

Verschilanalyse zesde-generatie modellen Meren

Effect software, rekenrooster, parameters & modelconcepten, schematisatie en modelrandvoorwaarden Markermeer, Veluwerandmeren, Volkerak-Zoommeer en Grevelingen



Verschilanalyse zesde-generatie modellen Meren

Effect software, rekenrooster, parameters & modelconcepten, schematisatie en modelrandvoorwaarden Markermeer, Veluwerandmeren, Volkerak-Zoommeer en Grevelingen

Auteur(s)

Ton Botterhuis

Jan Stijnen

Verschilanalyse zesde-generatie modellen Meren

Effect software, rekenrooster, parameters & modelconcepten, schematisatie en modelrandvoorwaarden Markermeer, Veluwerandmeren, Volkerak-Zoommeer en Grevelingen

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Martin Scholten
Referenties	-
Trefwoorden	Verschilanalyse, zesde-generatie, WAQUA, D-HYDRO, Markermeer, Veluwerandmeren, Volkerak-Zoommeer, Grevelingen

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	06-12-2024
Projectnummer	11209233-015
Document ID	11209233-015-ZWS-0001
Pagina's	110
Classificatie	
Status	definitief

Auteurs

	Ton Botterhuis (HKV)	
	Jan Stijnen (HKV)	

Samenvatting

Rijkswaterstaat maakt ten behoeve van haar kerntaken gebruik van verschillende model-schematisaties van de rijkswateren. Eén keer in de ongeveer zes jaar wordt een nieuwe generatie modelschematisaties ontwikkeld, waarin geaccepteerde nieuwe data, kennis en technieken worden toegepast. Met de ontwikkeling van de zesde-generatie modellen voor de Meren worden er weer een actuele en 'state of the art' basismodellen verkregen voor alle toepassingen.

Bij iedere overstap naar een nieuwe modelgeneratie wordt een uitgebreide verschilanalyse uitgevoerd, waarbij verschillende componenten bij deze overstap zoveel mogelijk los van elkaar worden beschouwd. Deze rapportage beschrijft alleen de feitelijke verschillen door de overstap naar de zesde generatie modelschematisaties van RWS en gaat alleen over de onderdelen die in het kader van de modelontwikkeling van belang zijn. De eventuele consequenties voor de toepassing binnen de verschillende primaire processen van RWS en andere zaken die specifiek binnen deze toepassingen eventueel worden aangepast (zoals de overstap naar een andere statistiek binnen BOI) worden buiten beschouwing gelaten.

De verschilanalyses in deze rapportages zijn ingedeeld volgens de vijf bouwstenen uit het Kader Toepassing Netwerkmodellen Water en Scheepvaart van RWS:

- 1. Software**
De overgang naar de nieuwe rekensoftware: van WAQUA naar D-HYDRO Suite.
- 2. Rekenrooster**
De overgang naar een ander soort rekenrooster: van gestructureerd naar ongestructureerd.
- 3. Schematisatie**
Het gebruik van een andere schematisatie (o.a. verbetering basisreferentie, actualisatie, vegetatielegger, vergunningen, planmaatregelen).
- 4. Parameters en Modelconcepten**
Het gebruik van andere modelconcepten en parameters voor horizontale viscositeit en overlaatformulering (verschil tussen Tabellenboek en Villemonte-formulering).
- 5. Modelrandvoorwaarden**
Het gebruik van andere BOI-randvoorwaarden.

Dit rapport beschrijft de verschilanalyse van dieptegemiddelde modellen (versie 2DH) van het Markermeer, Veluwerandmeren, Grevelingen en Volkerak-Zoommeer en gaat vooral in op de toepassing daarvan voor het BOI. Dit is een gedeelte binnen de totale scope van het generieke modelinstrumentarium van RWS. Het model voor het IJsselmeer is buiten beschouwing gelaten, omdat voor dit watersysteem geen nieuwe BOI-productieberekeningen zijn gedaan. Het belastingmodel van het Volkerak-Zoommeer is onderdeel van dat van de Rijn-Maas monding, maar zal binnen BOI2023 gevuld worden met twee verschillende typen productie-berekeningen: die van de Meren en die van de Rijn-Maasmonding. In deze verschilanalyse is alleen het 'Meren'-gedeelte van de berekeningen besproken.

Tabel 1 Overzicht van beschikbare database fysica van de onderzochte watersystemen.

Watersysteem	Jaartal productie-berekeningen	Onderzoek	Opmerkingen
Markermeer	1998, 2005, 2006	OOM-studie, HR2001	- HR2006 Gouwzee en Eem verbeterd - HR2006 project IJburg toegevoegd
Veluwerandmeren	2008	HR2006-c	- beoordeling categorie c-keringen
Volkerak-Zoommeer	2017	WBI2017	- 2021a databases gecorrigeerd - 2021b databases aangevuld
Grevelingen	2017	WBI2017	

Deze verschilanalyse voor de Meren wijkt qua aanpak af van verschilanalyses voor andere watersystemen (Maas, Rijntakken, Rijn-Maasmonding). Voor het Markermeer en de Veluwerandmeren zijn de actuele productieberekeningen veel ouder dan voor andere watersystemen (Tabel 1). Het maken van nieuwe berekeningen met het instrumentarium dat is gebruikt bij de productieberekeningen waarmee de databases fysica van WBI2017 zijn gevuld, is niet meer mogelijk. Daarmee vallen nieuwe berekeningen met de zesde generatie modelschematisaties t.b.v. een vergelijking buiten de scope van deze verschilanalyse. In deze analyse hebben we documenten gebruikt en een vergelijking gemaakt tussen de databases fysica van WBI2017 en BOI2023. De uitgevoerde analyse is in feite een dossieronderzoek. Daarmee wijkt de werkwijze af van die van de verschilanalyses voor de Maas, Rijntakken en Rijn-Maasmonding, waarin aanvullende berekeningen zijn gemaakt voor een stap-voor-stap-analyse van de verschillen. Dat maakt dat de duiding van de verschillen in de huidige studie niet hetzelfde detailniveau heeft. De gerapporteerde kalibratie/validatie is vergeleken, zodat een mogelijk verschil in de betrouwbaarheid in het waargenomen bereik kan worden geduid. Aanvullend zijn verschillen in de databases fysica onderzocht, zodat een mogelijk verschil in het extreme bereik kan worden geduid. Het goed representeren van de geometrie van het voorland en de oever, de positie van uitvoerlocaties en mogelijke obstakels voor de waterbeweging spelen een belangrijke rol.

De gevonden verschillen zijn in voorliggende rapportage beschreven en zijn zoveel als mogelijk nader verklaard. Omdat geen (nieuwe) berekeningen zijn gemaakt, kan er voor de Meren geen zuivere vergelijking worden gemaakt van de verschillen in software. Dit onderdeel van de verschil analyse laten we daarom buiten beschouwing. De belangrijkste bevindingen zijn opgenomen in de conclusies en samengevat in deze opsomming:

- **Rekenrooster:** In de resultaten van de zesde generatie modellen is duidelijk een verbeterde detaillering tot aan de waterkering mogelijk gemaakt door het ongestructureerde modelrooster. Door toename van het detail is het mogelijk om te rekenen (op het voorland) tot aan de teen van de dijk, bij het waterfront van stedelijk gebied en in de havenbekkens. In WBI2017 lagen uitvoerlocaties op 500 m onderlinge afstand en minimaal 300 m voor de primaire kering. Ook lag de begrenzing van het rekenrooster van het Markermeer niet overal tegen de primaire kering aan. Bij Hoorn, Enkuizen en de Hollandsche brug (Huizen) was een deel van de oeverzone niet in het model opgenomen. In BOI2023 sluit het rekenrooster goed tegen de primaire keringen aan. Er is gekozen om de onderlinge afstand te verkleinen tot 100 m en de uitvoerlocaties op 60 m voor de kering te leggen. Dat andere resultaten op deze locaties worden berekend is plausibel in het waargenomen en extreme bereik.
- **Schematisatie:** Voor elk van de onderzochte meren is de (basis)schematisatie aangepast naar de meest recente stand van de kennis (2019). De gegevens van de zesde generatie schematisatie zijn actueler en bieden de mogelijkheid om (ruimtelijk) gedetailleerder te rekenen. Enkele voorbeelden hiervan zijn de actualisatie van IJburg (het aantal gemodelleerde eilanden komt nu overeen met het aangelegde aantal), de verlegging van de grens tussen Vossemeer en Drontermeer met de aanleg van de Reevedam (waardoor de Randmeren een kortere strijklengte hebben gekregen t.o.v. de maatgevende windrichting) en/of de doorvaarbare haven bij Harderwijk. Daarnaast is een grote slag gemaakt in het aantal en de positie van de oeverlocaties.
- **Parameters en Modelconcepten:** Enkele van de grotere veranderingen in de zesde generatie modellen die wél van toepassing zijn voor de Rijntakken en de Maas (bijvoorbeeld de overstap op Villemonthe benadering voor overlaten) zijn nauwelijks van belang voor de Meren. In belangrijke mate worden verschillen op de Meren veroorzaakt door het toepassen van de winddragafkapping in de zesde generatie waterbewegingsmodellen. In eerdere generaties was dit niet het geval. Bij hoge windsnelheden (>30 m/s) heeft dit een significante invloed op de waterstanden (op de scheefstand).

- **Modelrandvoorwaarden:** De kwaliteit van de informatie over de windforcering is een grote beperking om optimaal te profiteren van de toegenomen detaillering in de zesde generatie modellen, met de beschikbare kennis over de windforcering als belangrijkste oorzaak. Daarnaast is in de BOI2023 berekeningen gewerkt met een groter aantal stochastcombinaties dan voorheen, om zoveel mogelijk inter- en extrapolatie tussen de resultaten te voorkomen en de set productieberekeningen geschikt te maken voor het ontwerpen van waterkeringen (OI). Een andere keuze die verschillen veroorzaakt, is de mate van windrotatie die wordt gehanteerd voor een bepaalde windrichting en de toekenning van een bepaalde windrichting aan de oostelijke- of westelijke windrichtingssectoren.
- **Kalibratie en validatie:** De zesde generatie modellen zijn even betrouwbaar als de voorgaande generaties. Controle van de reproductie van de waterstanden – de validatie – geeft vergelijkbare resultaten als in het verleden. In de uitgevoerde validatie is gesteld dat betrouwbare (gemeten) informatie over ruimtelijk verdeelde wind ontbreekt. Dit is ook de belangrijkste reden waarom er niet is gekalibreerd. De windgegevens geven onvoldoende informatie om van de default (theoretische) waarden af te wijken. Omdat (op het voorland) bij de teen van de dijk, bij het waterfront en in de havens (ook) metingen van de waterstand ontbreken, is alleen een expertbeoordeling van de modellen op deze locaties mogelijk. Die is uitgevoerd en de resultaten van de zesde generatie modellen zijn als plausibel beoordeeld. Daar waar ze niet plausibel zijn, zullen de locaties door de standaard controleprocedures van het BOI uit de databases worden verwijderd.

De verschillen die we zien tussen BOI2023 en WBI2017 langs de onderzochte meren (Markermeer, Grevelingen, Veluwerandmeren en Volkerak-Zoommeer) achten we goed verklaarbaar, ondanks dat het niet meer mogelijk is de verschillen één voor één af te pellen. De zesde generatie modellen zijn daarmee even geschikt (of beter geschikt vanwege de verdiscontering van nieuwe, geaccepteerde kennis en actualisatie van de schematisaties) voor de toepassing bij de kerntaken van Rijkswaterstaat dan eerdere generaties waterbewegingsmodellen. De onderzochte schematisaties zijn niet beperkend in de toepassing bij deze kerntaken.

Controle van de reproductie van de waterstanden – de validatie - geeft vergelijkbare resultaten als in het verleden. In het verleden gaf de beperkte validatie van de vijfde en de eerdere generaties voldoende vertrouwen in het instrumentarium. Uit de gemaakte analyse van de gerapporteerde betrouwbaarheid blijkt dat de zesde generatie waterbewegingsmodellen voor de Meren een vergelijkbare betrouwbaarheid heeft als de voorgaande generaties.

De modellering van de waterbeweging en de mogelijkheden van het zesde generatie instrumentarium zijn geen beperking om de overstap te maken naar een aanzienlijk actueler en daarnaast kwalitatief beter waterbewegingsmodel. Voor de langere termijn wordt aanbevolen om toe te werken naar verbetering van de modelinvoer (net name wind) en naar verbetering van de validatiemogelijkheden. Een redelijk actueel en compleet overzicht van de meetbehoefte voor de modelvalidatie wordt gegeven in [Informatiebehoefte WBI-BOI veldmetingen](#) (Bottema, 2019). Aanvullend wordt aanbevolen om nader onderzoek te doen naar de volgende onderdelen:

- **Verbetering windinformatie:** Waterstanden en stormopzet zijn zeer gevoelig voor de gebruikte wind: elke procent extra wind levert (ruim) twee procent extra stormopzet. De huidige vertaling van wind naar open water berust op achterhaalde en [foute aannames](#) (Sterl, 2019), Verbeteringen zijn:
 1. Toepassen en testen van een nabewerking op HIRLAM- en HARMONIE-weermodellen om *downscaling* toe te passen op de berekende informatie. Dit ontwikkeltraject is geagendeerd binnen Kennis voor Keringen maar heeft nog geen budget.

2. Verbeteren van de validatiemogelijkheden van de windmodellen, waarvoor representatieve, betrouwbare en meerjarige windmetingen nodig zijn op elk van de Meren (is dus een aanvullende verbetering op de informatiebehoefte).
 3. Verbeterde modellering tijdsafhankelijkheid en windstatistiek, wat op basis van de huidige lengte van de meetreeksen feitelijk onhaalbaar is. Lange berekende meetreeksen bieden veel perspectief voor [de Noordzeekust](#) (Van den Brink, 2023), maar vragen voor de Meren nog aanvullende *downscaling* van de windinformatie (zie punt 1).
 4. Verbeteren van de ruimtelijke windmodellering, hiervan is de meerwaarde minder groot (als de voorgaande punten), namelijk als de bulk van het windveld voldoende nauwkeurig is, hoeft niet elke oeverzone exact te worden gemodelleerd.
- **Verbetering validatie/kalibratie:** Voor de toepassing van het BOI bestaat de uitgevoerde kalibratie/validatie van de zesde generatie modelschematisaties uit een validatie van 1 of 2 stormen veelal met wind uit dezelfde richting, waardoor de schematisatie bij lang niet alle maatgevende belastingcombinaties wordt getoetst. Hiervoor kan het volgende worden aanbevolen:
 1. Het wordt aanbevolen om scherp de meetbehoefte ten behoeve van modelvalidatie te definiëren, en vervolgens de gewenste en/of vereiste metingen te realiseren (Bottema, 2019). Wanneer méér metingen beschikbaar zijn, kan ook de validatiemethodiek nader worden beschouwd. Bijvoorbeeld door op meer data dan 1 of 2 stormen te kalibreren en/of te valideren, of door aanvullende variabelen te meten en te valideren (zoals windgedreven stroming).
 2. Met name voor de kleinere meren zijn slechts beperkt metingen beschikbaar (Bottema, 2019), waarmee de invoer en uitvoer van modellen kan worden gevalideerd. Vaak betreft het (slechts enkele) waterstandsmeetlocaties, terwijl windinformatie ontbreekt. Met name op ondiepe locaties en locaties die regelmatig droogvallen (natuurlijke of aangelegde voorlanden, buitendijks bebouwd gebied) zijn veelal geen (waterstands-) metingen beschikbaar.
 3. Tot slot wordt aanbevolen er scherp op toe te zien dat de modelkalibratie en/of -validatie en de (WBI-/BOI-)modeltoepassing alle onderling consistent zijn. Zodat de validatieresultaten van een voorgaande generatie eenduidig kan worden vergeleken met de actuele validatie. Voor HR2006 is op de Veluwerandmeren een windreductiefactor toegepast in validatie en productieberekeningen. Recent is achterhaald dat deze factor ontbreekt in de toepassing van de zesde generatie voor BOI. Als modelvalidatie van opeenvolgende generaties onderling vergelijkbaar zijn, worden dergelijke omissie eerder opgemerkt en wordt de afhankelijkheid van individuen (experts) tot een minimum beperkt.

Consequenties voor BOI

Op basis van bovenstaande conclusies zien we vanuit het perspectief van BOI geen reden om niet over te stappen naar het zesde generatie modelinstrumentarium. We doen enkele aanbevelingen die meer op het gebruik van de modellen voor het BOI gericht zijn:

- Onderzoek of de mate van detaillering rondom havens, voorlanden en waterfronten in de hier geanalyseerde waterbewegingsmodellen binnen BOI2023 zinvol gebruikt kan worden.
- Zorg voor een verdere verbetering van de ligging van de BOI-uitvoerlocaties en dat deze ook tijdig beschikbaar zijn binnen de Baseline schematisatie van een model. Ondanks de geleverde inspanning in de productie van de databases, zijn er nog locaties waarvan de waterstanden niet geschikt zijn voor het BOI. Dit is een tijdrovende zaak, waarbij de benodigde hoeveelheid werk, expertise en watersysteemkennis gauw worden onderschat.

- Besteed bij de selectie van BOI-uitvoerlocaties ook aandacht aan de bodemligging om potentiële droogval zoveel mogelijk te voorkomen. Met het beschikbaar komen van de huidige resultaten, zou hier aan de voorkant (van een volgende set productie-berekeningen) prima rekening mee kunnen worden gehouden.
- Verbeter de kwaliteit van de windforcering in het extreme bereik. Een betere detaillering in de forcering in het extreme bereik achten we essentieel voor een verhoging van de betrouwbaarheid van de rekenresultaten van de hydraulische belastingen op de primaire keringen langs de Meren (dit vraagt met name een nieuwe kennis van het KNMI).

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	11
1.1	Introductie	11
1.2	Leeswijzer	13
2	Methode verschilanalyse	14
2.1	Inleiding	14
2.2	Opzet verschilanalyse	15
2.3	Historie	16
2.3.1	HR1996	16
2.3.2	OOM-Studie	17
2.3.3	HR2001	17
2.3.4	HR2006	19
2.3.5	WBI2017	19
3	Verschillen 'pre-baseline' (oudere), vijfde en zesde generatie	21
3.1	Inleiding	21
3.2	Software	22
3.3	Rekenrooster	24
3.4	Modelleringsconcepten	25
3.5	Schematisatie	27
3.6	Modelrandvoorwaarden	27
4	Betrouwbaarheid zesde generatie Meren	29
4.1	Markermeer en Veluwerandmeren	29
4.1.1	Prestaties 'pre-baseline' (oudere) t/m vijfde generatie model	29
4.1.2	Prestaties zesde generatie model	30
4.2	Grevelingen	32
4.2.1	Prestaties vijfde generatie model	32
4.2.2	Prestaties zesde generatie model	33
4.3	Volkerak-Zoommeer	36
4.3.1	Prestaties vijfde generatie model	36
4.3.2	Prestaties zesde generatie model	38
4.4	Conclusies en aanbevelingen	39
5	Verschillen tussen BOI2023 en WBI2017	41
5.1	Inleiding	41
5.2	Wind	41
5.2.1	Tijdsverloop van de wind	42
5.2.2	Rotatie van de wind	43

5.2.3	Ruimtelijk windveld	43
5.2.4	Open water vs. potentiële wind	44
5.2.5	Windschuifspanning	45
5.3	Discretisatie stochasten	46
5.3.1	Windsectoren	47
5.3.2	Windsnelheden	48
5.3.3	Meerpeilen	48
5.4	Modelrooster	48
5.5	Modelschematisatie	49
6	Effect verschillen BOI2023 t.o.v. WBI2017	50
6.1	Markermeer	51
6.1.1	Rond het Markermeer bij noorden wind	51
6.1.2	Vershil bij extreme wind (47 m/s) uit het noordnoordoosten	60
6.1.3	Vershil bij sterke wind (37 m/s) uit het noordnoordwesten	64
6.1.4	Actualisatie schematisatie Eem bij geen wind (0 m/s)	67
6.1.5	Aanpassing schematisatie Marker Wadden bij wind (37 m/s) uit verschillende richtingen	69
6.1.6	Wijziging scheefstand Markermeer bij sterke wind (37 m/s) uit het zuiden	70
6.1.7	Aanpassing schematisatie IJburg bij wind uit NO wind met verschillende windsnelheden	71
6.1.8	Conclusies en aanbevelingen	72
6.2	Veluwerandmeren	73
6.2.1	Rond de Veluwerandmeren bij zuiden wind	73
6.2.2	Detaillering rondom oude vissersplaatsen, kleine recreatie havens en andere waterwerken	78
6.2.3	Conclusies en aanbevelingen	79
6.3	Grevelingen	80
6.3.1	Rond het Grevelingenmeer bij westen wind	80
6.3.2	Vershil bij wind uit andere richting	85
6.3.3	Detaillering in en om havens	86
6.3.4	Conclusies en aanbevelingen	87
6.4	Volkerak-Zoommeer	88
6.4.1	Rond het Volkerak-Zoommeer bij noorden wind	88
6.4.2	Vershil bij wind uit andere richting	97
6.4.3	Conclusies en aanbevelingen	99
7	Conclusies en aanbevelingen	100
7.1	Conclusies	100
7.2	Aanbevelingen	102
	Referenties	106

1 Inleiding

1.1 Introductie

Rijkswaterstaat maakt ten behoeve van haar kerntaken gebruik van verschillende model-schematisaties van de rijkswateren. Deze modelschematisaties worden o.a. ingezet voor de operationele verwachtingen, vergunningverlening, planstudies en het Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium. Het is daarbij zaak dat deze modelschematisaties het betreffende watersysteem zo goed mogelijk representeren en dat zoveel mogelijk gebruik wordt gemaakt van de laatste (bewezen) kennis en techniek. Vanaf 2016 is daarom hard gewerkt aan het opzetten van een nieuwe generatie modelschematisaties in de D-HYDRO Suite en van 2020 t/m 2022 zijn diverse zogeheten ‘zesde generatie’ Meren-modellen opgeleverd aan Rijkswaterstaat.

Alleen tijdens de ontwikkeling van nieuwe generatie modellen kunnen methodieken gewijzigd worden, die van invloed zijn op de kalibratie en de validatie (bijv. numerieke instellingen, bepaling van laterale toestromingen, de Qf-relaties, of de kalibratiestrategie). Ook het rekenrooster wordt in de basis éénmaal gemaakt, waarbij er in navolgende jaren alleen een mogelijkheid is tot uitbreiding. Samen met de nieuwe software levert dit de mogelijkheid tot een kwaliteitsimpuls van de schematisatie. Tussen de vijfde- en zesde-generatie modellen zitten grote verschillen, zoals de overgang naar nieuwe rekensoftware (van WAQUA naar D-HYDRO), nieuwe rekenroosters (van gestructureerd naar ongestructureerd), nieuwe methodieken (o.a. andere omgang met windforcering), andere modelleringsconcepten (o.a. van de droogvalprocedure, andere viscositeitsmodellering) en andere modelschematisaties (gebiedsbeschrijvingen).

De vijfde-generatie WAQUA-modellen van de Meren hebben een prominente rol bij de diverse toepassingen binnen de primaire processen van Rijkswaterstaat, waaronder vergunningverlening, voorspellingen en het BOI-proces, waardoor de verschillen veroorzaakt door de overstap naar een nieuwe generatie aanzienlijke consequenties kunnen hebben voor de toepasbaarheid bij RWS. In de voorgaande beoordelingsronde (onderdeel van het BOI proces) is voor de Grevelingen en het Volkerak-Zoommeer gebruik gemaakt van een vijfde-generatie WAQUA-model. Het Markermeer en de Veluwerandmeren zijn de voorgaande beoordelingsronde hydraulisch niet opnieuw doorgerekend (Tabel 2). Gebruik is gemaakt van berekeningen met een (veel) oudere versie van het hydraulisch instrumentarium. Het is van belang om te kunnen duiden welke invloed een ander instrumentarium heeft op de beoordeling.

Tabel 2 Overzicht van beschikbare database fysica van de onderzochte watersystemen.

Watersysteem	Jaartal productie-berekeningen	Onderzoek	Opmerkingen
Markermeer	1998, 2005, 2006	OOM-studie, HR2001	- HR2006 Gouwee en Eem verbeterd - HR2006 project IJburg toegevoegd
Veluwerandmeren	2008	HR2006-c	- beoordeling categorie c-keringen
Volkerak-Zoommeer	2017	WBI2017	- 2021a databases gecorrigeerd - 2021b databases aangevuld
Grevelingen	2017	WBI2017	

Om dit inzichtelijk te maken wordt gebruik gemaakt van ‘de verschilanalyse bij een generatieovergang’, in dit rapport afgekort als ‘de verschilanalyse’. Deze zogenoemde verschilanalyse helpt RWS bij het maken van de afwegingen en het besluit om deze nieuwe modellen binnen de primaire processen van RWS in te gaan zetten.

De voorliggende rapportage beschrijft de verschilanalyse van de 2D D-HYDRO modellen van de Meren: Markermeer, Veluwerandmeren, Grevelingen en Volkerak-Zoommeer (VZM) en gaat vooral over de onderdelen die in het kader van de modelontwikkeling van belang zijn. In dit rapport gaan we met name in op het effect van de overgang voor BOI, omdat daarvoor voldoende vergelijkingsmateriaal beschikbaar is (voor andere toepassingen is er minder of geen vergelijkingsmateriaal). Het maken van nieuwe berekeningen met het oude en/of nieuwe instrumentarium valt buiten de scope van deze verschilanalyse. Deze verschilanalyse bestaat alleen uit dossieronderzoek. Voor een juiste interpretatie van deze rapportage is het van belang dat de lezer zich realiseert dat deze verschilanalyse afwijkt van andere uitgevoerde verschilanalyses. Voor de Maas en de Rijn- en Rijn-Maasmonding (RMM) zijn verschilanalyses uitgevoerd en deze staan beschreven in respectievelijk Spruyt et al. (2023a), Spruyt et al. (2023b) en (Bom en Spaans, 2024). In deze (andere) verschilanalyses is meer aandacht voor andere toepassingen van de modellen en was het maken van vergelijkingsmateriaal door berekeningen met het oude en/of nieuwe instrumentarium wel onderdeel van de analyse.

In het BOI-proces wordt het zesde-generatie instrumentarium gebruikt om de zogenaamde 'productieberekeningen' uit te voeren. In deze berekeningen worden gebeurtenissen gesimuleerd waarin extreme waterstanden kunnen ontstaan. De productieberekeningen van het Markermeer, de Veluwerandmeren, de Grevelingen en het Volkerak-Zoommeer (systemen die we in deze rapportage 'de Meren' noemen), bestaan uit combinaties van drie drijvende krachten (de "basisstochasten"): het meerpeil, de windrichting en de windsnelheid. Een simulatie start met een vlakke waterspiegel in het gehele meer (het meerpeil), waarna vanuit een bepaalde richting volgens een vast verloop de windsterkte toeneemt tot een maximum en vervolgens weer afneemt. Het IJsselmeer valt buiten de scope van deze verschilanalyse, omdat voor dat systeem in BOI2023 geen nieuwe productieberekeningen worden gemaakt.

Het belastingmodel van het Volkerak-Zoommeer (VZM) is onderdeel van dat van de Rijn-Maasmonding, maar zal binnen BOI2023 gevuld worden met twee verschillende typen productieberekeningen: die van de Meren en die van de Rijn-Maasmonding. Wordt waterberging Volkerak-Zoommeer als maatregel niet ingezet, dan worden resultaten gebruikt waarbij het VZM als "meer" is gemodelleerd. Als wel gebruik wordt gemaakt van berging op het VZM, worden de resultaten uit de productieberekeningen van de Rijn-Maasmonding gebruikt. In deze verschilanalyse is alleen het 'Meren'-gedeelte van de berekeningen besproken.

Dit dossieronderzoek heeft niet de ambitie om een volledig en precies beeld neer te zetten van alle verschillen tussen WBI2017 en BOI2023, omdat dat een veel te grote inspanning zou zijn. Dit onderzoek zal om dezelfde reden ook niet de verschillen in alle maatgevende situaties voor de normtrajecten langs de Meren duiden. Voor elk meer zijn bij meerdere windrichtingen de verschillen tussen WBI2017 en BOI2023 in beeld gebracht. Gerapporteerd en besproken zijn de verschillen bij één (indicatieve) windrichting. Zodat een interpreteerbaar ruimtelijk beeld ontstaat van de te verwachten verschillen. Helaas is het niet gelukt om alle geconstateerde verschillen in de resultaten eenduidig te verklaren, omdat de verschillen meerdere oorzaken kunnen hebben en het afpellen van deze oorzaken niet mogelijk is op basis van beschikbare gegevens en onderzoeksmogelijkheden. Toch helpt het gerapporteerde beeld en de gegeven verklaringen van de verschillen bij de interpretatie van de gevolgen van de overstap die met het gebruik van de zesde generatie genomen wordt.

1.2 Leeswijzer

De rapportage van de verschilanalyse voor de Meren bestaat uit 7 hoofdstukken:

- Hoofdstuk 2 presenteert de uitgangspunten en de aanpak van de verschilanalyse van het vijfde- naar het zesde-generatie modelinstrumentarium voor de Meren.
- Hoofdstuk 3 beschrijft de verschillen in achtereenvolgens de software, het rekenrooster, de modelleringsconcepten, de schematisatie en de modelrandvoorwaarden. De ontwikkeling van de modellen voor de Meren kent een lange historie, die o.a. tot uiting komt in een toepassing als het BOI.
- In hoofdstuk 4 staan we expliciet stil bij de betrouwbaarheid van het zesde generatiemodel in het waargenomen bereik van waterstanden en wind op de Meren t.o.v. eerdere modelversies. Hiervoor bespreken we de resultaten van de validatie van het nieuwe model en voorgaande versies.
- In hoofdstukken 5 en 6 lichten we de implicaties van de overstap voor het BOI toe waarin we expliciet kijken naar respectievelijk de verschillen tussen het BOI2023 en het WBI2017, en wat het effect van die verschillen is op de berekende waterstanden. In het extremere bereik van wind en waterstanden zal de betrouwbaarheid afwijken van de betrouwbaarheid in het waargenomen bereik. Dit is overigens zeer moeilijk te bewijzen. Daarom bespreken we niet de betrouwbaarheid, maar de verschillen tussen het zesde generatie instrumentarium voor de lopende ronde van BOI (BOI2023) t.o.v. de gegevens gebruikt in de voorgaande ronde (WBI2017).
- In hoofdstuk 7 zijn de analyses samengevat en volgen de conclusies en aanbevelingen op basis van de resultaten van het dossieronderzoek.

2 Methode verschilanalyse

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zetten we de methode uiteen die is toegepast voor de verschilanalyse van de Meren. Voor de watersystemen Maas, Rijntakken en Rijn-Maasmonding (RMM) zijn ook verschilanalyses gemaakt voor de overstap van de vijfde- naar de zesde-generatie modellen. In de rapporten die voor die specifieke watersystemen zijn gemaakt, is gekozen voor een bepaalde opzet en het ligt voor de hand om daar ook voor de Meren bij aan te sluiten. De Meren zijn echter duidelijk andere watersystemen dan de Maas, Rijntakken en RMM. Met name de historie speelt een grote, belangrijke rol. Specifiek voor het BOI is bijvoorbeeld voor het Markermeer en de Veluwerandmeren eigenlijk geen sprake van een overstap van vijfde naar zesde generatie modellen, maar van een 'pre-baseline' versie¹ en niet meer beschikbare model naar de zesde generatie². Dit lichten we nader toe onder het kopje historie (hoofdstuk 2.3). Voor andere toepassingen zijn wel vijfde-generatie modellen beschikbaar.

Anders dan voor de Maas, Rijntakken en RMM is het voor de Meren niet mogelijk om voor BOI de verschillen tussen de voorgaande generaties en het zesde-generatie model te kwantificeren, simpelweg omdat in sommige gevallen de in het verleden gebruikte fysische modellen niet langer beschikbaar zijn (ze zijn soms meer dan 20 jaar oud).

De modellering van de waterbeweging op de Meren is anders dan die voor de rivieren en de delta's en kent daarmee een andere – kleinere – complexiteit. Ontwikkelingen die zijn doorgevoerd voor het verbeteren van stroming in langsrichting, de verdeling van de afvoeren over de splitsingspunten en de formulering voor overlaten zijn voor de Meren van minder of zelfs van geen belang. Platgeslagen: een meer is een "bak met water" die door wind in beweging en scheef wordt gezet. De kwaliteit van het opgelegde windveld bepaalt in hoge mate de kwaliteit van de simulatie van de waterbeweging. In iets mindere mate geldt dat ook voor de bodemligging en in nog wat mindere mate voor het goed representeren van de geometrie van de oever en mogelijke obstakels voor de waterbeweging. Wat meer of minder belangrijk is, hangt af van de precieze toepassing van het model. Een toegesneden kalibratie voor de zesde generatie modellen van de Meren is niet uitgevoerd. Een validatie van de modellen is wel uitgevoerd, voorgelegd en besproken met experts, zoals dat bij eerdere generaties ook is toegepast (Genseberger et al., 2019 en 2020, Groenenboom et al., 2020 en Van der Lugt et al., 2021).

Voor het BOI is een correcte berekening van de waterstand tot aan de primaire kering bij verschillende mate van scheefstand van het meer van groot belang. In het BOI is gekozen om standaard de uitvoerlocaties op 60 m van de teen van de primaire kering te plaatsen. Een juiste plaatsing van de locatie waar het rekenresultaat wordt uitgelezen is daarom van groot belang. Kleine obstakels in de oeverzone die leiden tot droogval en/of plassen in terrein-depressies (die daar in de initiële conditie zijn achtergebleven) verstoren een correcte lezing van het rekenresultaat als door verschillende windsterkte en -richting de oeverzone onder water wordt geblazen of juist niet. Uitvoer in het midden van het meer geeft (te) weinig informatie over het effect van de wind nabij de teen van de keringen.

¹ Vanaf begin van deze eeuw is Rijkswaterstaat het pakket Baseline gaan gebruiken om de hoofdwatersystemen te schematiseren, vanaf de vierde generatie is een model voor het Markermeer en de Randmeren beschikbaar (dit is overigens nooit gebruikt voor de beoordeling van primaire keringen).

² De Grevelingen en het Volkerak-Zoommeer zijn in de vorige beoordelingsronde wel met een vijfde generatiemodel doorgerekend, ook voor deze systemen hanteren we dezelfde methode als voor Markermeer en Veluwerandmeren.

Hierdoor bepaalt de (ligging van de) uitvoerlocatie vaak mede het resultaat van de analyses. Bij modellen van de rivieren en/of van de Rijn-Maasmonding geeft uitvoer op de as van de waterloop een goede indicatie van de betrouwbaarheid van het model voor waterstand nabij de primaire kering. Bij modellen van de Meren is het van belang om daadwerkelijk de uitvoer nabij de kering te beoordelen.

2.2 Opzet verschilanalyse

De opzet van deze verschilanalyse voor de Meren is (noodgedwongen) anders ingestoken dan die voor de overige drie watersystemen waarvoor de overstap naar de zesde generatie ook speelt. In deze analyse hebben we alleen documenten gebruikt en een vergelijking gemaakt tussen de databases fysica van WBI2017 en BOI2023. We richten ons daarbij op de reproductie van de waterstanden door de modellen in het gemeten en in het extreme bereik. De belasting van de wind speelt op de Meren de voornaamste rol (de ligging van de waterbodem is van minder belang en obstakels in de oeverzone zijn van nog minder belang mits de locatie van de uitvoerpunten goed is gekozen). Daar waar we resultaten uit eerdere rapportages bespreken, is dat aangegeven met referenties naar de geraadpleegde stukken. Als onze bevindingen volgen uit de analyse van de databases, dan is dit ook benoemd. Anders dan in de verschilanalyses voor de rivieren (daar zijn uitvoerpunten op de as van de rivier gebruikt), zijn we in de verschilanalyse voor de Meren gebonden aan uitvoerpunten langs de oevers van de Meren.

Het vervolg van deze rapportage is opgebouwd uit drie blokken:

1. Benoemen verschillen tussen de verschillende generaties modellen

In hoofdstuk 3 staan de belangrijkste verschillen benoemd tussen eerdere generaties van de waterbewegingsmodellen en het nieuwe, zesde generatie model.

2. Betrouwbaarheid zesde generatiemodel (waargenomen bereik)

In hoofdstuk 4 gaan we in op de betrouwbaarheid van het zesde generatiemodel in het waargenomen bereik. Deze stellen we vast uit een vergelijking van de validatie van het vijfde en zesde generatie model met metingen. Voor het Markermeer en de Veluwerandmeren maken we gebruik van studieresultaten uit een verder verleden. In het waargenomen bereik, met dezelfde modelrandvoorwaarden of vergelijkbare modelrandvoorwaarden, is de verwachting dat deze modellen vergelijkbare validatieresultaten geven. Er is geen onderzoek beschikbaar naar de betrouwbaarheid in het extreme bereik. Hoewel je de modelbetrouwbaarheid voor het extreme bereik niet goed kan vaststellen, blijft het van belang om hier onderzoek naar te doen. Dit is een aanbeveling die in zijn algemeenheid blijft bestaan, ook voor de drie eerder genoemde watersystemen Rijn, Maas en Rijn-Maasmonding. Dit past echter niet binnen de scope van de huidige verschilanalyse.

