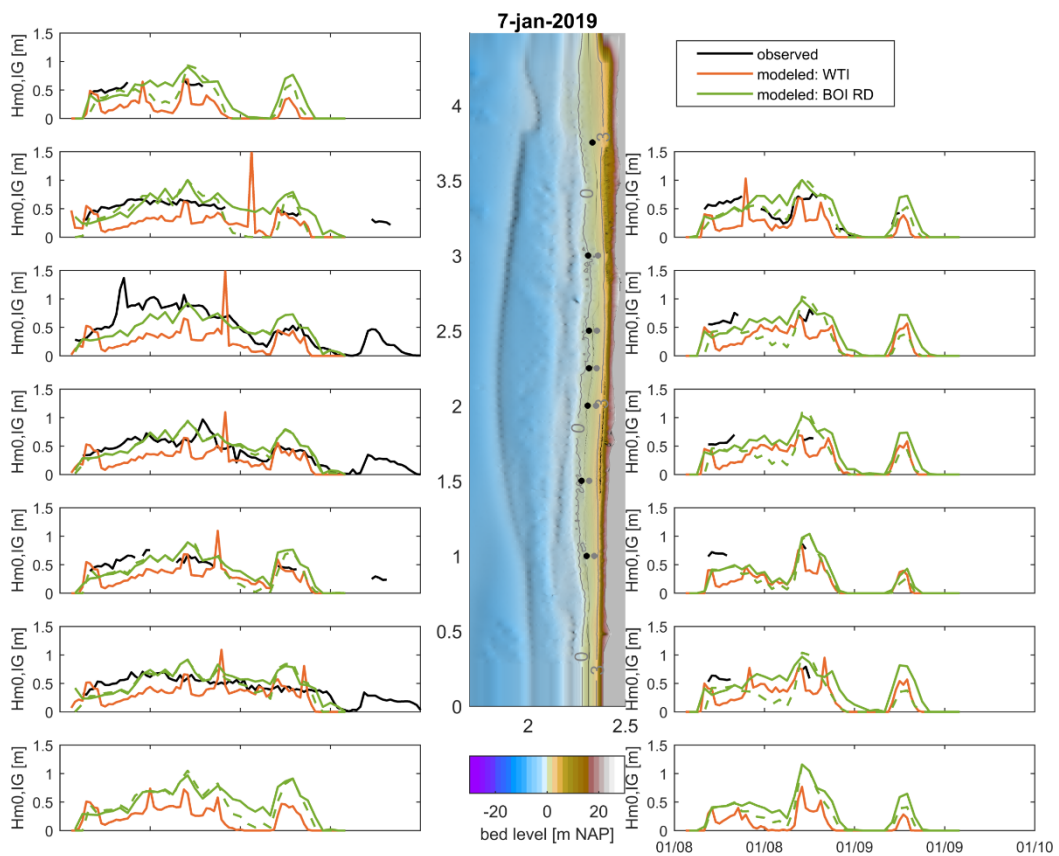
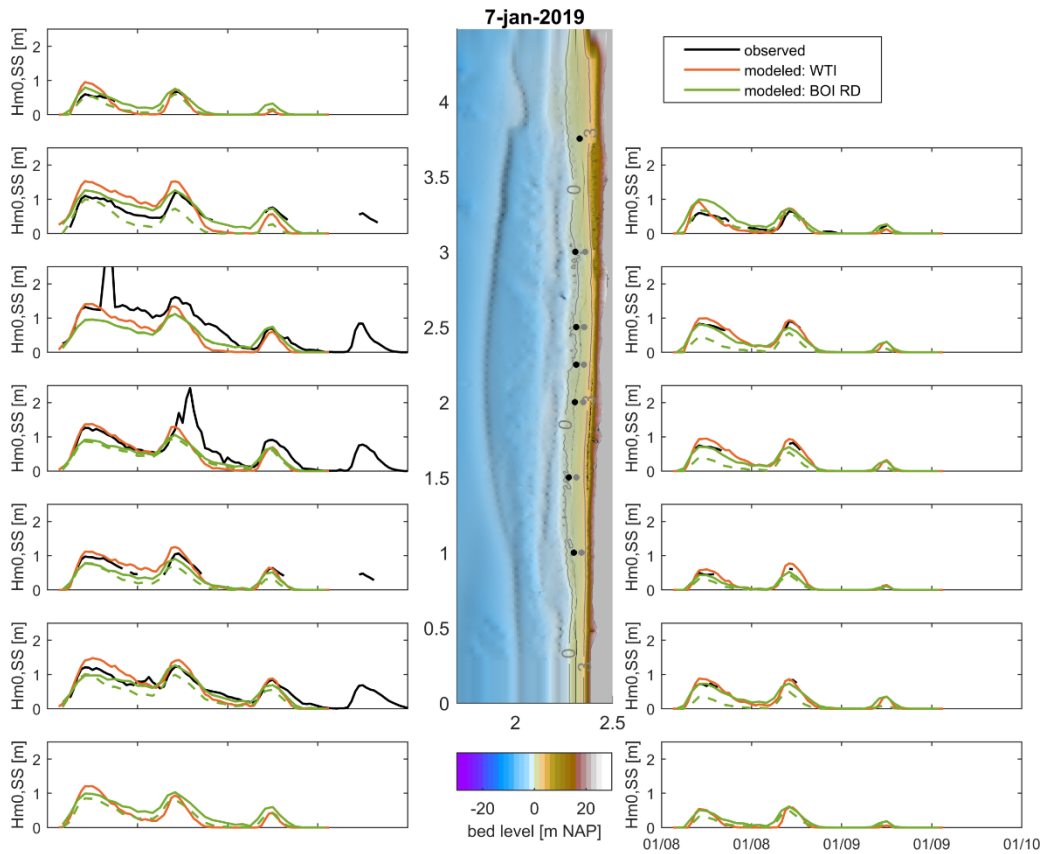
BOI-instellingen versus WTI-instellingen

In Figuur 2.9 tot Figuur 2.12 toont de vergelijking van de resultaten verkregen met de WTI-instellingen en met de BOI-instellingen, samen met de observaties. Voor de waterstanden in Figuur 2.9 zijn de verschillen in de modelresultaten klein, al zien we dat de hogere resolutie in het nieuwe model sommige laagwaters beter kunnen modelleren. Voor de korte golven (zie Figuur 2.10) zien we een wisselend resultaat, maar voor de meeste druksensoren worden de korte golven nog beter gerepresenteerd met de BOI-instellingen. De grootste verbetering is te zien voor de lange golfhoogtes (Figuur 2.11), deze worden niet langer onderschat voor de BOI-instellingen.

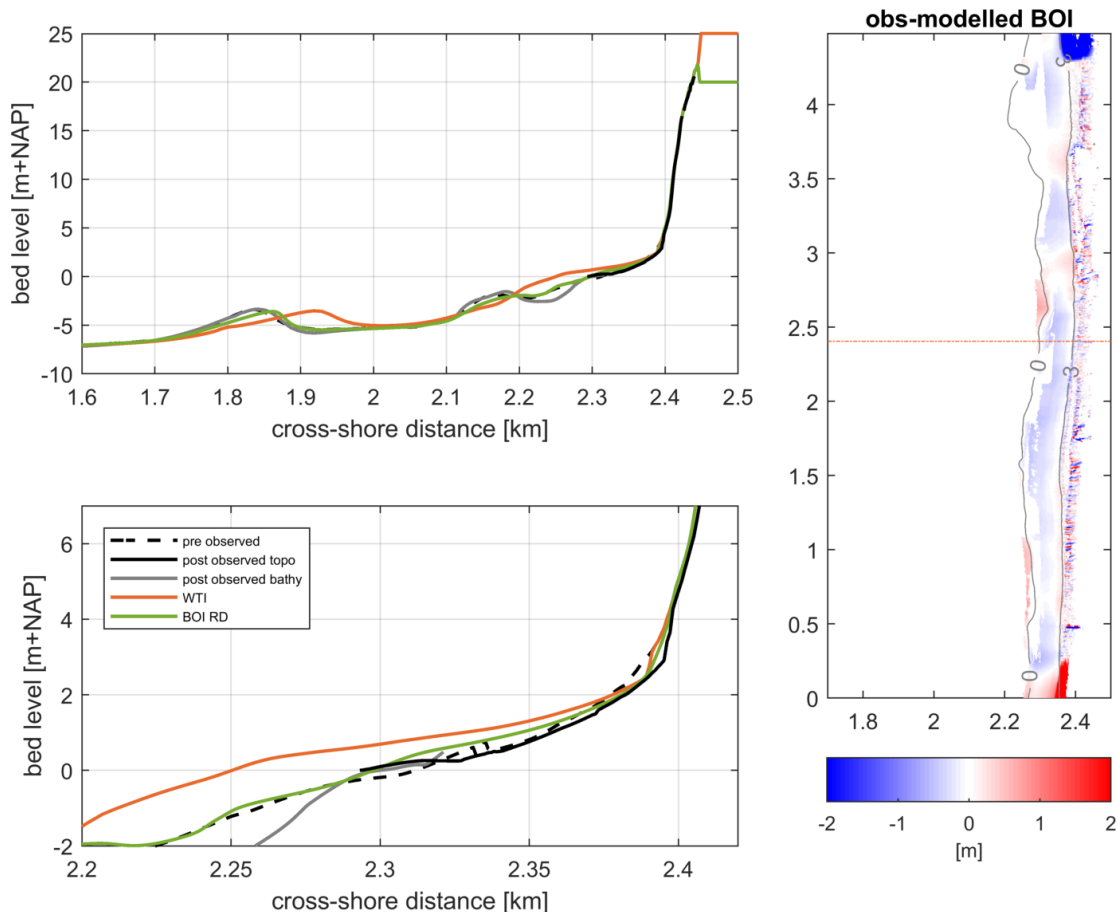
De morfologische resultaten zijn weergegeven in Figuur 2.12, en laten zien dat ook de morfologische prestaties beter zijn geworden met de BOI-instellingen. Er is meer erosie van het strand, en ook het vooroeverprofiel komt beter overeen met de observaties.