Merk op dat het vijfde generatie model (WAQUA) beschikbaar is voor alle Meren, maar dat deze binnen WBI2017 niet overal een "BOI-status" hebben. Voor het Markermeer en de Veluwerandmeren zijn eerder (1997 en 2005) met een 'pre-baseline' generatie model productieberekeningen uitgevoerd. Zoals eerder gesteld, deze oude modellen zijn niet meer beschikbaar. De resultaten van deze oudere generaties zijn soms nog beschikbaar, zoals voor het Markermeer. Die resultaten zijn weliswaar gebaseerd op andere stormen, maar uit rapportages blijkt dat ze in het waargenomen bereik net zo goed presteerden als het zesde generatie model. Door een vergelijking te maken op basis van de gerapporteerde kalibratie en/of validatie resultaten krijgen we zicht op de belangrijkste verschillen in de simulatie van het bereik van de beschikbare metingen.

3. Verschillen tussen BOI2023 en WBI2017 (extreme bereik)

In zijn algemeenheid geldt dat tussen het zesde generatiemodel en het vijfde generatiemodel (of eerdere generaties) verschillen zitten, maar de meeste verbeteringen hebben naar verwachting een beperkte invloed op toepassing van het model voor BOI2023. De grootste drijvende kracht op de Meren is de modellering van de wind en dat is tevens waar zich naar verwachting nog de grootste kennisleemte voor deze watersystemen bevindt. In het verleden is onderzoek gedaan naar kleinschalige beschutting of grootschalige ruwheidseffecten (overgang van zee naar landinwaarts) en zijn keuzes gemaakt om een ruimtelijk verdeelde wind op te leggen aan de modellen in HR2001 en HR2006 (WL | Delft Hydraulics, 1997). In WT12011 (Kieftenburg en Chbab, 2012) is hiervan afgestapt voor het IJsselmeer, omdat er nog te veel onzekerheid bestaat rond de toepassing van deze kennis. Sindsdien is gewerkt aan het oplossen van deze kennisleemte (bijvoorbeeld WL | Delft Hydraulics, 1997; Verkaik, 2006; Caires, 2009; Sterl, 2019; Stijnen en Daggenvoorde, 2019; Rongen et al., 2021). Bij de start van BOI2023 is vastgesteld dat de onderzoeksresultaten nog niet die status hebben om deze toe te passen in de beoordeling (Oerlemans et al., 2022). Nieuw windonderzoek voor het IJsselmeergebied zal bij het KNMI moeten worden uitgevoerd (hopelijk want nog niet geaccordeerd). Betere modelleringen zijn eigenlijk alleen zinvol als dit windonderzoek is afgerond. De wind is de grootste bron van onzekerheid in het gebruik van de zesde generatie voor de Meren.

Zoals hiervoor benoemd, is een analyse waarin de verschillen stuk voor stuk worden geduid niet mogelijk (door het ontbreken van de mogelijkheid om nieuwe specifieke berekeningen voor de verschilanalyse uit te voeren). Wat wel kan, is de verschillen tussen BOI2023 en WBI2017 inzichtelijk maken. Dit doen we in hoofdstukken 5 (benoemen verschillen met eerdere modelgeneraties) en 6 (effecten op de waterstand van de benoemde verschillen). Hoewel we deze verschillen niet stuk voor stuk kunnen duiden, zijn wel een aantal duidelijke oorzaken voor deze verschillen aan te geven. Door een vergelijking te maken op basis van de beschikbare databases uit BOI2023 en WBI2017 krijgen we voor een groot aantal locaties en belastingcombinaties zicht op de belangrijkste verschillen in de simulatie van het extreme bereik.

Voordat we verder gaan met de nadere uitwerking, geven we eerst een beknopte historie van de hydraulische belastingen van de Meren om de complexiteit van de vergelijking met het zesde generatiemodel te duiden.

2.3 Historie

Deze paragraaf geeft een beknopt overzicht van de geschiedenis van de hydraulische belastingen op de Meren zoals beschreven in Lodder (2006).

2.3.1 HR1996

In 1996 zijn voor het eerst officiële hydraulische belastingen opgeleverd in het kader van de Wet op de waterkering (staatsblad 1996 8). In de HR1996 werden voor de dijkkringgebieden langs het IJsselmeer nog minimaal benodigde kruinhoogten voorgeschreven. Deze minimaal benodigde kruinhoogten werden bepaald door RWS RIZA met het computer programma PEILOF. Vanwege de hoogwaterproblemen van 1993 en 1995 is in 1995 besloten de dijkversterkingen in het kader van het Deltaplan Grote Rivieren versneld uit te voeren. Voor de dijkversterkingen langs het IJsselmeer en Ketelmeer diende hiertoe PEILOF uitgebreid en geactualiseerd te worden. In 1999 is Hydra-M vastgesteld voor de bepaling van de hydraulische belastingen en zijn de benodigde kruinhoogten uit 1996 vervangen. De nieuw met Hydra-M berekende belastingen zijn wettelijk vastgelegd. Voor de dijkringen grenzend aan het Markermeer, Gooimeer en Eemmeer zijn in HR1996 geen hydraulische belastingen opgenomen omdat het Markermeer destijds niet werd geclassificeerd als buitenwater.

2.3.2 OOM-Studie

Bij de voorbereiding van de Wet op de waterkering uit 1996 (Staatsblad 1996-8) kwam de vraag naar voren of het Markermeer aangemerkt moest worden als buitenwater. Naar aanleiding van deze vraag is in 1997 het Onafhankelijk Onderzoek Markermeer, de OOM-studie, gestart. De OOM-studie had als doel adequate technische en bestuurlijke argumenten te leveren aan diegenen die uiteindelijk moeten beslissen of het Markermeer wel of niet als buitenwater in de Wet op de Waterkering moest worden opgenomen. De OOM-studie heeft er toe geleid dat het Markermeer is aangewezen als buitenwater. Een van de bijproducten van de OOM-studie is een instrumentarium gebaseerd op Hydra-M en Delft2D, waarmee de toetsing op het Markermeer kon worden uitgevoerd. Later is dit instrumentarium opgenomen in de HR2001. De resultaten van de OOM-studie zijn de bron van een groot gedeelte van de databases fysica van de voorgaande beoordelingsronde (WBI2017). Zij staan beschreven in de deelrapporten behorende bij fase 1 t/m 5 van de OOM-studie (WL | Delft Hydraulics, 1997).

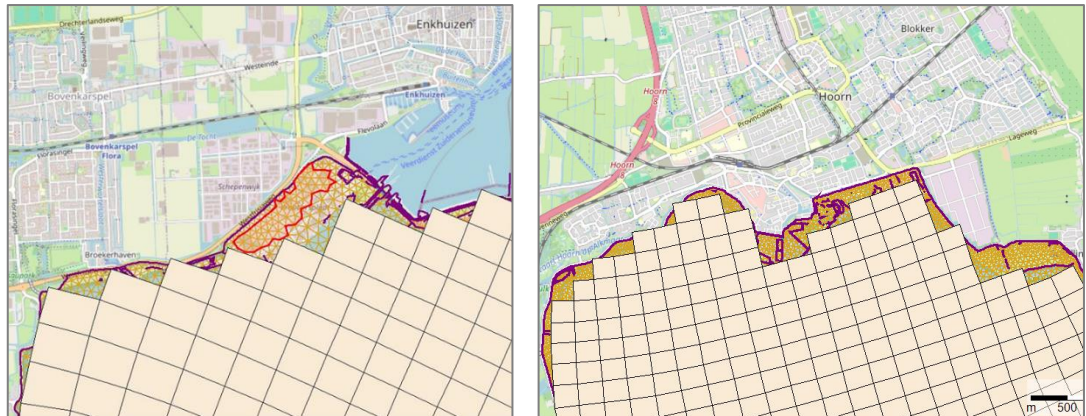


Figuur 1 Vergelijking rekenrooster Markermeer (een versie) uit de OOM-studie t/m HR2006 en het zesde generatie model (Bak, 2024).

2.3.3 HR2001

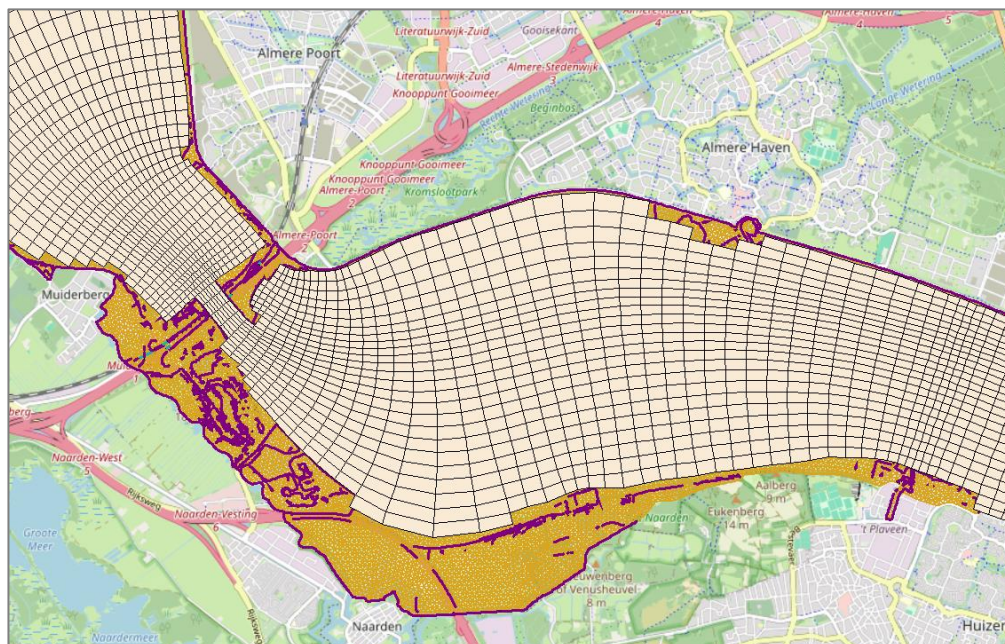
In 2001 zijn de in 1999 herziene belastingen voor het IJsselmeer en Ketelmeer opgenomen in de HR2001. Door de aanwijzing van het Markermeer als buitenwater kreeg het Rijk de verplichting om hydraulische belastingen op te leveren voor het Markermeer, Gooimeer, Eemmeer, het Nijkerkernauw en de Eem. In HR2001 zijn voor het eerst belastingen opgenomen voor deze meren. De rekenresultaten zijn, na een extra kwaliteitsborging, overgenomen uit de OOM-studie.

De OOM-studie was met name gericht op het beantwoorden van de vraag of het Markermeer als buitenwater moest worden aangewezen, waarvoor kon worden volstaan met een vrij grofmazige modellering van het Markermeer. Daarbij is weinig aandacht besteed aan de relatief moeilijk te modelleren en voor de doelstelling minder belangrijke, omgeving van de Gouzee en de Eem (Figuur 1). Dit heeft ertoe geleid dat deze gebieden beperkt (de Gouzee en de Eem) alsnog zijn opgenomen in de modellering. Deze gebieden zijn daarom niet opgenomen in de HR2001. Aanvullend zijn later in een (afzonderlijk) project door Deltares (onder leiding van Ingenieursbureau Amsterdam) hydraulische belastingen afgeleid voor IJburg. Later werd ook duidelijk dat delen nabij de primaire kering bij Hoorn en Enkhuizen niet binnen de begrenzing van het rekenrooster lagen (Bak, 2024).



Figuur 2 Vergelijking rekenrooster Markermeer uit de OOM-studie en het zesde generatie model (Bak, 2024), links detail bij Enkhuizen en rechts een detail bij Hoorn.

Aan de zuidwestkant van het Gooimeer (Muiderberg-Huizen) ontbreekt een strook land in het rooster van het oude model. Er is destijds gemodelleerd tot aan de rijksweg A1. Aan weerszijde van de Hollandsebrug wordt in de zesde generatie modellering veel gedetailleerder (ruimer) geschematiseerd. Aan de overkant bij Almere-haven is dit ook het geval (Figuur 3).



Figuur 3 Vergelijking rekenrooster Markermeer uit de OOM-studie en het zesde generatie model (Bak, 2024), detail bij Hollandse brug.

2.3.4 HR2006

Voor de Eem en de Gouwe heeft Rijkswaterstaat nieuwe productiebeperkingen uitgevoerd (Lodder, 2006). De hieruit volgende resultaten zijn gebruikt als representatieve hydraulische belastingen voor de tweede beoordelingsronde. In 1998 heeft het Ingenieurs Bureau Amsterdam aan WL | Delft Hydraulics en Witteveen & Bos gevraagd belastingen te bepalen voor het ontwerp van IJburg (Delft Hydraulics & Witteveen+Bos, 2005). Het samenvoegen van de resultaten van HR2001, de verbeterde berekeningen voor de Eem en de Gouwe en de projectberekeningen voor IJburg heeft geresulteerd in databases fysica die tot op heden (WBI2017) worden gebruikt. De ontwerprandvoorwaarden zijn door de combinatie WL-W+B opgeleverd in de vorm een specifiek Hydra-M model t.b.v. IJburg en toegevoegd aan de databases (Delft Hydraulics & Witteveen+Bos, 2005).

In 2008 zijn voor de primaire keringen langs de Veluwerandmeren, de Grevelingen en het Volkerak-Zoommeer hydraulische belastingen berekend met een WAQUA model (RWS, 2008). Voor de Randmeren is het gebruikte waterbewegingsmodel opgebouwd met Baseline versie 3.3 (Wijbenga et al., 2004). Voor de Grevelingen en het Volkerak-Zoommeer zijn destijds voor de productieberekeningen modellen gebruikt die zonder Baseline zijn opgebouwd, dit is terug te lezen in respectievelijk Lieveense (1998) en Lieveense (2002). De uitgangspunten van de set productieberekeningen en de probabilistische berekeningen is terug te lezen in Van Veen en Sloopjes, 2008a, 2008b en 2008c.



Figuur 4 Locaties in de databases fysica van het Markermeer:

- blauwe locaties (=HR2006) langs normtrajecten 13a-1, 44-2, 45-2, 46-1 en de Nijkerkersluis,
- groene locaties (=HR2001 = OOM) langs overige normtrajecten.

2.3.5 WBI2017

De HR2006 Marker-, Gooi- en Eemmeer komen grotendeels overeen met die uit de HR2001, aangevuld met hydraulische randvoorwaarden voor de omgeving van de Gouwe en de Eem. In Figuur 4 is een indeling gemaakt van de locaties in de databases fysica van WBI2017, waarbij verondersteld wordt dat de blauwe locaties in HR2006 zijn aangeleverd.

In WBI2017 zijn deze gegevens opnieuw opgenomen in de databases fysica voor de berekening van de hydraulische belastingen. De motivatie hiervoor was dat met het uitkomen van de HR2001 voor het Markermeer grote stappen voorwaarts waren gezet t.o.v. het Randvoorwaardenboek 1996. Hiermee was voor het Markermeer destijds de meest geavanceerde methode van Nederland toegepast om belastingen te kwantificeren. Sindsdien is er weinig aanleiding geweest om de productieberekeningen voor waterstanden aan te passen (de waterstandsrelevante fysica van het watersysteem kende weinig veranderingen). De probabilistische berekening is wel aangepast, o.a. door de toepassing van modelonzekerheden, de introductie van Hydra-NL en (later) Riskeer en de wijziging van statistiek van de basisstochasten.

Voor de Veluwerandmeren zijn voor WBI2017 ook geen nieuwe productieberekeningen gemaakt: database fysica van de derde toetsronde voor de randmeren komen overeen met die van HR2006.

Voor de Grevelingen en het Volkerak-Zoommeer zijn voor WBI2017 wel nieuwe productieberekeningen gemaakt met het vijfde generatie instrumentarium (Kuiper et al. 2014). Voor WBI2017 is gekozen om het Volkerak-Zoommeer niet langer als alleen een 'Meren'-systeem te beschouwen. Door de inzet van het meer als waterberging voor de Rijn-Maasmonding veranderen de hydraulische belastingen langs het meer. Bij inzet van de waterberging worden de waterstanden en de golfcondities gedomineerd door de basisstochasten van de Rijn-Maasmonding (zeewaterstand, rivierafvoer en wind). In situaties zonder inzet van de berging zijn de basisstochasten van de Meren (meerpeil en wind) dominant. In de huidige verschilanalyse gaan we in op de situaties zonder inzet. Deze data kwam in 2020 (Duits, 2020; Kuijper en Pleijter, 2020) beschikbaar in een nabewerking van de eerder opgeleverde resultaten van WBI2017.

3 Verschillen ‘pre-baseline’ (oudere), vijfde en zesde generatie

3.1 Inleiding

Bij de ontwikkeling van Watermodellen voor RWS worden vijf modelonderdelen (bouwstenen) onderscheiden:

- 1 Software
- 2 Rekenrooster
- 3 Schematisatie
- 4 Modelrandvoorwaarden
- 5 Modelleringsconcepten

Met deze vijf modelonderdelen kan een basismodel worden ontwikkeld. In de verschillende toepassingen kunnen vervolgens eventueel twee extra modelonderdelen worden toegevoegd:

- 6 Procesmanager
- 7 Database

Een nieuwe ontwikkeling, een nieuwe generatie watermodellen, wordt bij voorkeur met een ritme van ongeveer één keer per zes jaar uitgevoerd. Het ritme van zes jaar is gebaseerd op het regelmatig toepassen van geaccepteerde nieuwe kennis en technieken, de toepassing voor een nieuwe BOI-ronde, de beschikbare middelen en omgevingsfactoren. Zoals hiervoor is toegelicht, is van deze tijdsperiode voor het Markermeer en de Veluwerandmeren afgeweken en wordt nu een inhaalslag gemaakt.

Bij het opzetten van een nieuwe modelgeneratie wordt gestreefd naar de ontwikkeling van een generiek modelinstrumentarium, dat geschikt is voor meerdere toepassingen (o.a. operationele voorspellingen, vergunningverlening, beleidsvragen). Hierbij wordt, zoveel als mogelijk, rekening gehouden met de compatibiliteit en consistentie tussen de modellen voor de verschillende processen. Hiervoor zijn generieke specificaties opgesteld, waarin de verschillende keuzes voor het opzetten van de zesde generatie modellen zijn vastgelegd (Minns, Spruyt en Kerkhoven, 2022). Deze specificaties worden continu bijgewerkt op basis van de meest recente inzichten en ontwikkelingen.

Bij de ontwikkeling van een nieuwe generatie kunnen alle vijf modelonderdelen worden gewijzigd. Door nieuwe kennis en technieken toe te passen in het basismodel wordt een consistent, actueel en ‘state-of-the-art’ basismodel verkregen voor alle toepassingen van Rijkswaterstaat. Per toepassing kan het noodzakelijk zijn om een modelonderdeel aan te passen of toe te voegen. Welke modelonderdelen wel en welke niet voor de toepassingen aangepast mogen worden, staat beschreven in het “Kader Toepassing Netwerkmodellen Water en Scheepvaart” (RWS, 2021)³. Voor meer informatie over de werkwijze, tijdlijnen, toepassingen en de procedure voor het inzetten van nieuwe modellen verwijzen we naar dit Kader. Het Kader is een uitwerking van de in februari 2010 door Rijkswaterstaat, Directoraat-generaal Water en Bodem, Hoofddirectie Juridische Zaken en Programma Directie Ruimte voor de rivier gemaakte afspraken, met instemming van de toenmalige Staatsecretaris van Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat vastgelegd in het Protocol Netwerkmodellen.

³ <https://standaarden.rws.nl/link/standaard/3416>

Bij het ontwikkelen en actualiseren van modellen wordt het “Kader Toepassing Netwerkmodellen Water en Scheepvaart” gevolgd.

In het vervolg van hoofdstuk 3 gaan we nader in op de vijf genoemde modelonderdelen van het basismodel.

3.2 Software

De kern van de D-HYDRO Suite is de D-Flow Flexible Mesh module (D-Flow FM) waarmee eendimensionale (1D), tweedimensionale (2D) en driedimensionale (3D) hydrodynamische simulaties gemaakt kunnen worden op ongestructureerde roosters (Kernkamp et al., 2005, Kernkamp et al., 2011). D-HYDRO is het modelleringsplatform voor (gekoppelde) hydrodynamica, morfodynamica, waterkwaliteit en golven. Deze software-suite is de vervanger van het door RWS gebruikte SIMONA (WAQUA, TRIWAQ), Delft2D en Delft3D.

De overgang naar de D-HYDRO Suite houdt in dat bij het opzetten van nieuwe modelschematisaties gebruik gemaakt kan worden van de nieuwe mogelijkheden en concepten van deze software. Het gebruik van de D-HYDRO Suite biedt op diverse vlakken nieuwe kansen, die niet bij SIMONA, Delft2D of Delft3D-FLOW aanwezig waren. Het gaat hier o.a. om de verbeterde modelleerflexibiliteit, gebruik van een flexibel rekenrooster, roosteronafhankelijke invoer, andere modelconcepten en betere afstemming tussen waterbeweging, golven, morfologie en waterkwaliteit. Deze vernieuwingen maken het mogelijk om details bij havens, bruggen, kreken en slikken nauwgezet te schematiseren, waardoor de vertaling van de geometrie naar de modellering eenduidiger wordt. De overgang naar een nieuw software pakket past daarbij in de reguliere update-cyclus van de modelschematisaties waarin geaccepteerde nieuwe data, kennis en technieken worden toegepast.

Advectie⁴ is één van de belangrijkste termen in de natuurkundige stromingsvergelijkingen. Het beschrijft de snelheid van het (horizontale) transport van water. Daarom is het zo nauwkeurig mogelijk uitrekenen van advectie vooral belangrijk als de verschillen in stroomsnelheid groot zijn. Uit een eerdere studie (Platzek, 2019) blijkt dat de advectieschema's van zowel SIMONA (hier: WAQUA) als D-HYDRO Suite (hier: D-Flow FM Perot1/2) wiskundig gezien consistent, nauwkeurig en robuust zijn. Het schema van WAQUA is iets nauwkeuriger (d.w.z. de numerieke discretisatiefout is kleiner) voor 2D-stroming met gestructureerde roosters. Het is echter niet geschikt voor ongestructureerde roosters en 3D berekeningen en kan daarom niet worden toegepast binnen de D-HYDRO Suite. In D-Flow FM wordt de berekening van de advectieterm “expliciet” uitgevoerd. Dit introduceert een beperking van de rekentijdstep. De rekenstep wordt automatisch ingesteld op basis van het Courant criterium (deze is afhankelijk van de stroomsnelheid en de grootte van de rekencellen) en is in de huidige software implementatie van D-Flow FM globaal (voor het hele rekenrooster) opgelegd. In WAQUA wordt een ander rekenschema gebruikt (ADI – Alternating Direction Implicit), waardoor de tijdstep anders wordt beperkt door de numerieke stabiliteit binnen een berekening. WAQUA levert een numeriek stabiele oplossing, maar als de tijdstep te groot gekozen wordt, kunnen de resultaten onnauwkeurig(er) worden.

Destijds is in de OOM-studie van het Markermeer (WL | Delft Hydraulics, 1997) een beschouwing over het Courantgetal gemaakt voor de keuze van de meest geschikte tijdstep en is gekozen voor 1 minuut. Halvering van deze tijdstep had geen effect op de waterstanden, alleen de stroomsnelheden weken af tot een maximum van 0,007 m/s. Voor het Volkerak-Zoommeer domein van de vijfde generatie is een rekentijdstep van 15 s gekozen.

⁴ Advectie is transport van een eigenschap of massa door bulkbeweging een vloeistof. Naast advectie bevatten de stromingsvergelijkingen termen voor krachten en/of versnellingen (zowel positief, als negatief in de vorm van stromingsweerstand) en vaak ook voor menging.

Dit impliceert Courant getallen van ongeveer 10 in het Volkerak en ongeveer 20 in het Schelde-Rijnkanaal. Uit nauwkeurigheidsoverwegingen moet het Courant getal in principe kleiner zijn dan de waarde 5 à 10 (WL | Delft Hydraulics, 1997). De relatief hoge waarde in het Schelde-Rijnkanaal is een gevolg van de kleine roostergrootte in dwarsrichting. Voor de zesde generatie (D-Flow FM) waterbewegingsmodellen zijn zowel de gebruikte numerieke methoden voor discretisatie van de ondiep water vergelijkingen met een ruimtelijke rooster en tijdsintegratie van continuïteits- en impulsvergelijking als de methoden om de ruimtelijke roosters te genereren anders dan in de vijfde generatiemodellen (of eerdere generaties). Tijdens de modelbouw van de zesde generatie is minstens dezelfde numerieke nauwkeurigheid gehaald als de vijfde generatie modellen binnen een praktische bruikbare rekentijd op gangbare moderne hardware.

- Het vijfde generatie WAQUA model van de Markermeer is voor een laag aantal cores zo'n 3 tot 4 keer sneller dan het zesde generatie D-Flow FM model (Genseberger et al., 2019). Een optimale rekentijd voor het vijfde generatie model van het Markermeer wordt verkregen bij partitionering over 16 cores, door het zesde generatie te verdelen over 96 cores worden vergelijkbare rekestijden verkregen. Dit is te verklaren door het aantal rekencellen van de twee Markermeer (deel)modellen: voor het zesde generatie model is dat een factor 3.5 groter.
- Het vijfde generatie WAQUA model van de Grevelingen is voor 4 cores geoptimaliseerd. Hierbij zijn 4 partities op 4 cores gedraaid. In Minns en Aguilar (2015) is aangegeven dat de rekentijd ca. 7 minuten per 24 uur simulatietijd bedraagt. De rekentijd voor het zesde generatie D-Flow FM model bij dagelijkse omstandigheden is 3,4 minuten per 24 uur simulatie (Groenenboom et al., 2020). De gemiddelde tijdstap in de simulatie is hierbij ongeveer 20 seconden. Het berekenen van extremere condities leidt echter tot langere rekestijden vanwege de automatische tijdstapbeperking. Deze rekestijden voor het zesde generatie model gelden bij een opdeling van het rekendomein in 8 partities op 2 nodes.
- Het vijfde generatie WAQUA model van het Volkerak-Zoommeer is voor 4 cores geoptimaliseerd. Hierbij zijn 4 partities op 4 cores gedraaid. In Kuiper et al. (2014) is aangegeven dat de rekentijd 5 minuten per 24 uur simulatie bedraagt. Het zesde generatie D-Flow FM model is met 8 partities gedraaid op 2 nodes. De rekentijd op basis van deze configuratie is 2,75 minuten per 24 uur simulatie (Van der Lugt et al., 2021).

Een dergelijke vergelijking van benodigde rekestijden is strikt genomen alleen mogelijk als dezelfde of vergelijkbare hardware is gebruikt. Dat is hier niet het geval. De gegeven opsomming geeft wel een beeld van de benodigde rekentijd voor de toepassing van de zesde generatie in vergelijking met rekestijden waarmee in het verleden rekening is gehouden. Gesteld kan worden dat de rekestijden voor de Grevelingen en het Volkerak-Zoommeer vergelijkbaar zijn, of halveren als de hardware capaciteit verdubbeld wordt. De rekestijden voor het Markermeer/Veluwerandmeren zijn ongeveer 3 keer groter, welke verkleind kan worden door meer hardware. Doordat de software de rekentijdstap automatisch limiteert op basis van (numerieke) stabiliteitscriteria varieert de rekentijdstap tijdens de simulatie. Er zit echter een maximum aan deze rekentijdstap, dat kan worden opgegeven als modelinvoer. Het limiteren van de automatisch bepaalde rekentijdstap tot een maximum zorgt ervoor dat de modelberekening kleinere en meer tijdstappen nodig heeft, waardoor de numerieke oplossing in theorie nauwkeuriger kan worden. Het verlagen van de maximale rekentijdstap van 60 naar 30 seconden in het zesde generatie model van de Grevelingen had geen grote invloed op de rekentijd. Het model beperkte zelf automatisch de tijdstap al naar tijdstappen van meestal 15 tot 30 seconden met enkele uitschieters tot 60 seconden. Een verdere verkleining van de maximale rekentijdstap naar 15 seconden gaf geen duidelijk betere modelresultaten, maar had wel een substantiële invloed op de rekentijd. Er is daarom gekozen om de maximale rekentijdstap op 30 seconden te zetten voor het zesde generatiemodel van de Grevelingen (Groenenboom et al., 2020). Voor de andere Meren zijn soortgelijke analyses uitgevoerd.

3.3 Rekenrooster

Het rekenrooster is het fundament van het model en is zeer bepalend voor de nauwkeurigheid in bijvoorbeeld havens en uithoeken van de Meren, de toepasbaarheid en de rekentijd van een model.

Vijfde generatie

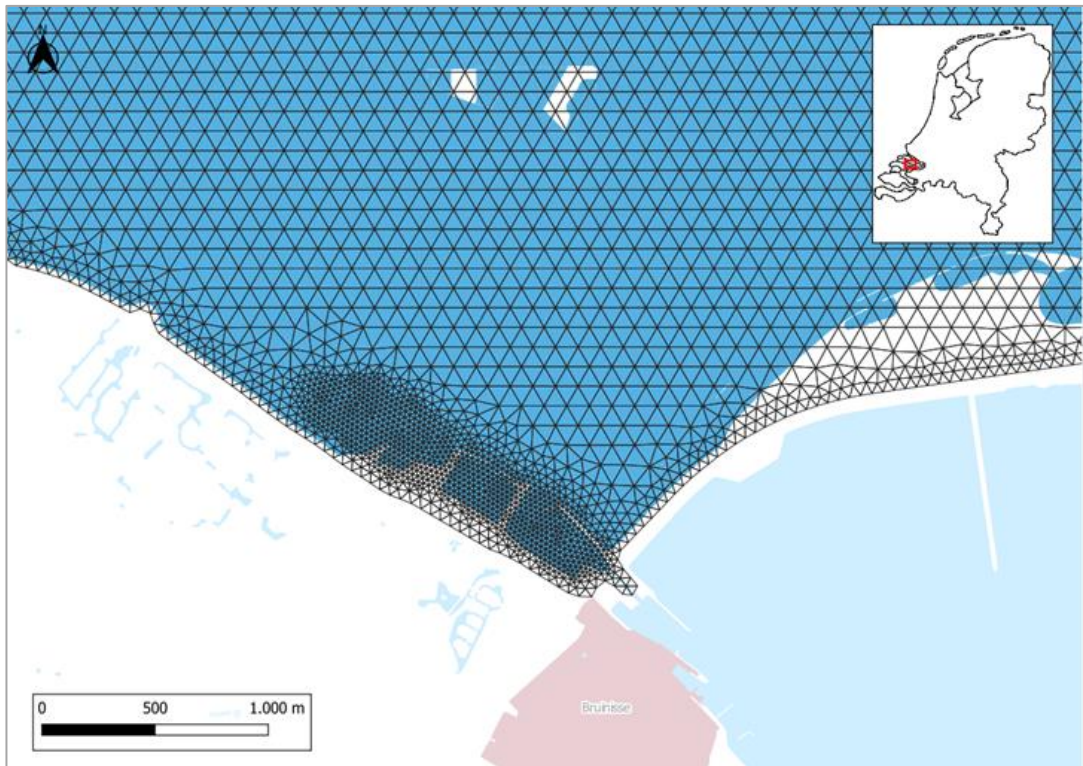
Binnen de vijfde generatie modelschematisaties (WAQUA) kan alleen gebruik gemaakt worden van een gestructureerd curvi-lineair (of desgewenst rechthoekig) rooster vanwege het gebruikte numerieke ADI rekenschema. Dit betekent dat alle cellen curvi-lineair zijn en ze allemaal vier buurcellen moeten hebben (afgezien van droge cellen). Deze restricties zorgen ervoor dat de onderliggende wiskundige vergelijkingen efficiënter opgelost kunnen worden (*staggered* rooster en ADI methode), omdat geen sprake is van veelhoeken maar alleen vierhoeken. Dit geeft echter beperkingen aan het kunnen volgen van geometrische aspecten die belangrijk zijn voor de stroming in uithoeken van of in havens langs de Meren. Hierbij speelt vooral dat de stroming minder goed gevolgd kan worden, met extra numerieke weerstand tot gevolg. Voorbeelden hiervan zijn gegeven in Figuur 1, Figuur 2 en Figuur 3.

Zesde generatie

Eén van de belangrijkste aspecten in de ontwikkeling van D-HYDRO is het gebruik van een flexibel, ongestructureerd rooster. Centraal in de opzet van het ongestructureerde rooster voor de zesde generatie modellen staan daarom de extra mogelijkheden om het rooster uit te lijnen met de stroming en de geometrie van de Meren. In 2016 is in het kader van het zesde generatie instrumentarium een pilot verricht voor het Markermeer. Daarin is gekeken naar welke roosterresolutie nodig is in het gehele Markermeer om voldoende detail te krijgen bij de dijk (Genseberger, 2016) en is een strategie bepaald voor het genereren van het rooster. Bij het uitlijnen van het rooster in de zesde generatie is verder rekening gehouden met overige belangrijke stroomlijnen (aansluiting bij havens en sluizen, etc.). Gekozen is voor een niet uniform *boundary fitted* rekenrooster met driehoekige⁵ rekencellen met voldoende resolutie van 50 m bij de dijk en waar mogelijk een vergroving naar 400 m in het midden van het meer om zo optimaal mogelijk te rekenen: zo hoog mogelijke resolutie waar nodig, met een zo laag mogelijke rekentijd. Voor de Veluwerandmeren is een niet uniform *boundary fitted* rekenrooster gebruikt met driehoekige rekencellen van 50 m, vanwege de smalle doorgangen bij Harderwijk (aquaduct en een doorstroombare haven) is alleen daar geleidelijk verfijnd tot lokaal 5 m. Bij de Grevelingen en het Volkerak-Zoommeer is een andere strategie toegepast die uitging van een overall uniform rekenrooster met driehoekige rekencellen met lokale verfijningen. De detaillering van het rooster nabij de oevers van de Meren, de havens en vernauwingen (doorstroomopeningen) is daardoor aanzienlijk toegenomen t.o.v. de vijfde generatie (en eerdere generaties). In Figuur 5 is hiervan voor het rooster van de Grevelingen een voorbeeld van gegeven. Door de zesde generatie is het mogelijk om de haven van Bruinisse met aanzienlijk meer detail te schematiseren.

De inspanning die bij de roostergeneratie is besteed om een zo optimaal mogelijke verhouding van nauwkeurigheid versus rekentijd versus toepassingsgebieden te verkrijgen, betaalt zich terug in alle simulaties die vervolgens met het model gemaakt worden.

⁵ Voor het op kleine schaal goed kunnen volgen van de rivier de Eem zijn curvi-lineaire rekencellen gebruikt.



Figuur 5 Detail rond Bruinisse van rekenrooster van zesde generatie instrumentarium voor de Grevelingen.

3.4 Modelleringsconcepten

Viscositeit

D-HYDRO en WAQUA lossen de ondiepwatervergelijkingen op voor een niet-samendrukbare vloeistof. Over het algemeen is het expliciet modelleren van alle turbulente bewegingen geen haalbare kaart omdat daarvoor extreem kleine roostercellen en tijdstappen noodzakelijk zijn. Om het effect van turbulente processen toch te kunnen meenemen bij het modelleren, worden deze opgelost op 'sub-grid' niveau. De grootte van deze effecten zijn over het algemeen afhankelijk van de gridcelgrootte en de lokale gradiënten in de stroomsnelheid.

In WAQUA kan hiervoor een turbulentieviscositeit (EDDYviscositycoëfficiënt) worden ingesteld. Hierbij is voor de vijfde generatie modellen van RWS (gelijk aan de vierde generatie) standaard een vaste waarde van $1.0 \text{ m}^2/\text{s}$ gebruikt (Uittenbogaard et al. 2005). In de zesde generatie modellen voor de Meren is een vaste standaard waarde van $0,1 \text{ m}^2/\text{s}$ aangehouden gecombineerd met een Smagorinsky parameter met de waarde 0,2 (Minns et al. 2019).

Overlaatformulering

Overlaten zijn in het model aanwezig langs oevers, strekdammen, waterfronten in stedelijke gebieden (bijv. tussen Harderwijk en Elburg), of bij eilanden en voorlanden (zoals in de Grevelingen) en hebben invloed op de simulatie van de waterbeweging. Er zijn grote delen in de modellen van de Meren waar de keuze voor *het type* overlaatformulering er weinig toe doet. In de Meren-modellen zijn veel minder overlaten aanwezig dan in de riviermodellen en is er in het algemeen ook geen grote afvoer over de overlaten, dus zijn de effecten van de overstap naar een andere overlaatformulering bij de Meren naar verwachting veel kleiner dan in de riviermodellen (Spruyt et al., 2023a en 2023b). Vanwege belang van deze aanpassing voor alle modellen van de zesde generatie, bespreken we hier de wijziging wel met voldoende aandacht.

Vanwege de gebruikte roosterresolutie kunnen niet alle lijnelementen (lijnvormige verhogingen zoals kaden, kribben, scherpe bodemsprongen) in de bodem worden meegenomen. Er wordt daarom in de zesde generatie modellen, net als in de vijfde generatie, een subgrid aanpak toegepast waarin deze lijnelementen, overlaten, als zogeheten 'fixed weirs' in het model worden opgenomen. Hierbij wordt een energieverlies uitgerekend met een extra formule. De grootte van het energieverlies is afhankelijk van de kruinhoogte boven de bodem van de overlaat, de taludhelling, de overlaatbreedte, waterstanden boven- en benedenstrooms van de overlaat en de afvoer over de overlaat. De energieverliezen veroorzaken een opstuwung en leiden tot hogere waterstanden.

In de vijfde generatie ging dit met de zogenaamde *Tabellenboekmethode*. Deze methode is gebaseerd op experimenten uit 1968 waarvan de onderliggende data verloren zijn gegaan. Bovendien kent de Tabellenboekmethode maar één vorm van een overlaat (met een taludhelling van 1:4 en een kruinbreedte van 3 meter) en kan daardoor het aanpassen van de vorm van havendammen / overlaten / kribben niet meenemen. Mede hierdoor is in de opzet van de zesde generatie modellen overgestapt op de *Villemonte* aanpak.

De *Villemonte* aanpak is, net als de Tabellenboekmethode, ook een empirische formulering, maar dan gebaseerd op meerdere experimenten en met de technische mogelijkheid om de vorm van de overlaat mee te nemen⁶. Deze formule is ook binnen WAQUA beschikbaar, maar is tot nu toe nog niet in de officiële RWS-modellen toegepast. Een dergelijke wijziging had betekend dat alle modellen opnieuw moesten worden gekalibreerd. Zowel Tabellenboek als Villemonte geven op basis van een beperkt aantal beschikbare praktijkmetingen tijdens het hoogwater van 2011 op de Waal resultaten die onderling enkele centimeters verschillen en beiden een plausibele overeenkomst vertoonden met de metingen (De Goede, 2011).

Er is daarnaast aanvullend modelonderzoek uitgevoerd over hoe beide formuleringen zich gedragen buiten dit bereik en in het bijzonder voor de voor BOI relevante extreme afvoeren op rivieren, zowel vanuit de fysica als de numerieke implementatie (Chavarrías, 2023). Hieruit is gebleken dat de huidige Villemonte-formulering voor de omstandigheden (bij hoge afvoeren) op de Waal tot hogere energieverliezen leidt dan Tabellenboek. Voor andere omstandigheden kan Villemonte echter ook lagere energieverliezen opleveren. Daarnaast neemt het verschil tussen Villemonte en Tabellenboek (zoals verwacht) af voor hele grote afvoeren, omdat het energieverlies naar nul gaat voor toenemende verdrinkingsgraad van de overlaat. Deze verschillen spelen vooral als de stroming 'loodrecht' op de overlaat staat. Zowel in D-HYDRO als in WAQUA wordt op een 'identieke' manier het energieverlies door overlaten berekend, maar er zijn wel verschillen in het modelleringsconcept voor overlaten. In D-HYDRO worden de advectietermen uitgezet in flow-links met overlaten, terwijl die in WAQUA wel toegepast werden. Ook de discretisaties voor de advectietermen in D-HYDRO en WAQUA verschillen van elkaar. Voor beide is een onderbouwing te geven. Daarnaast worden in WAQUA schuine overlaten en kribben op een net iets andere manier afgehandeld dan 'gewone' overlaten, terwijl in D-HYDRO alle overlaten op dezelfde manier worden afgehandeld.

3.5 Schematisatie

De onderliggende geometrie en ruwheid (o.a. vegetatie) zijn bij het simuleren van de waterbeweging in de Meren van belang voor de uitkomsten van een model, net als bij riviermodellen. Voor de opzet van een modelschematisatie wordt, net als bij riviermodellen, gebruik gemaakt van de geometrische gebiedsbeschrijving zoals deze opgenomen is in de Baseline-schematisaties. Een dergelijke gebiedsschematisatie kan vervolgens door Baseline worden geconverteerd naar invoer voor een hydrodynamisch model. Net als voor de Rijntakken, de Maas en de Rijn-Maasmonding beschrijft de onderliggende Baseline informatie voor de zesde generatie zo goed mogelijk de geometrie van de Meren op basis van beschikbare gegevens van de situatie tot en met 2019.

Voor alle Meren zijn kleine updates van de gegevens in Baseline (bijvoorbeeld actuele bodemgegevens) toegepast t.o.v. de vijfde generatie. Door wijziging van het modelrooster (paragraaf 3.3) komen die op een andere wijze in de modelschematisatie terecht. Grote aanpassingen van de schematisatie zijn doorgevoerd bij het Markermeer (bodemgegevens en actualisatie IJburg en Marker Wadden) en de Veluwerandmeren (verkleining van het meer met 4 km in het noordoosten met de nieuwe Reevesluis en Reevedam). De Grote Hop – zanddijk voor de primaire waterkering tussen Enkhuizen en Hoorn – is niet in het zesde generatie model opgenomen, omdat de contouren hiervan in 2020 nog niet bekend waren. Afgezien van het modelrooster zijn de schematisaties van de Grevelingen en het Volkerak-Zoommeer niet wezenlijk veranderd. De opbouw van de zesde generatie modelschematisaties is terug te vinden in de ontwikkeling en actualisatie van de modellen in Genseberger et al. (2019), Groenenboom et al. (2020) en Van der Lugt et al. (2021).

Naast actuele modellen wordt in de processen van RWS ook gebruik gemaakt van beleidsmodellen (zogenoeten BenO-modellen) die een (toekomstige) situatie representeren. In deze modellen worden naast alle verleende vergunningen ook alle planmaatregelen meegenomen die een officiële status hebben en waarvan het dus (vrij) zeker is dat ze worden uitgevoerd. De vegetatie heeft zeer beperkte invloed op de waterstanden op de Meren en daarom is voor de Meren geen Vegetatielegger opgesteld en dus ook niet beschikbaar. Voor de meest actuele beno-schematisatie, die ook voor BOI wordt toegepast, is de peildatum 2035. Voor Markermeer is daarom voor Markerwadden en een stukje Houtribdijk een verwachte toekomstige situatie opgenomen in het zogenaamde BenO model. Het zijn planmaatregelen die in de productieberekeningen voor BOI2023 worden meegenomen. Van IJburg zijn alleen de aangelegde eilanden (en niet de toekomstige) in het model opgenomen. Voor de andere Meren is geen BenO model gemaakt (omdat hiervoor geen vergunningen en planmaatregelen bekend zijn) en wordt de actuele schematisatie in de productieberekeningen toegepast.

3.6 Modelrandvoorwaarden

Voor alle zesde generatie modellen voor de Meren zijn de laterale bronnen direct omgezet uit het overeenkomstige vijfde generatie (WAQUA) model. Voor de precieze reeksen die zijn opgelegd wordt verwezen naar de modelbouw rapportages (Minns en Gaytan Aguilar, 2015 en Kuiper et al., 2014). In het verleden zijn de afstromingsdebeten, neerslag, verdamping en correcties via enkele onttrekkings- en lozingspunten opgelegd aan de hydraulische modellering. In het zesde generatie model wordt dit opgelegd door de debieten te verspreiden over een groot deel van het modeldomein o.b.v. een polygoon. Dit heeft als voordeel dat er geen opgeloste stoffen uit het model onttrokken worden bij verdamping, iets wat ongewenst is voor het modelleren van bijv. zout en waterkwaliteitsparameters. De voorheen gebruikte methode om het te veel aan 'verdamp'/onttrokken zout (of andere stoffen) terug te brengen in het model, is daardoor nu niet meer nodig.

Er zijn simulaties gemaakt met zowel uniforme wind als ruimtelijk variërende wind, zoals dat in het verleden ook is toegepast. Op het Eem- en Gooimeer (Oerlemans et al., 2022) wordt een windreductie-factor van 0 - 10% gehanteerd (0% bij de Hollandse brug en 10% bij Nijkerk) en op alle Veluwerandmeren zou een constante reductiefactor van circa 15% moeten worden gebruikt (Bottema, 2021). De winddragformulering (Smith & Banke) en de luchtdichtheid zijn wel anders ingesteld dan in het verleden, namelijk volgens de generieke D-HYDRO specificaties (Minns et al., 2019). Met name de aanpassing van de winddragformulering leidt tot significante wijziging van de berekeningen (aanpassing van de luchtdichtheid heeft een veel kleinere invloed).

Hier hebben we voornamelijk generieke modelinstellingen benoemd en randvoorwaarden zoals die in de kalibratie/validatie van de modellen zijn gebruikt. De schematisatie van de wind in de productieberekeningen voor HR2006, WBI2017 en BOI kent veel grotere verschillen, in hoofdstuk 5 gaan we daar nader op in.

4 Betrouwbaarheid zesde generatie Meren

In dit hoofdstuk gaan we in op de betrouwbaarheid van het zesde generatiemodellen voor de Meren. Daarbij maken we een vergelijking met de betrouwbaarheid van eerdere generaties waterbewegingsmodellen voor de Meren. Deze betrouwbaarheid in het waargenomen bereik volgt uit de gerapporteerde validatie van de verschillende modellen⁷. De kalibratie van een modelschematisatie bestaat uit het afregelen van onzekere, of meest bepalende parameters, zodat modelresultaten zo goed mogelijk overeenkomen met gemeten data. Hierbij wordt gecompenseerd voor onbekenden en onnauwkeurigheden in de modelopzet. De grootste onbekende in de kalibratie/validatie van de modellen voor de Meren is de betrouwbaarheid van het 'gemeten' windveld. Er zijn onvoldoende betrouwbare windgegevens beschikbaar, waardoor voor de RWS-modellen besloten is om de waterbeweging in de zesde generatie modellen voor het Markermeer, de Veluwerandmeren, de Grevelingen en het Volkerak-Zoommeer alleen te valideren en niet te kalibreren. Het beschikbare model is alleen getoetst en niet aangepast om de verschillen met waterstandmetingen te verkleinen. Eerdere generaties waterbewegingsmodellen voor de Meren zijn om dezelfde reden ook alleen gevalideerd en niet gekalibreerd.

4.1 Markermeer en Veluwerandmeren

4.1.1 Prestaties 'pre-baseline' (oudere) t/m vijfde generatie model

Een groot deel van deze paragraaf hebben we overgenomen uit: WL | Delft Hydraulics (1997). Het zijn de conclusies en het oordeel over de validatie van het model dat destijds is gerapporteerd.

We beschouwen hier de resultaten van de validatie van het model uit de OOM-studie ('pre-baseline' generatie model) en de validatie van de zesde generatie uit Genseberger et al. (2019). In het verleden (WL | Delft Hydraulics, 1997) is gevalideerd op historische tijdreeksen van stormen met een ruimtelijk variërend windveld. Hierbij zijn lokale beschuttingsfactoren toegepast. Destijds zijn 8 stormen gebruikt: januari 1976, januari 1984, januari 1993, februari 1993, maart 1993, november 1993, december 1993 en februari 1996. De prestaties van het model zijn getoetst op waterstandsmetingen bij de locaties: Houtribsluizen, Krabbersgat-sluisen, Oranjesluizen en de Nijkerkersluis.

Van de geselecteerde 8 stormen voldeden de simulaties van 2 stormen niet aan het gestelde kalibratiecriterium (afwijking maximale waterstand kleiner dan 20 cm). De kwaliteit van de windgegevens van deze stormen is in de studie ter discussie gesteld (WL | Delft Hydraulics, 1997). Als beide stormen buiten beschouwing worden gelaten, is geconcludeerd dat het model voldoet. De standaardafwijking van de waterstand is minder dan 0,1 m in de 6 resterende stormen op de locaties Houtrib, Krabbersgat, Nijkerk en Oranjesluizen. De *root mean square* waarde is kleiner dan 11 cm. Er wordt aangegeven dat verbetering van de validatie (en daarmee van het model) vooral moet worden gezocht in verbetering van de windvelden. In Delft Hydraulics & Witteveen+Bos (2005) is het model niet opnieuw gevalideerd. In deze vervolgstudie uit 2005 is geverifieerd of de reproductieprestaties niet wijzigen op locaties waar de schematisatie niet is gewijzigd.

⁷ Kalibratie van de modellen voor de meren wordt veelal achterwege gelaten, omdat dan parameters van de interactie tussen de wind en de waterbeweging moeten worden aangepast. Omdat de informatie (metingen) van het windveld erg onzeker zijn, wordt dit niet toegepast.

Het verschil tussen het Delft2D model van de OOM studie (HR2001) en het WAQUA model van HR2006 (Lodder, 2006) is klein en uitlegbaar. Figuur 6 geeft een overzicht van enkele karakteristieke modeleigenschappen uit de OOM-studie ('pre-baseline' – oudere - generatie).

In een gevoeligheidsanalyse (voorafgaand aan de kalibratie van het 'nulde' – oudere - generatie model) zijn de volgende parameters onderzocht (zie WL | Delft Hydraulics (1997) en Delft Hydraulics & Witteveen+Bos (2005)). Dit geeft een overzicht van de gekozen parameterwaarde en inzicht in het effect van deze keuze op de resultaten.

Bodemruwheid

De bodemruwheid heeft nauwelijks merkbare gevolgen voor de waterstanden. De bodemruwheid is weergegeven in de Manningformulering met de constante waarde $0,0263 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ (overeenkomstig Bak en Vlag, 1997). Een hogere ruwheid geeft meer demping van de waterbeweging (enige vertraging) en slechts een verhoging van enkele centimeters. In de rapportages is niet gevonden of voor de Eem een andere bodemruwheid is gehanteerd.

Windschuifspanningscoëfficiënt

Dit wordt gezien als een belangrijke kalibratieparameter. Een verlaging van de coëfficiënt (door de knikpunten van de Cd waarde in respectievelijk $9,3 \text{ m/s}$ en $3,4 \cdot 10^{-3}$ te veranderen), leidt tot een algehele verlaging van de extreme waterstanden. Verschuiving in de tijd blijft hierbij achterwege. In het definitieve model zijn de knikpunten $7,8 \text{ m/s}$ en $3,9 \cdot 10^{-3}$ gehanteerd.

Eddy viscositeit

Een horizontale eddy viscositeit van $1,0 \text{ m}^2/\text{s}$ is ingesteld. Variatie van deze parameter heeft vooral een effect op de Randmeren (bij verlaging ontstaat minder demping en dus minder afwaaiing).

Dichtheid

$Rho_{air} = 1,205 \text{ kg/m}^3$, $Rho_{mean} = 1000,0 \text{ kg/m}^3$, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$,

Initiële waterstand

Een verhoging van de initiële waterstand met 10 cm leidt tot een 10 cm hoger waterstandsverloop gedurende de gehele storm.

Figuur 6 Gehanteerde modeleigenschappen Markermeer en Veluwerandmeren in OOM-studie ('pre-baseline' – oudere - generatie), bron: WL | Delft Hydraulics (1997) en Delft Hydraulics & Witteveen+Bos (2005).

4.1.2 Prestaties zesde generatie model

Een groot deel van deze paragraaf hebben we overgenomen uit: Genseberger et al. (2019 en 2020). Het zijn de conclusies en het oordeel over de validatie van het model dat destijds is gerapporteerd.

Het zesde generatie model is gevalideerd met simulaties van 4 stormen. Dit zijn de stormen van oktober 2006, januari 2007, december 2011 en oktober 2013. Van deze stormen is een uniform windveld beschikbaar, gebaseerd op metingen en een ruimtelijk verdeeld windveld gebaseerd op *downscaling* van uitkomsten van het HIRLAM model van het KNMI. Met inbreng van verschillende experts is nagegaan wat een goede kalibratiestrategie zou zijn voor het zesde generatie model, waarbij ook de aanpak bij eerdere schematisaties is beschouwd. Een pragmatische aanpak is geformuleerd in sectie 5.2 van Genseberger et al. (2019). Er zijn verschillende inhoudelijke argumenten die om een verdere verdieping naar de nauwkeurigheid van het windveld en de daaruitvolgende kalibratiestrategie vragen. Het uitzoeken van deze vragen en de kalibratie viel echter buiten de scope en het budget van de modelbouw. Ook voor de Veluwerandmeren bleek aanvullend onderzoek nodig, waardoor kalibratie nu niet zinvol is (Genseberger, 2021).

De eerste versie van het zesde generatie model (j10) is vooral gevuld met gegevens van het vijfde generatie model. Hierbij zijn de instellingen (o.a. bodemhoogte en bodemruwheden) zo goed mogelijk overgenomen uit de vijfde generatie dieptegemiddelde WAQUA modellen. Alle beoogde stormperiodes zijn gesimuleerd met zowel de vijfde generatie WAQUA als de nieuwe zesde generatie D-Flow FM modellen (j10) van dit gebied, Omdat zowel de Baseline schematisatie “Markermeer-j17_5-v1” als de Baseline schematisatie “Markermeer-j18_5-v1” pas in 2018 beschikbaar kwamen, is alleen voor de storm van januari 2007 nagegaan wat de effecten zijn op het Markermeer t.o.v. de j10 modellen. Eenzelfde vergelijking is voor de j19 modellen (definitieve versie zesde generatie) gemaakt.

Het nieuwe zesde generatie model voor het Markermeer doet het goed voor de beschouwde stormperiodes. De verificatie voor de gewijzigde diepte (zowel met als zonder Marker Wadden) heeft laten zien dat ook het geactualiseerde zesde generatie model voor het Markermeer het goed doet voor de beschouwde stormperiode in 2007. De reproductie van de metingen is vergelijkbaar met de ‘pre-baseline’ generatie uit de vorige paragraaf. Wel wordt (aanvullend) aanbevolen om de situatie met Marker Wadden na te rekenen met een stormperiode die optrad ná het gereedkomen van de Marker Wadden in 2016. Voor BOI is met dit model van het Markermeer een kleine test voor extreme condities uitgevoerd in een hoekpuntenanalyse, waarbij is gekeken of het model enkele extreme situaties aan kan en of de resultaten hiervan plausibel zijn (Genseberger 2021a). Door het gebruik van de windparameter “hu0” doet het nieuwe zesde generatie deelmodel van de Veluwerandmeren het nu beter dan in 2017 voor de beschouwde stormperiodes. In het verleden zijn overschattingen van het effect van de wind op het Veluwerandmeer onderzocht Bottema, (2021). Gebleken is dat een windreductiefactor moet worden toegepast, welke ook in de productieberekeningen voor BOI zal worden toegepast (hiervoor is een correctie van de concept hydraulische belastingen nodig), Verder is de gemeten opwaaiing vaak verrassend laag door de zeer grote eigenperiode van het Veluwerandmeer (ca. 9 uur), die vooral door de combinatie lengte-ondiepte wordt bepaald en niet zozeer door evt. bottlenecks zoals Elburg en Harderwijk. Ook het model van de Veluwerandmeren is in het extreme bereik getest in een hoekpunten-analyse voor BOI (Genseberger, 2021b).

Figuur 7 geeft een overzicht van enkele karakteristieke modeleigenschappen zoals deze zijn gehanteerd voor het BOI2023 (zesde generatie).

Bodemruwheid

In de uiteindelijke berekeningen is de parameter UnifFrictType op 2 gezet en is ruwheidsbestand versie 2015_5-v1 gebruikt. Voor Markermeer en Veluwerandmeren zijn hierin de codes 411 t/m 420 opgenomen, allen met Manningwaarde $0,0263 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ en voor de Eem code 180 met k-Nikuradse waarde $0,05 \text{ m}$. Deze waarden zijn gebruikt voor de meer- en beekbodem. De Manningwaarde komt overeen met het ‘pre-baseline’ – oudere – generatiemodel, mogelijk dat de bodemruwheid voor de Eem afwijkt.

Windschuifspanning

Dezelfde instellingen voor windstresscoëfficiënt zijn in eerste instantie gebruikt als in WAQUA (standaard tabellen voor Markermeer, Veluwerandmeren) maar in 2021 als volgt geüniformeerd met de andere Rijkswateren: Cdbreakpoints= $0,0014$; $0,00275$. Windspeedbreakpoints= $7,8 \text{ m/s}$; $30,85 \text{ m/s}$. Voor de beschouwde historische stormen tijdens de validatie maakt deze uniformering niet uit, omdat daarbij geen extreme windsnelheden optreden.

Eddy viscositeit

Voor beide meren staat de horizontale eddy viscosity op $0,1 \text{ m}^2 / \text{s}$ en wordt er een Smagorinsky factor van $0,2$ toegepast. Dit anders dan WAQUA en ‘pre-baseline’ – oudere – generatie modellen.

Dichtheid

$Rho_{air} = 1,2265 \text{ kg/m}^3$, $Rho_{mean} = 1000,0 \text{ kg/m}^3$, $g = 9,813 \text{ m/s}^2$, waarbij de luchtdichtheid afwijkt van de 'pre-baseline' – oudere – generatie

Parameter voor overlaten

Methode Villemonte is toegepast, zoals bij alle KPP hydrodynamica projecten. De parameter $Sillheight_{min}$ is op 0 m gezet. Dat is de minimum drempel hoogte die D-Flow FM gebruikt voor de berekening (m.a.w. elke terreindrempel wordt in berekening meegenomen).

Parameter "hu0" voor effect diepte in windformulering

Voor de Veluwerandmeren bleken in 2017 opvallende afwijkingen op te treden in D-Flow FM. Op basis van de bevindingen in (Genseberger, 2021a en 2021b) is -om een gedeelte van deze afwijkingen op te lossen- een parameter in D-Flow FM ingebouwd die het effect van de diepte in de windformulering anders doorvertaalt. Dit is van belang voor windgedreven stroming door smalle geulen, zoals de vaargeul in de Veluwerandmeren.

De diepte in de snelheidspunten die in de windschuifspanning gebruikt wordt, is in Delft3D-FLOW/WAQUA de upwind H_u ("hu based"). Deze bestaat uit een upwind/centrale waterstand met een lokale bodemhoogte die een gemiddelde is van de diepte in de 2 hoekpunten van het wandje. In D-Flow FM wordt de diepte in de snelheidspunten die hiervoor standaard gebruikt wordt ("zws based"), gewogen tussen de 2 omliggende celdieptes (links en rechts van het wandje). Deze celdieptes zijn voor de default instellingen in D-Flow FM bepaald uit de maximale bodemdiepte van de 4 omliggende snelheidspunten, die zelf dan weer het gemiddelde zijn van de 2 dieptes in de 2 hoekpunten van het betreffende wandje. Doordat er een max-operator op de diepte zit (maximale diepte dus minimale bodemhoogte) is de waarde bij D-Flow FM die in de windschuifspanning gebruikt wordt, altijd groter of gelijk aan die van Delft3DFLOW/WAQUA. Voor variabele bodem en vooral op kleine diepte, kan het relatieve verschil aanzienlijk zijn. Zowel voor Markermeer als Veluwerandmeren wordt deze parameter expliciet op de volgende waarde gezet $Windhuorzwsbased = 0$.

Figuur 7 Gehanteerde modeleigenschappen Markermeer en Veluwerandmeren in productieberekeningen voor BOI2023 (zesde generatie), bron: Genseberger et al. (2019 en 2020).

4.2 Grevelingen

4.2.1 Prestaties vijfde generatie model

Een groot deel van deze paragraaf hebben we overgenomen uit: Minns en Aguilar (2015). Het zijn de conclusies en het oordeel over de validatie van het model dat destijds is gerapporteerd.

Het vijfde generatie WAQUA model van de Grevelingen (Minns en Aguilar, 2015) is gevalideerd op windopzet (op- en afwaaiing) aan de hand van twee historische stormen in oktober 2002 (maximaal 22 m/s uit het westen) en december 2013 (de Sinterklaasstorm met maximaal 19 m/s uit het noordwesten). Deze stormperiodes zijn geselecteerd op basis van het criterium dat waterstandfluctuaties ten gevolge van het peilbeheer beperkt zijn én dat er een duidelijk signaal waarneembaar is in de waterstand door de wind. Aanvankelijk werd gedacht aan de validatie van vijf verschillende periodes met stormen, namelijk periodes in 1998, 2002, 2005, 2007 en 2013. Uit een analyse volgde dat de invloed van de wind op de waterstand niet bij alle stormen prominent zichtbaar is in de metingen van de waterstanden. Daarom is besloten om het model alleen te valideren voor periodes in oktober 2002 en december 2013. Opgemerkt moet worden dat deze werkwijze kan leiden tot een gegevensbias, immers mogelijk wordt zo aangestuurd op een bevestiging van een a priori verwachting. Dat een storm (van een bepaalde windkracht en uit een bepaalde richting) wel enige opzet moet geven al blijkt dat niet uit de waterstandmetingen.

Het gebruik van gemeten windsnelheden en -richtingen bij locatie Stavenisse geeft goede resultaten in het model bij een vergelijking met gemeten waterstanden op drie stations in de Grevelingen (oostelijk langs de Grevelingendam, in het midden van het meer en westelijk langs de Brouwersdam). Als gevolg van de wind treedt in deze perioden bij de waterstandstations een maximale verlaging (door afwaaiing) en een maximale verhoging (door opzet) van ongeveer 0,2 m op. Het gemiddelde verschil tussen meting en berekening in maximale op- en afwaaiing bedraagt 0,01 tot 0,02 m. Tijdens het hoogtepunt van de storm in oktober 2002 wordt de opwaaiing bij Grevelingendam met 0,028 m onderschat door het model, op dat moment wordt de afwaaiing bij de Brouwersdam met 0,045 m onderschat. Gedurende de storm van december 2013 wordt de afwaaiing bij de Brouwersdam met ca. 0,02 m onderschat. De opzet bij de Grevelingendam wordt met ca. 0,016 m onderschat.

Figuur 8 geeft een overzicht van enkele karakteristieke modeleigenschappen zoals deze zijn gehanteerd voor het WBI2017 (vijfde generatie).

Bodemruwheid

In het model is een Manning formulering voor de bodemruwheid toegepast, omdat eerdere validatieberekeningen van het WAQUA model van het Volkerak-Zoommeer (Kuiper et al, 2014) lieten zien dat dit het meest geschikt is voor dit soort meren. De waarde van de Manning coëfficiënt is vanuit consistentie overwegingen gelijk gekozen aan de waarde die gebruikt is in het WAQUA-model van het Volkerak-Zoommeer: $0,022 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$, dat tevens gelijk is aan de waarde voor het IJsselmeer model (zie ook Figuur 10).

Windschuifspanningscoëfficiënt

Dezelfde instellingen voor windstresscoëfficiënt zijn gebruikt als in de Rijn-Maasmonding (vijfde generatie): $C_{dbreakpoints} = 0,0014; 0,0039$. $Windspeedbreakpoints = 7,0 \text{ m/s}; 50,0 \text{ m/s}$.

Eddy viscositeit

Een horizontale eddy viscositeit van $1,0 \text{ m}^2/\text{s}$ is ingesteld.

Dichtheid

$Rho_{air} = 1,205 \text{ kg/m}^3$, $Rho_{mean} = 1000,0 \text{ kg/m}^3$, $g = 9,813 \text{ m/s}^2$.

Initiële waterstand

De validatieberekeningen zijn gestart met een gemiddeld waterniveau op basis van de gemeten waterstand in de Grevelingen in de periode voorafgaand aan de verificatieperiode. In de periode voorafgaand aan de oktober 2002 storm was het waterpeil in de Grevelingen vrij stabiel rond $-0,18 \text{ m NAP}$. Begin december 2013 was de waterstand in de Grevelingen stabiel rond $-0,2 \text{ m NAP}$.

Figuur 8 Gehanteerde modeleigenschappen Grevelingen in productieberekeningen WBI2017 (vijfde generatie), bron: Minns en Aguilar (2015).

4.2.2 Prestaties zesde generatie model

Een groot deel van deze paragraaf hebben we overgenomen uit: Groenenboom et al. (2020). Het zijn de conclusies en het oordeel over de validatie van het model dat destijds is gerapporteerd.

Net als in de modelontwikkeling van het vijfde generatie WAQUA model (Minns en Aguilar, 2015), zijn oktober 2002 en december 2013 doorgerekend met het zesde generatie model van de Grevelingen (Groenenboom et al., 2020). De validatie van deze perioden heeft aangetoond dat windgegevens van station Stavenisse tot de beste waterstandsreproductie leiden. Het zesde generatie model simuleert zeer vergelijkbare waterstanden als het vijfde generatie model (Groenenboom et al., 2020).

Aanvullend is in Groenenboom et al. (2020) een gevoeligheidsonderzoek uitgevoerd, dat laat zien dat de berekende stormopzet vooral beïnvloed wordt door de keuze van meetstation en de winddragcoëfficiënten:

- Het is logisch dat bij een ander KNMI-station veelal significant andere wind gemeten wordt met aanzienlijke impact op de berekende windopzet. Bijvoorbeeld het gebruik van KNMI-station Vlissingen geeft bij noordwesten tot noordoosten wind ca.20% beschutting door stadseffecten, wat in principe leidt tot 40% minder stormopzet in de modelberekeningen.
- Het is niet logisch om CD-waarde als kalibratieparameter te gebruiken. De CD-waarde heeft een duidelijke fysische betekenis en algemeen geaccepteerde parametrisatie als Wu en Smith/Banke. De windopzet gaat slechts lineair met de CD-waarde en de onderlinge verschillen in CD-formulering zijn binnen het waargenomen bereik niet heel groot. Het is dan logischer om de bodemwrijving als kalibratieparameter te gebruiken.

Het gebruik van de winddata van stations Vlissingen en Brouwershavense Gat zorgen voor een grotere stormopzet in de simulatie van oktober 2002 dan het meer landinwaarts gelegen meetstation Stavenisse. Tijdens de eerste piek in de waterstand (op de vroege ochtend van 26 oktober) wordt hierdoor de afwijking ten opzichte van de gemiddelde waterstand overschat, de berekende waterstand op basis van meetstation Stavenisse geeft een betere overeenkomst met de gemeten waterstand. De stormopzet tijdens de piek van de storm in de middag van 27 oktober, wordt het best benaderd door de simulatie met gegevens van station Brouwershavense Gat.

Omdat in operationele toepassing ook de windforcering op basis van het model HARMONIE van het KNMI relevant is, is naast bovenstaande stations ook een tijdserie op basis van het ruimtelijk-variërende HARMONIE model gebruikt. Er zijn verschillen tussen de metingen en de modelresultaten, bijvoorbeeld een tweede piek in de windsnelheid van station Stavenisse is niet terug te zien in de berekening van HARMONIE. Het gebruik van een ruimtelijk-variërende wind is (in deze beperkte vergelijking van slechts één periode) niet noodzakelijk gebleken, aangezien het model van het KNMI vergelijkbare windsnelheden en -richtingen berekent voor het oosten en westen van de Grevelingen.

Voor stormperiode december 2013 zijn naast de eerder genoemde meetstations ook gegevens van station Bruinisse beschikbaar. Opvallend is dat in de simulatie van december 2013 de modelresultaten op basis van meetstation Brouwershavense Gat substantieel afwijken van de gemeten waterstand, voor de periode oktober 2002 gaf dit station een beter resultaat (Groenenboom et al., 2020). Ook de reproductie van de waterstanden op basis van de meetgegevens van Vlissingen en Bruinisse wijkt op sommige momenten erg af van de gemeten waterstanden. Meetstation Stavenisse blijkt het meest geschikt om het waterstandverloop tijdens deze storm te modelleren. De stormopzet wordt niet beter berekend in de simulatie waarin de HARMONIE-gegevens gebruikt zijn. Dit komt waarschijnlijk doordat de tweede piek in de windsnelheid onderschat wordt door HARMONIE. In Groenenboom et al. (2020) wordt aanbevolen om het gebruik van HARMONIE gegevens in een later stadium nog eens nader te onderzoeken.

De metingen van het station Vlissingen worden onbetrouwbaar geacht, door de beschutte ligging. Voor het berekenen van de stormopzet in de Grevelingen wordt aangeraden Stavenisse te gebruiken, aangezien deze voor de beste reproductie van het waterstandverloop zorgen. Het toepassen van hogere winddragcoëfficiënten zal tot hogere piekwaterstanden leiden. Dit verbetert het berekenen van de waterstanden iets, maar er zal dan van de standaard D-HYDRO-instellingen afgeweken moeten worden. Winddragcoëfficiënten zijn daarom niet aangepast. Door gebruik te maken van 10-minuuts-gegevens in plaats van 60-minuutsgegevens zal de modelprestatie ook verbeteren.

Voor BOI is met het model een kleine test voor extreme condities uitgevoerd in een hoekpuntenanalyse, waarbij is gekeken of het model enkele extreme situaties aan kan en of de resultaten hiervan plausibel zijn (Groenenboom et al., 2020).

Figuur 9 geeft een overzicht van enkele karakteristieke modeleigenschappen zoals deze zijn gehanteerd voor het BOI2023 (zesde generatie).

Bodemruwheid

Overeenkomstig met het Delft3D 4-model van het Grevelingenmeer is de algemene bodemruwheid ingesteld op de Manningformulering met de waarde $0,020 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ voor het gedeelte van het modeldomein dat onder normale omstandigheden onder water staat. De standaardwaarde van de bodemruwheid (Baseline-term: zomerbed) voor de Zeeuwse Delta heeft de waarde $0,022 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$. Een hogere Manning-coëfficiënt (een 'ruwere' bodem) zorgt voor een iets lagere piekwaterstand. Het effect is echter relatief klein (minder dan 1 cm) ten opzichte van de totale windopzet. Aangezien het aanpassen van de bodemruwheid weinig effect heeft op de windopzet, de Manning-coëfficiënt van $0,020 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ relatief glad is en een aanpassing van de bodemruwheid mogelijk ook een herkalibratie van zout/temperatuur vraagt vanwege het effect op verticale menging, is besloten de bodemruwheid niet aan te passen. Voor BOI wordt wel de waarde van $0,022 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ toegepast. Voor de buitendijkse gebieden die onder normale omstandigheden (geen stormopzet of waterberging) droog staan, is een op fysische eigenschappen gebaseerde ruwheid uit Baseline opgelegd. Hiervoor bestaat een generieke wijze waarop de bodemruwheidswaarden worden berekend gebaseerd op ecotopen (Spruyt et al., 2017).

Windschuifspanning

Tijdens de ontwikkeling van het model zijn de winddrag-formulering (Smith & Banke) ingesteld volgens de default waarden uit D-HYDRO: $C_{d\text{breakpoints}} = 0,00063; 0,0073$. $\text{Windspeedbreakpoints} = 0 \text{ m/s}, 100 \text{ m/s}$. Ten behoeve van de BOI-toepassing is hiervan afgeweken en is gebruik gemaakt van C_d -coëfficiëntwaarden die zijn afgesproken voor de zesde generatie. De BOI productieberekeningen zijn uitgevoerd met de waarden: $0,0014$ bij $7,8 \text{ m/s}$ en $0,00275$ bij $30,85 \text{ m/s}$.

Eddy viscositeit

Voor de Grevelingen staat de horizontale eddy viscosity op $0,1 \text{ m}^2/\text{s}$ en is er een Smagorinsky factor van $0,2$ toegepast.

Dichtheid

Het model is ontwikkeld met de volgende instellingen: $\rho_{\text{air}} = 1,205 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{water}} = 1023,0 \text{ kg/m}^3$, $g = 9,813 \text{ m/s}^2$. Deze parameters bleken tijdens de ontwikkeling van het model een verwaarloosbare invloed te hebben op de berekende stormopzet in de Grevelingen. De BOI productieberekeningen zijn uitgevoerd met een afwijkende waarde voor de luchtdichtheid $1,2265 \text{ kg/m}^3$, die gelijk is voor alle zesde generatie modellen toegepast voor BOI.

Parameter voor overlaten

Methode Villemonte is toegepast, zoals bij alle zesde generatie modellen. De parameter $S_{\text{illheightmin}}$ is op 0 m gezet. Dat is de minimum drempelhoogte die D-Flow FM gebruikt voor de berekening (m.a.w. elke terreindrempel wordt in berekening meegenomen).

Parameter "hu0" voor effect diepte in windformulering

Op basis van de bevindingen in (Genseberger, 2021a en 2021b) is een parameter in D-Flow FM ingebouwd die het effect van de diepte in de windformulering anders doorvertaalt (zie ook Figuur 7). Dit is van belang voor windgedreven stroming door smalle geulen. Net als voor Markermeer en Veluwerandmeren is deze parameter expliciet op de volgende waarde gezet: $\text{Windhuorzwsbased} = 0$.