Figuur 2.9 Vergelijkingen van de waterstanden in de 13 drukstations met in oranje de resultaten van de WTI-instellingen en in groen de resultaten van de BOI-instellingen.

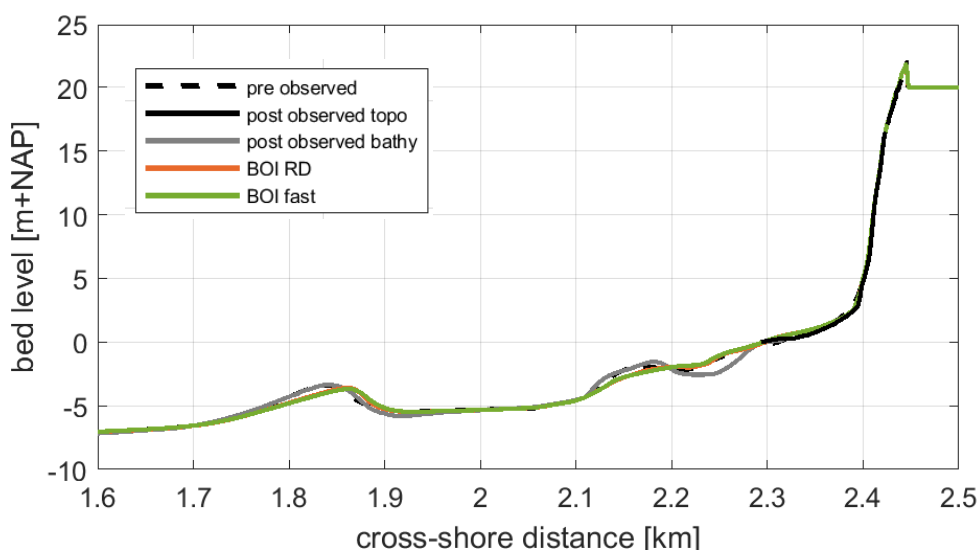


Figuur 2.11 Vergelijkingen van de lange golven in de 13 drukstations met in oranje de resultaten van de WTI-settings en in groen de resultaten van de BOI-settings.



Figuur 2.12 Morfologische ontwikkeling voor een van de dwarsprofielen met in oranje de resultaten met de WTI-settings, en in groen de resultaten met de BOI-settings.

Hoewel de gebruikte BOI-instellingen nog concept waarden bevatte, is al een duidelijke verbetering te zien van de modelresultaten in vergelijking met de observaties. Door middel van een morfocac en een grid optimalisatie kan in beide gevallen een versnelling van minstens een factor 3 bewerkstelligd worden zonder groot verlies in model-prestaties. Door de beide optimalisaties te combineren resulteert dit zelfs bijna in een factor 10. De modelresultaten zijn nog steeds goed te noemen (zie Figuur 2.13).



Figuur 2.13 Vergelijking voor de BOI resultaten en het BOI model met een geoptimaliseerd grid en een morfocac van 4 (groen).

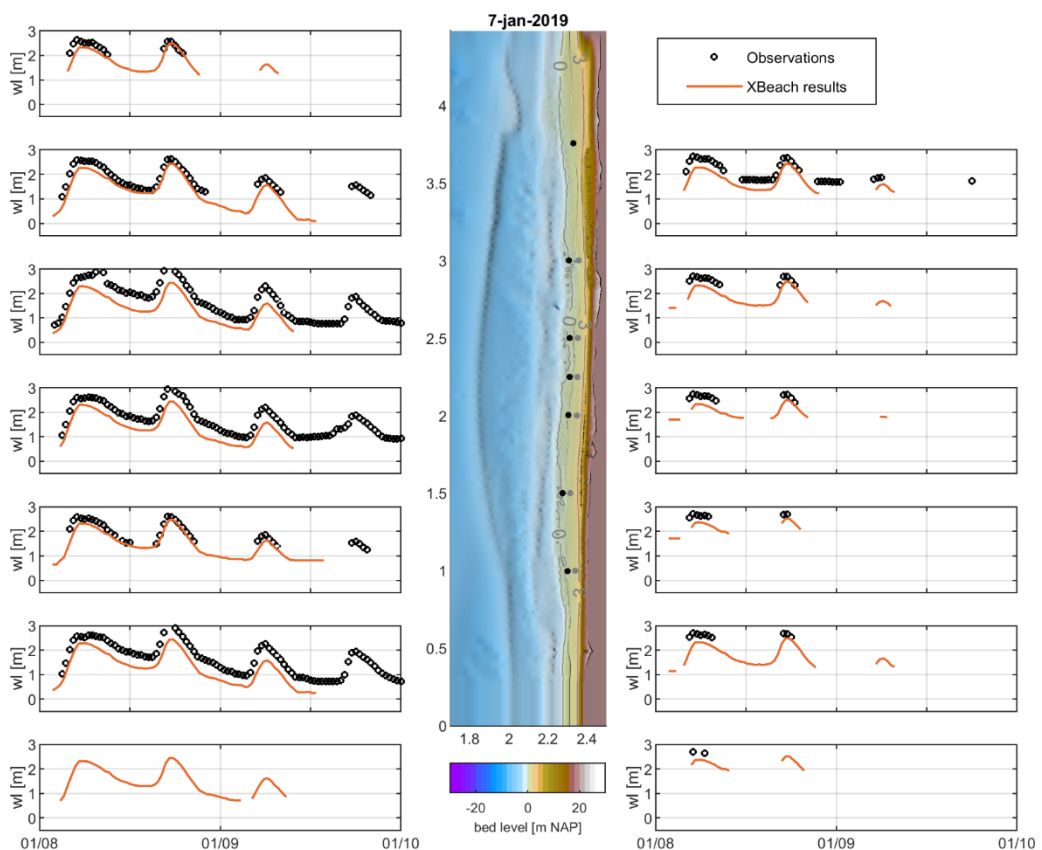
Resultaten met een 1D aanpak

Binnen het kader van het BOI-project zijn zeven 1D XBeach modellen opgezet volgens de BOI-richtlijnen (Deltares/Arcadis, 2021, concept). In Figuur 2.14, Figuur 2.15 en Figuur 2.16 zijn respectievelijk de gemodelleerde en geobserveerde waterstanden, korte golven en lange golven vergeleken. Wat opvalt is dat met de 1D aanpak, gekenmerkt door een veel kortere rekentijd, de hydrodynamica eveneens goed wordt gereproduceerd door het XBeach model.