De parameter Windhuorzwsbased (die bepaalt of de lokale diepte in het snelheids- of waterstandspunt gebruikt wordt in de berekening van de windschuifspanningsterm) heeft/had een andere default waarde in 2D- en 3D-modellering. De gekozen waarde resulteert in een iets hogere opzet; dit is te verklaren doordat de lokale diepte in het snelheidspunt per definitie ondieper ligt dan het waterstandspunt (bij de standaardinstellingen voor parameters BedlevType en Conveyance2D).

Figuur 9 Gehanteerde modeleigenschappen Grevelingen in productieberekeningen voor BOI2023 (zesde generatie), bron: Groenenboom et al. (2020).

4.3 Volkerak-Zoommeer

4.3.1 Prestaties vijfde generatie model

Een groot deel van deze paragraaf hebben we overgenomen uit: Kuiper et al. (2014). Het zijn de conclusies en het oordeel over de validatie van het model dat destijds is gerapporteerd.

Met het vijfde generatie model van het Volkerak-Zoommeer zijn opgetreden stormen doorgerekend (Kuiper et al., 2014). Hierbij zijn de in het meer berekende waterstanden vergeleken met de beschikbare waargenomen waterstanden. Besloten is om het model voor het Volkerak-Zoommeer alleen te valideren voor periodes in oktober 2002 en december 2013. Deze stormperiodes zijn geselecteerd op basis van het criterium dat waterstandsfluctuaties ten gevolge van het peilbeheer beperkt zijn (spuidebiet bij Bath kleiner dan circa 60 m³/s) én dat er een duidelijk signaal waarneembaar is in de waterstand ten gevolge van op- en afwaaiing door wind. Voor wat betreft het toekomstige gebruik van het model moet rekening worden gehouden met een onderschatting van orde 0,1 m van de maximale waterstand in het noordoostelijke deel van het Volkerak, waarbij de maximale waterstand in het model ongeveer 1,5 uur eerder optreedt dan in werkelijkheid. Voor zwaardere stormen is deze onderschatting mogelijk groter.

De twee geselecteerde stormperiodes, oktober 2002 en december 2013 (de Sinterklaasstorm), zijn eerst gesimuleerd met als forcering een ruimtelijk uniform windveld gebaseerd op de gemeten windsnelheden en -richtingen in het station Rotterdam Zestienhoven met zowel een alluviale ruwheid als een ruwheid volgens een Manning formulering. Aanvullend zijn voor elk van beide stormperiodes nog simulaties gedaan, waarbij de ruimtelijk uniforme windforcering is ontleend aan windmetingen op de stations Stavenisse en Tholen. Een nadeel van het gebruik van deze ruimtelijk uniforme windvelden is dat minder rekening wordt gehouden met het feit dat een lokaal gemeten wind niet voor alle locaties in het gebied even representatief zou kunnen zijn. Een ruimtelijk variërend windveld kan mogelijk betere resultaten geven. Met deze simulaties is de gevoeligheid van de modelresultaten voor de gebruikte windforcering en de gebruikte ruwheidsformulering duidelijk geworden.

Tijdens het hoogtepunt van de storm op 27 oktober 2002 is de maximale opwaaiing in het Volkerak het beste gereproduceerd met een windforcering ontleend aan station Stavenisse (bij locatie Rak-Zuid resulteert dit in 5 cm hogere waterstanden en wordt de vergelijkbaarheid met de metingen daarmee beter). De maximale afwaaiing bij locaties Vossemeer en Bathse spuikanaal-inloop wordt door de drie simulaties met ongeveer dezelfde kwaliteit gereproduceerd. Geconcludeerd is dat de resultaten van de drie simulaties, met wind ontleend aan resp. de stations Rotterdam, Stavenisse en Tholen, weinig van elkaar verschillen behoudens een betere reproductie van de opwaaiing bij westelijke wind op locatie Rak-Zuid indien de forcering gebaseerd is op windmetingen in de stations Stavenisse of Tholen.

Het gemiddelde verschil van de waterstanden bij vier locaties in het Volkerak-Zoommeer tijdens de oktober 2002 stormperiode is 2-3 cm voor de situatie dat gegevens van het station Rotterdam worden gebruikt.

Tijdens het hoogtepunt van de storm wordt de opwaaiing in Rak-zuid met 8 cm onderschat door het model. Bij de overige locaties zijn de verschillen tussen maximale opwaaiing en afwaaiing 1-3 cm. Deze verschillen moeten worden beschouwd ten opzichte van een maximale opwaaiing van 30 cm in Rak-Zuid en een maximale afwaaiing van 30 cm in Bathse spuikanaal-inloop. Het verschil tussen de meting en de berekening wordt nauwelijks beïnvloed door de gebruikte ruwheidsformulering.

Voor alle simulaties van de storm op december 2013 geldt dat de door het model berekende op- en afwaaiing goed overeenkomen met de metingen. De simulaties met de windforcering ontleend aan windmetingen in station Rotterdam geeft, in vergelijking met de beide andere simulaties, voor de locaties Galathea en Bathse spuikanaal-inloop iets betere resultaten en voor station Rak-zuid iets minder goede resultaten. De reproductiekwaliteit op locatie Vossemeer is voor alle drie simulaties ongeveer gelijk. De kentallen zijn voor de storm in december 2013 qua absolute grootte wat kleiner dan die voor de storm van oktober 2002, namelijk 1-2 cm in december 2013 versus 2-3 cm voor oktober 2002; de overeenstemming tussen model en werkelijkheid lijkt voor deze periode dus iets beter te zijn. Dit kan onder andere samenhangen met de iets geringere windsnelheden tijdens de december 2013 storm ten opzichte van de storm in oktober 2002. Tijdens december 2013 is bij locatie Bathse spuikanaal-inloop sprake van opwaaiing als gevolg van wind uit vooral noordelijke richting. Dit geldt ook voor locatie Vossemeer, al is de opwaaiing hier dan kleiner. In beide gevallen wordt de waargenomen opzet goed door het model gereproduceerd. In de stations Galathea en vooral Rak-zuid is de opwaaiing maximaal als de wind sterk uit het westen waait. Het waterstandsverhang tussen beide stations wordt door het model enigszins onderschat.

Figuur 10 geeft een overzicht van enkele karakteristieke modeleigenschappen zoals deze zijn gehanteerd voor het WBI2017 (vijfde generatie).

Bodemruwheid

De ruwheidscode zoals gegenereerd door Baseline correspondeert met een alluviale ruwheidsvoorspeller (standaardwaarden $A/\alpha = 2,5$ en $B/\beta = 0,1$). Voor het Volkerak-Zoommeer lijkt de "Manning" formulering (met waarde $0,022 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$) zoals gebruikt voor IJsselmeer en Markermeer een logischer keuze. De twee geselecteerde stormperiodes, oktober 2002 en december 2013 zijn met beide doorgerekend. De gebruikte ruwheid, de alluviale ruwheidsvoorspeller of de Manning formulering, heeft nauwelijks invloed op de berekende opzet/afwaaiing in het Volkerak-Zoommeer. Vanwege overeenstemming in waterbewegingskarakteristieken tussen het IJsselmeer en het Volkerak-Zoommeer, is de Manning formulering met een waarde gelijk aan die van het IJsselmeer gebruikt.

Windschuifspanningscoëfficiënt

Dezelfde instellingen voor windstresscoëfficiënt zijn gebruikt als in de Rijn-Maasmonding (vijfde generatie): $C_{dbreakpoints} = 0,0014; 0,0039$. $W_{speedbreakpoints} = 7,0 \text{ m/s}; 50,0 \text{ m/s}$.

Eddy viscositeit

Een horizontale eddy viscositeit van $1,0 \text{ m}^2/\text{s}$ is ingesteld.

Dichtheid

$\rho_{air} = 1,205 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{homean} = 1000,0 \text{ kg/m}^3$, $g = 9,813 \text{ m/s}^2$.

Initiële waterstand

De validatieberekeningen zijn gestart met een gemiddeld waterniveau op NAP+0 m.

Figuur 10 Gehanteerde modeleigenschappen Volkerak-Zoommeer in productieberekeningen WBI2017 (vijfde generatie), bron: Kuiper et al. (2014).

4.3.2 Prestaties zesde generatie model

Een groot deel van deze paragraaf hebben we overgenomen uit: Van der Lugt et al. (2021). Het zijn de conclusies en het oordeel over de validatie van het model dat destijds is gerapporteerd.

De validatie van het zesde generatie model is beschreven in Van der Lugt et al. (2021). Gegevens over windsnelheid en -richting zijn beschikbaar bij KNMI stations Tholen en Vlissingen. Metingen van windsnelheid, -richting, temperatuur en bewolgingsgraad zijn beschikbaar bij KNMI station Vlissingen. Neerslag en verdamping zijn individueel opgegeven en afgeleid van de meetgegevens bij het KNMI station Vlissingen⁸. Voor BOI is aanvullend een kleine test voor extreme condities uitgevoerd in een hoekpuntenanalyse, waarbij is gekeken of het model enkele extreme situaties aan kan en of de resultaten hiervan plausibel zijn Van der Lugt et al. (2021).

Het 2D D-HYDRO model is een afgeleide van het 3D D-HYDRO model. Het 3D model is gekalibreerd voor zout en temperatuur op basis van jaarsommen van de periode 2011-2013 en gevalideerd voor dezelfde parameters op basis van de periode 2014-2016. Het 2D D-HYDRO model is alleen gevalideerd op de waterstandsreproductie tijdens december 2013 (de Sinterklaasstorm). Wind is in de validatie ruimtelijk uniform opgelegd op basis van uurgemiddelde windtijdreeksen van meteorostation Tholen. Daarnaast is beknopt gekeken naar de toepassing van wind van meetstation Vlissingen⁸ in plaats van meetstation Tholen. Zowel de timing van de hoogwaterpieken als de grootte van de waterstandopzet wordt beter geproduceerd door de forcering van het model met windgegevens van station Tholen. Een mogelijke oorzaak hiervoor kan gevonden worden in het feit dat Vlissingen meer zeewaarts gelegen is en de meting daardoor minder land-water invloed ondervindt. In het D-HYDRO-model is gekozen voor forcering met windgegevens van station Tholen omdat dit de timing van de hoogwaterstanden tijdens stormen beter beschrijft.

Het model is goed in staat de geobserveerde waterstanden te reproduceren, zowel tijdens stormperiodes als voor jaarsommen. Gebruik van windforcering van meetstation Tholen laat een verbeterde waterstandsreproductie zien tijdens de Sinterklaasstorm 2013 dan wind van Vlissingen. Wind van meetstation Vlissingen is vanwege de ligging over het algemeen sterker en daardoor wordt de op- en afwaaiing overschat in het model. Resultaten voor 2D en 3D D-HYDRO sommen laten zien dat beide zeer vergelijkbare resultaten opleveren, met vergelijkbare statistische kengetallen. Het D-HYDRO-model levert daarnaast vergelijkbare resultaten op als het vijfde generatie WAQUA-model.

Figuur 11 geeft een overzicht van enkele karakteristieke modeleigenschappen zoals deze zijn gehanteerd voor het BOI2023 (zesde generatie).

Bodemruwheid

De zesde-generatie D-HYDRO-modellen hanteert een generieke manier voor het opleggen van bodemruwheidswaarden gebaseerd op ecotopen (Spruyt et al., 2017): Hierbij wordt voor de buitendijkse gebieden die onder normale omstandigheden (geen stormopzet of waterberging) droog staan, een ruwheid uit Baseline opgelegd. Voor het gedeelte van het modeldomein dat onder normale omstandigheden onder water staat (incl. de intergetijdengebieden) is de bodemruwheid overgenomen uit het Delft3D 4-model (Kramer et al., 2016); een ruimtelijk uniforme Manning ruwheid van $0,027 m^{1/3}s^{-1}$. Onderzocht is of een afwijkende ruwheid ($0,023 m^{1/3}s^{-1}$) invloed heeft op de resultaten, door de lokale wind gedreven opzet tijdens een jaarsimulatie te vergelijken. Dit leidt er niet toe dat de waterstandsberekening accurater wordt.

⁸ Het gebruik van KNMI-station Vlissingen geeft bij noordwesten tot noordoosten wind ca.20% beschutting door stadseffecten, wat in principe leidt tot 40% minder stormopzet in de modelberekeningen (@ref). Daarmee zijn de gegevens van Vlissingen onbetrouwbaar.

Windschuifspanning

Tijdens de ontwikkeling van het model zijn de winddrag-formulering (Smith & Banke) ingesteld volgens de default waarden uit D-HYDRO: $C_{dbreakpoints} = 0,00063; 0,0073$. $Windspeedbreakpoints = 0 \text{ m/s}, 100 \text{ m/s}$. Ten behoeve van de BOI-toepassing is hiervan afgeweken en is gebruik gemaakt van C_d -coëfficiëntwaardes die zijn afgesproken voor de zesde generatie. De BOI productieberekeningen zijn uitgevoerd met de waardes: 0,0014 bij 7,8 m/s en 0,00275 bij 30,85 m/s.

Eddy viscositeit

Voor het Volkerak-Zoommeer staat de horizontale eddy viscosity op $0,1 \text{ m}^2/\text{s}$ en is er een Smagorinsky factor van 0,2 toegepast.

Dichtheid

Het model is ontwikkeld met de volgende instellingen: $Rho_{air} = 1,205 \text{ kg/m}^3$, $Rho_{mean} = 1000,0 \text{ kg/m}^3$, $g = 9,813 \text{ m/s}^2$, dit is gelijk aan de vijfde generatie. De BOI productieberekeningen zijn uitgevoerd met een afwijkende waarde voor de luchtdichtheid $1,2265 \text{ kg/m}^3$, die gelijk is voor alle zesde generatie modellen toegepast voor BOI.

Parameter voor overlaten

Methode Vilemonte is toegepast, zoals bij alle zesde generatie modellen. De parameter $Sillheight_{min}$ is op 0 m gezet. Dat is de minimum drempel hoogte die D-Flow FM gebruikt voor de berekening (m.a.w. elke terreindrempel wordt in berekening meegenomen).

Parameter "hu0" voor effect diepte in windformulering

Op basis van de bevindingen in (Genseberger, 2021a en 2021b) is een parameter in D-Flow FM ingebouwd die het effect van de diepte in de windformulering anders doorvertaalt (zie ook Figuur 7). Dit is van belang voor windgedreven stroming door smalle geulen. Net als voor Markermeer als Veluwerandmeren is deze parameter expliciet op de volgende waarde gezet $Windhuorzws_{based} = 0$.

Figuur 11 Gehanteerde modeleigenschappen Volkerak-Zoommeer in productieberekeningen voor BOI2023 (zesde generatie), bron: Van der Lugt et al. (2021).

4.4 Conclusies en aanbevelingen

Uit de gemaakte analyse van de gerapporteerde betrouwbaarheid van de modellen blijkt dat de zesde generatie even betrouwbaar is als de voorgaande generaties. Controle van de reproductie van de waterstanden – de validatie – geeft vergelijkbare resultaten als in het verleden. In het verleden gaf de validatie van de vijfde en de eerdere generaties voldoende vertrouwen in het instrumentarium. Er zijn duidelijk verbeteringen in de zesde generatie doorgevoerd (zie hoofdstuk 3), maar door beperkingen verbonden aan de afgelopen jaren gepubliceerde validatie – en de vergelijkbaarheid met eerder uitgevoerde validatie – zijn deze niet zichtbaar in de reproductie van de waterstand. In uithoeken van de Meren, bij de overgang van water naar land bij voorlanden (slikken en schorren), in havens en nabij waterfronten van stedelijk gebied zal het beschikbare detail van de modellering van meerwaarde zijn. Ten opzichte van eerdere generaties is de zesde generatie modellen daarmee even geschikt (of beter, in theorie meer geschikt) voor de toepassing bij de kerntaken van Rijkswaterstaat.

Net als bij de voorgaande generaties blijkt uit de bestudeerde rapportages dat een beperkte toetsing mogelijk is gebleken van de modellen op windopzet. Het gevonden verschil met metingen is maximaal 10 cm van maxima en gemiddeld gedurende een storm enkele centimeters. Het resultaat van de validatie is gevoelig voor de keuze van de windstations en schuifspanningscoëfficiënt (winddrag). De meerwaarde van de ruimtelijke wind van weermodellen van het KNMI (HIRLAM of HARMONIE) in de controle (validatie) van de hydraulische modellen is nog onduidelijk.

Verbeteringen in zesde generatie worden in het waargenomen bereik van wind en waterstanden niet zichtbaar door enerzijds een beperkte controle (validatie met 2 tot 4 stormen lijkt onvoldoende) en anderzijds de gemaakte (impliciete en expliciete) aannames ten aanzien van de *windforcing* in de validatiestudies. Er is daarbij een gebrek aan eenduidigheid en consistentie van die aannames, zowel tussen de validatie van de verschillende generaties onderling als ten opzichte van HR2006, WBI2017 en BOI. Samen met de grote (meer dan kwadratische) gevoeligheid van stormopzet voor wind maakt dat een eerlijke modelvergelijking lastig zo niet onmogelijk. De ruimtelijke windvariëaties tussen KNMI-stations zijn vaak het gevolg van onvoldoende gecorrigeerde beschuttings-effecten, welke vele malen groter zijn dan de werkelijke ruimtelijke variaties over (ruim) open water. Op basis van de variatie tussen (alleen) KNMI-stations kan niet worden geconcludeerd dat ruimtelijk variabele windvelden noodzakelijk zijn.

We adviseren om de komende jaren allereerst te werken aan een verbeterde en meer consistente validatiemethodiek, zowel ten aanzien van onderlinge vergelijking van validatiestudies van generaties en/of modellen als ten aanzien van de vergelijking tussen de validatieberekeningen (toetsing hindcast aan metingen) en de BOI productieberekeningen. De beschikbaarheid van goede, representatieve en gevalideerde windinformatie is daarvoor een eerste vereiste. Om die reden heeft het uitvoeren van validatie met relatief recente stormen de voorkeur boven stormen uit een relatief ver verleden (nog los van het feit dat de actuele gebiedschematisatie niet passend is voor dergelijke historische stormen). Deze wensen voor een zeer actuele set validatieset mag niet leiden tot een te beperkt aantal (1 of 2) stormen (alleen van vanuit dezelfde windrichting en met min of meer dezelfde sterkte). Noch mogen deze wensen leiden tot validatiestudies die onderling nauwelijks te vergelijken zijn.

Voor watersystemen waar peilbeheer significante effecten kan hebben ten opzichte van de windopzet (Grevelingen, Volkerak-Zoommeer) kan het meerwaarde hebben om “zuivere” stormgebeurtenissen te selecteren voor validatie van de stormopzet. Hierbij moet echter worden vermeden dat ongemerkt een gegevensbias tot stand komt (beperkte variatie in de selectie) waarbij alleen validatiecases worden geselecteerd die voldoen aan een subjectief verwachtingspatroon. Het meenemen van een gebeurtenis met een verhoogde waterstand op de Meren waardoor een groter areaal onder water en scheef wordt gezet tijdens een storm kan van grote betekenis zijn voor de validatie van het model voor condities die maatgevend zijn voor het BOI.

Als in de beschikbare metingen onvoldoende informatie aanwezig is om de modellen te valideren op verschillende gebeurtenissen met voldoende variatie in windrichting en -sterkte, dan kan ook onderzocht worden of een synthetische validatieset van meerwaarde kan zijn. In een dergelijke validatie worden modellen niet getoetst aan metingen, maar worden de uitkomsten van de verschillende generaties en/of modellen onderling vergeleken. Een representatieve selectie zou hiervoor gemaakt kunnen worden uit de ca. 8.000 jaar aan gecombineerde seizoenverwachting (SEASS5) van het ECMWF (Van den Brink, 2020 en 2023). De gegevens zijn helaas niet (direct) toepasbaar geschikt voor modelvalidatie vanwege een te grove ruimtelijke resolutie. Het gebruik van een gesimuleerd verloop van de wind heeft in een dergelijke validatie een duidelijke meerwaarde t.o.v. het geschematiseerde verloop uit de BOI productieberekeningen.

5 Verschillen tussen BOI2023 en WBI2017

5.1 Inleiding

Na bestudering van de historie (hoofdstuk 2) onderscheiden we vier belangrijke bouwstenen in de ontwikkeling van de hydraulische belastingen BOI2023 voor RWS:

- 1 Wind randvoorwaarden
- 2 Discretisatie basisstochasten
- 3 Modelrooster
- 4 Modelschematisatie

Met deze vier onderdelen van het instrumentarium verwachten we de verschillen tussen de databases fysica van WBI2017 en BOI2023 (in concept) te kunnen verklaren. In dit hoofdstuk bespreken we de bouwstenen en geven we de verschillen t.o.v. vorige beoordelingsrondes aan. In hoofdstuk 6 bespreken we het effect van deze verschillen.

5.2 Wind

Markermeer

Voor het Markermeer zijn sinds HR2006 geen nieuwe productieberekeningen gemaakt. In Tabel 3 is een overzicht gegeven van de verschillen in de winddiscretisatie tussen WBI2017 (wat overeenkomt met OOM, HR2001 en HR2006) en BOI2023 voor het Markermeer. Aangegeven is op welke wijze de wind, die als forcering op het waterbewegingsmodel wordt gezet, is geschematiseerd in de productieberekeningen.

Tabel 3 Overzicht van verschillen tussen HR2001, HR2006 / WBI2017 en BOI2023 in de schematisatie van de windrandvoorwaarden voor het Markermeer.

		HR2001 (WL Delft Hydraulics, 1997)	HR2006 / WBI2017 (Delft Hydraulics & Witteveen+Bos, 2005)	BOI2023 (Oerlemans et al., 2022)
Voorflank	Duur snelheid	9 uur	9 uur	23 uur
	Duur rotatie	9 uur	9 uur	7 uur
	Rotatie westenwind	39,6° (181°-359°)	39,6° (181°-359°)	-25° (181°-240°), -40° (240°-300°), -70° (300°-360°),
	Rotatie oostenwind	constante windrichting	constante windrichting	constante windrichting
	Interpolatie rotatie	vectoren	graden	graden
	Start snelheid	1 m/s	0 m/s	0 m/s
	Eind snelheid	piekwind	piekwind	piekwind
Piek	Duur snelheid	4 uur	4 uur	2 uur
	Rotatie westenwind	4,4°	4,4°	0°
	Interpolatie rotatie	vectoren	graden	graden
	Start snelheid	piekwind	piekwind	piekwind
	Eind snelheid	piekwind	piekwind	piekwind

		HR2001 (WL Delft Hydraulics, 1997)	HR2006 / WBI2017 (Delft Hydraulics & Witteveen+Bos, 2005)	BOI2023 (Oerlemans et al., 2022)
Achterflank	Duur snelheid	n.v.t.	9 uur	23 uur
	Duur rotatie	n.v.t.	9 uur	7 uur
	Rotatie westen wind	n.v.t.	0° (181°-359°)	+25° (181°-240°), +10° (240°-300°), +0° (300°-360°),
	Interpolatie rotatie	n.v.t.	graden	graden
	Start snelheid	n.v.t.	piekwind	piekwind
	Eind snelheid	n.v.t.	0 m/s	0 m/s
Winsnelheid	Ruimtelijke verdeling	macro/meso windvelden	uniform + lineair Hollandse Brug naar Nijkerk (90%)	uniform + lineair Hollandse Brug naar Nijkerk (90%)
	Transformatie $U_p \rightarrow U_{ow}$	WL (1997)	De Waal (2003)	De Waal (2003)
Windschuifspanning		geen afkapping	geen afkapping	afkapping
	parameters	(7,8 m/s; 1,4 10 ⁻³), (50 m/s; 3,9 10 ⁻³)	(7,8 m/s; 1,4 10 ⁻³), (50 m/s; 3,9 10 ⁻³)	(7,8 m/s; 1,4 10 ⁻³), (30,85 m/s; 2,75 10 ⁻³)
	luchtdruk	1,205 kg/m ³	1,205 kg/m ³	1,2265 kg/m ³

Veluwerandmeren

Voor de Veluwerandmeren zijn sinds HR2006 (Van Veen en Sloopjes, 2008a) geen nieuwe productieberekeningen gemaakt. Voor de vertaling van potentiële wind naar open water wind is destijds de werkwijze van De Waal (2003) gehanteerd. De windsnelheid heeft in deze berekeningen een symmetrisch verloop in de tijd met een basis van 48 uur en een topduur van 2 uur. De windrichting is constant (ruimte en tijd) aangenomen in de berekeningen. Voor de windschuifspanning en luchtdruk is dezelfde parametrisatie gebruikt als in de OOM-studie en HR2006 berekeningen van het Markermeer (Tabel 3). In Van Twuiver en Geerse (1999) is een noodzakelijke transformatie van wind op de locatie Schiphol naar de randmeren voorgesteld. In Bottema (2021) is geconstateerd dat die ontbrak in WBI2017 en benoemd als een noodzakelijke windreductiefactor van circa 15%.

Grevelingen en Volkerak-Zoommeer

Voor de Grevelingen en het Volkerak-Zoommeer zijn voor het WBI2017 nieuwe productieberekeningen gemaakt. T.o.v. WBI2017 is voor BOI2023 voor deze meren alleen de windschuifspanning aangepast.

In het vervolg (paragrafen 5.2.1 t/m 5.2.5) worden op hoofdlijnen deze verschillen, op welke wijze de wind als forcering op het waterbewegingsmodel wordt gezet, besproken.

5.2.1 Tijdsverloop van de wind

In de voorgaande tabel staan de verschillen in het tijdsverloop van de wind voor het Markermeer. Met de overstap naar de windrandvoorwaarden van BOI2023 wordt het 9-4-9-uurs verloop vervangen door een 23-2-23-uurs verloop. In Delft Hydraulics & Witteveen+Bos (2005) staat het effect hiervan voor locaties langs het Gooi- en Eemmeer (de blauwe locaties uit Figuur 4) besproken. Er is geen significant verschil in maximale waterstand tussen de 9-4-9-uurs en 23-2-23-uurs stormen. Een 23-2-23-uurs verloop van de wind levert beperkt hogere waterstanden (minder dan 0,05 m) op in het oosten van het Gooi- en Eemmeer ten opzichte van de 9-4-9-uurs tijdsverlopen van de wind (Delft Hydraulics & Witteveen+Bos (2005)). Voor de simulaties met de windreducties (zie ruimtelijk windveld met 10% reductie van de windsnelheid) geldt dat een 23-2-23-uurs schematisatie beperkt lagere waterstanden oplevert in het westen van het Gooi- en Eemmeer ten opzichte van de 9-4-9-uurs tijdsverlopen van de wind.

5.2.2 Rotatie van de wind

Op het Markermeer (inclusief Gooimeer, Eemmeer en de Eem) wordt met windrotatie gewerkt. In Tabel 3 is de duur van de rotatie van de voor- en achterflank opgegeven. Tijdens de top van de windsterkte is de richting gelijk aan de opgegeven windrichting. De duur van de rotatie bepaalt dan het aantal uur voor de top dat de rotatie start. De windrotatie is later (voor BOI) consistent gemaakt met die op de Westelijke Waddenzee, het IJsselmeer en de Vecht-IJsseldelta. Dat betekent dat is aangesloten bij de analyse uit SBW-Belastingen voor het WTI2011 (Lopez de la Cruz et al., 2010). T.o.v. de HR2001 is een verbetering van de definitie van de windrotatie in de voorflank en gedurende de piek van de storm toegepast. Daarnaast is een achterflank toegevoegd in de beschrijving van de storm, omdat in werkelijkheid de maximale waterstanden na de piek van de storm optreden (traagheids-effect).

5.2.3 Ruimtelijk windveld

In het algemeen geldt dat binnen BOI2023 beperkt rekening is gehouden met ruimtelijke variatie in het windveld (alleen voor de Oosterschelde en het Gooi- en Eemmeer wordt ruimtelijke variatie toegepast⁹). Afgezien van lokale beschuttingseffecten is het landelijk stormklimaat snel milder naarmate een locatie meer zuidoostelijk ligt ten opzichte van de Kust. Voor veel watersystemen ligt het daarom in de rede een NW-ZO-gradiënt in het windveld op te leggen in de productiesommen. Dit is echter in de praktijk nog beperkt gedaan. Zo is nog géén gebruik gemaakt van de nieuwste kennis rondom het hanteren van een gradiënt in het windklimaat (Rongen et al., 2021). Deze kennis is nog niet voldoende uitgewerkt om gebruikt te worden in de productiesommen van BOI2023. Voor het Markermeer, de Veluwerandmeren, de Grevelingen en het Volkerak-Zoommeer wordt station Schiphol gehanteerd als referentiestation voor het uniforme veld van de windsnelheid.

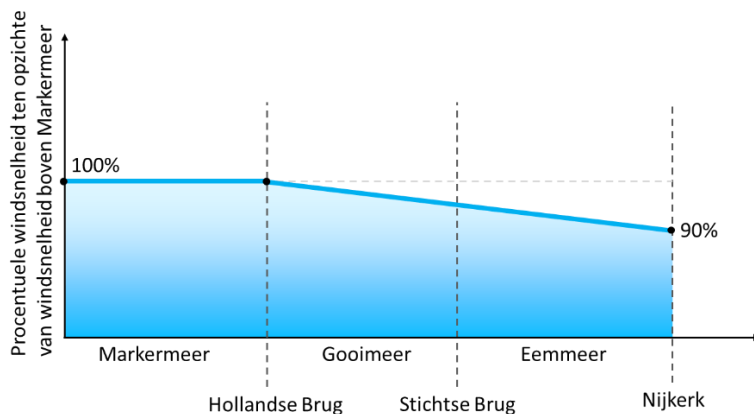
In de HR2001 (gebaseerd op de OOM studie) is een ruimtelijk variabel windveld toegepast in de productieberekeningen waarbij een groot- en kleinschalig ruwheidseffect zijn verwerkt in ruimtelijke spreiding van de opgelegde windsnelheid. Het grootschalig ruwheidseffect is berekend op basis van Van Agthoven et al. (1997). In de huidige databases fysica (WTI2011) van het IJsselmeer is van deze methode afgestapt. Met behulp van het Rijkooort-Weibull Model was de windsnelheid bij het referentiestation vertaald naar locaties aan de rand van het meer. Vervolgens zijn de gevonden waarden van de windsnelheid langs het meer lineair geïnterpoleerd tot een ruimtelijk windveld boven het meer.

In Delft Hydraulics & Witteveen+Bos (2005) is voor de update van de databases fysica te IJburg en langs de Eem een vereenvoudigd ruimtelijk windveld gemaakt, waarbij zo goed mogelijk voor deze locaties de resultaten van de OOM studie zijn benaderd. Voor het Gooi- en Eemmeer is destijds vanaf de Hollandse Brug een reductiefactor op de windsnelheid toegepast, lineair oplopend tot 10% bij Nijkerk (overeenkomstig de productieberekeningen van HR2006 (Delft Hydraulics & Witteveen+Bos, 2005). Omdat er binnen BOI2023 geen ruimte was om dit beter af te schatten, is de beperkte reductie (10%) van de windsnelheid toegepast. In Delft Hydraulics & Witteveen+Bos (2005) is gesteld dat hiermee de waterstand eerder iets te hoog wordt berekend dan te laag (conservatieve benadering).

In Kok et al. (1999) is aangegeven dat de windsterkte door de toegepaste verwerking van een groot- en kleinschalig ruwheidseffect in HR2001 mogelijk met 10 tot 20% wordt overschat. Daardoor zijn de destijds benodigde kruinhoogten mogelijk met een halve meter tot meer dan een meter overschat. Vanwege deze mogelijke fout is de eerder toegepaste methode niet herhaald in BOI2023.

⁹ Voor de kust is in het verleden een ruimtelijk gevarieerde belasting gebruikt door toepassing van meerdere stations voor de basispeilen. Op termijn zal ook voor de Kust worden overgestapt op productieberekeningen, zie <https://cdn.knmi.nl/knmi/pdf/bibliotheek/knmipubTR/TR406.pdf>

Doordat de kennis rondom ruimtelijk verdeelde windvelden nog niet voldoende is uitgewerkt, is in BOI2023 een uniform windveld gehanteerd. Omdat dit op het Gooi- en Eemmeer tot een te grote overschatting van de windsterkte leidt, is hier gekozen om de eerder toegepaste methode (HR2006-WBI2017) niet te wijzigen. (Oerlemans et al., 2022). Het gebied ten noordwesten van de Hollandse Brug (Markermeer) heeft een uniforme windsnelheid en in zuidoostelijke richting vanaf de brug (Eem- en Gooimeer) neemt de windsnelheid lineair af (Figuur 12). In Bottema (2021) is herbevestigd dat op de Veluwerandmeren gerekend moet worden met een windreductiefactor van 15%, zowel in de kalibratie als in de productieberekeningen. Inmiddels is geconstateerd dat deze reductiefactor niet is toegepast in de productieberekeningen (dit zal moeten worden gecorrigeerd).



Figuur 12 Ruimtelijke variatie van de windsnelheid boven het Marker-, het Gooi- en het Eemmeer.

5.2.4 Open water vs. potentiële wind

Voor de windsnelheid wordt bij alle watersystemen in principe gebruik gemaakt van de “open-water windsnelheid” (De Waal, 2003). Dit geldt zowel voor de waterbeweging als voor de golven. De windsnelheid waarvoor statistiek is afgeleid en waarmee de databases fysica worden gevuld betreft echter de potentiële windsnelheid. De potentiële windsnelheid wordt daarom getransformeerd naar de open-water windsnelheid.

Voor open-water windsnelheden boven de 30 m/s neemt volgens de laatste inzichten (Van Vledder, 2016) de winddragcoëfficiënt C_D niet verder toe. In deze nieuwe winddragformulering is er bij hogere windsnelheden dus sprake van een gladder wateroppervlak. Dat betekent dat bij dezelfde potentiële windsnelheid een hogere open-water windsnelheid wordt gevonden dan in de oude dragformulering. Deze hogere windsnelheid heeft echter minder grip op het water (de winddragcoëfficiënt is immers lager). Het netto resultaat hiervan is dat de bijbehorende schuifspanningssnelheid afneemt ten opzichte van de situatie zonder afkappen (oude dragformulering), met als gevolg lagere waterstanden en golven.

De onderliggende werkwijze voor het transformeren van de windsnelheid is beschreven in (De Waal, 2003)¹⁰. Vanaf potentiële windsnelheden van iets onder de 30 m/s ligt de open-water windsnelheid volgens de nieuwe formulering iets hoger dan in de oude formulering uit de OOM studie. Het afkappen van de winddragcoëfficiënt vindt zoveel mogelijk plaats binnen de fysische modellen (D-HYDRO voor de waterbeweging en SWAN voor de golven), zie ook paragraaf 5.2.5 voor meer details.

¹⁰ Hierbij past de kanttekening dat uit Sterl (2019), bijlage E van Bottema (2007) en Caires et al. (2012) de aannames achter deze transformatie inmiddels achterhaald en fout zijn gebleken. Dit is in de uitgangspunten voor BOI2023 gecorrigeerd.

5.2.5 Windschuifspanning

Voor het berekenen van de *wind shear stress* biedt de zesde generatie software twee opties:

- Standaard is ingesteld dat de effectieve windsnelheid gelijk is aan de windsnelheid op 10 meter hoogte.
- Het is ook mogelijk om de relatieve wind – relatief t.o.v. van de stroomsnelheid – te gebruiken om de wind shear stress te berekenen (optie *Relativewind*). Dit wordt van belang als de wind de belangrijkste drijvende kracht is voor de waterbeweging en de windsnelheid de stroomsnelheid benadert (normaliter is de snelheid van de windgedreven oppervlaktestroming orde grootte 5% van de wind op 10 m hoogte). Met deze optie wordt voorkomen dat de wind nog steeds een kracht uitoefent, terwijl het verschil tussen windsnelheid en stroomsnelheid nagenoeg nul is.

In de zesde generatie modellen is standaard gekozen voor de eerste optie. Recent internationaal onderzoek (Van Vledder, 2017) wijst op een minder effectieve wind-water-energieoverdracht vanaf zeer zware stormen (11 Beaufort, wat overeenkomt met 28,5 – 32,6 m/s). In WBI2017 is dit voor het IJsselmeergebied meegenomen door de zogenaamde *windschuifspanningscoëfficiënt (winddrag coëfficiënt) C_D* boven 30 m/s wind niet verder te laten toenemen. Binnen WBI2017 is gekozen om deze nieuwe kennis voor het IJsselmeer toe te passen via een correctie op de windstatistiek. In de overige watersystemen is in WBI2017 nog geen gebruik gemaakt van de C_D -afkapping. Voor BOI2023 is gekozen om de C_D -afkapping toe te passen in de fysica van de productieberekeningen (zowel waterbeweging als golven) voor alle Meren. De windschuifspanningscoëfficiënt C_D is gedefinieerd met de Smith & Banke formulering. De coëfficiënt is stuksgewijs lineair afhankelijk van de windsnelheid. Gekozen is voor de volgende parameters van de Smith & Banke formule:

- knikpunten C_D (*winddrag coëfficiënt*) 0,0014 en 0,00275 [-].
- knikpunten windsnelheid 7,8 en 30,85 m/s.

In de OOM-studie (en andere studies t/m WBI2017) is een vergelijkbare relatie van de C_D waarde gebruikt, hier zijn (conform Bak en Vlak, 1997) de volgende parameters gebruikt:

- knikpunten C_D 0,0014 en 0,0039 [-].
- knikpunten windsnelheid 7,8 en 50,0 m/s.

Lage luchtdruk kan nog een opzetbijdrage van enkele decimeters geven. Of een (jaargemiddelde) luchtdruk van 1015 hPa wordt toegepast of een (niet eens zo heel lage) luchtdruk van 985 hPa (overeenkomend met ca. 3% verschil in luchtdichtheid) scheelt in situaties met vrije toestroming (zoals op zee) ongeveer 30 cm in de windopzet.

Tijdens stormen treden verschillen in luchtdruk op over het Markermeergebied. Bijvoorbeeld tijdens de 1953 storm bedroegen de verschillen over het Markermeer maximaal circa 3 mbar (figuur 4.36 van Wieringa en Rijkoort, 1983). Dit komt in een stationaire situatie overeen met een verschil in waterstand van 3 cm. Tijdens de storm van 1972 (figuur 4.37 van Wieringa en Rijkoort, 1983) is er boven noord Nederland een extreem luchtdrukverschil van zelfs ca. 10 mbar waargenomen over een gebied ter grootte van het Markermeer. De resulterende verschillen in de waterstand worden, conform de IJsselmeerstudie van het RIZA (Bak en Vlag, 1997), verwaarloosd door de atmosferische druk tijdens de berekening constant te houden.

Figuur 13 Indicatie van het effect van een andere luchtdruk op de waterstanden (overgenomen uit OOM studie).

Ook de luchttemperatuur kan – via de luchtdichtheid – de stormopzet beïnvloeden. Meestal wordt de luchtdichtheid voorgeschreven, op basis van een vaste standaardwaarde.

In het verleden (HR2001 en HR2006) is 1,205 kg/m³ gehanteerd en in de huidige modellering 1,2265 kg/m³ (verschil van 1,5%)¹¹.

5.3 Discretisatie stochasten

In Tabel 4 t/m Tabel 7 is een overzicht gegeven van de verschillen in de discretisatie van de basisstochasten tussen WBI2017 en BOI2023. Voor de Meren worden de basisstochasten het meerpeil, de windrichting en -snelheid gehanteerd. In het vervolg van deze paragraaf worden deze verschillen inzichtelijk gemaakt. In BOI2023 worden meer combinaties van de realisaties van de basisstochasten doorgerekend. Vaak wordt een groter domein doorgerekend en meer realisaties binnen hetzelfde domein. In het ene geval hoeft minder geëxtrapoleerd te worden in het extreme bereik (wat de databases ook beter toepasbaar maakt voor het OI - het ontwerpen van waterkeringen). In het andere geval worden knippunten in de overschrijdingskrommen van de waterstand binnen het bereik beter benaderd, omdat minder hoeft te worden geïnterpoleerd.

Tabel 4 Overzicht van verschillen tussen WBI2017 en BOI2023 in de discretisaties van de basisstochasten voor het Markermeer.

		WB2017	BOI2023
Windrichting	Sectoren oostenwind westenwind	12 van 30° 0° t/m 180° 181° t/m 359°	16 van 22,5° 1° t/m 180° ¹² 181° t/m 360°
Winsnelheid	Piekwaarden oostenwind	0, 15, 20, 23, 26, 28, 30 m/s	0, 10, 16, 22, 27, 32, 37, 42, 47 m/s
	Piekwaarden westenwind	0, 22, 28, 33, 36, 39, 42 m/s	0, 10, 16, 22, 27, 32, 37, 42, 47 m/s
Meerpeil		-0,4; +0,3; +1,3 m+NAP	-0,4; -0,2; +0,0; +0,2; +0,4; +0,8; +1,2; +1,6; +2,0; +2,4 m+NAP

Tabel 5 Overzicht van verschillen tussen WBI2017 en BOI2023 in de discretisaties van de basisstochasten voor de Veluwerandmeren.

		WB2017	BOI2023
Windrichting	Sectoren oostenwind westenwind	16 van 22,5° 1° t/m 180° 181° t/m 360°	16 van 22,5° 1° t/m 180° 181° t/m 360°
Winsnelheid	Piekwaarden oostenwind	0, 14, 19, 22, 25, 28, 31, 34, 38, 42 m/s	0, 10, 16, 22, 27, 32, 37, 42, 47 m/s
	Piekwaarden westenwind	0, 14, 19, 22, 25, 28, 31, 34, 38, 42 m/s	0, 10, 16, 22, 27, 32, 37, 42, 47 m/s
Meerpeil		-0,35; -0,1; +0,4; +1,0 m+NAP	-0,4; -0,2; +0,0; +0,2; +0,4; +0,8; +1,2; +1,6; +2,0; +2,4 m+NAP

¹¹ Gebruik van een luchtdichtheid van 1,2 kg/m³ voor BOI is aan de lage kant voor het winterhalfjaar, namelijk bij 0°C is een luchtdichtheid van 1,29-1,30 kg/m³ gebruikelijker. De luchtdichtheid is niet alleen gevoelig voor de luchtdruk maar ook voor de temperatuur: een ruim 27 graden hogere luchttemperatuur impliceert een 10% lagere luchtdichtheid (overeenkomstig de natuurkundige gaswet).

¹² Merk op dat in het verleden de richting noord zonder rotatie is doorgerekend.

Tabel 6 Overzicht van verschillen tussen WBI2017 en BOI2023 in de discretisaties van de basisstochasten voor de Grevelingen.

		WB2017	BOI2023
Windrichting	Sectoren oostenwind westenwind	16 van 22,5° 1° t/m 180° 181° t/m 360°	16 van 22,5° 1° t/m 180° 181° t/m 360°
Winsnelheid	Piekwaarden oostenwind	0, 14, 19, 22, 25, 28, 31, 34, 38, 42 m/s	0, 10, 16, 22, 27, 32, 37, 42, 47 m/s
	Piekwaarden westenwind	0, 14, 19, 22, 25, 28, 31, 34, 38, 42 m/s	0, 10, 16, 22, 27, 32, 37, 42, 47 m/s
Meerpeil		-0,3; -0,15; +0,0; +0,15; +0,3 m+NAP	-0,3; -0,15; +0,0; +0,15; +0,3; +0,45; +0,6; +0,75 m+NAP

Tabel 7 Overzicht van verschillen tussen WBI2017 en BOI2023 in de discretisaties van de basisstochasten voor het Volkerak-Zoommeer.

		WB2017	BOI2023
Windrichting	Sectoren oostenwind westenwind	12 van 30° 0° t/m 180° 181° t/m 359°	16 van 22,5° 1° t/m 180° 181° t/m 360°
Winsnelheid	Piekwaarden oostenwind	0, 10, 20, 30, 42, 46 m/s	0, 10, 16, 22, 27, 32, 37, 42, 47 m/s
	Piekwaarden westenwind	0, 10, 20, 30, 42, 46 m/s	0, 10, 16, 22, 27, 32, 37, 42, 47 m/s
Meerpeil		+0,05; +0,4; +0,8; +1,2; +1,8 m+NAP	+0,0; +0,15; +0,3; +0,45; +0,6; +0,9; +1,2; +1,5; +1,8; +2,1 m+NAP

5.3.1 Windsectoren

De discretisatie van de windsectoren is voor de Grevelingen en het Volkerak-Zoommeer niet aangepast t.o.v. WBI2017. Voor het Markermeer en de Veluwerandmeren is dit wel aangepast. Het grootste gedeelte van de actuele databases fysica van het Markermeer en de Veluwerandmeren uit WBI2017 zijn gevuld o.b.v. de OOM-studie (WL | Delft Hydraulics (1997)) t.b.v. de wijzigingen rond de realisatie van IJburg en een verbetering van de modellering van de Eem en de Eempolder is een gedeelte van de HRD databases verbeterd in 2005 (Delft Hydraulics & Witteveen+Bos, 2005). Destijds is gerekend met 12 windsectoren. In BOI2023 is overgestapt op 16 sectoren, d.w.z. de windroos (360°) is in 16 gelijke sectoren van 22.5° verdeeld. De keuze is heel pragmatisch: 12 windrichtingen geeft te weinig informatie over de hydraulische belastingen, meer dan 16 vraagt weer te veel rekentijd bij de productie en bij de bepaling van de hydraulische belastingen. Daarnaast is het wenselijk om dit landelijk uniform te hebben en niet per watersysteem een andere keuze.

Niet alleen het aantal sectoren is veranderd in het BOI, ook is de windrichting noord (0° of 360°) niet langer aan oostelijke maar aan westelijke windrichtingen toebedeeld. Hierdoor worden in de berekeningen met noordelijke wind wezenlijk andere basistochastwaarden en windverlopen toegepast (zie voorgaande tabellen). Immers een rotatie van de wind wordt alleen toegepast voor westelijke windrichtingen.

De Veluwerandmeren, de Grevelingen en het Volkerak-Zoommeer worden niet doorgerekend met een draaiende wind (ook niet voor westelijke windrichtingen). De windrichting was in WBI2017 en is in BOI2023 constant. Rotatie is en wordt alleen toegepast op het Markermeer.

5.3.2 Windsnelheden

Net als voor de discretisatie van de windrichting, is ook de discretisatie van de windsnelheden verfijnd en verlengd (zie Tabel 4 t/m Tabel 7). Deze wijziging heeft langs het Markermeer de meeste impact op de oostelijk windrichtingen en dan met name windrichting noord. Voor het Volkerrak-Zoommeer is de discretisatie van de windsnelheid ook aanzienlijk verfijnd, maar door de ongewijzigde windsectoren heeft dit minder invloed. Voor de Veluwerandmeren en de Grevelingen is de discretisatie ook aangepast om landelijk uniformiteit te krijgen. Het effect hiervan op de inhoud van de databases fysica (en daarmee op de probabilistische berekening) is beperkt.

5.3.3 Meerpeilen

Net als voor de discretisatie van de windrichting en de windsnelheid, is ook de discretisatie van de meerpeilen verfijnd en verlengd (zie Tabel 4 t/m Tabel 7). Deze wijzigingen in BOI2023 zijn ook nodig gebleken om voldoende hoge waterstanden te kunnen genereren om golfcondities bij af te kunnen leiden zonder extrapolatie in de golfgegevens. Hierdoor is het resultaat van de productieberekeningen ook geschikt voor het OI en voor beleidsstudies waar met nieuwe/aangepaste meerpeilstatistiek prognoses gemaakt kunnen worden van de hydraulische belastingen na klimaatveranderingen (en/of eventuele maatregelen in het beheer).

5.4 Modelrooster

De verbeteringen van het rooster (zie paragraaf 3.3) spelen een duidelijke rol. Het is duidelijk dat in het Markermeer bijvoorbeeld bij de Hollandsche brug, of in de Veluwerandmeren bij het aquaduct te Harderwijk de waterbeweging beter wordt gesimuleerd in de zesde generatie. De zesde generatie maakt het mogelijk om de BOI uitvoerpunten dichter bij de oever en de primaire kering te leggen. Door de detaillering van het rooster in havens en langs het waterfront van dorpen komt hier meer informatie beschikbaar. De toename van het aantal beschikbare uitvoerpunten t.o.v. eerdere generaties modellen is een duidelijk verschil. Het tracé van de oever langs de Meren kan zo beter worden gevolgd. Gesteld kan worden dat met de introductie van de zesde generatie het modelrooster niet meer een beperking is om met meer detail en meer nauwkeurigheid tot aan de teen van de dijk te rekenen. In hoofdstuk 6 zal blijken dat een meer gedetailleerd rooster in combinatie met de keuze van de uitvoerlocaties niet noodzakelijkerwijs tot een verbetering van de berekende waterstand voor BOI leidt. We geven hier enkele oorzaken van:

- Vooraf zou meer aandacht moeten worden besteed aan de initiële conditie van een simulatie in combinatie met de gekozen plek van de uitvoerlocaties in het modelrooster. Het heeft weinig zin om uitvoer uit te lezen op locaties die pas door het water worden bereikt bij condities die extremer zijn dan aangegeven in Tabel 4 t/m Tabel 7. Het werkt verstorend als in de initialisatie van een simulatie allerlei plassen op hooggelegen terreinen aanwezig zijn. Langs de Meren met schorren en slikken ontstaat bij een laag meerpeil veel land dat droog komt te staan (voorlanden). Het *blind* uitlezen van de uitvoer op locaties langs de oever is dan niet voldoende. Immers, als het water de oeverlocatie niet bereikt, wordt standaard de bodemhoogte uitgelezen. In sommige gevallen staan plassen op het maaiveld. Hierdoor is het uitvoerpunt wel nat, maar wordt de waterstand niet beïnvloed (niet veroorzaakt) door de doorgerekende condities van wind en meerpeil. Tussen het midden van het meer en de oeverlocatie kunnen allerlei obstakels aanwezig zijn, met name bij havens en waterfronten zijn vaak kademuren aanwezig die het voorland en/of een lage kade beschermen. Er moet zorg worden besteed aan een controle van het rekenresultaat of een maaiveldhoogte of een (geïsoleerde) plas wordt uitgelezen. In BOI-verband is het aantal uitvoerpunten zo groot dat hiervoor een automatische droogvalprocedure wordt toegepast. Deze levert niet altijd een logisch resultaat.

- De toepassing van de vijfde generatie voor de Grevelingen en het VZM voor BOI heeft geleid tot het verwijderen van een groot deel van de locaties langs slikken en schorren, omdat hier de resultaten niet werden vertrouwd. In Oerlemans et al. (2022) is aangetoond dat in het zesde generatie model van de Grevelingen bij bepaalde combinaties van meerpeil en wind een dun laagje water over de schorren en slikken wordt geblazen tot aan de primaire kering. Simulatie van dergelijke details was niet of nauwelijks mogelijk in de vijfde generatie modellen. Met de introductie van de zesde generatie wordt het mogelijk met meer detail het onderlopen van het voorland te berekenen. In het verleden (5^{de} en eerdere generaties, WAQUA) als voor BOI2023 (6de generatie, DHYDRO) is bij gebrek aan metingen nooit specifiek gevalideerd zijn op situaties met storm over omvangrijke ondiep overstroomde kwelders en slikken (afgezien van mogelijk enkele metingen op de Waddenzee). Om dit op betrouwbare wijze te berekenen, wordt echter een grotere inspanning van de validatie gevraagd.

5.5 Modelschematisatie

In paragraaf 3.5 zijn de grootste verschillen in de schematisatie tussen 'pre-baseline' en zesde generatie besproken. Het betreft verbeteringen voor de haven bij Harderwijk, de uitbreiding van IJburg, de aanleg van de Marker Wadden in het Markermeer en de aanleg van de Reevesluis en Reevedam in de Veluwerandmeren. Dit zijn zonder meer verbeteringen die de werkelijkheid realistischer beschrijven. Het is niet eenvoudig om het effect van elke individuele verbetering los te kwantificeren. In deze verschilanalyse zijn geen nieuwe (aanvullend verklarende) berekeningen gemaakt. Het effect van deze details voor de toepassing van de zesde generatie modellen blijkt beperkt in de uitgevoerde analyse (zie hoofdstuk 6). Daar waar het significant is, wordt het benoemd. Dat dit mogelijk minder zichtbaar is in de resultaten, heeft redenen die in de voorgaande paragraaf al zijn benoemd.

In het VZM en de Grevelingen hebben geen noemenswaardige (grote) wijzigingen aan de schematisatie plaatsgevonden in de overgang van het vijfde naar zesde generatie model.

6 Effect verschillen BOI2023 t.o.v. WBI2017

Dit hoofdstuk gaat in op de effecten van de overstap naar een nieuw instrumentarium voor BOI2023 t.o.v. het instrumentarium dat is gebruikt in de vorige beoordelingsronde (WBI2017). Voor BOI2023 (voor de beoordeling) geldt dat zowel het instrumentarium zelf (hoofdstuk 3) als de gebruikte modelrandvoorwaarden (hoofdstuk 5) zijn aangepast. Daartoe hebben we een analyse uitgevoerd, waarbij alleen is gekeken naar het effect van de gehele overstap. Voor een groot deel van de Meren is het niet meer mogelijk om met het oude instrumentarium nieuwe berekeningen te maken. Daarom zijn geen nieuwe berekeningen met vergelijkbare uitgangspunten en/of modelrandvoorwaarden gemaakt. We maken een vergelijking tussen de locaties en de waterstanden die in de concept- en definitieve databases van respectievelijk BOI2023 en WBI2017 zijn opgenomen. Dit kan een vertekend beeld geven, omdat de vertaling van potentiële wind naar open water (winddrag) in BOI2023 via de productieberekeningen in de databases is terecht gekomen en in WBI2017 niet in de databases is verwerkt.

De beschikbare databases van WBI2017 zijn definitieve databases (gedownload van openbare *web omgeving - stack*), wat betekent (1) dat niet alleen de resultaten van de productieberekeningen zijn gecontroleerd, (2) dat aanvullend gecontroleerd is dat op uitvoerlocatie niet de bodemhoogte maar een 'stabiele' waterstand is uitgelezen en (3) dat de *met database berekende* frequentielijn overeenkomt met het probabilistische resultaat op andere locaties langs hetzelfde normtraject. Als aan een van de drie controles niet wordt voldaan, dan wordt het resultaat van de gehele productieberekening voor alle locaties verwijderd uit de database of alleen het resultaat voor een specifieke uitvoerlocatie. In de conceptdatabases voor het BOI2023 van het Markermeer, de Veluwe-randmeren en de Grevelingen zijn controles 1 en 2 uitgevoerd. Op de conceptdatabases van het Volkerak-Zoommeer is alleen controle 1 uitgevoerd. Niet alleen het modelinstrumentarium en de modelrandvoorwaarden (zoals de windmodel-lering) zorgen voor verschillen in waterstand, ook de positie van de uitvoerlocaties zijn gewijzigd waardoor verschillen ontstaan. In BOI2023 is er (over het algemeen) voor gekozen om de locaties dichterbij de primaire kering te leggen.

In deze verschilanalyse bespreken we eerst de resultaten langs het Markermeer (paragraaf 6.1). Daarna volgen de Veluwerandmeren (6.2), de Grevelingen (6.3) en het Volkerak-Zoommeer (6.4). Dit dossieronderzoek heeft niet de ambitie om een volledig en precies beeld neer te zetten van alle verschillen tussen WBI2017 en BOI2023, omdat dat een veel te grote inspanning zou zijn. Dit onderzoek kan ook niet de verschillen in alle maatgevende situaties voor de normtrajecten langs de Meren duiden, omdat op dit moment de maatgevende belastingen voor BOI2023 niet beschikbaar zijn. Mocht dit wel beschikbaar zijn, dan zouden dit te veel combinaties van meerpeil, windrichting en -snelheid zijn om te bespreken. Voor elk meer zijn bij meerdere windrichtingen de verschillen tussen WBI2017 en BOI2023 onderzocht. Voor alle normtrajecten langs een meer worden de verschillen besproken bij één indicatieve windrichting, één meerpeil en drie windsnelheden. Zodat een interpreteerbaar ruimtelijk beeld ontstaat van de verschillen. Helaas is het niet gelukt om alle geconstateerde verschillen in de resultaten eenduidig te verklaren, omdat de verschillen meerdere oorzaken kunnen hebben en het afpellen van deze oorzaken niet mogelijk is op basis van alleen de databases. Toch helpt het gerapporteerde beeld en de gegeven verklaringen van de verschillen bij de interpretatie van de gevolgen van de overstap die met het gebruik van de zesde generatie genomen wordt. Het zal duidelijk worden dat andere wijzigingen (voornamelijk in uitgangspunten van BOI2023 t.o.v. WBI2017, zie ook hoofdstuk 5) van groter belang zijn voor de geconstateerde verschillen dan het gebruik van het nieuwe modelinstrumentarium.

6.1 Markermeer

6.1.1 Rond het Markermeer bij noorden wind

Op het Markermeer is in de productie gerekend met een uniforme windrichting in de ruimte en in de tijd roteert de wind afhankelijk van de dominante windrichting (zie 5.2.2). De windsnelheid varieert ook in de tijd en is uniform in de ruimte. We beginnen de verklaring van de verschillen tussen BOI2023 en WBI2017 met een “rondwandeling” langs het Markermeer, waarbij we per deeltraject van de rondwandeling de verschillen stuk voor stuk bespreken. In Figuur 15 t/m Figuur 22 is deze rondwandeling langs de oevers van het Markermeer gevisualiseerd. De figuren bestaan steeds uit de volgende onderdelen:

1. Linkerzijde figuur

Aan de linkerzijde van de figuur staat een overzichtskaartje van het hele Markermeer-gebied, met daarin per locatie een indicatie van het waterstandsverschil tussen BOI2023 en WBI2017 voor een specifieke belastingcombinatie (Mn040U32D360, wat overeenkomt met een meerpeil van -0,4 m+NAP, een windsnelheid van 32 m/s en een windrichting uit het noorden). Het verschil betreft “BOI2023 minus WBI2017”, dus positieve waarden betekent dat BOI2023 hogere resultaten geeft, negatieve waarden betekent dat WBI2017 hoger is. In de figuur staat ook een draaiende pijl (oranje), die de windrotatie weergeeft (gedurende een storm draait de wind van grofweg WNW naar N). Tot slot is in het kaartje aan de linkerzijde een zwarte pijl (met de term “route”) te zien. Deze dient om een specifiek traject (deel) van de rondwandeling nader uit te lichten in de langsfiguur aan de rechterzijde.

De resultaten van WBI2017 zijn eerst geïnterpoleerd en geëxtrapoleerd naar dezelfde realisaties van de basisstochasten, zoals in de BOI2023 berekeningen zijn toegepast¹³. Geïnterpoleerd is voor windrichting, windsnelheid en meerpeil. Voor windsnelheid en meerpeil is ook geëxtrapoleerd. Deze bewerking van de gegevens komt overeen met de bewerking die in de probabilistische berekening wordt uitgevoerd om op een fijner rooster te rekenen. De bewerkte gegevens zijn vertaald naar de locaties uit de BOI2023 databases. In de concept BOI2023 databases zitten veel meer locaties per normtraject (blauwe punten in Figuur 14). Tussen de dichtstbijzijnde WBI2017 locaties (rode punten in Figuur 14) is geïnterpoleerd. In de probabilistische analyse van WBI2017 en BOI2023 zijn beide sets locaties aangenomen als de waterstand aan (of nabij) de teen van de dijk¹⁴. Dit is een inschatting van de wijze waarop omgegaan kan worden met het kleinere aantal locaties in de definitieve WBI2017 databases. De linkerzijde van de figuur geeft dan ook een ruimtelijke indicatie van de verschillen.

2. Rechterzijde figuur

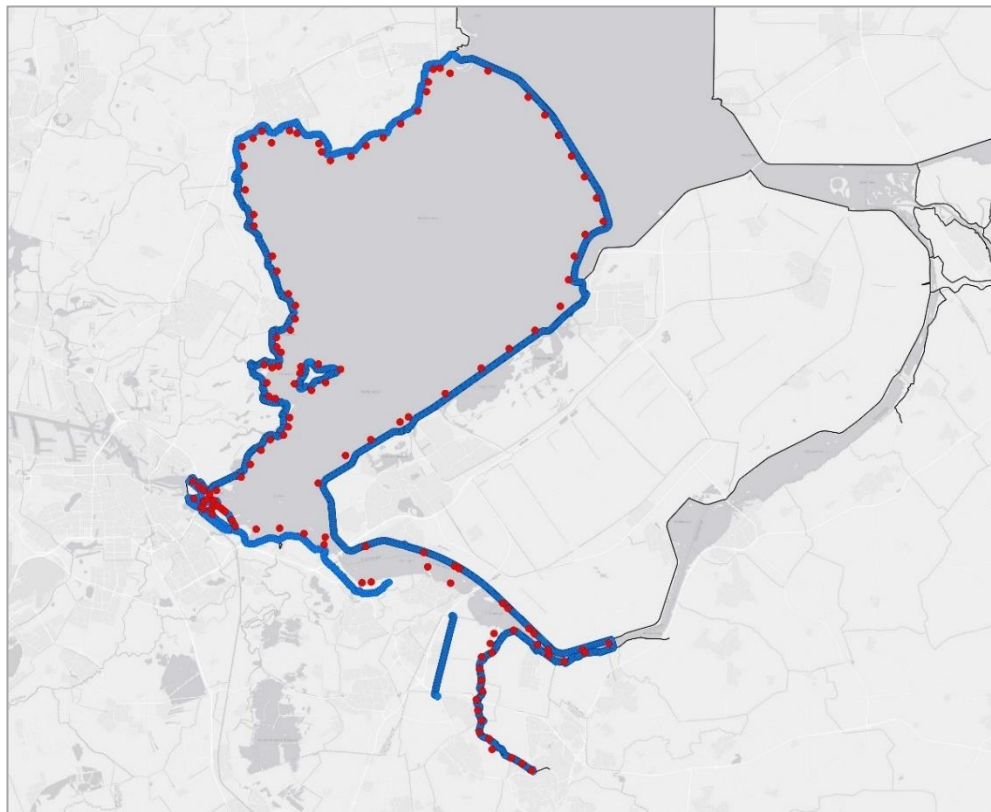
Aan de rechterzijde staat een langsfiguur met daarin de absolute waterstanden voor een specifiek traject zonder inter- of extrapolatie. Dit traject komt overeen met de pijl (“route”) aan de linkerzijde. Aan de rechterzijde zijn waterstanden uit de databases fysica gevisualiseerd voor zowel BOI2023 (HRD A) als voor WBI2017 (HRD B). Voor beide zijn steeds 3 windsnelheden (0, 22/23 en 30/32 m/s) in beeld gebracht. De blauwe, oranje en groene doorgetrokken lijnen komen overeen met de resultaten uit de databases fysica van BOI2023 voor respectievelijk 0, 22 en 30 m/s.

¹³ Bij extrapolatie kunnen soms forse extrapolatiefouten worden gemaakt. Met name bij meerpeilen en oostelijke windrichtingen (beperkt meerpeil- resp. windsnelheidsbereik van WBI2017) en daarnaast ook als WBI2017 (bijna) droogval geeft en die droogval verdwijnt in de extremere condities van BOI2023.

¹⁴ In de probabilistische berekening wordt verondersteld dat de locaties van WBI2017 en BOI2023 aan de teen van de dijk liggen. In WBI2017 en in BOI2017 is geprobeerd om zo dicht mogelijk bij de dijk een waterstand beschikbaar te hebben in de database. In de beoordeling wordt dan verondersteld dat de locaties in de database aan de teen van de dijk liggen.

De rode, paarse en bruine gestreepte lijnen corresponderen met die uit de databases van WBI2017 voor respectievelijk 0, 23 en 30 m/s. De donkergekleurde markers op de lijnen geven de posities van de beschikbare uitvoerlocaties langs het traject. Omdat in de vorige beoordelingsronde een andere discretisatie van de basisstochast windsnelheid is toegepast, komen de opgelegde windsnelheden van BOI2023 en de WBI2017 data niet overeen in de vergelijking¹⁵. Gekozen is de dichtstbijzijnde realisaties met elkaar te vergelijken en niet te interpoleren naar dezelfde waarde, zodat het werkelijke verschil tussen BOI2023 en WBI2017 wordt gepresenteerd.

Indien sprake is van afwaaiing op een uitvoerlocatie (een verlaging van de waterstand door wind), komt dit op een andere wijze in de database van BOI2023 dan in die van WBI2017 terecht. In WBI2017 is de waarde van de waterstand nabij het tijdstip van de maximale windsterkte weggeschreven in de database. Deze waarde komt min of meer overeen met de maximale verlaging van het opgelegde meerpeil. In BOI2023 is het maximum van de waterstand gedurende de gehele doorgerekende periode naar de database weggeschreven. Deze waarde is bij afwaaiing gelijk aan het opgelegde meerpeil. In de figuren geven we aan dat voor een juiste vergelijking tussen WBI2017 en BOI2023 het verschil door afwaaiing zou moeten worden gecorrigeerd.



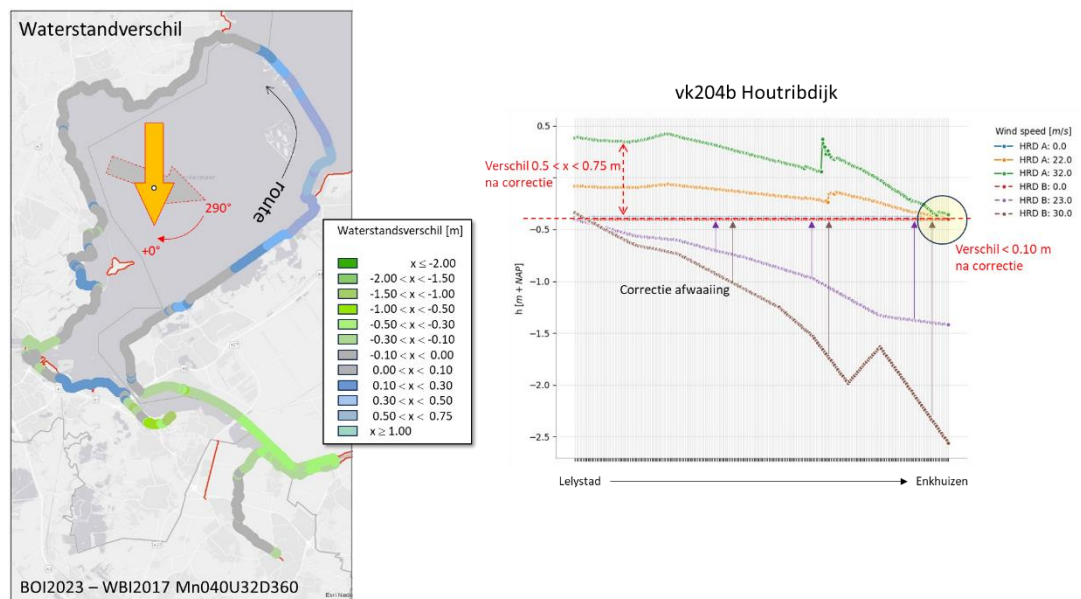
Figuur 14 Weergave van de locaties langs het Markermeer zoals beschikbaar in de BOI2023-databases (serie blauwe punten nabij de primaire keringen) en locaties beschikbaar in de WBI2017-databases (serie rode punten, met minder locaties op grotere afstand tot primaire keringen).

Uit de figuur blijkt dat de rode locaties van WBI2017 verder van de primaire kering gelegen zijn. In het verleden is er voor gekozen om de locaties op 300 m van de teen te leggen. In BOI2023 is er voor gekozen om de locaties op 60 m te leggen.

¹⁵ Op basis van deze verschillen in windsnelheid wordt een maximaal verschil van 14% in opwaaiing verwacht, namelijk overeenkomstig met $(32/30)^2$.

Bij het vullen van de databases is zowel in WBI2017 als in BOI2023 getoetst of water aanwezig is op de uitvoerlocaties. Als dat niet het geval is, wordt het resultaat uitgelezen op een zogenaamde terugvallocatie (die verder van de kering af ligt en wel door het water wordt bereikt). Door het gedetailleerdere rekenrooster van de zesde generatie is het mogelijk om meer detail in de bodemligging en eventuele obstakels als kademuurtjes op het voorland in de schematisatie op te nemen. Dergelijke obstakels en eventuele terreindepressies kunnen leiden tot geïsoleerde plassen op hoger gelegen delen in het modeldomein (bijvoorbeeld op het voorland). Bij het uitlezen van de resultaten is het wel mogelijk om op droogval te toetsen, maar niet op geïsoleerde plassen. Het moge duidelijk zijn dat een waterstand als gevolg van een dergelijke plas, niet de juiste hydraulische belasting geeft. Daar waar sprake is van dergelijke uitvoer, zullen we dit aangeven. In de standaard controle procedures van het BOI wordt dergelijke uitvoer nog uit de concept databases verwijderd. In de databases die beschikbaar waren voor de huidige verschilanalyse was deze controle nog niet uitgevoerd.

In Figuur 15 beginnen we de rondwandeling met het traject van Lelystad naar Enkhuizen (Houtribdijk).



Figuur 15 Waterstandverschillen langs het Markermeer (traject Houtribdijk) bij meerpeil -0,4 m+NAP, windrichting noord: links windsnelheid 32 m/s en rechts drie windsnelheden. (links WBI2017 resultaten geïnterpoleerd op BOI2023 datarooster, rechts BOI2023 = HRD A en WBI2017 = HRD B, uitleg begin 6.1.1).

We constateren het volgende:

- Uit de geografische figuur aan de linkzijde zien we verschillen die liggen tussen +0,1 en +0,75 m (BOI2023 komt hoger uit dan WBI2017).
- Aan de rechterzijde zien we in de langfiguur in eerste instantie grotere verschillen tussen BOI2023 en WBI2017. De BOI-resultaten liggen bóven het meerpeil van -0,4 m+NAP, de WBI-resultaten liggen daar juist ónder. Dit heeft twee belangrijke oorzaken:
 - Ten eerste behoorde de windrichting noord in WBI2017 tot de oostelijke windrichtingen (waarvoor geen rotatie van de wind is meegenomen), terwijl de richting noord in BOI2023 tot de westelijke windrichtingen hoort (waarbij rotatie wel is meegenomen).

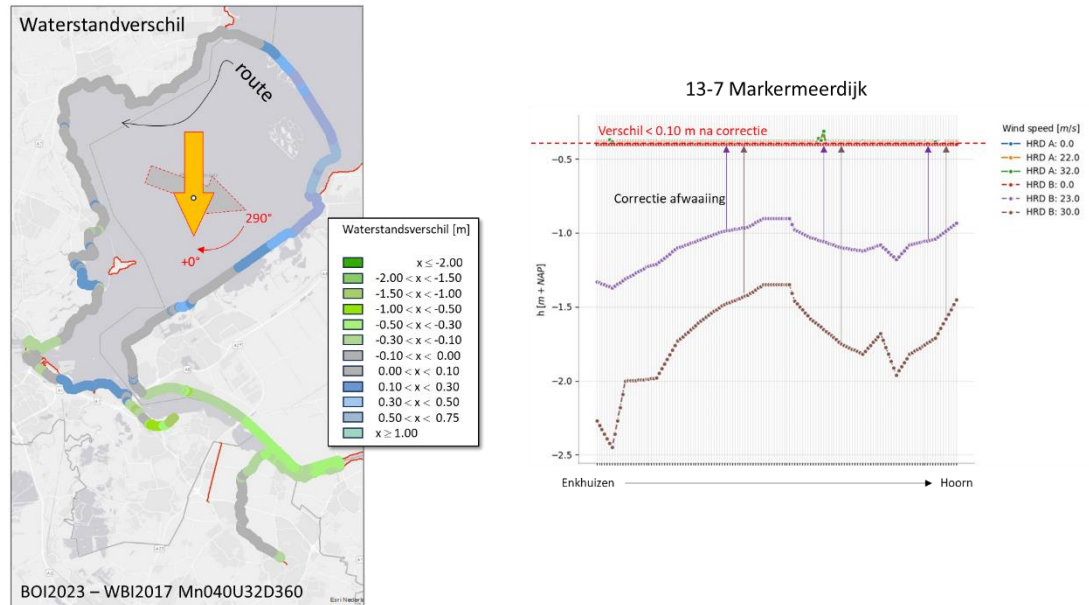
- Ten tweede zijn in de databases fysica van WBI2017 waterstanden nabij het moment van de maximale windsterkte¹⁶ weggeschreven. In het geval van afwaaiing is dan de minimale waterstand opgenomen in de WBI2017 database, terwijl in de BOI2023 databases altijd maximale waterstanden zijn opgenomen. Als sprake is van afwaaiing wordt de hoogste waterstand aan het begin van de simulatie gevonden, wat overeenkomt met het initiële meerpeil.
Door windrotatie kan de maximale waterstand ook op een ander moment optreden, dan het moment van de maximale windsterkte. Als tijdens de rotatie van de wind een ongunstigere situatie (met hogere waterstanden) voor een bepaald dijkvak optreedt dan op het moment van de maximale windsterkte, kan het moment van de maximale waterstand meerdere uren verschillen met het moment van de maximale windsterkte.
- Ten derde is bij het uitwerken van de rotatie van de wind in de hydraulische berekeningen van WBI2017 een fout gemaakt. Destijds is de rotatie in vectoren uitgerekend en niet in graden (gecorrigeerd in aanvulling voor HR2006). Dit heeft weer een effect op de resulterende waterstand op het moment van de maximale windsterkte.

De verwerking van de modelinvoer en -uitvoer naar de databases fysica is een nabewerking, wat dus niets zegt over de onderlinge verschillen tussen de verschillende generaties waterbewegingsmodellen van BOI2023 en WBI2017. Om het effect van afwaaiing eruit te filteren, zijn de WBI2017-resultaten hiervoor gecorrigeerd. Dat betekent dat de bruine en paarse lijnen “opgetild” zijn naar de realisatie van het meerpeil van -0,4 m+NAP, wat overeenkomt met het resultaat dat staat gevisualiseerd in de geografische figuur aan de linkerzijde van Figuur 15. Voor andere effecten zoals het moment van uitlezen van de resultaten en de fout in de windrotatie kunnen de WBI2017 resultaten niet worden gecorrigeerd.