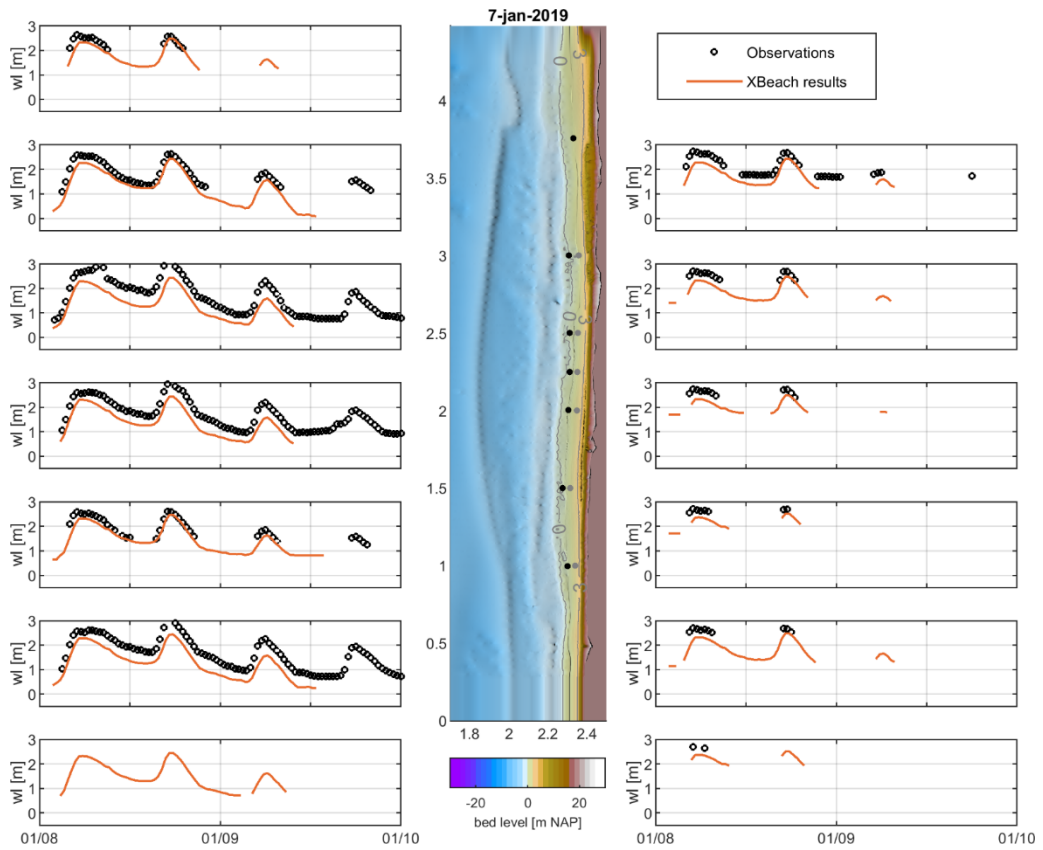
Zoals te zien in Tabel 2-2 resulteert de 1D aanpak in een overschatting van de erosievolumes. Een deel van deze overschatting valt binnen de onzekerheid van het model, aangezien het voor de meeste raaien in absolute getallen om minder dan 5 m³ gaat. Omdat de absolute verschillen klein zijn, resulteert dit in een grote relatieve verschillen.

Tabel 2-2 Overzicht van de gemodelleerde en geobserveerde erosie volumes voor de zeven verschillende raaien voor de kust van Egmond.

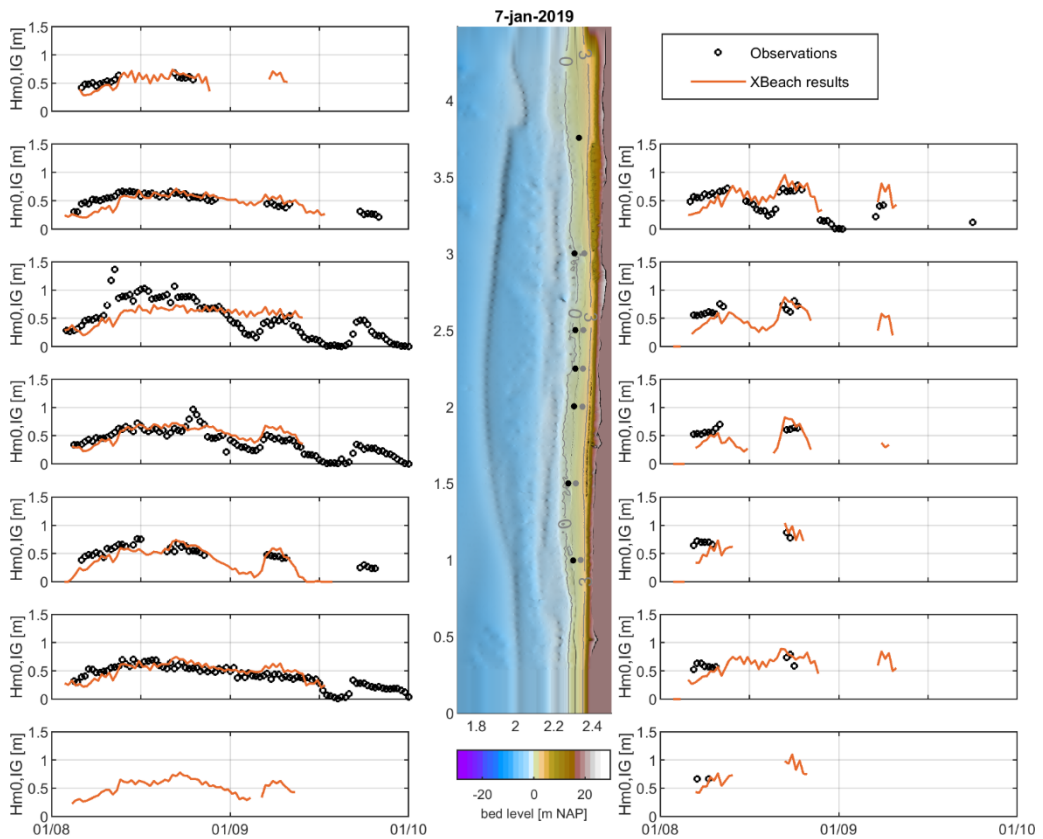
Profile nr.	Erosie volume			
	XBeach [m ³]	Observatie [m ³]	Vershil [m ³]	Vershil [%]
-1755	7	0	6.9	27233%
-1001	13	1	11.6	836%
-502	8	6	1.3	22%
-249	8	8	-0.1	-1%
0	5	4	0.9	24%
499	7	4	3.1	79%
1001	8	6	2.5	43%
Gemiddeld	8	4	3.8	4034%



Figuur 2.14 Vergelijking van geobserveerde (zwarte bolletjes) en gemodelleerde waterstanden met 1D XBeach modellen.



Figuur 2.15 Vergelijking van geobserveerde (zwarte bolletjes) en gemodelleerde korte golven met 1D XBeach modellen.



Figuur 2.16 Vergelijking van geobserveerde (zwarte bolletjes) en gemodelleerde lange golven met 1D XBeach modellen.

2.4 Aanbevelingen voor QRF-kust in 2022

Samen met Universiteit Utrecht (UU) worden door QRF in Noord-Holland op het strand en in de duinen bodemhoogtemetingen en golfhoogtemetingen uitgevoerd. 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 uit het stormseizoen 2018-2019 is door QRF en UU 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 WTI ('Wettelijk Toets Instrumentarium') basisinstellingen.

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 navolging op het afgelopen stormseizoen wil QRF aanvullend op de stormmetingen door UU tenminste twee keer per jaar metingen uitvoeren van de bodemhoogte van de ondiepe vooroever en van strand en duinen. De metingen worden hierbij in samenwerking met Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier uitgebreid. Het interessegebied ligt kustlangs tussen RSP 37.000 en 43.000 (dus 6 km) en kustdwars tussen de duinvoet en 1 km zeewaarts van de duinvoet.

Doel van het QRF-werk bij Egmond aan Zee is om de metingen zoals vanaf 2013 ingewonnen door de UU samen met Hoogheemraadschap Holland Noorderkwartier en met het KPP-project WK02 - Beoordelings- en Ontwerp Instrumentarium (BOI) voor Primaire Waterkeringen te bestendigen en toe te passen.

Doel voor het stormseizoen 2022 is om het model operationeel toe te passen voor stormscenario's. Wanneer er een storm wordt verwacht dan kunnen de synthetische basisrandvoorwaarden snel worden aangepast aan de karakteristieken van de betreffende verwachte storm. Op basis van enkele simulaties kan voorafgaand aan de storm een inschatting worden gemaakt van de verwachte strand- en duinerosie.