- De vergelijking tussen de BOI2023-resultaten en de WBI2017-resultaten voor de geselecteerde realisaties van de windsnelheid is niet helemaal eerlijk, maar onvermijdelijk omdat in de verschillende programma's andere belastingcombinaties zijn doorgerekend (met andere windsnelheden).
- Aan de rechterzijde van Figuur 15 is met name bij de hoogste windsnelheden goed de invloed van de aanleg van de (brede) ondiepe zone ter hoogte van de Trintelhaven terug te zien, wat resulteert in 'sprongen' in het verloop van de waterstanden langs het normtraject. Ook bij een windsnelheid van 22 m/s is in de BOI-resultaten een dergelijke sprong in de waterstanden nog te zien. De sprongen tussen opeenvolgende locaties in BOI2023 zijn abrupter dan in WBI2017, omdat de detaillering van het rekenrooster in BOI2023 veel fijner is geworden en de maatregel gedetailleerder is geschematiseerd.

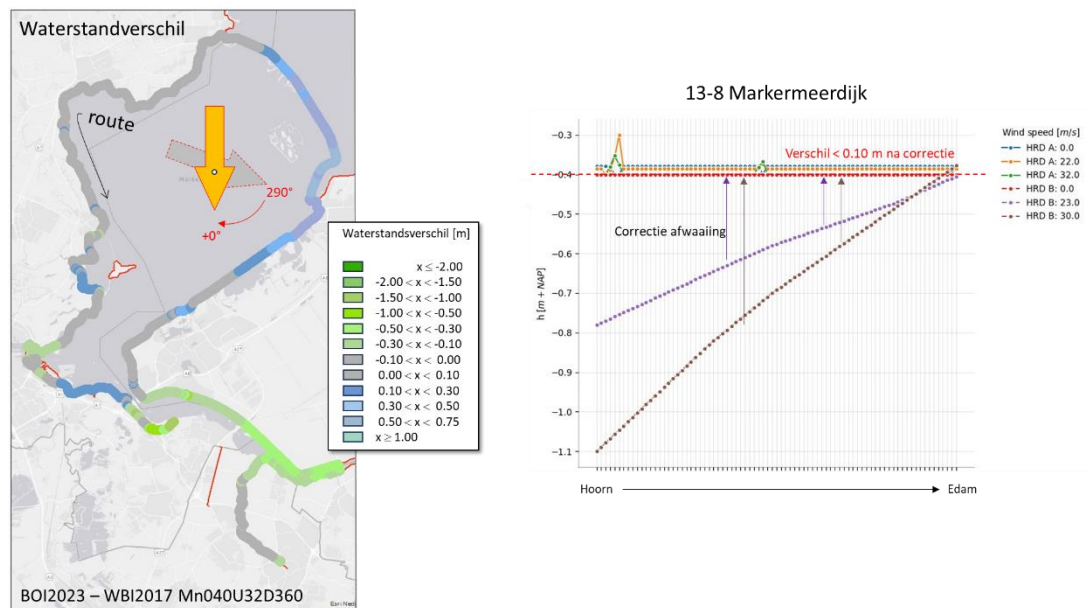
Het vervolg van de rondwandeling betreft het traject van Enkhuizen naar Hoorn (Markermeerdijk), zie Figuur 16. De Grote Hop – zanddijk voor de primaire waterkering – is niet in het zesde generatie model opgenomen, omdat de contouren hiervan in 2020 nog niet bekend waren. Ook hier is goed het verschil in methode te zien tussen WBI2017 en BOI2023 wat betreft het omgaan met afwaaiing. Als daarvoor gecorrigeerd wordt (door de WBI2017 resultaten op te tillen naar het initiële meerpeil), zien we dat de verschillen minder dan 0,1 m zijn. Op een enkele plek zien we dat de BOI2023 resultaten een kleine verhoging geven: dit wordt veroorzaakt door een fijnere detaillering van bepaalde geografische elementen zoals haventjes in het BOI2023 rooster.

¹⁶ Tijdens de OOM-studie zijn niet de maximale waterstanden uitgevoerd, maar is het maximum uitgevoerd van de waterstanden op t=9, t=11 en t=13 uur rondom het maximum van de windsterkte. Dit betekent dat de gebruikte maximale waterstand lager kan zijn dan de daadwerkelijk berekende maximale waterstand, indien de top van het waterstandsverloop niet op t=9, t=11 of t=13 uur valt. Dit is bij afluende wind het geval.



Figuur 16 Waterstandsverschillen langs Markermeer (traject 13-7 Markermeerdijk) bij meerpeil -0,4 m+NAP, windrichting noord: links windsnelheid 32 m/s en rechts drie windsnelheden. (links WBI2017 resultaten geïnterpoleerd op BOI2023 datarooster, rechts BOI2023=HRD A en WBI2017=HRD B, uitleg begin 6.1.1).

Het volgende traject betreft 13-8 (tussen Hoorn en Edam) aan de westzijde van het meer (Figuur 17).

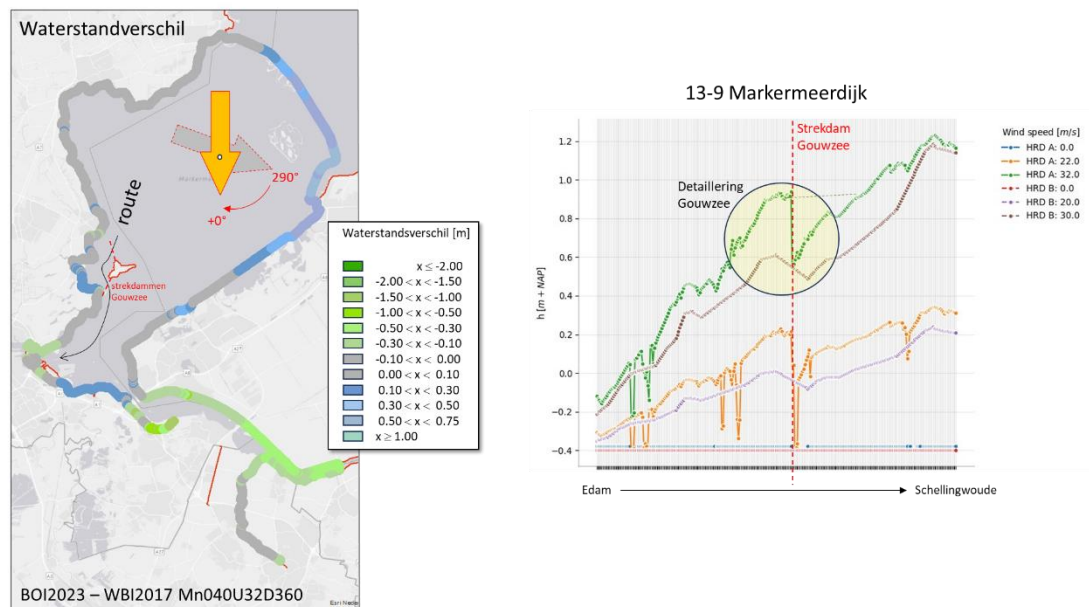


Figuur 17 Waterstandsverschillen langs Markermeer (traject 13-8 Markermeerdijk) bij meerpeil -0,4 m+NAP, windrichting noord: links windsnelheid 32 m/s en rechts drie windsnelheden. (links WBI2017 resultaten geïnterpoleerd op BOI2023 datarooster, rechts BOI2023=HRD A en WBI2017=HRD B, uitleg begin 6.1.1).

We zien een vergelijkbaar resultaat als dat bij het vorige traject. Na correctie voor afwaaiing zijn de verschillen beperkt. Op enkele plaatsen geven de BOI2023-resultaten kleine verhogingen t.o.v. WBI2017. Dit wordt weer veroorzaakt door de fijnere detaillering van het BOI2023 rooster, b.v. in haventjes en/of op voorlanden. De oeverlocaties in WBI2017 liggen verder van de oever af (bij dieper water, zie Figuur 14), zodat deze resultaten minder verstoord worden door lokale omstandigheden nabij de uitvoerlocaties.

Op basis van de waarde in de BOI2023 database, is duidelijk dat het hier een waterstand betreft in een terreindepressie die wat hoger ligt (dat het water hier initieel achter gebleven is). Het water kan achter schotjes zijn blijven staan. Misschien ontstaat de hogere waterstand wel omdat het water in de terreindepressie een beetje scheef wordt gezet (richting het midden van het meer). Het moet duidelijk zijn dat de uitvoer gelezen is op een locatie die bij deze combinaties van wind en meerpeil niet in verbinding staat met de rest van het meer.

Het volgende traject betreft 13-9 (tussen Edam en Schellingwoude) aan de westzijde van het meer (Figuur 18).



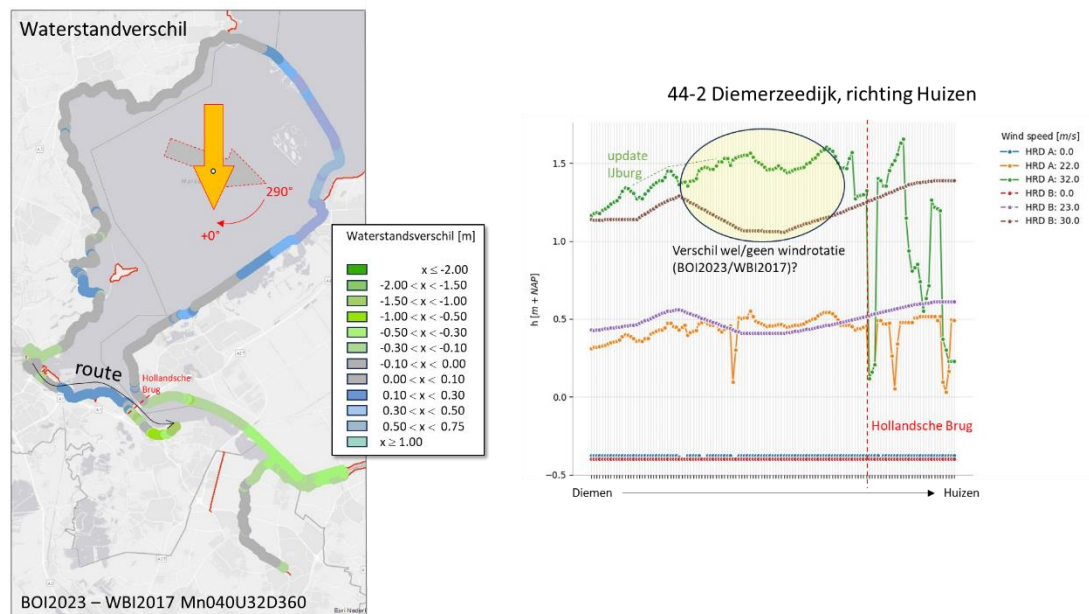
Figuur 18 Waterstandsverschillen langs Markermeer (traject 13-9 Markermeerdijk) bij meerpeil -0,4 m+NAP, windrichting noord: links windsnelheid 32 m/s en rechts drie windsnelheden. (links WBI2017 resultaten geïnterpoleerd op BOI2023 datarooster, rechts BOI2023=HRD A en WBI2017=HRD B, uitleg begin 6.1.1).

Uit de linkerzijde van de figuur zien we dat de verschillen grotendeels beperkt blijven tot 0,1 m, maar dat één deel van het traject blauw kleurt en verschillen geeft tussen 0,1 en 0,3 m. De wijziging in de rotatie tussen noordenwind in WBI2017 en BOI2023 en het verschil in toepassing van de winddrag zorgt waarschijnlijk voor de verschillen in de trend langs het normtraject. Het langsverloop van de waterstand is in de resultaten van BOI2023 ook grilliger. Dit verschil is goed te verklaren doordat in BOI2023 met een gedetailleerder rekenrooster is gewerkt rondom de Gouwee. Het effect van de aanwezige strekdammen (o.a. de verbinding met Marken, resultaten rondom Marken zelf zijn niet in de figuur opgenomen) komt dan ook veel explicieter naar voren in de resultaten dan in WBI2017, wat een goede verklaring geeft voor de verschillen. Zowel bij een windsnelheid van 22 m/s als 32 m/s zien we in de BOI2023-resultaten een veel grotere mate van detail terug, wat weer veroorzaakt wordt door de verbeteringen aan het rooster. Dit gedetailleerdere rooster i.c.m. uitvoerlocaties die dicht bij de primaire kering liggen, zorgt ook voor enkele zeer lage waterstanden in het langsverloop van BOI2023 (met name bij 22 m/s – oranje lijn). Het betreft hier uitvoer op een locatie dat bij deze combinatie niet in verbinding staat met de rest van het meer.

De resultaten voor traject 44-2 (tussen Schellingwoude en Huizen) staan in Figuur 19. Hier zien we voor het eerst verschillen tussen BOI2023 en WBI2017 die zowel positief als negatief uit kunnen pakken. Het effect verschilt ook per windsnelheid.

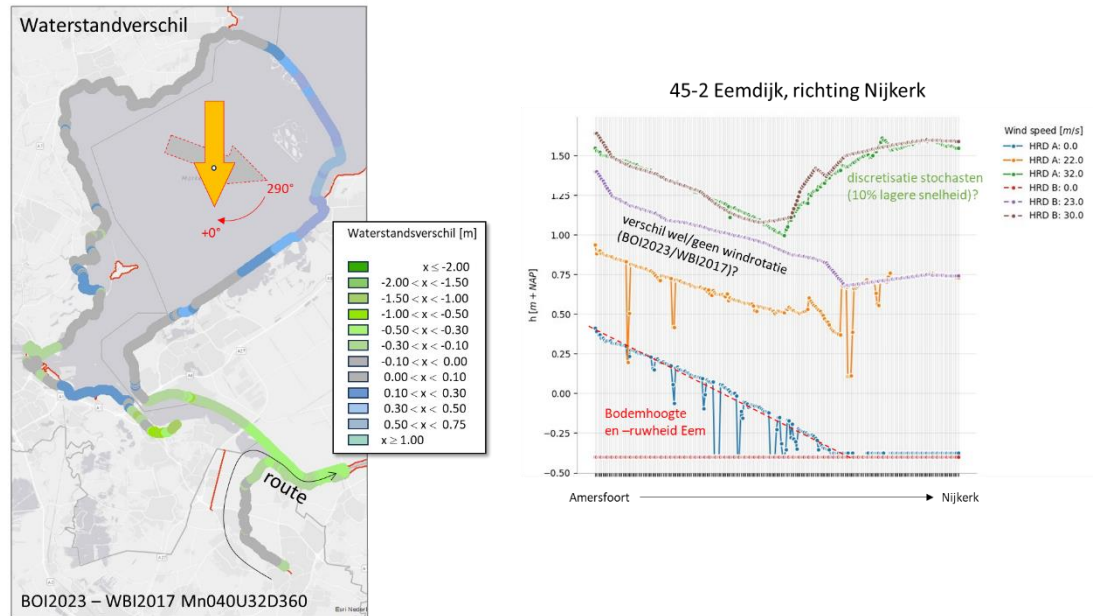
Een aantal zaken vallen op:

- In de luwte van IJburg zien we dat de BOI2023-resultaten meer detail laten zien, maar wel min of meer hetzelfde resultaat geven (voor deze specifieke belastingcombinatie) als in WBI2017. Op een enkele plek zien we aan de linkerzijde van Figuur 19 een afname van net iets meer dan 0,1 m (groen), als we de resultaten van WBI2017 interpoleren naar de realisaties van BOI2023. Aan de rechterzijde van de figuur zien we wel de verbeterde detaillering maar niet de kleine afname. Dit komt doordat het effect klein is en wegvalt als de realisaties niet exact overeenkomen.
- Op het stuk ten oosten van IJburg laat BOI2023 overwegend hogere waterstanden zien dan WBI2017 bij een windsnelheid van 32 m/s (orde 0,3 – 0,4 m). Dit wordt vermoedelijk veroorzaakt doordat windrotatie in BOI2023 wel is meegenomen en in WBI2017 niet voor deze specifieke windrichting. Dit is echter niet meer met zekerheid aan te tonen, omdat de benodigde modellen en precieze instellingen (die teruggaan tot 2001) niet meer beschikbaar zijn. In de modellering waarmee de WBI2017 resultaten zijn berekend is het gehele plan IJburg opgenomen, in de modellering van BOI2023 zijn alleen de gerealiseerde eilanden (een kleiner aantal) opgenomen. Op basis van de beschikbare informatie is het niet mogelijk om een eenduidige verklaring te geven voor de geconstateerde verschillen.
- De overgang naar het Eemmeer (achter de vernauwing van de Hollandsche Brug) is goed zichtbaar als verschil tussen beide modellen (overgang van blauwe puntjes naar groene puntjes in de linkerfiguur). Ook in de rechter langsfiguur is dit goed terug te zien. De verschillen ten oosten van de Hollandsche Brug (A6) zijn moeilijk aan een specifieke oorzaak toe te schrijven, maar ze zullen worden veroorzaakt door een combinatie van een verschil in windsnelheid, het verschil in wel/niet meenemen van windrotatie voor deze windrichting, een fijnere detaillering, een ruimer modelrooster (Figuur 3) en de geometrie.
- Het grillige verloop van de waterstanden in het langsverloop van BOI2023 wordt vermoedelijk veroorzaakt door de keuze van de uitvoerlocaties en eventuele obstakels waardoor enkele locaties geïsoleerd zijn van de rest van het meer.



Figuur 19 Waterstandverschillen langs Markermeer (traject 44-2 langs Diemerzeedijk richting Huizen) bij meerpeil -0,4 m+NAP, windrichting noord: links windsnelheid 32 m/s en rechts drie windsnelheden. (links WBI2017 resultaten geïnterpoleerd op BOI2023 datarooster, rechts BOI2023=HRD A en WBI2017=HRD B, uitleg begin 6.1.1).

Het traject tussen Amersfoort en Nijkerk is gevisualiseerd in Figuur 20.

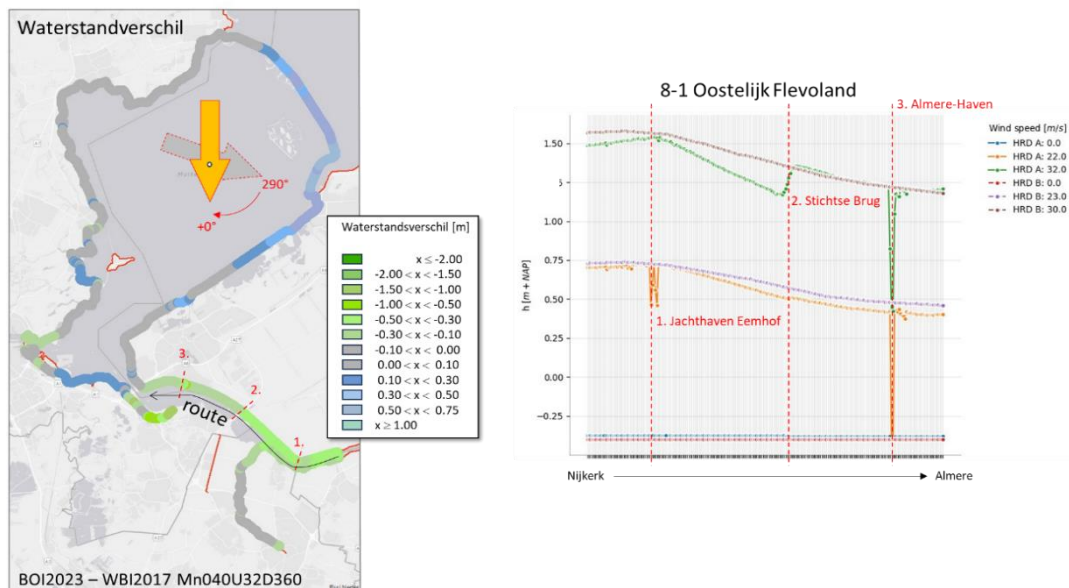


Figuur 20 Waterstandsverschillen langs Markermeer (traject 45-2 van Amersfoort naar Nijkerk) bij meerpeil - 0,4 m+NAP, windrichting noord: links windsnelheid 32 m/s en rechts drie windsnelheden. (links WBI2017 resultaten geïnterpoleerd op BOI2023 datarooster, rechts BOI2023=HRD A en WBI2017=HRD B, uitleg begin 6.1.1).

Op dit traject zien we dat BOI2023 voornamelijk een verlaging geeft van de waterstanden t.o.v. WBI2017 bij een windsnelheid van 22 m/s. Alleen bij windsnelheid 0 m/s zien we relatief grote verschillen langs de Eem. In dit deel van het gebied hebben verschillende verbeteringen plaatsgevonden in de BOI2023 modellering van de Eem (ander bodemhoogten en bodemruwheid). Dit zal ook doorwerken bij de hogere windsnelheden, maar daar zullen ook andere verschillen een rol spelen. Ook het feit dat in BOI2023 in de productieberekeningen bij de windsnelheden boven 30 m/s rekening is gehouden met winddragafkapping, kan een rol spelen. Daarnaast hebben de windsnelheden in beide programma's verschillende waarden, wat ook een oorzaak van verschillen in de figuur zal zijn. Zoals eerder ook aangegeven is niet meer met 100% zekerheid te achterhalen wat de precieze oorzaken zijn.

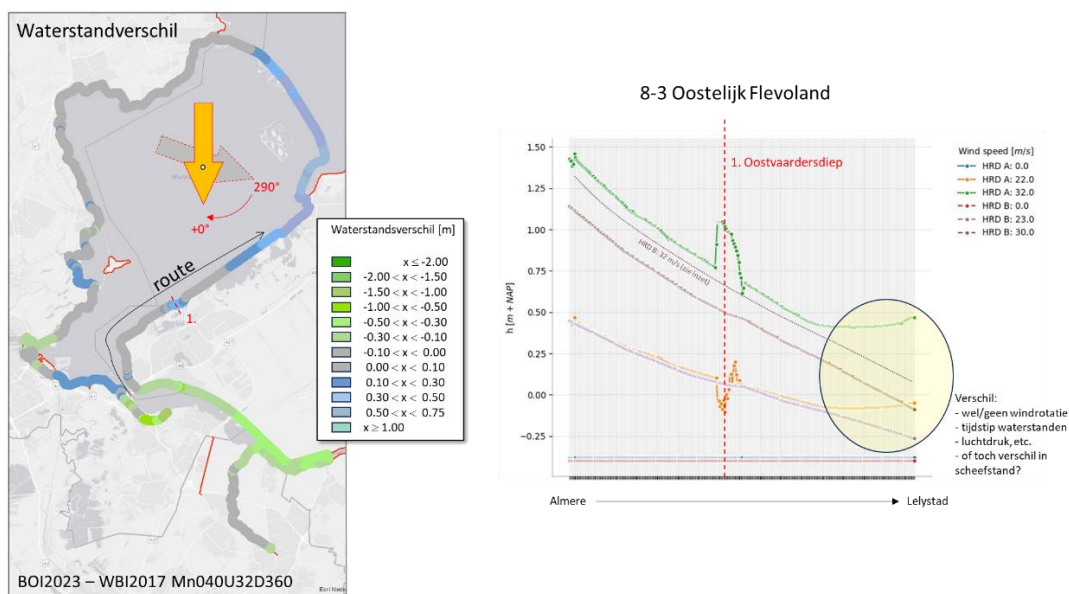
De resultaten voor het traject tussen Nijkerk en Almere zijn te vinden in Figuur 21. Over het algemeen ligt langs dit traject de berekende waterstand uit BOI2023 wat lager dan die van WBI2017. Hier zijn drie duidelijke geometrische locaties aan te geven waar de grootste verschillen ontstaan tussen BOI2023 en WBI2017:

1. De jachthaven Eemhof geeft in BOI2023 meer verschil tussen opeenvolgende locaties door een fijnere detaillering ervan in het rooster. In de BOI-waterstanden is ook het effect van de ronding in de Flevopolder terug te zien.
2. Bij de Stichtse Brug (A27) zien we een duidelijke sprong in de resultaten van BOI2023. Deze sprong is tegengesteld en veel kleiner in de resultaten van WBI2017. Hier is een verfijning en verruiming van het modelrooster (Figuur 3) belangrijk, maar ook het effect van windrotatie zal in BOI2023 anders doorwerken ter plaatse van deze vernauwing dan in WBI2017 (waar geen windrotatie is meegenomen voor deze windrichting).
3. De haven van Almere heeft een verlaging van de waterstand met grofweg 0,75 m in BOI2023. Mogelijk dat dit niet alleen veroorzaakt wordt door het model, maar dat de in BOI2023 gehanteerde nabewerking voor het vullen van de databases fysica ook van invloed is (droogvalprocedure). We adviseren om dit nader uit te zoeken, of wellicht is het nodig de locatie te verwijderen in de definitieve databases van het BOI.



Figuur 21 Waterstandsverschillen langs Markermeer (traject 8-1 van Nijkerk naar Almere) bij meerpeil - 0,4 m+NAP, windrichting noord: links windsnelheid 32 m/s en rechts drie windsnelheden. (links WBI2017 resultaten geïnterpoleerd op BOI2023 datarooster, rechts BOI2023=HRD A en WBI2017=HRD B, uitleg begin 6.1.1).

Het laatste traject van de rondwandeling bevindt zich tussen Almere en Lelystad (Figuur 22).



Figuur 22 Waterstandsverschillen langs Markermeer (traject 8-3 van Almere naar Lelystad) bij meerpeil - 0,4 m+NAP, windrichting noord: links windsnelheid 32 m/s en rechts drie windsnelheden. (links WBI2017 resultaten geïnterpoleerd op BOI2023 datarooster, rechts BOI2023=HRD A en WBI2017=HRD B, uitleg begin 6.1.1).

De verschillen in waterstanden tussen BOI2023 en WBI2017 blijven grotendeels beperkt tot 0,1 m. De extra lijn in de figuur onder de groene lijn, geeft de hoogte van de waterstand als in WBI2017 gerekend zou zijn met 32 m/s i.p.v. 30 m/s.

Er zijn drie opvallende zaken om te melden:

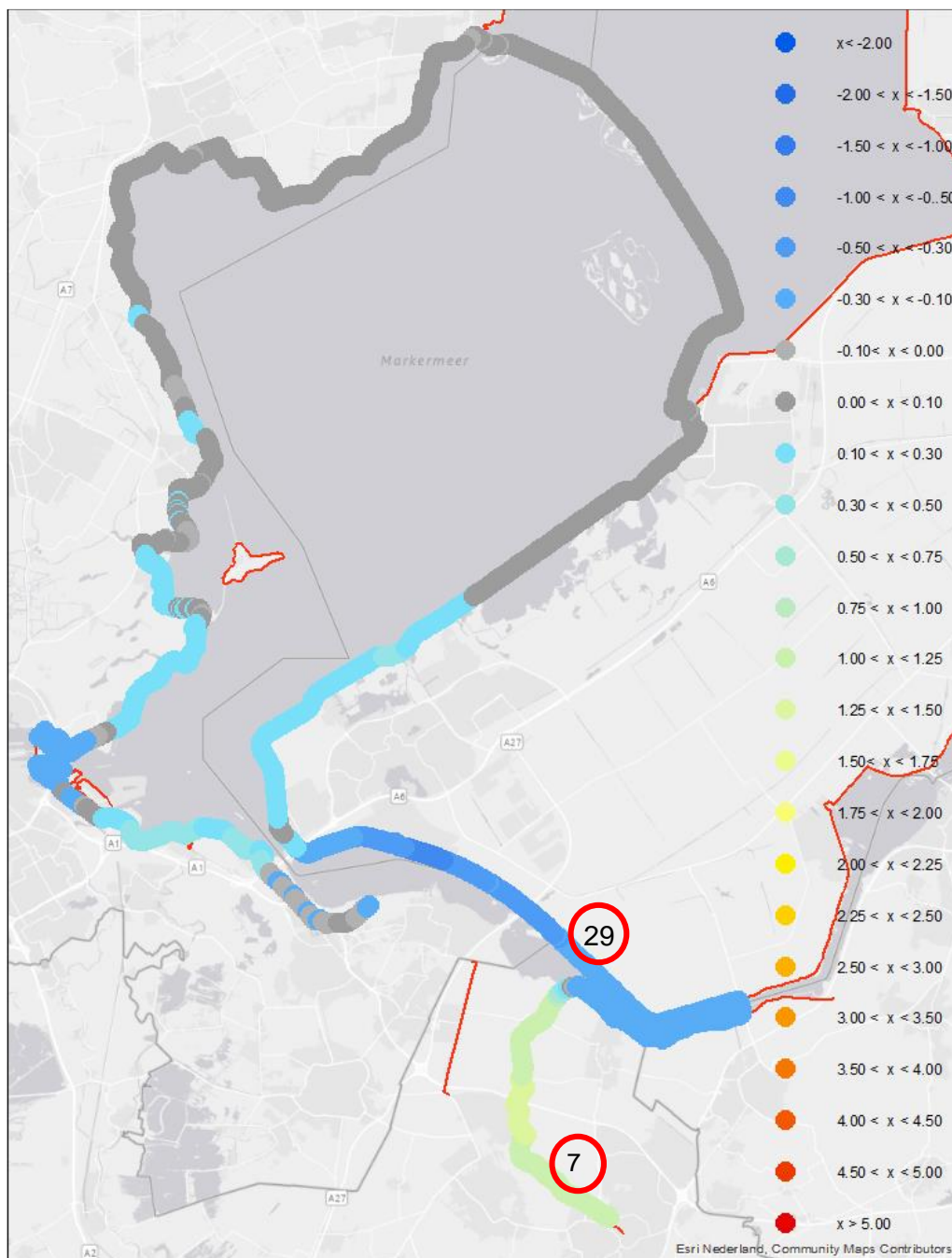
- Ter plaatse van het Oostvaardersdiep geven de BOI2023 resultaten veel meer variatie dan de WBI2017 resultaten. Bij de hoogste windsnelheid betreft het een verhoging van 0,2 – 0,3 m t.o.v. de naburige locaties. Bij de windsnelheid van 22 m/s ligt het effect tussen -0,1 en +0,1 m. Dergelijke toe- en afnames zijn niet zichtbaar in de WBI2017 resultaten. Dit wordt veroorzaakt door het rekenen met een (ter plaatse) gedetailleerder modelrooster dan in WBI2017. Verwacht mag worden dat meer detail in het rekenrooster betere resultaten oplevert. Alleen lijkt hier een waterstand te ontstaan die minder betrouwbaar is (dit is niet verder uitgezocht)..
- Het tweede punt is dat het relatief klein ogende verschil in windsnelheid (30 vs. 32 m/s) in termen van waterstanden op dit traject een duidelijke oorzaak is van het verschil. Ter illustratie is in de langsfiguur aan de rechterzijde op basis van extrapolatie ook een inschatting gegeven van het resultaat als in WBI2017 met 32 m/s gerekend zou worden. De waterstandsresultaten van WBI2017 gaan daarmee met orde 0,25 m omhoog en komen een stuk dichterbij de BOI2023 resultaten te liggen.
- Het derde punt dat opvalt, is dat de verschillen toenemen in de richting van Lelystad. De verschillen zijn echter lastig toe te schrijven aan één specifieke oorzaak. We noemen de belangrijkste: effect van windrotatie of een ander moment in een storm waarop de waterstanden zijn uitgelezen. De waterstand aan de rechterkant van de grafiek (nabij Lelystad) sluiten goed aan bij de waarden aan de linkerkant in de grafiek uit Figuur 15 (begin Houtribdijk). Gegeven deze verschillen zien we geen aanleiding om te twijfelen aan de uitkomsten, al is een precieze duiding dus niet mogelijk.

Hiermee is de rondwandeling langs het Markermeer voor deze specifieke belastingcombinatie afgerond. Om er zeker van te zijn dat we een goed beeld hebben van de verschillen tussen BOI2023 en WBI2017 hebben we deze "rondwandeling" ook uitgevoerd bij wind uit het oosten (90°), het zuiden (180°) en het westen (270°). De windsnelheid en het meerpeil hebben we hierbij gelijk gehouden als in de gerapporteerde rondwandeling, namelijk meerpeil van -0,4 m+NAP, een windsnelheden 0, 22 en 32 m/s.

De verschillen die daarbij naar boven zijn gekomen bespreken we in de volgende paragrafen 6.1.2 t/m 6.1.7. Hierbij kijken we niet naar de specifieke belastingcombinatie, maar naar het verschil en zijn we op zoek gegaan naar een combinatie waarmee we dit goed kunnen bespreken.

6.1.2 Verschil bij extreme wind (47 m/s) uit het noordnoordoosten

In Figuur 23 tonen we bij een extreme wind uit het noordnoordoosten het verschil tussen de lokale waterstand uit de WBI2017 en de BOI2023 HRD databases. Ten zuiden van de Oostvaardersplassen en Monnickendam is de waterstand in de resultaten van BOI2023 hoger. Ten noorden is geen verschil in waterstand (gedeeltelijk het gevolg van een correctie op de berekende afwaaiing).

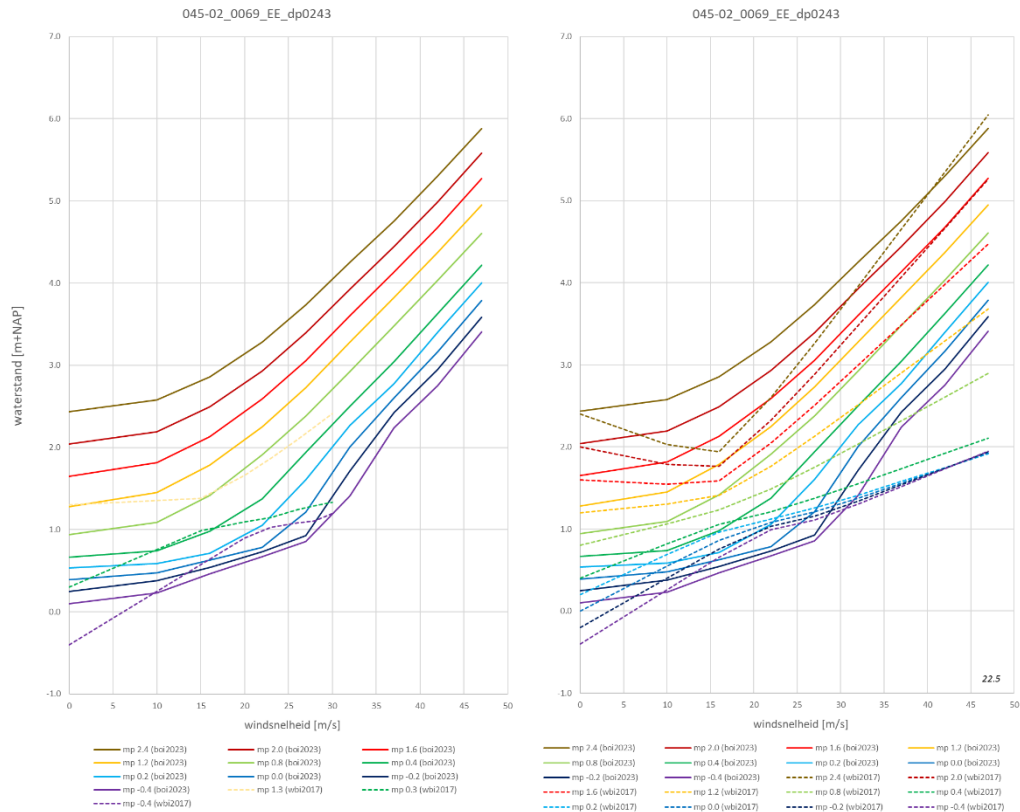


Figuur 23: Waterstandverschil (BOI2023 minus WBI2017) bij meerpeil NAP+1,2 m, windsnelheid 47 m/s, richting NNO (22,5° t.o.v. N).

Actualisatie schematisatie Eem

In het zuidoosten van het gebied zitten aanzienlijke verschillen in de berekeningen. Langs de Eem (bij locatie 7 in Figuur 23) is de waterstand hoger. Hoogstwaarschijnlijk wordt dit veroorzaakt door het verschil in de schematisatie van de Eem (bodempligging). De verwachting is dat de Eem in het zesde generatiemodel met meer detail in het model is opgenomen. In Figuur 24 is voor locatie 7 langs de Eem aan de linkerkant een vergelijking gemaakt tussen de informatie uit database fysica van WBI2017 en uit die van BOI2023.

Aan de rechterkant van deze figuur staat precies dezelfde informatie, maar vertaald naar de discretisatie van de basisstochasten van BOI2023 (de doorgetrokken lijnen zijn dus identiek, de gestippelde lijnen zijn tot stand gekomen door inter- en extrapolatie van de beschikbare WBI2017 resultaten op het discretisatie-rooster van BOI2023). De inter- en extrapolatie vindt plaats tussen windrichtingen, meerpeilen en windsnelheden. Bovenaan de grafiek staat de naam van de grafiek zoals elke toetslocatie in BOI2023 een gecodeerde naam heeft.