Door QRF wordt de volgende inzet voorgesteld:

- Verbeteren XBeach-model Egmond aan Zee. Meer specifiek:
 - Op enkele meetlocaties wijken de gemeten waterstanden iets af ten opzichte van het gemiddelde op de andere locaties, of vertonen de gemeten korte golfhoogtes onverklaarbare pieken. Dit wordt mogelijk veroorzaakt door een meetfout of een fout in de verwerkingen van de metingen. We bevelen aan om de metingen zorgvuldig na te lopen en op deze onvolkomenheden te controleren.
 - De concept BOI instellingen zijn reeds veelbelovend. In de tussentijd zijn er een aantal, met name morfologische, parameters aangepast. Daarom lijkt het ons goed om te kijken of dit ook de modelresultaten positief beïnvloed wanneer we die aanpassingen meenemen.
 - Aanbevolen wordt het XBeach-model te valideren op de storm in 2020 of een potentiële storm in 2022.
 - Er is een begin gemaakt met uitbreiding van het XBeach model met het noordelijker gelegen interessegebied van HHNK. Het is de aanbeveling om

een vergelijking te maken tussen de resultaten voor het noordelijke deel en het zuidelijke deel. Het noordelijke deel is namelijk beïnvloed door vooroeversuppleties terwijl het zuidelijk deel niet verstoord is door uitgevoerde suppleties. Ook staan er strandpaviljoens in het noordelijke deel.

- Meting bathymetrie ondiepe vooroever Egmond (twee keer) in samenwerking met Shore Monitoring en toelevering aan UU en HHNK

Deltares blijft in QRF samenwerken met de UU door:

- uniformeren van dataopslag
- delen van data
- gezamenlijke stormeffectrapportage Egmond aan Zee

3 Activiteiten, voorbeeldresultaten en aanbevelingen QRF rivieren

3.1 Beoogde en uitgevoerde activiteiten

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. WBI). Echter, er zijn voor rivieren geen of nauwelijks golf- 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 golfvoorspellingen 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 golfvoorspellingen?

De QRF-rivieren zal bijdragen aan het beantwoorden van een deel van deze onderzoeksvragen. Het korte termijn doel van de QRF is als volgt gedefinieerd:

- Methodes ontwikkelen om golven en stroming op rivieren kwalitatief en kwantitatief te meten, zodat deze ingezet kunnen worden voor rivier toepassingen;
- Een draaiboek ontwikkelen wat te doen wanneer een interessante storm optreedt.

Er zijn verschillende metingen uitgevoerd in 2018, zowel op de Waal en de Westerschelde. Dit waren video opnamen, foto's en C-drone metingen. Daarnaast zijn tijdens de storm Ciara in februari 2020 foto's en video opnamen van waterschappen verzameld via Rijkswaterstaat en zijn webcam camera beelden bij Varik opgeslagen.

In 2019 zijn de videobeelden uit 2018 kwalitatief geanalyseerd en vergeleken met beschikbare resultaten uit golf- en stromingsmodellen (Deltares, 2019). Daarnaast zijn de C-drone metingen verder geanalyseerd door Rijkswaterstaat (Sieben, 2019). En in 2020 zijn een aantal videobeelden uit 2018 en 2020 kwantitatief geanalyseerd met behulp van de Coastal Community Drone Laboratory methode (afgekort COCOS, PhD onderzoek Matthijs Gawehn TuDelft, Gawehn et al. 2019, 2020, 2021). De resultaten hiervan zijn beschreven in Deltares (2021a).

Voor 2021 waren de volgende activiteiten voorzien:

1. Meten tijdens hoogwater
Naast de validatie van de meettechnieken wordt een Quickscan voorbereid om voor een hoogwater snel in te kunnen schatten wat de golf- en stromingscondities volgens de modellen Bretschneider en WAQUA zullen zijn en daarmee makkelijk interessante monitoringslocaties uit te kunnen kiezen.
2. Validatie analysetechnieken
De videoanalyse van Deltares (2021a) is aan de hand van modelresultaten geverifieerd. Echter, een validatie op basis van metingen ontbreekt, omdat er op de locaties waar de videobeelden beschikbaar zijn geen/of nauwelijks stromings- of golfmetingen beschikbaar zijn. Om deze reden is voor 2021 een validatieprogramma gepland. Er wordt gekeken naar de mogelijkheden om de analyse uit de dronemetingen te vergelijken met golf- en stromingsmetingen.

3.2 Voorbeeldresultaten

3.2.1 Stappenplan QRF rivieren en Quickscan rivieren

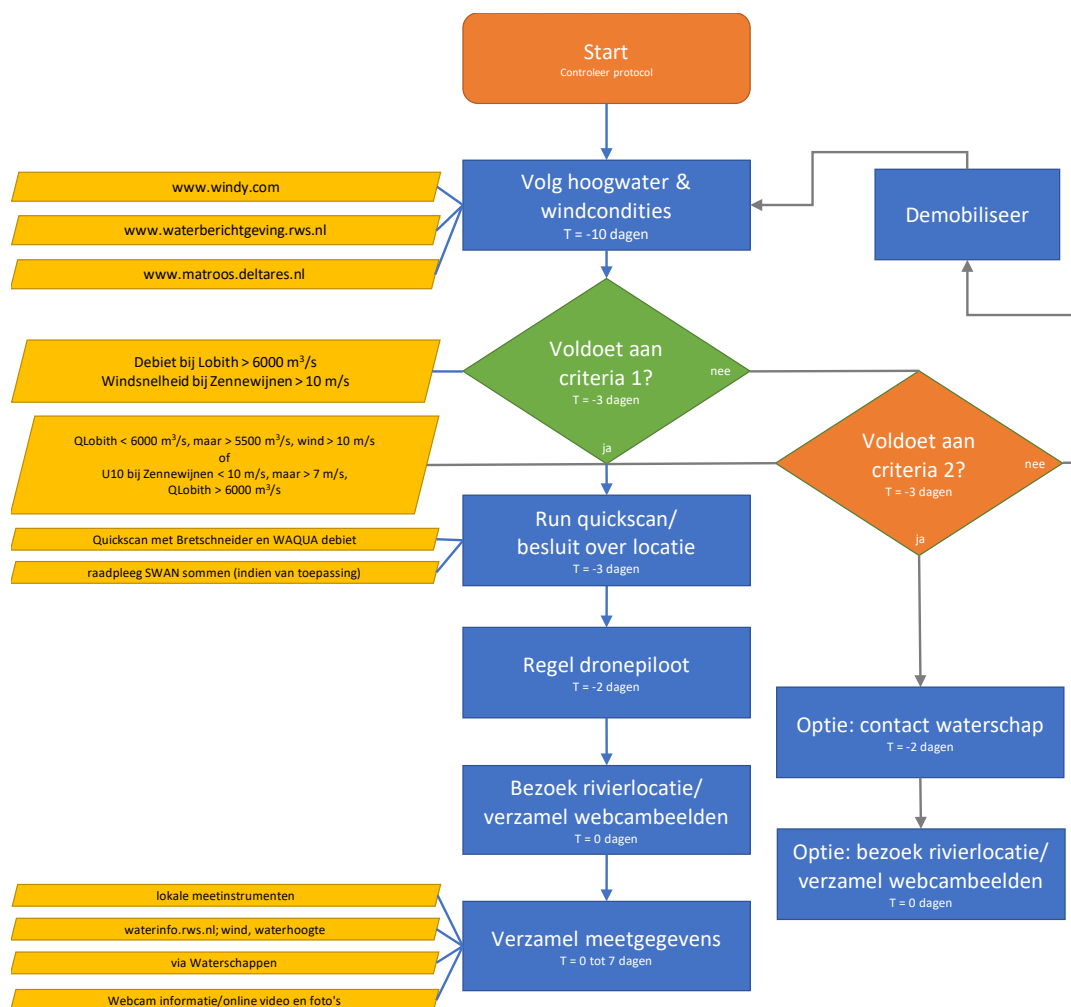
In 2019 is een draaiboek opgesteld dat in 2020 is aangevuld met de inzichten uit de video en drone analyses. Het draaiboek heeft als doel om een stappenplan te geven wanneer we QRF-metingen willen verrichten van golf-stroominteractie. Dit om bij te dragen aan de doelstellingen van Pilot 1 en 2 (Deltares, 2017)⁴.

Het draaiboek beschrijft de volgende aspecten:

- Welke gebieden; bijvoorbeeld op de Waal het traject Tiel-Waardenburg, de Westerschelde of Eemshaven-Delfzijl.
- Wanneer; windsnelheden, golfrichtingen, afvoer, meteo.
- Wat en hoe monitoren, meetmethodes en relevante info.
- Analyse, benodigde gegevens en modellen.

De aanvullingen in het stappenplan van 2021 zijn voornamelijk van toepassing op wanneer er gemonitord wordt en op welke monitoringslocaties.

Wanneer er gemonitord wordt op de rivieren wordt besloten met onderstaande stroomschema.



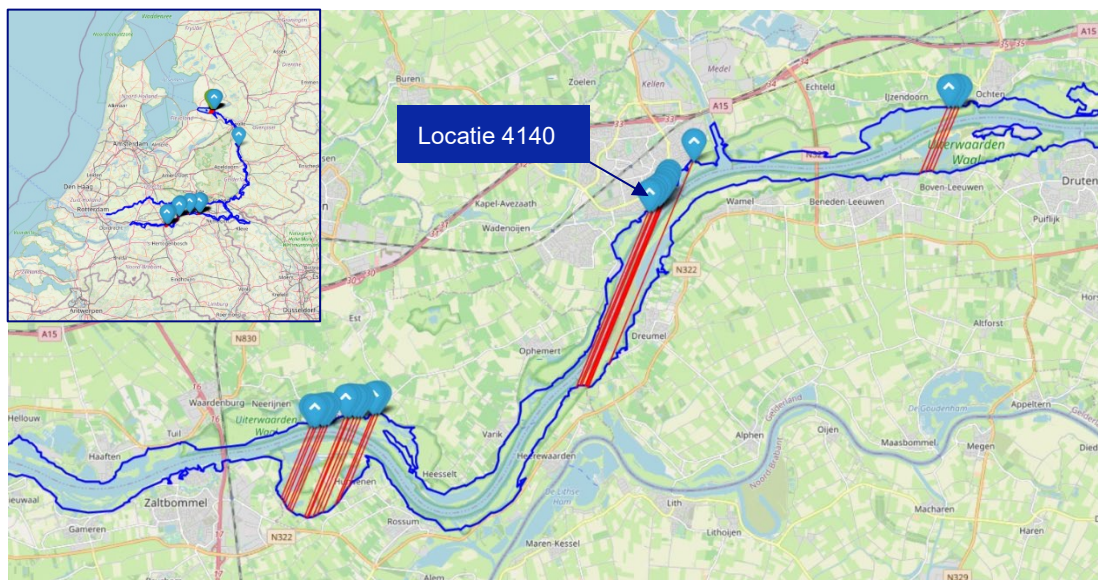
⁴ Pilot 1: "eerste scan golven" gericht op een kwalitatieve bepaling van ruimtelijke patronen in golfhoogten. Pilot 2: Modelverificatie en testen van data-inwintechnieken op een alternatieve testlocatie.

Wanneer aan criteria 1 wordt voldaan is het doel van de QRF om hoge resolutie beelden te verzamelen om kwalitatief en kwantitatief te vergelijken met de modelresultaten van Bretschneider en SWAN. Een afvoer van meer dan 6000 m³/s heeft een herhalingsstijd van 2 jaar. Daarnaast valt een afvoer van meer dan 6000 m³/s niet altijd samen met een windsnelheid van meer dan 10 m/s. De verwachting is daarom dat criteria 1 niet elk jaar worden gehaald.

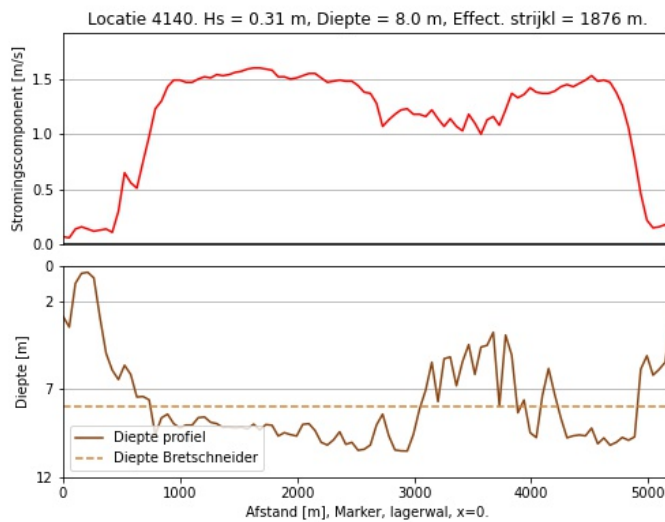
Wanneer aan criteria 2 wordt voldaan is het doel van de QRF om beelden te verzamelen van golf-stroominteractie om een kwalitatief beeld te krijgen van de omstandigheden op de rivieren en om ervaring op te doen. De verwachting is dat criteria 2 elk jaar gehaald wordt. Vervolgens kan actie worden ondernomen via een bezoek aan rivierlocaties en/of via contact waterschappen.

Om snel een locatie uit te kunnen kiezen voor het monitoren tijdens hoogwater is gewerkt aan een 'Quickscan'. Met de Quickscan kan voor een event van hoogwater en harde wind ingeschat worden welke gebieden, naast Tiel-Waardenburg, interessant kunnen zijn wanneer aan de criteria (hoogwater > 5500 m³/s en windsnelheid > 7 m/s) wordt voldaan. Op basis van de verwachte windsnelheid en windrichting en het debiet bij Lobith kan met één druk op de knop een inschatting gemaakt worden van de met Bretschneider verwachte golfhoogte op verschillende locaties langs de dijk. Figuur 3.1 toont een voorbeeld van de Quickscan voor een debiet van 6000 m³/s, een windrichting van 202.5 °N en een windsnelheid van 10 m/s. Om rekening te houden met gebieden die bij 6000 m³/s nog niet onderwater staan, is de rivieromtrek aangepast. In de figuur worden alleen de locaties getoond waar de golfhoogte groter of gelijk is aan 0.3 m.

Ook wordt een overzicht gegeven van de stromingscomponent en de diepte over de strijklengte in de richting van de golfrichting, zie Figuur 3.2. Op deze manier kan ingeschat worden waar Bretschneider significante golven verwacht en waar golf-stroom interactie mogelijk tot verschillen kan leiden tussen de werkelijke golfhoogte/golfperiode en de met Bretschneider berekende golfhoogte/golfperiode. De 'Quickscan' maakt het zo makkelijker om te besluiten of er gemonitord gaat worden en om een geschikte locatie te kiezen. Daarnaast kan de Quickscan helpen in de communicatie met de dronepiloot en ter aansturing van collega's/ waterschappen voor het verzamelen van beelden/informatie. Tot slot is, door het diepte en stromingsprofiel te bekijken, een indruk te krijgen van de mogelijke limitaties van Bretschneider.



Figuur 3.1: Een voorbeeld van de Quickscan voor een debiet van 6000 m³/s, een windrichting van 202.5 °N en een windsnelheid van 10 m/s.



Figuur 3.2: Een voorbeeld van een locatie, waarbij de Quickscan een golfhoogte groter of gelijk aan 0.3 m verwacht. Via de kaart in Figuur 3.1 is de locatie aan te klikken (in dit geval locatie 4140).

Er wordt gestreefd om in ieder geval in het hoofdgebied beelden te maken wanneer aan de basis criteria wordt voldaan. Daarnaast wordt per event gekeken op welke andere locaties informatie ingezameld gaan worden (bijvoorbeeld foto's/veekrand- of kwalitatieve golfinformatie). De locatiekeuze hangt af van de condities (debiet, wind) en wat de Quickscan als interessante gebieden aanwijst. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van collega's van de QRF, geïnteresseerde collega's van Deltares/RWS en de rivierwaterschappen, die worden benaderd via email (hiervoor is een emaillijst beschikbaar). Er zijn standaard emails geschreven voor het mailen van collega's, waterschappen en dronepiloot. Een standaard bijlage voor deze mail is voorbereid met informatie over de meetlocaties en waar we naar op zoek zijn.