Figuur 24 Lokale waterstand op locatie 7 (uit Figuur 23) langs de Eem bij wind uit NNO (22,5°) – stippellijnen WBI2017 en doorgetrokken lijnen BOI2023: linker grafiek gegevens beschikbaar in de databases en rechtergrafiek gegevens waarbij de WBI2017 met reprofuncties zijn vertaald naar discretisatie van BOI2023¹⁶.

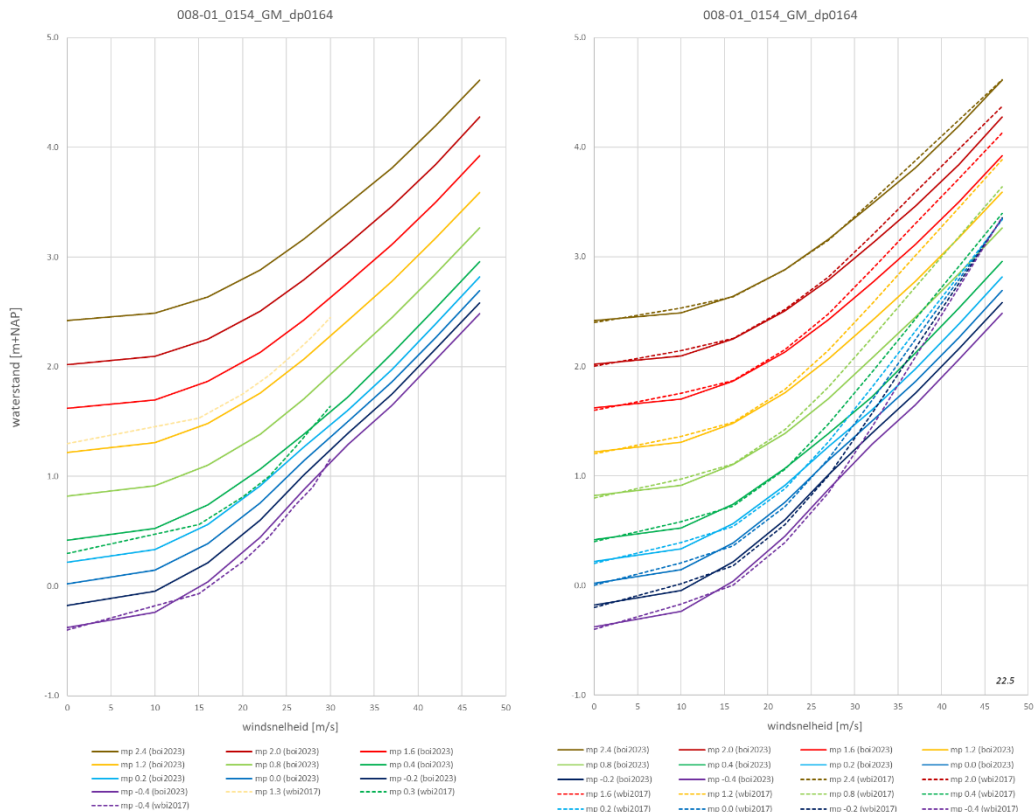
We geven een indicatie van de mogelijke gevolgen van de inter- en extrapolatie van de resultaten van de productieberekeningen op een fijner en groter datarooster van de probabilistische berekening. Uit een vergelijking van de twee figuren vallen een aantal zaken op:

- Ten eerste zien we dat het inter- en extrapoleren van de WBI2017 data naar de BOI2023 discretisatie grote verschillen geeft. In de probabilistische berekening (met Riskeer of Hydra-NL) die ook in de beoordeling van waterkeringen wordt toegepast, is dit automatisch onderdeel dat op vergelijkbare wijze wordt uitgevoerd. Immers het rekenrooster in de probabilistische berekening is fijner, dan de discretisatie van de basisstochasten in de productieberekeningen. Van belang is dat de grotere set productieberekeningen (vooral meer meerpeilen), de nauwkeurigheid van de waterstands-frequentielijn vergroot.
- De resultaten voor WBI2017 windsnelheden boven de 30 m/s volgen uit extrapolatie, wat zorgt voor een fysisch onrealistische afname in de waterstand bij een toename van het meerpeil (zie b.v. de bovenste stippellijn in de rechterfiguur, die omlaag loopt tot een waterstand van 2,0 m+NAP). Dit ongewenste gedrag is het gevolg van een onvoldoende nauwkeurige discretisatie van de stochasten in de WBI2017 databases.

- Bij lage meerpeilen en nauwelijks wind is de waterstand in de WBI2017 doorrekening aanmerkelijk lager. Dit wordt veroorzaakt door een hogere ligging van de bodem, of een hogere ruwheid in de bedding van de Eem. Op locatie 7 is de waterstand in BOI2023 ongeveer een halve meter hoger dan het opgelegde meerpeil bij een windsnelheid van 0 m/s. In de productieberekeningen van BOI2023 is bij windsnelheid 0 m/s een verval van een halve meter aanwezig tussen locatie 7 en Eemmeer (locatie 29). De drijvende kracht hiervoor is de afvoer van de Eem (die als afvoerrandvoorwaarde van 75 m³/s aan het model is opgelegd). In Delft Hydraulics & Witteveen+Bos (2005) is aangegeven dat destijds al een Eemafvoer van 75 m³/s is opgenomen in de update van de Eempolder en de Eem (die voor HR2006 is uitgevoerd). Als het verschil in verval bij 0 m/s wind niet door de afvoer is veroorzaakt, dan zal het veroorzaakt worden door een actualisatie van de schematisatie (bodem, vegetatie of terreindrempels).
- Aan de rechterkant van Figuur 24 is de informatie uit de WBI2017 database met *zogenaamde reprofuncties* vertaald naar discretisatie van de stochasten uit BOI2023. In de toegepaste vertaling van de WBI2017 resultaten naar de discretisatie van BOI2023, zijn 3 stappen toegepast. Allereerst is naar de juiste windrichting geïnterpoleerd. Als tweede stap is de data naar de juiste windsnelheid geïnter- en geëxtrapoleerd en als laatste stap zijn de lokale waterstanden geïnter- en geëxtrapoleerd naar het juiste meerpeil. De verschillen in de linker grafiek worden uitvergroot in de rechter grafiek door de bewerking met reprofuncties.

Wijziging winddrag coëfficiënt

Langs het Eem- en het Gooimeer en ook in de hoek bij de Oranjesluizen (Buiten IJ) is de waterstand lager in BOI2023. Dit verschil wordt veroorzaakt door het toepassen van andere parameters voor de *winddrag coëfficiënt* (de winddragafkapping). In Figuur 25 is voor een locatie langs het Eemmeer aan de zijde van Zuidelijk Flevoland tegenover de monding van de Eem (locatie 29 in Figuur 23) aan de linkerkant een vergelijking gemaakt tussen de informatie uit HRD database van WBI2017 en van BOI2023. Bovenaan de grafiek staat de naam van de locatie zoals elke toetslocatie in BOI2023 een gecodeerde naam heeft.



Figuur 25 Lokale waterstand op locatie 29 langs het Eemmeer bij wind uit NNO (22,5°) – stippellijnen WBI2017 en doorgetrokken lijnen BOI2023: linker grafiek gegevens beschikbaar in de databases en rechtergrafiek gegevens waarbij de WBI2017 met reprofuncties zijn vertaald naar discretisatie van BOI2023¹⁷.

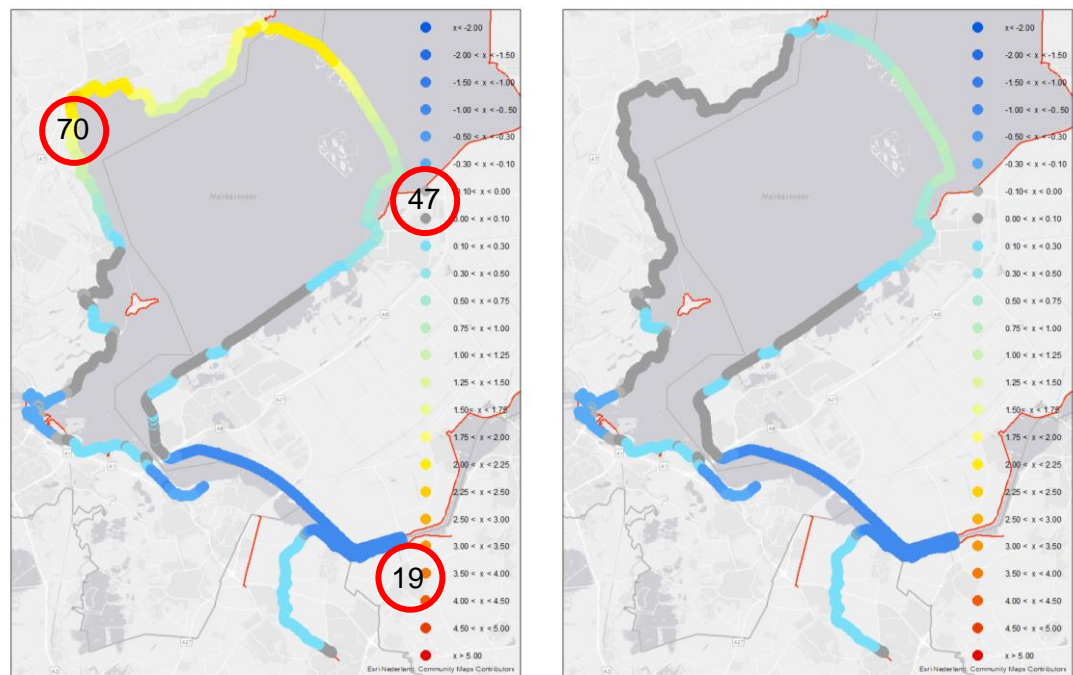
Aan de rechterkant staat dezelfde informatie, maar vertaald naar het discretisatierooster van BOI2023¹⁷. Het doortrekken van de resultaten boven de realisatie van 30 m/s in de WBI2017 gebeurt d.m.v. extrapolatie (zoals dit ook intern in het probabilistische model plaatsvindt). Het gevolg van het meenemen van de winddragafkapping in de fysica is dat de relatie tussen de lokale waterstand (y-as) en de windsnelheid (x-as) minder steil is. Bij een oostelijke wind is 30 m/s de maximale windsnelheid in de productieberekeningen voor WBI2017, maar we zien vergelijkbare verschillen tussen WBI2017 en BOI2023 bij extremere windsnelheden voor westelijke windrichtingen voor deze locatie (waarbij tot windsnelheden van 42 m/s is gerekend in WBI2017).

6.1.3 Verschil bij sterke wind (37 m/s) uit het noordnoordwesten

In Figuur 26 tonen we het verschil bij een sterke wind uit het noordnoordwesten tussen de lokale waterstand uit de WBI2017 en de BOI2023 databases fysica. In het noorden van het gebied zitten aanzienlijk verschillen. Langs de dijk tussen Hoorn en Enkhuizen, of tussen Enkhuizen en Lelystad is de waterstand in de BOI2023 een stuk hoger. Dit wordt veroorzaakt doordat in WBI2017 de 'maximale' waterstand van een korte periode rondom top van de storm wordt weggeschreven. Bij afluende wind wordt ook die 'maximale' waterstand van WBI2017 nog sterk beïnvloed door de afwaaiing rondom de stormtop.

¹⁷ De vertaling van de WBI2017 resultaten naar de discretisatie van de basisstochasten van BOI2023, is in 3 stappen uitgevoerd. Allereerst is naar de juiste windrichting geïnterpoleerd. Als tweede stap is de data naar de juiste windsnelheid geïnter- en geëxtrapoleerd. Als laatste en derde stap zijn de lokale waterstanden geïnter- en geëxtrapoleerd naar het juiste meerpeil. Een lineaire inter- en extrapolatie is in de reprofuncties toegepast.

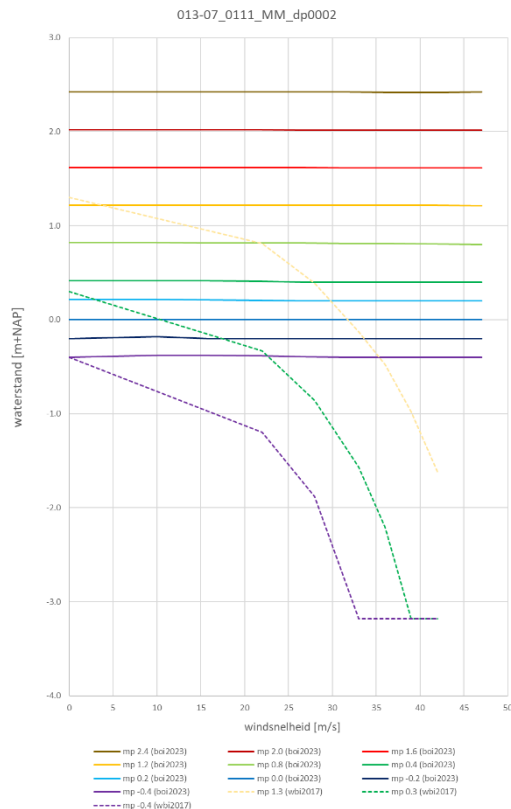
In BOI2023 is bij afwaaiing (conform andere watersystemen uit WBI2017) wel steeds de maximale waterstand van de gehele simulatie weggeschreven. Veelal is dit gelijk aan de initiële waterstand (het opgelegde meerpeil).



Figuur 26 Waterstandverschil (BOI2023 minus WBI2017) bij meerpeil NAP+1,2m, windsnelheid 37 m/s en -richting NNW (337,5° t.o.v. N). Linkergrafiek: resultaten met het effect van afwaaiing (WBI2017). Rechtergrafiek: resultaten zonder het effect van afwaaiing (BOI2023).

Effect afluende wind

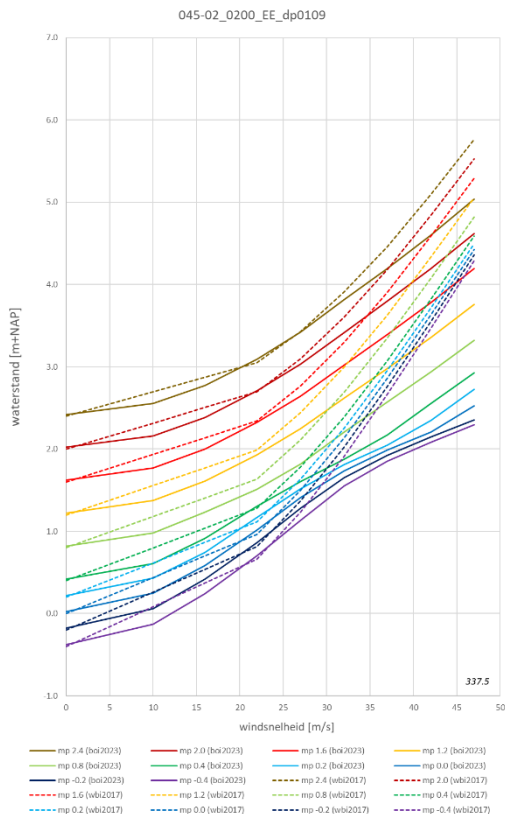
Voor een eerlijke vergelijking van de productieberekeningen van BOI2023 met de databases van WBI2017 corrigeren we in het vervolg van deze analyse voor dit effect (in de gevisualiseerde simulatie is immers wel sprake van afwaaiing). Dit verschil is het gevolg van een keuze over het wel of niet meenemen van afwaaiing bij het vullen van de databases (het zegt niets over de kwaliteit van de resultaten van de productieberekeningen). Verwacht wordt dat dit geen effect heeft op de probabilistische berekening van de hydraulische belastingen. Bij de verwerking van de simulatieresultaten in BOI2023 komt afwaaiing niet langer terecht in de databases. De maximale waterstand bij afwaaiing treedt op aan het begin van een storm (op $t = 0$ wanneer de windsnelheid nog 0 m/s is). In WBI2017 (overgenomen uit de HR2006 en de HR2001) is de waterstand nabij het moment van de maximale windsterkte in de database opgenomen. Bij afluende wind is dit de minimale waterstand. Afluende wind zal in principe niet leiden tot belasting van de waterkering. In Figuur 27 is het verschil te zien tussen de waterstanden uit de WBI2017 en de BOI2023 databases voor een locatie met afwaaiing nabij Hoorn (locatie 70 in Figuur 26). Bovenaan de grafiek staat de naam van de BOI toetslocatie.



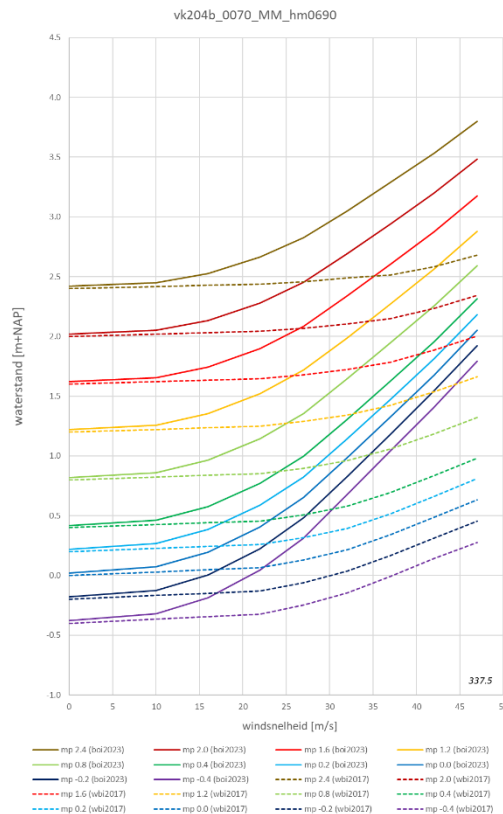
Figuur 27 Lokale waterstand nabij Hoorn (locatie 70 in Figuur 26) bij wind uit NNW (337,5° t.o.v. N) – stippellijnen WBI2017 en doorgetrokken lijnen BOI2023.

Wijziging winddrag coëfficiënt, ruimtelijk windveld en/of windrotatie (mogelijk luchtdichtheid)

We laten de resultaten zien voor 2 verschillende locaties in het gebied: ten noorden van het Nijkerkernauw en bij de Houtribdijk. In Figuur 28 is ten noorden van het Nijkerkernauw nabij locatie 19 (Figuur 26) te zien dat bij extreme windsnelheden de lokale waterstand in BOI2023 lager is dan in WBI2017. Vanaf windsnelheden groter dan 25 m/s ontstaat een duidelijk verschil in de opwaaiing tussen BOI2023 en WBI2017. Bij lagere meerpeilen (onderste lijnen in de grafiek) neemt de toename van de lokale waterstand als functie van de windsnelheid sterk af. Dit is mogelijk niet alleen het effect zijn van de aanpassing van de *winddrag coëfficiënt*. Bij lagere meerpeilen zal het meer minder breed zijn. Mogelijk dat naast een wijziging van de winddrag coëfficiënt, ook dit strijklengte effect bijdraagt aan het grotere verschil tussen BOI2023 en WBI2017. Natuurlijk, net als dat de extrapolatie naar extreme waarden een effect heeft. Door het grotere aantal meerpeilen dat is doorgerekend in de set productieberekeningen van BOI2023, hoeft in deze resultaten niet geëxtrapoléerd te worden.



Figuur 28 Lokale waterstand langs het Nijkernaauw nabij Nijkerk (locatie 19 in Figuur 26) bij wind uit NNW (337,5° t.o.v. N) – stippellijnen WBI2017 en doorgetrokken lijnen BOI2023, waarbij de WBI2017 gegevens zijn vertaald naar de discretisatie van BOI2023.



Figuur 29 Lokale waterstand langs de Houtribdijk nabij Lelystad (locatie 47 in Figuur 26) bij wind uit NNW (337,5° t.o.v. N) – stippellijnen WBI2017 en doorgetrokken lijnen BOI2023: waarbij de WBI2017 gegevens zijn vertaald naar discretisatie van BOI2023.

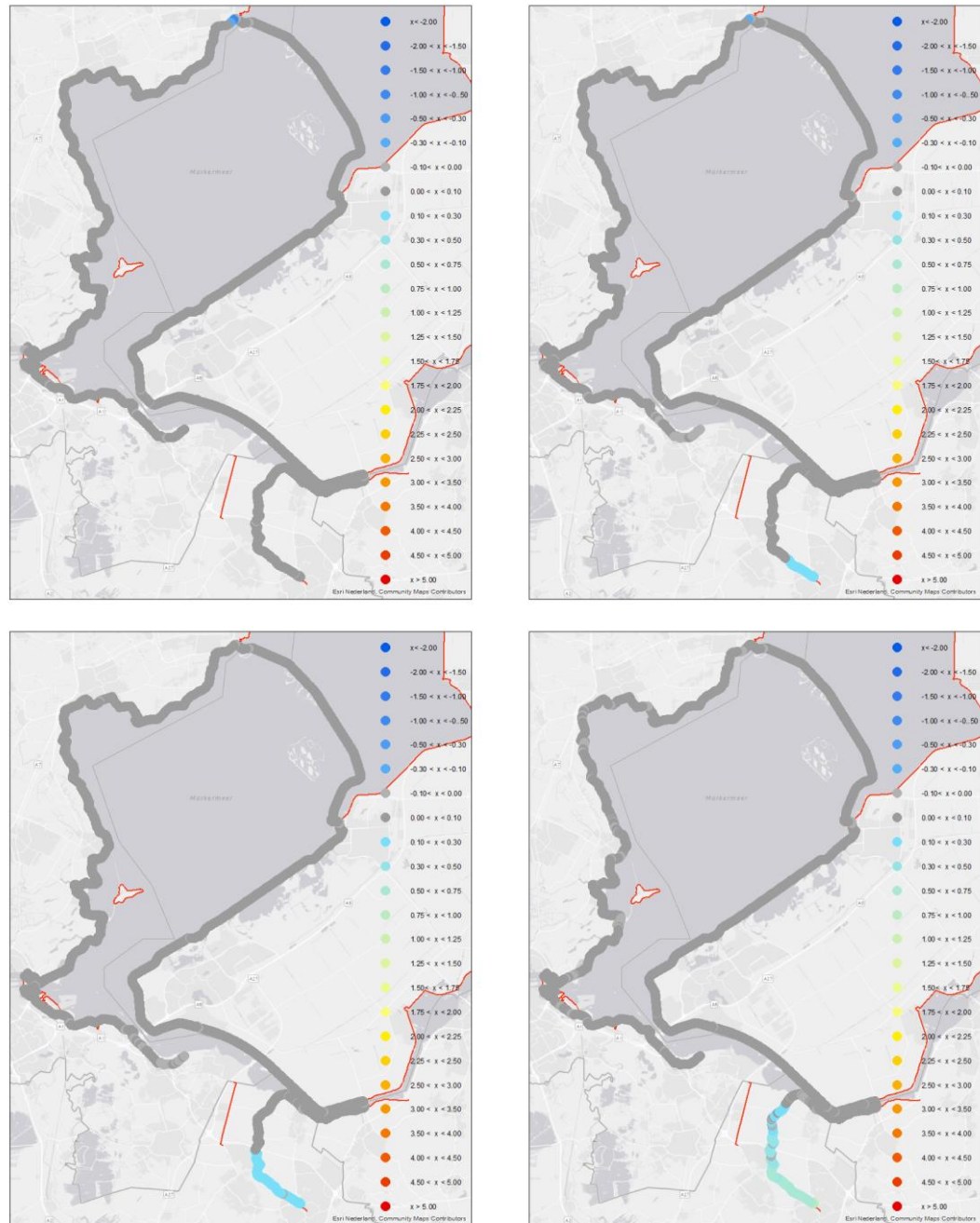
In de grafiek van Figuur 29 staat de lokale waterstand van locatie 47 (langs de Houtribdijk bij Lelystad) bij wind uit het noordnoordwesten. Bovenaan de grafiek staat de naam van de locatie zoals elke toetslocatie in BOI2023 een gecodeerde naam heeft. Het is te begrijpen dat bij deze windrichting opwaaiing optreedt op deze locatie, maar wat we niet goed kunnen duiden is waarom de resultaten van BOI2023 hier hoger zijn dan die uit WBI2017. Geconcludeerd is dat het getoonde effect in Figuur 29 niet eenvoudig aan één enkele wijziging kan worden verbonden (we hebben het niet verder uitgezocht).

6.1.4 Actualisatie schematisatie Eem bij geen wind (0 m/s)

In Figuur 30 staat het verschil tussen BOI2023 en WBI2017 in lokale waterstand bij geen wind voor verschillende meerpeilen. Te zien is dat bij alle locaties geen (of nauwelijks) een verschil aanwezig is, behalve langs de Eem. Doordat de schematisatie van de Eem is geactualiseerd, wordt een groter verval tussen Amersfoort en het Eemmeer berekend. Dit is het duidelijkst in de figuur rechtsonder. Bij een meerpeil van NAP-0,2 m op het Eemmeer is het doorstroomprofiel op de Eem het kleinst, waardoor het verschil in verval tussen beide sets databases het grootst is.

Andersom geredeneerd: als het opgelegde meerpeil extreem hoog is, zal door het stuwkromme effect vanaf het meer het verval richting Amersfoort veel kleiner zijn. Linksboven in de figuur bij een meerpeil van NAP+2,4m is het verschil veel kleiner dan in de afbeelding rechtsonder. De vier afbeeldingen laten goed zien dat bij toename van de waterstand op het Eemmeer ook het verschil tussen BOI2023 en WBI2017 afneemt.

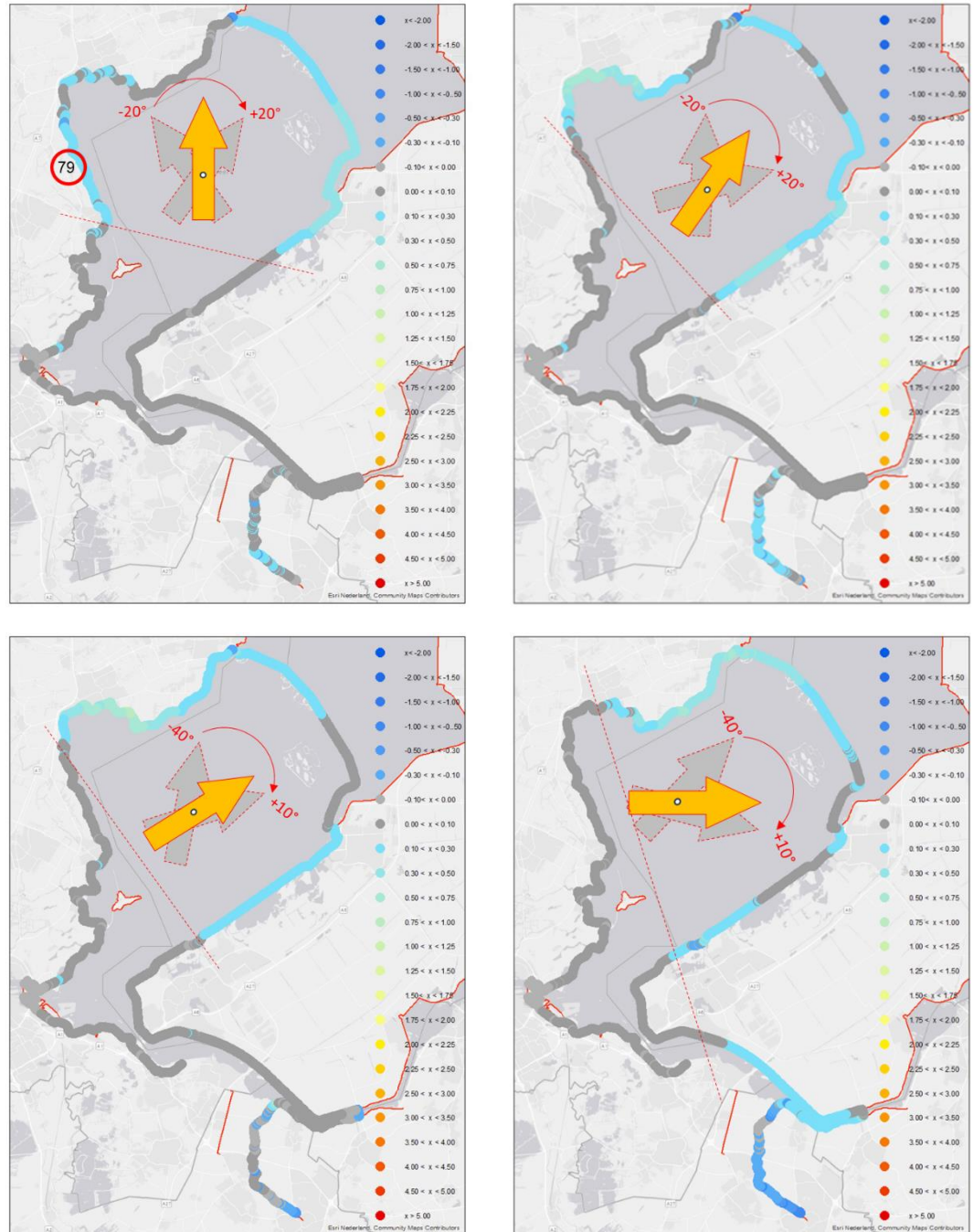
In de berekeningen van BOI2023 ontstaat door de aangepaste schematisatie van de Eem een groter verhang tussen Amersfoort en het Eemmeer bij een lage waterstand op het meer. Het verhang wordt kleiner als de waterstand op het meer hoger is, daarmee wordt ook het verschil met WBI2017 kleiner. In de schematisatie van de Eem uit Delft Hydraulics & Witteveen+Bos (2005) treedt immers een kleiner verval op. Dit kan worden veroorzaakt door een hogere bodemligging of een ruwere bedding van de Eem na de actualisatie van de schematisatie in de zesde generatie.



Figuur 30 Waterstandverschil (BOI2023 minus WBI2017) bij windsnelheid 0 m/s en meerpeilen NAP +2,4m, +1,6m, +1,2m en -0,2m: linksboven het hoogste en rechtsonder het laagste meerpeil.

6.1.5 Aanpassing schematisatie Marker Wadden bij wind (37 m/s) uit verschillende richtingen

In Figuur 31 staat het verschil tussen BOI2023 en WBI2017 in lokale waterstand bij verschillende windrichtingen (gecombineerd met een windsnelheid van 37 m/s en een meerpeil van +0,0m NAP). Te zien is dat bij alle windrichtingen de waterstanden in de databases van BOI2023 hoger zijn dan in de databases van WBI2017. Mogelijk dat door de aanpassing van de schematisatie met de realisatie van de Marker Wadden, de waterstand nauwelijks wordt beïnvloed. Bij zuidwesten wind (rechtsboven), bij westzuidwesten wind (linksonder) en bij westen wind (rechtsonder) verandert de waterstand langs de Houtribdijk achter de Marker Wadden (zie grijze stukken).

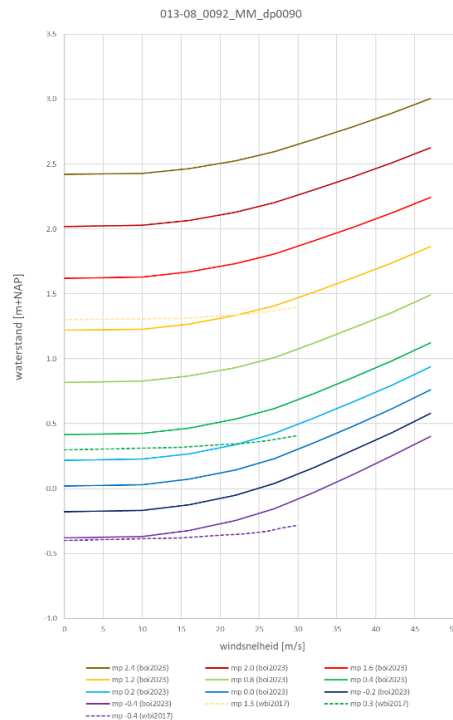


Figuur 31 Waterstandverschil (BOI2023 minus WBI2017) bij meerpeil +0m NAP, windsnelheid 37 m/s en windrichting Z (180°), ZW (225°), WZW (247,5°) en W (270°): linksboven zuidelijke wind en rechtsonder westen wind – met pijlen is de windrichting en de rotatie van de wind weergegeven.

Een dergelijke analyse komt niet overeen met het resultaat bij zuidelijke wind (linksboven). Hier is de verhoging in het verlengde van de windrichting ook afwezig. Het lijkt erop dat de maximale scheefstand van het meer niet anders is in BOI2023 dan in WBI2017, maar dat een groter gedeelte van het meer in de BOI2023 resultaten door de scheefstand is verhoogd t.o.v. het opgelegde meerpeil.

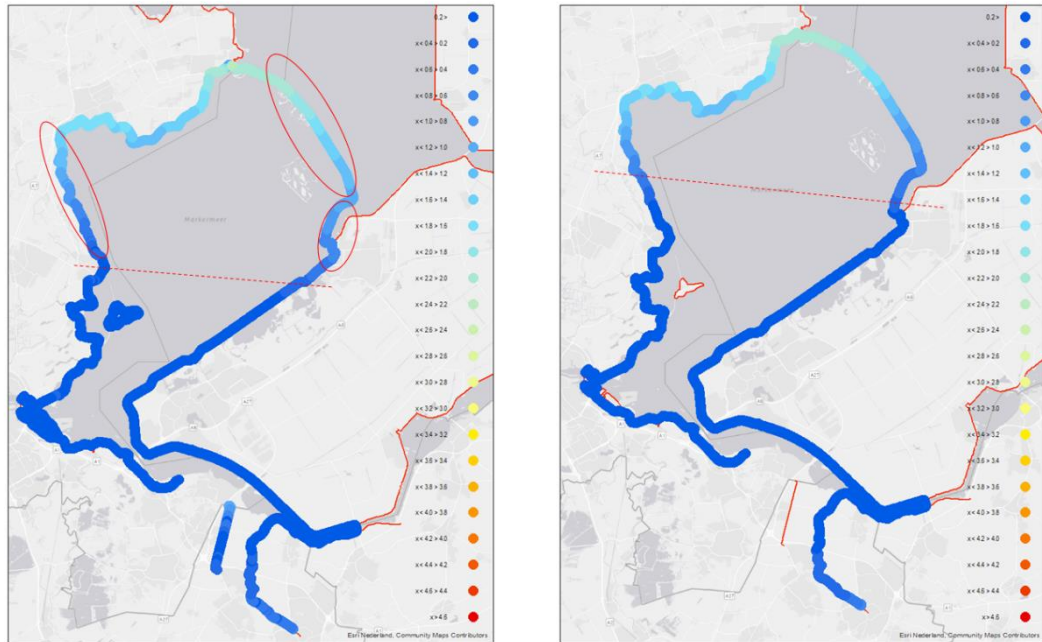
6.1.6 Wijziging scheefstand Markermeer bij sterke wind (37 m/s) uit het zuiden

In Figuur 32 is te zien dat nabij Oosthuizen (locatie 79 in Figuur 31) een toenemende windsterkte een groter effect heeft op de lokale waterstand in de BOI2023 productieberekeningen (t.o.v. de WBI2017 resultaten).



Figuur 32 Lokale waterstand nabij Oosthuizen (locatie 79 in Figuur 31) bij sterke wind (37 m/s) uit Z (180° t.o.v. N) – stippellijnen WBI2017 en doorgetrokken lijnen BOI2023: waarbij de WBI2017 gegevens uit de databases worden getoond.

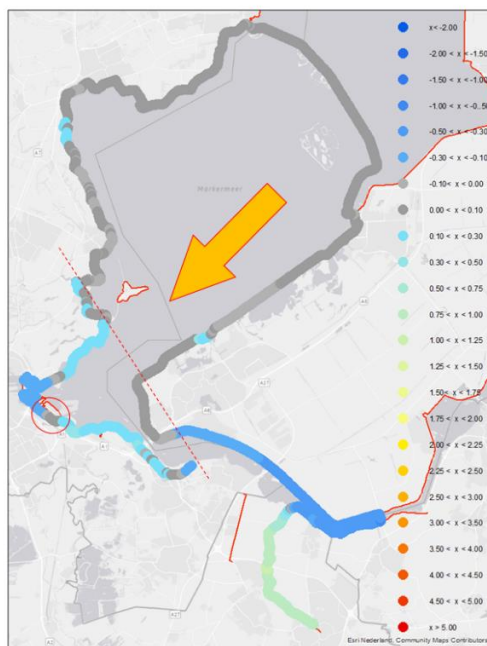
Door de aanpassing van de winddragafkapping verwachten we dat in BOI2023 lagere waterstanden zouden optreden. Het is onduidelijk waar deze verhoging door wordt veroorzaakt. In Figuur 33 laten we niet het verschil, maar de waterstanden uit de databases zien. Links in de figuur staat een afbeelding bij zuidelijke wind met de resultaten van BOI2023 en rechts staan de resultaten van WBI2017. In de figuur staan de waterstanden bij dezelfde combinatie als in de afbeelding linksboven in Figuur 31. De rode stippellijn geeft bij benadering een denkbeeldige grens aan. Ten noorden van deze lijn wordt de waterstand door de wind verhoogd en ten zuiden wordt de waterstand verlaagd. Het lijkt er op dat in de BOI2023 resultaten een groter gebied door de scheefstand wordt verhoogd. Het is onduidelijk waardoor dit precies wordt veroorzaakt. Met rode ovals is in de linker afbeelding van Figuur 33 aangegeven bij welke trajecten de waterstand in BOI2023 hoger is dan in WBI2017 databases. Dit komt min of meer overeen met de blauw gekleurde tracés in de afbeelding linksboven in Figuur 31 (afgezien van de Eem). Er kunnen meerdere oorzaken zijn voor deze wijziging in scheefstand, zoals de interpolatie tussen de WBI2017-resultaten i.c.m. het verschil in winddrag of windrotatie. Mogelijk heeft het ruimere modelrooster van de zesde generatie hier ook nog invloed op (Figuur 1, Figuur 2 en Figuur 3).