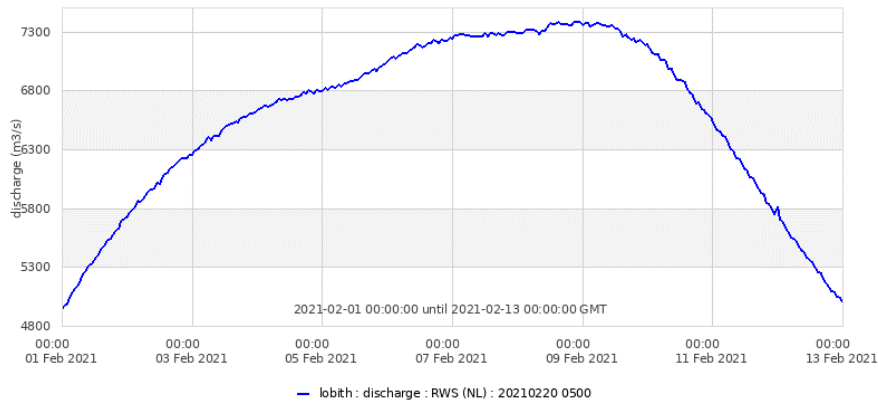
Het draaiboek is een werkdocument en zal na veldmetingen worden bijgewerkt om de meest recente inzichten te kunnen meenemen. De laatste versie staat beschreven in Deltares (2021b).

3.2.2 Metingen Hoogwater 2021

In 2021 is twee keer een hoogwater voorgekomen in de Rijntakken.

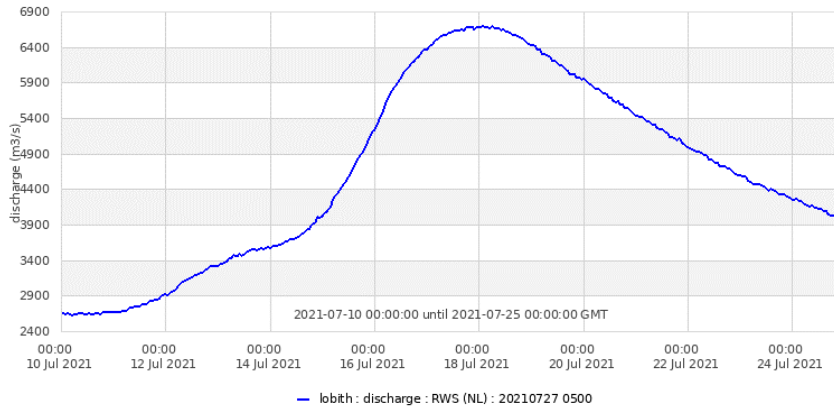
Van 1-12 februari 2021 is een hoogwater opgetreden met een maximum afvoer rond de 7300 m³/s, zie Figuur 3.3. Tijdens deze periode is de wind overdag niet hoger geweest dan 7 m/s (op zaterdag 7 februari) en kwam de wind uit een oostelijke windrichting. Met een strijklengte van maximaal 2 km was de golfhoogte dan ook niet veel meer dan 10-15 cm. Daarnaast speelde dat de wind- en stromingsrichting gelijk waren op veel delen van de rivier (meestroming). Dit had tot gevolg dat de golven 'uit elkaar' werden getrokken en de golfhoogte naar verwachting nog meer afnam dan wat voorspelt werd met Bretschneider.

Op zaterdag 7 februari zijn meerdere collega's op pad geweest om beelden van het hoogwater te maken. De terugkoppeling was echter dat er nauwelijks waarneembare golven waren. Zie bijvoorbeeld Figuur 3.4 en Figuur 3.5 voor een beeld van het hoogwater.



Figuur 3.5: Beelden van het hoogwater van februari 2021 van de Nederrijn vanaf de Rijnbrug bij Heteren, oostwaarts kijkend. Foto gemaakt door Dénes Beyer.

Daarnaast heeft in juli 2021 een tweede hoogwater plaatsgevonden op de Waal met een hoogwaterpiek van circa 6650 m³/s bij Lobith rond 18 juli, zie Figuur 3.6. Echter, in de hoogwaterperiode is de windsnelheid niet boven de 7 m/s uitgekomen. Er is daarom niet in het veld gemonitord.

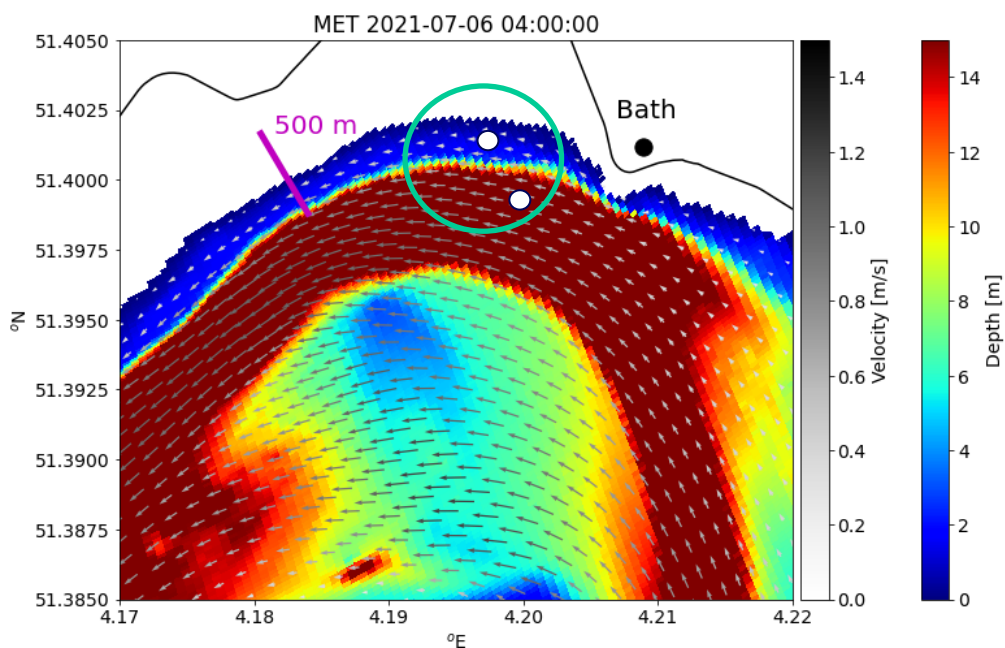


Figuur 3.6: Debiet bij Lobith van 10 juli tot en met 24 juli 2021.

3.2.3 Validatiemetingen 2021

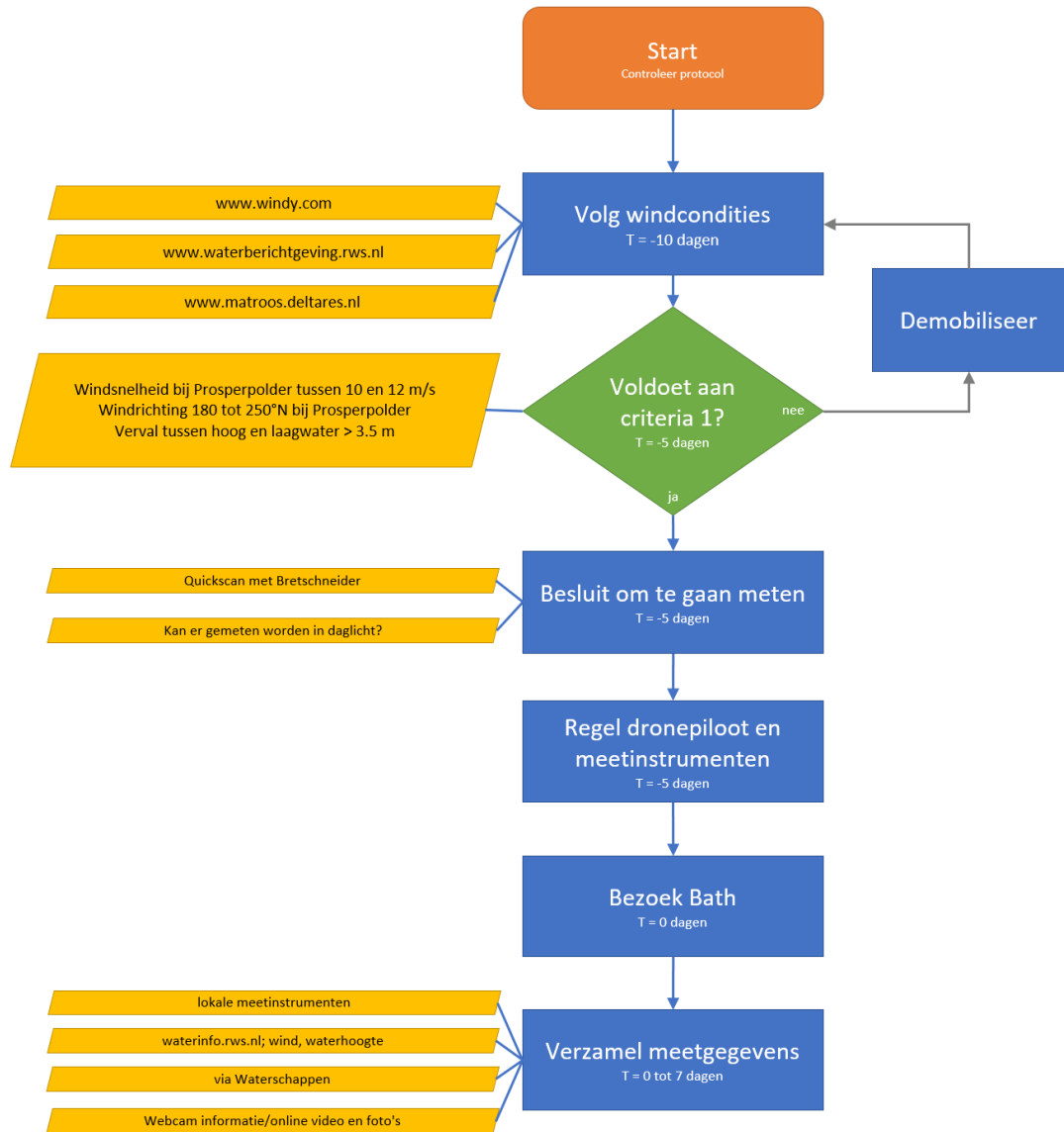
Voor de validatiemetingen is gekozen om metingen te doen in de Westerschelde. Dit vanuit praktisch oogpunt, bijvoorbeeld de bereikbaarheid van het gebied, en omdat de Westerschelde relatief goed de condities in een rivier benadert. Voor de validatiemetingen is een meetplan opgesteld, zie Deltares (2021c).

Er is gekozen voor het gebied ten westen van Bath, zie Figuur 3.7. Het interessegebied bij Bath betreft het strand ten westen dat droog staat bij laag water en tot 5 meter onder water staat bij hoog water. Het strand met een breedte van 50 tot 300 meter ligt direct aan de diepe stromende hoofdgeul en is in theorie dus representatief voor een rivier met uiterwaarden bij hoogwater.



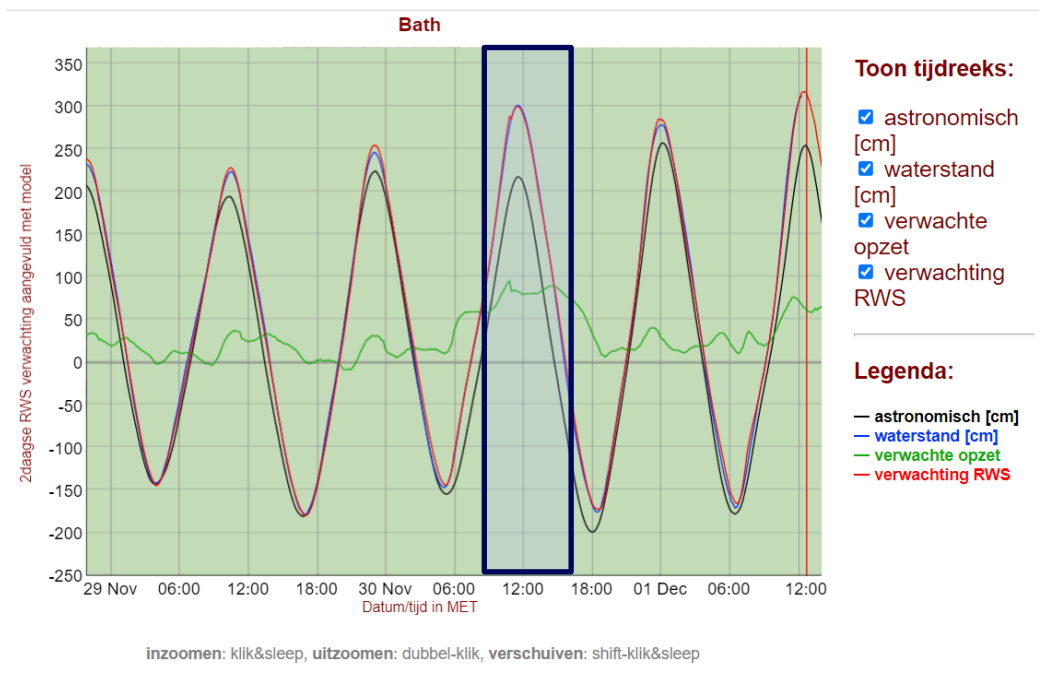
Figuur 3.7: Het bovenste paneel geeft voor het gebied rondom Bath de diepte en stroomsnelheid weer bij uitgaand tij. Het meetgebied is aangegeven met een groene cirkel. De twee witte stippen geven uitvoerlocaties van de waterstand en stroomsnelheid weer op het strand en in de geul. De magenta lijn van 500 meter geeft een indicatie van de breedte van het strand.

Voor het meetplan is een stroomschema gemaakt met criteria wanneer er gemeten kan worden en wat er dan geregeld moet worden, zie Figuur 3.8.



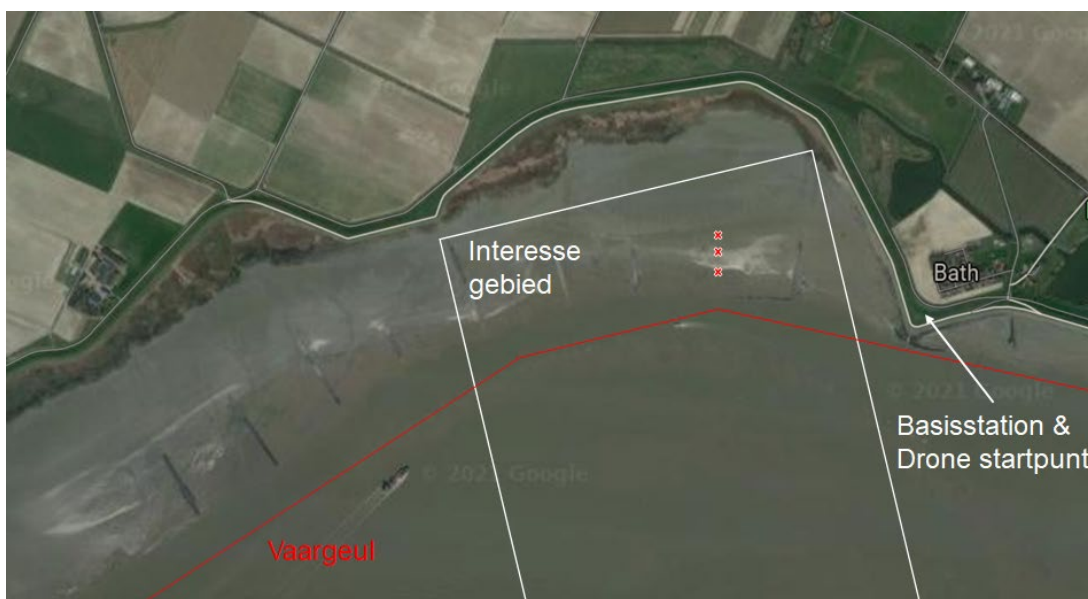
Figuur 3.8: Stroomschema validatiemetingen bij Bath

Uiteindelijk zijn de metingen uitgevoerd op 30 november 2021. Op die dag was de windsnelheid op de Westerschelde ongeveer 10 m/s met een windrichting van circa 260 °N. Hoogwater trad op rond 11:30 uur en de sterkste stroming rond 13:00 uur, zie Figuur 3.9. Volgens het operationele SWAN-Kuststrook model waren de golven op die dag maximaal 45 centimeter hoog.

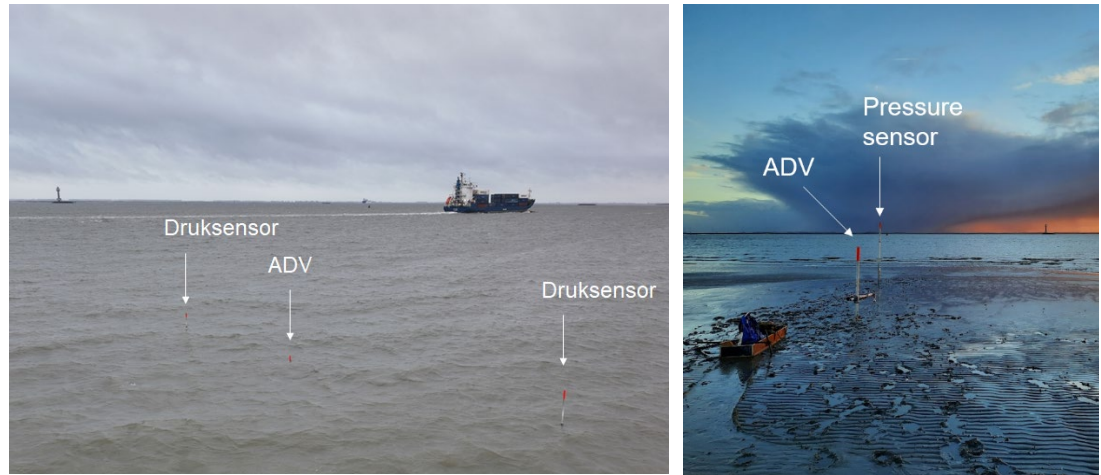


Figuur 3.9: Getij en windopzet volgens de RWS verwachting

Voor de validatie zijn 2 drukmeters (RBR virtuosio DWave) en 1 ADV meter (Nortek) gebruikt. Hieruit willen we golfinformatie en stromingsinformatie halen. De instrumenten zijn in de buurt van Bath geïnstalleerd, zie Figuur 3.10 en Figuur 3.11.



Figuur 3.10: Locatie dronemetingen, aangegeven met 'interessegebied' en puntmetingen, aangegeven met drie rode kruisjes. Het drone startpunt lag op 7.89 m+NAP.



Figuur 3.11: Locatie puntmetingen op 30 november om 15:00 uur en op 29 november om 17:30.

Het dronebedrijf Aeriallive Productions was ingehuurd voor de dronemetingen. Zij hebben gevlogen met een strom drone DJI Mavic 3, zie Figuur 3.12. Deze drone kan tot windsnelheden van 12 m/s stabiel vliegen. De drone heeft beelden genomen met een 5K resolutie en 25 frames per seconde. Figuur 3.13 toont een voorbeeld van de droneopname. Aangezien het op 30 november af en toe regende, kon de drone niet langere tijd vliegen. Echter, met lichte regen bleek de drone nog wel te kunnen vliegen.



Figuur 3.12: Gebruikte drone en drone startpunt.



Figuur 3.13: Voorbeeld van de droneopname.

3.3 Aanbevelingen voor QRF-rivieren in 2022

Voor 2022 wordt aanbevolen om de validatiemetingen in de Westerschelde te analyseren, aangezien dit niet meer in 2021 opgepakt kan worden. Het doel van deze uitwerking is om enerzijds inzicht te krijgen in de kwaliteit van de dronemetingen en anderzijds een advies te geven voor de toepasbaarheid hiervan op rivieren.

De volgende werkzaamheden worden verwacht bij de analyse van de validatiemetingen:

- Metingen van wind, waterstand en golven tijdens de meetcampagne worden (voor zover dat nog niet is gebeurd) opgeslagen;
- Modelinformatie voor zowel golven als hydrodynamica tijdens de meetcampagne wordt (voor zover dat nog niet is gebeurd) opgeslagen;
- De Quicksan wordt geüpdatet met de laatste informatie van de wind en waterstanden tijdens de meetcampagne. Hieruit volgt informatie hoe de golven met de Bretschneider formules worden voorspeld;
- De metingen van de druksensoren en de adv metingen worden uitgewerkt. Hieruit wordt golf- en stromingsinformatie gehaald;
- Er wordt een kwalitatieve analyse uitgevoerd op de dronebeelden. Hierbij wordt gekeken naar gevolgen van golf-stroominteractie zichtbaar zijn. Er wordt vervolgens een selectie gemaakt van de beelden voor een verdere kwantitatieve analyse;
- De dronebeelden worden georthorectificeerd;
- Voor de kwantitatieve analyse wordt de golfrichting en de golfperiode uit de beelden gehaald. Er wordt geprobeerd om de golfhoogte met een benadering uit de beelden te halen.
- Er wordt gekeken naar de mogelijkheden om ook stroming uit de beelden te halen. Aangezien hiervoor geen beproefde methode bestaat op dit moment, worden verschillende methodes (mits dit binnen het budget past) uitgetest;
- Er wordt een vergelijking gemaakt tussen (1) de puntmetingen, (2) de drone monitoring en (3) de modelberekeningen. De drone resultaten, zowel kwalitatief als kwantitatief, worden vergeleken met de puntmetingen, de modelresultaten van het golfmodel SWAN, het hydrodynamische model Delft3D-FM en de Bretschneider voorspellingen;
- De resultaten worden in een memo gepresenteerd.

Naast de uitwerking van de validatiemetingen wordt een budget gereserveerd om te kunnen meten tijdens hoogwater. Hiervoor wordt het protocol meten op rivieren (Deltares, 2021b) gehanteerd.

Voor de inzet tijdens hoogwater wordt rekening gehouden met:

- Inzet van een drone;
- Inzet van mensen voor voorbereidingen en tijdens de metingen;
- Beknopte analyse van de drone beelden en het verzamelen van model- en meetgegevens.

Daarnaast staat voor 2022 gepland om contacten op te bouwen met waterschappen over het verzamelen van beelden tijdens hoogwater en het mogelijk maken van QRF inzet bij extreem hoogwater.

Referenties

- Deltares (2017). Monitoring golven en stroming op rivieren. Deltares rapport 11200537-003-ZWS-0008, december 2017.
- Deltares (2019). Kwalitatieve vergelijking golfpatronen op rivieren met golfmodellen. Deltares memo 11203682-011-ZWS-0006, november 2019.
- Deltares (2021a). Kwantitatieve analyse videobeelden op rivieren. Deltares memo 11205235-006-ZWS-0004, 11 mei 2021.
- Deltares (2021b). QRF protocol monitoren op rivieren tijdens hoogwater. Deltares memo 11205235-006-ZWS-0003, 1 oktober 2021.
- Deltares (2021c). Meetplan validatie meettechnieken. Deltares memo 11206793-007-ZWS-0001, 1 oktober 2021.
- Deltares (2021d). XBeach BOI -Approaches to reduce calculation time. Tech. report 11205758-029-GEO-0012, 29 april 2021, definitief.
- Deltares/Arcadis (2021). XBeach BOI –BOI Standaard instellingen, (her)kalibratie van XBeach(Deel 1 + Deel 2). Tech. report 11205758-018-GEO-0006, november 2021
- Gawehn, M., De Vries, S., Aarninkhof, S. (2019). Depth and surface current inversion on the fly: a new video based approach using the dynamic mode decomposition. International Conference on Coastal Sediments 2019, Mei 2019.
- Gawehn, M., van Dongeren, A., De Vries, S., Swinkels, C., Hoekstra, R., Aarninkhof, S., Friedman, J. (2020). The application of a radar-based depth inversion method to monitor near-shore nourishments on an open sandy coast and an ebb-tidal delta. Coastal Engineering (159), April 2020.
- Gawehn M, de Vries S, Aarninkhof S. (2021). A Self-Adaptive Method for Mapping Coastal Bathymetry On-The-Fly from Wave Field Video. Remote Sensing. 2021; 13(23):4742. <https://doi.org/10.3390/rs13234742>
- Hoegen, R. (2020). On the parameterization of the nearshore bathymetry of the XBeach model for Egmond aan Zee. MSc thesis, Utrecht University, September 2020.
- IMARES, 2014. Monitoringplan Deltaprogramma Waddengebied: Advies voor het toekomstbestendig maken van het monitoringsysteem voor waterveiligheid in het Waddengebied. Technisch Rapport C121/14.
- Ruessink, G., Schwarz, C. S., Price, T. D., & Donker, J. J. A. (2019). A multi-year data set of beach-foredune topography and environmental forcing conditions at Egmond aan Zee, the Netherlands. Data, 4(2). <https://doi.org/10.3390/data4020073>
- Shore Monitoring (2019). Integrale survey Egmond November 2019. Rapport N201911-01. Shore Monitoring & Research, November 2019, Den Haag, Nederland.

Sieben, A. (2019). Test interpretatie golven en stroming uit drone metingen. Notitie, d.d. 13-11-2019 Arjan Sieben RWS-WVL.

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