Figuur 33 Waterstanden bij meerpeil +0m NAP, windsnelheid 37 m/s en windrichting Z (180° t.o.v. N): links resultaten BOI2023 en rechts resultaten WBI2017 – met de rode stippellijn is bij benadering de toename en afname van de waterstand weergegeven (ten noorden verhoging en ten zuiden verlaging) en met de rode cirkels de locaties van de verhoging in Figuur 31 linksboven.

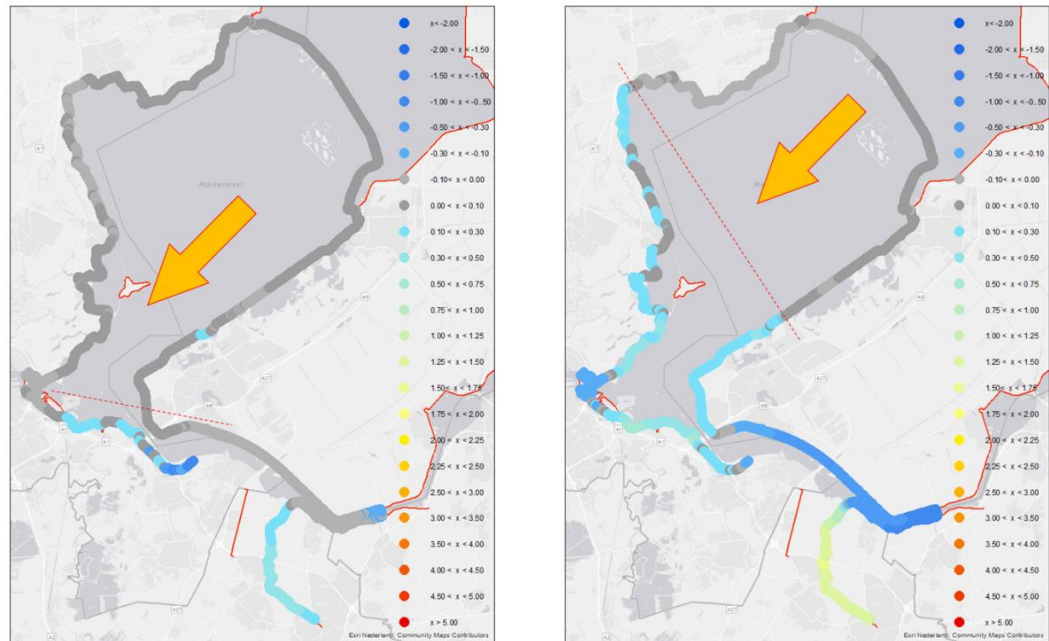
6.1.7 Aanpassing schematisatie IJburg bij wind uit NO wind met verschillende windsnelheden

In Figuur 34 staat het verschil tussen BOI2023 en WBI2017 in lokale waterstand bij windrichting noordoost (gecombineerd met een windsnelheid van 37 m/s en een meerpeil van +0,8m NAP). Te zien is dat de waterstand in de databases van BOI2023 tussen Huizen en IJburg hoger is dan in de databases van WBI2017. Direct ‘achter’ de eilanden van IJburg (rood omcirkeld) verdwijnt deze verhoging. Mogelijk is dit veroorzaakt door het grotere aantal eilanden dat in de WBI2017 berekening aanwezig is.



Figuur 34 Waterstandverschil (BOI2023 minus WBI2017) bij meerpeil +0,8m NAP, windsnelheid 37 m/s en windrichting NO (45° t.o.v. N): met pijl is de windrichting weergegeven (geen rotatie bij 45°).

In Figuur 35 is voor een lagere en een hogere windsnelheid dezelfde situatie gevisualiseerd. Bij een toenemende windsnelheid neemt de lengte van het tracé met een hogere waterstand in BOI2023 t.o.v. WBI2017 toe. Bij een lagere windsnelheid neemt deze lengte af. Windrichtingen uit de sector $22,5^\circ$ t/m $167,5^\circ$ t.o.v. N worden niet een rotatie, maar een constante richting in de productieberekeningen opgelegd. Het lijkt er dus op dat de rotatie van de wind niet of nauwelijks invloed heeft op dit fenomeen.



Figuur 35 Waterstandsverschil bij meerpeil +0,8m NAP en windrichting NO (45°): links windsnelheid 22 m/s en rechts 47 m/s – met de rode stippellijn is aangegeven in welk deel van het meer de BOI2023 resultaten hoger zijn (ten zuiden BOI2023 hoger dan WBI2017 en ten noorden geen of nauwelijks verschil).

Let op dat kleine verschillen ook ontstaan door verschillen in de ligging van de locaties (BOI-locaties bevinden zich om de 100 m langs de oever of de kruin van de kering en WBI-locaties liggen grofweg om de 500 m meer naar het midden van het meer – verder van de kering af).

6.1.8 Conclusies en aanbevelingen

De verschillen die we zien tussen BOI2023 en WBI2017 achten we veelal (niet altijd) redelijk goed verklaarbaar (ondanks dat het niet meer mogelijk is de verschillen één voor één af te tellen). Strikt genomen kunnen we over de verschillen veroorzaakt door de overstap van het oude naar het nieuwe waterbewegingsmodel, geen uitspraken doen. Althans we zien dat wijzigingen in de uitgangspunten van het BOI veel grotere verschillen veroorzaken (en daarmee dus van groter belang zijn) dan de overstap naar een nieuwe generatie modellen. Dit is een ander onderzoeksresultaat dan in de andere verschilanalyses voor Maas (Spruyt et al., 2023a), Rijnakken (Spruyt et al., 2023b) en Rijn-Maasmonding (Bom en Spaans, 2024), maar wel bruikbaar voor de onderbouwing van een solide overstap naar de zesde generatie.

We zien veel meer detaillering in de resultaten van het zesde generatie instrumentarium door de verbeteringen aan het modelrooster. Daar is met de keuze van de uitvoerlocaties (of de droogval correctie) niet altijd goed omgegaan bij het wegschrijven van de BOI2023 resultaten naar de databases. De standaard controleprocedure van het BOI is nog niet uitgevoerd op de toegeleverde conceptdatabases van BOI2023, Dergelijke onregelmatigheden worden in de controle uit de databases gefilterd. Van WBI2017 zijn definitieve databases toegeleverd waar deze controles in het verleden al op zijn uitgevoerd.

De grootste verschillen worden in onze ogen veroorzaakt door de gewijzigde modelrandvoorwaarden (andere discretisatie van de stochasten, wel/geen windrotatie en wel/geen winddragafkapping). Op diverse plekken bij havens en voorlanden geeft de verbeterde detaillering en de andere ligging van de begrenzing van het modelrooster duidelijk andere (betere) resultaten. Alhoewel al veel zorg is besteed aan de keuze van de uitvoerlocaties, is deze keuze nog wel verder te verbeteren, zodat bij het filteren van de conceptdatabases niet teveel detail verloren gaat. Deze verbetering van de detaillering in het modelrooster kan nog beter worden benut als meer detaillering in de opgelegde windsterkte wordt toegepast. Bij meer detaillering in de windsterkte zal de nauwkeurigheid van de berekende waterstanden verder toenemen.

6.2 Veluwerandmeren

In Bottema (2021) is herbevestigd dat op de Veluwerandmeren gerekend moet worden met een windreductiefactor van 15%, zowel in de kalibratie als in de productieberekeningen anders kan de opzet van de waterstanden tussen Harderwijk en Roggebot tijdens zware stormen met 30% worden overschat. Inmiddels is geconstateerd dat deze reductiefactor niet is toegepast in de productieberekeningen van BOI2023 (dit zal worden gecorrigeerd).

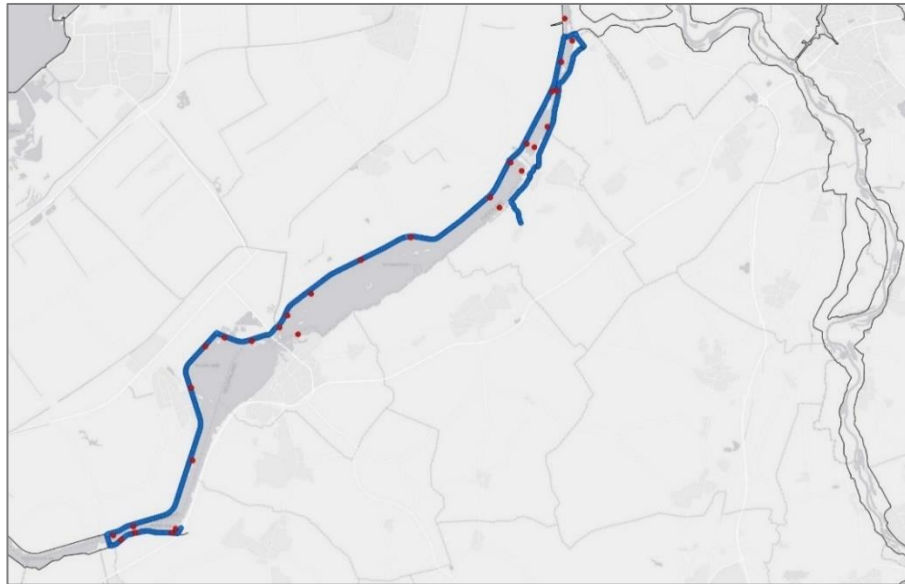
6.2.1 Rond de Veluwerandmeren bij zuiden wind

Op de Veluwerandmeren wordt in de productie gerekend met een constante windrichting in de tijd en de ruimte. De windsnelheid varieert wel in de tijd, maar is uniform in de ruimte. We beginnen de verklaring van de verschillen tussen BOI2023 en WBI2017 langs de Veluwerandmeren ook met een “rondwandeling”, waarbij we per deeltraject van de rondwandeling de verschillen stuk voor stuk bespreken. In Figuur 37 t/m Figuur 42 is deze rondwandeling langs de oevers van de randmeren gevisualiseerd. De figuren bestaan net als eerder bij het Markermeer (zie paragraaf 6.1.1) steeds uit de volgende onderdelen:

1. Aan de linkerkant van de figuur staat een overzichtskaartje van alle randmeren tussen de sluis bij Nijkerk en de Reevedam, met daarin per locatie het waterstandsverschil tussen BOI2023 en WBI2017 voor een specifieke belastingcombinatie (Mp040U32D180, wat overeenkomt met een meerpeil van 0,4 m+NAP, een windsnelheid van 32 m/s en een windrichting uit het zuiden). Het verschil betreft “BOI2023 minus WBI2017”, dus positieve waarden betekent dat BOI2023 hogere resultaten geeft, negatieve waarden betekent dat WBI2017 hoger is. In de figuur staat ook een pijl, die de windrichting weergeeft (windrotatie is niet meegenomen). Tot slot is in het kaartje aan de linkerkant een pijl (met de term “route”) te zien. Deze dient om een specifiek traject van de rondwandeling nader uit te lichten in de langfiguur aan de rechterkant. In de concept BOI2023 databases zitten veel meer locaties per normtraject (blauwe punten in Figuur 36) dan in WBI2017¹⁸. Tussen de dichtstbijzijnde WBI2017 locaties (rode punten in Figuur 36) is geïnterpoleerd. Dit is de werkwijze waarvoor we binnen deze studie gekozen hebben om om te gaan met het beperktere aantal locaties in de definitieve WBI2017 databases. De linkerkant van de figuur geeft daarmee een ruimtelijke indicatie van de verschillen.
2. Aan de rechterkant staat een langfiguur met daarin de absolute waterstanden voor een specifiek traject zonder inter- of extrapolatie. Dit traject komt overeen met de pijl (“route”) aan de linkerkant. Aan de rechterkant zijn waterstanden uit de databases fysica gevisualiseerd voor zowel BOI2023 als voor WBI2017. Voor beide zijn steeds 3 windsnelheden (0, 22 en 31/32 m/s) in beeld gebracht. De blauwe, oranje en groene doorgetrokken lijnen komen overeen met de resultaten uit de databases fysica van BOI2023 (HRD A) voor respectievelijk 0, 22 en 30 m/s. De rode, paarse en bruine gestreepte lijnen corresponderen met de databases van WBI2017 (HRD B) voor respectievelijk 0, 23 en 30 m/s.

¹⁸ Aan de zuidoostelijke zijde van de Veluwerandmeren liggen geen primaire keringen (alleen hoge gronden). In de beschikbare databases zijn voor die kant van de Veluwerandmeren geen waterstanden beschikbaar.

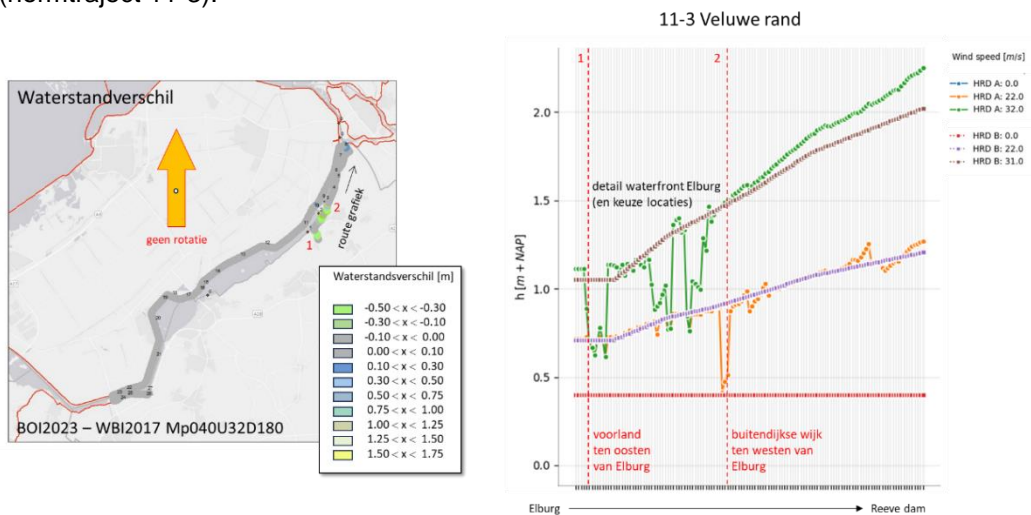
De donkergekleurde markers op de lijnen geven de posities van de beschikbare uitvoerlocaties langs het traject. De donkergekleurde markers op de lijnen geven de posities van de beschikbare uitvoerlocaties langs het traject.



Figuur 36 Weergave van de locaties langs de Veluwerandmeren beschikbaar in de BOI-databases (serie blauwe punten nabij de primaire keringen) en locaties beschikbaar in de WBI-databases (serie rode punten: minder locaties met grotere afstand tot primaire keringen).

Indien sprake is van afwaaiing op een uitvoerlocatie (een verlaging van de waterstand door wind), komt dit op een andere wijze in de databases van BOI2023 en WBI2017 terecht. In WBI2017 is de verlaging van de waterstand nabij het tijdstip van de maximale windsterkte weggeschreven in de database. In BOI2023 is het maximum van de waterstand gedurende de gehele doorgerekende periode weggeschreven naar de database (min of meer gelijk aan het opgelegde meerpeil). In de figuren geven we aan dat voor dit verschil door afwaaiing gecorrigeerd zou moeten worden.

In Figuur 37 beginnen we de rondwandeling met het traject van Elburg naar de Reevedam (normtraject 11-3).



Figuur 37 Waterstandsverschillen langs Randmeren (traject 11-3 langs de rand van de Veluwe) voor meerpeil +0,4 m+NAP, windrichting zuid: links windsnelheid 32 m/s en rechts drie windsnelheden. (links WBI2017 resultaten geïnterpoleerd op BOI2023 datarooster, rechts BOI2023=HRD A en WBI2017=HRD B, uitleg begin 6.2.1).

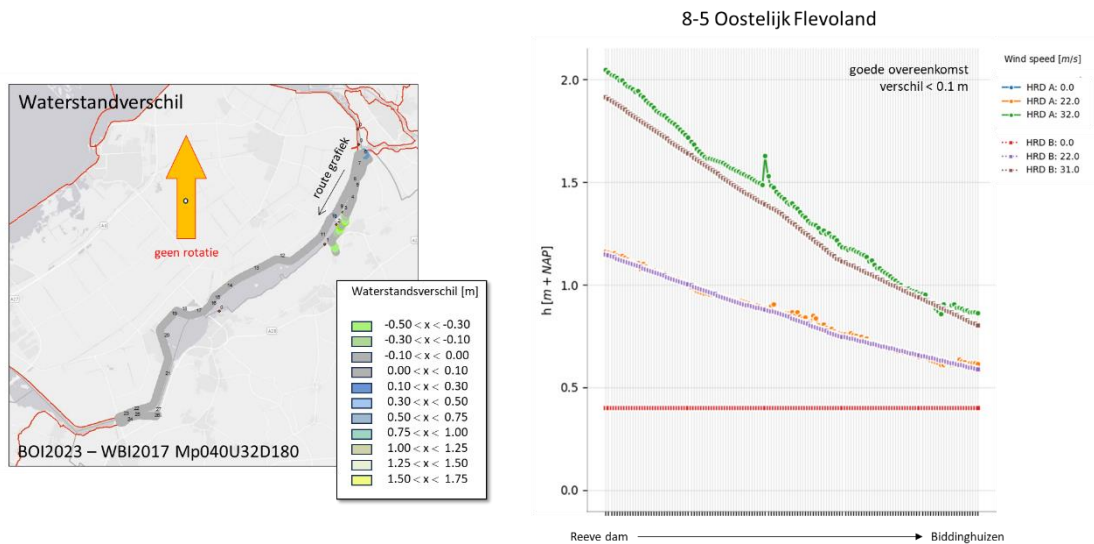
Met de aanleg van de Reevedam verschuift de grens tussen het Vossemeer en het Drontermeer van de Roggebotsluis naar de dam. Hierdoor worden de Veluwerandmeren 4 km korter. Deze verkorting leidt tot een verlegging zuidwestwaarts van het zwaarte-/kantelpunt van de Randmeren, waardoor t.o.v. de oude situatie bij wind uit het zuiden tot westen de waterstand hoger is op het Veluwe- en Drontermeer.

We constateren het volgende:

- Uit de geografische figuur aan de linkerzijde zien we verschillen die liggen tussen -0,5 en +0,10 m. De resultaten van BOI2023 komen op diverse plekken beduidend lager uit dan die uit WBI2017, terwijl in de richting van de Reevedam de BOI resultaten juist iets hoger liggen. De verhoging is gedeeltelijk het gevolg van het verkleinen van het meer door de aanleg van de Reevedam. Mogelijk dat de wijziging van de winddragafkapping (in de productieberekeningen in BOI2023) dit verschil gedeeltelijk veroorzaakt.
- Beide sets met resultaten liggen ver boven het meerpeil van 0,4 m+NAP. Dit wordt veroorzaakt door de opwaaiing richting de Reevedam. Door de wind uit het zuiden wordt het water van het Veluwemeer deze hoek in geduwd.
- Aan de rechterzijde is met name bij de hogere windsnelheden goed de invloed van de aanwezigheid van het waterfront van Elburg langs het traject te zien. De verschillen in de waterstanden tussen BOI2023 en WBI2017 zijn daar al gauw enkele decimeters, wat vooral wordt veroorzaakt doordat in WBI2017 de beschikbare locaties verder van de oever afgelegen waren. Hier spelen dezelfde oorzaken van de verschillen als benoemd in paragraaf 6.2.2. De waterstanden schieten op sommige locaties vrij steil omlaag (en daarna weer omhoog), wat op het oog een opmerkelijk verloop van de belastingen oplevert op plaatsen waar buitendijks bebouwing aanwezig is. De lagere belastingen wordt veroorzaakt door lokale obstakels, waardoor uitvoerlocaties droog blijven, of omdat het aanwezige water niet in directe verbinding staat met de rest van het meer.
- Op locaties zonder voorliggend buitendijksgebied zijn de resultaten tussen BOI2023 en WBI2017 redelijk vergelijkbaar (verloop bij windsterkte 22 m/s). Deze constatering is zowel bemoedigend als verontrustend. Inmiddels is gebleken dat in deze versie van de BOI2023 productieberekeningen de windreductiefactor (circa 15% uit Bottema, 2021) niet is toegepast. In de WBI2017 berekeningen was dat ook niet het geval, waardoor de resultaten van beide berekeningen goed met elkaar overeenkomen.
- De vergelijking tussen de BOI2023-resultaten en de WBI2017-resultaten bij een windsnelheid van 32 m/s is net niet helemaal eerlijk, maar onvermijdelijk omdat in de verschillende programma's andere belastingcombinaties zijn doorgerekend (met andere windsnelheden).

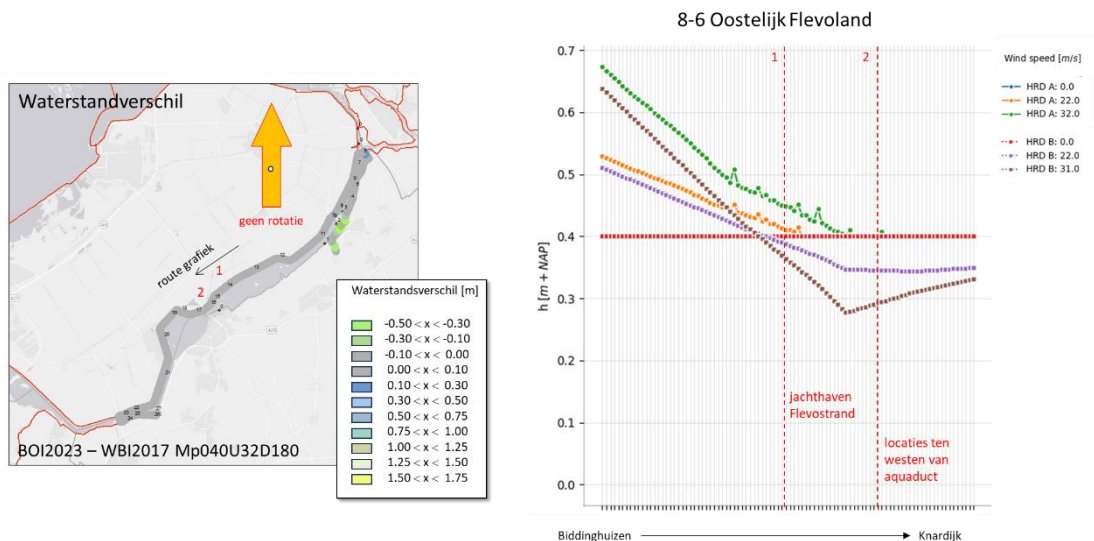
Het vervolg van de rondwandeling betreft het traject van de Reevedam naar Biddinghuizen (normtraject 8-5), zie Figuur 38. Uit de linkerzijde van de figuur zien we dat de verschillen langs dit traject liggen tussen -0,1 en 0,1 m (BOI2023 is nagenoeg gelijk aan WBI2017).

Ter hoogte van de brug van Elburg is nog een kleine onregelmatigheid te zien aan de rechterzijde van de figuur. We verwachten dat dit het gevolg is van de keuze van uitvoerlocatie, waar het resultaat uit het rekengrid wordt uitgelezen. De resultaten van BOI2023 bij een windsnelheid van 32 m/s liggen iets hoger. Dit verschil is deels te verklaren door de verkorting van de Randmeren en deels door het moment in de simulatie van het wegschrijven van de resultaten. Doordat in BOI2023 de winddragafkapping is meegenomen in de berekeningen voor de waterbeweging, is de verwachting dat de waterstand lager is. Door deze drie oorzaken is de waterstand vergelijkbaar, of iets hoger. Dit is relevant voor windsnelheden groter dan 30 m/s.



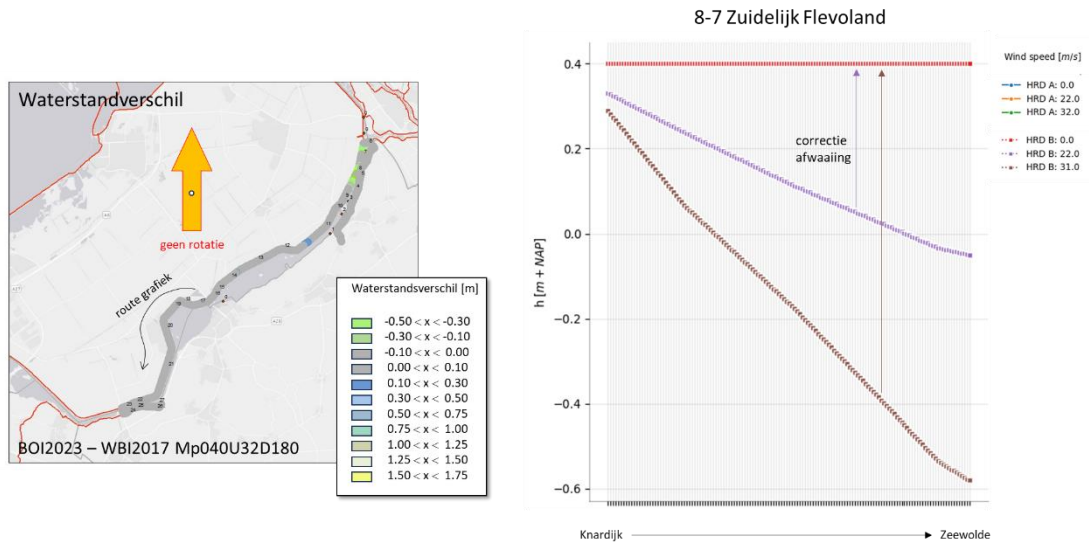
Figuur 38 Waterstandsverschillen langs Randmeren (traject 8-5 Oostelijk Flevoland) voor meerpeil +0,4 m+NAP, windrichting zuid: links windsnelheid 32 m/s en rechts drie windsnelheden. (links WBI2017 resultaten geïnterpoleerd op BOI2023 datarooster, rechts BOI2023=HRD A en WBI2017=HRD B, uitleg begin 6.2.1).

Het volgende traject betreft 8-6 (tussen Biddinghuizen en de Knardijk/het aquaduct bij Harderwijk) aan de noordzijde van het Veluwemeer (Figuur 39), langs de zuidoever van Oostelijk Flevoland. We zien vergelijkbare resultaten als langs normtraject 8-5 (let op dat in de grafiek het bereik van de verticale as kleiner is dan in de voorgaande grafiek). Na correctie voor afwaaiing zijn de verschillen beperkt. Langs het Harderstrand zijn kleine onregelmatigheden in de BOI2023-resultaten te zien nabij de jachthaven. Ten westen van het aquaduct (verbinding bij Harderwijk) is de windopzet afgenomen tot 0 m. In de WBI2017-resultaten is ten westen van het aquaduct de afwaaiing te zien. Aan de overkant tussen Nijkerk en Elburg zijn geen locaties in de databases aanwezig omdat het hier zogenaamde hoge gronden betreft (zonder primaire kering).



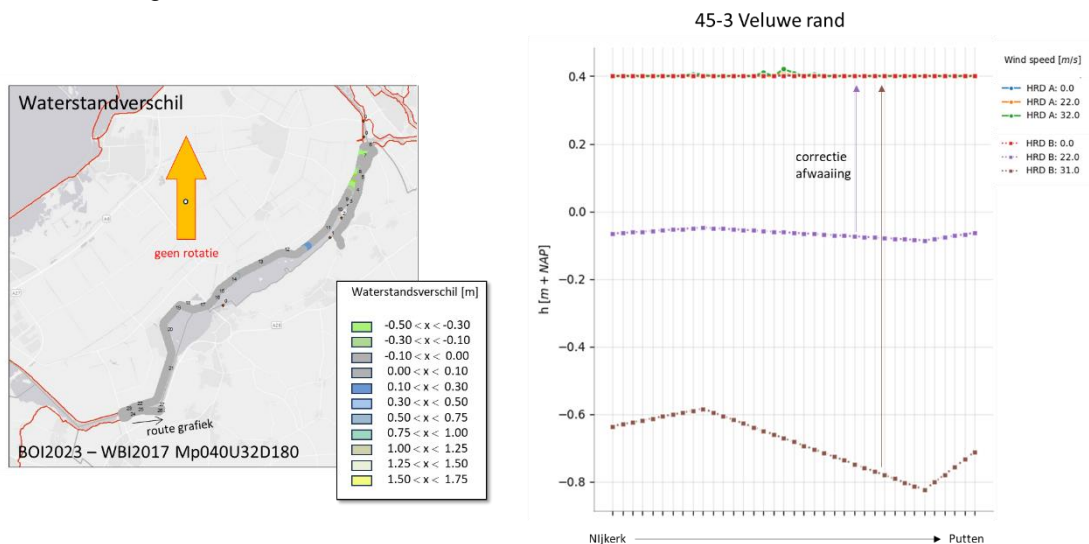
Figuur 39 Waterstandsverschillen langs Randmeren (traject 8-6 Oostelijk Flevoland) voor meerpeil +0,4 m+NAP, windrichting zuid: links windsnelheid 32 m/s en rechts drie windsnelheden. (links WBI2017 resultaten geïnterpoleerd op BOI2023 datarooster, rechts BOI2023=HRD A en WBI2017=HRD B, uitleg begin 6.2.1).

In Figuur 40 staat een vergelijking voor normtraject 8-7 (tussen het aquaduct bij Harderwijk/de Knardijk en Zeewolde) aan de noordzijde van het Nuldernauw en het Wolderwijd (Figuur 40), langs de zuidoever van Zuidelijk Flevoland. Dit traject is eigenlijk weinig interessant als wordt gecorrigeerd voor het omgaan met afwaaiing. In de langsfiguur aan de rechterzijde zien we nog effect van afwaaiing, daarvoor is in de geografische figuur aan de linkerzijde gecorrigeerd (alle waterstanden gelijk aan het initiële meerpeil).



Figuur 40 Waterstandsverschillen langs Randmeren (traject 8-7 Zuidelijk Flevoland) voor meerpeil +0,4 m+NAP, windrichting zuid: links windsnelheid 32 m/s en rechts drie windsnelheden. (links WBI2017 resultaten geïnterpoleerd op BOI2023 datarooster, rechts BOI2023=HRD A en WBI2017=HRD B, uitleg begin 6.2.1).

Het laatste deel van de rondwandeling van de randmeren betreft traject 45-3 (de primaire kering tussen Nijkerk en Putten) aan de zuidzijde van het Nuldernauw (Figuur 41). Bij deze windrichting is dit traject is ook weinig interessant als wordt gecorrigeerd voor het omgaan met afwaaiing.



Figuur 41 Waterstandsverschillen langs Randmeren (traject 45-3 rand Veluwe) voor meerpeil +0,4 m+NAP, windrichting zuid: links windsnelheid 32 m/s en rechts drie windsnelheden. (links WBI2017 resultaten geïnterpoleerd op BOI2023 datarooster, rechts BOI2023=HRD A en WBI2017=HRD B, uitleg begin 6.2.1).

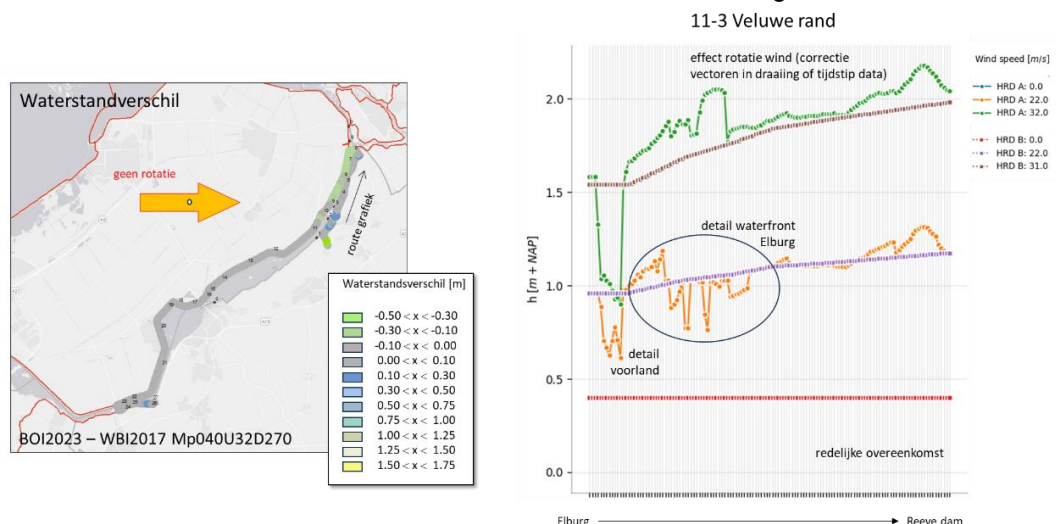
Hiermee is de rondwandeling langs de randmeren voor deze specifieke belastingcombinatie afgerond. Om er zeker van te zijn dat we een goed beeld hebben van de verschillen tussen BOI2023 en WBI2017 hebben we deze “rondwandeling” ook uitgevoerd bij wind uit het westen (270°), het noorden (360°) en het oosten (90°). De windsnelheid en het meerpeil hebben we hierbij gelijk gehouden als in de gerapporteerde rondwandeling, namelijk meerpeil van +0,4 m+NAP, een windsnelheden 0, 22 en 32 m/s. Dit heeft echter geen andere inzichten opgeleverd.

6.2.2 Detaillering rondom oude vissersplaatsen, kleine recreatie havens en andere waterwerken

Tijdens de vergelijking van de resultaten zijn nog enkele zaken opgevallen die we expliciet willen benoemen, met name bij oude vissersplaatsen, kleine recreatiehavens en andere waterwerken. In dergelijke gebieden zijn hydraulische belastingen berekend die afwijkend zijn van de omliggende locaties. Zoals eerder gesteld is het binnen de scope van dit project niet de bedoeling om alle BOI-resultaten toe te lichten. Vergelijkbare constatering zijn overigens gedaan in de rapportage over de productieberekeningen voor de Meren (Oerlemans et al., 2022).

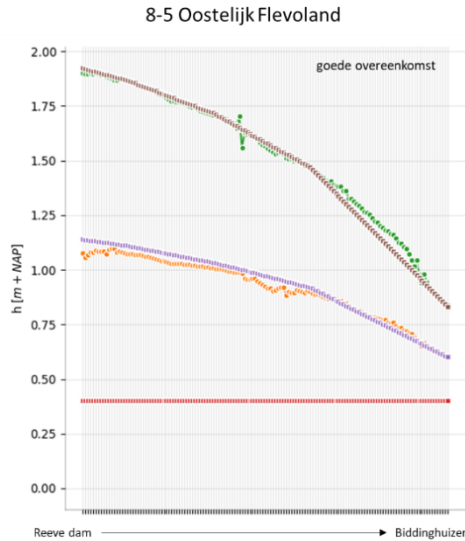
Figuur 42 laat een voorbeeld zien van een situatie waarbij bovenstaande optreedt voor de belastingcombinatie met een meerpeil van 0,4 m+NAP en een windsnelheid van 32 m/s uit het westen. Te zien is dat b.v. bij de omcirkelde locaties in de rechterzijde van de figuur duidelijke toenames en afnames in de waterstanden (+0,2 m) te zien zijn t.o.v. de omliggende locaties. Die uitschieters zijn duidelijk toe te kennen aan lokale eigenschappen van de modellering rondom deze locaties (haven en bebouwd buitendijks gebied). Hiervoor zijn tenminste 3 oorzaken aan te wijzen (ook benoemd in paragraaf 6.3.3):

1. Ten eerste heeft een verfijning van het rekenrooster en de schematisatie plaatsgevonden, waarin meer detail in en om deze terreinen is terechtgekomen t.o.v. WBI2017.
2. Ten tweede betreft het in een aantal van dergelijke situaties een stuk kering met een voorland met kleine keringen daarop (bakjes), gecombineerd met een hoge bodemligging (droogval). Daardoor wijken de resultaten duidelijk af in geometrie t.o.v. naastgelegen locaties.
3. Ten derde zijn de uitvoerlocaties ter plaatse van deze terreinen soms wat ongelukkig terecht gekomen (ze liggen b.v. op een havendam), waardoor de resultaten in sommige van dit soort situaties vertekend worden door lokale omstandigheden.

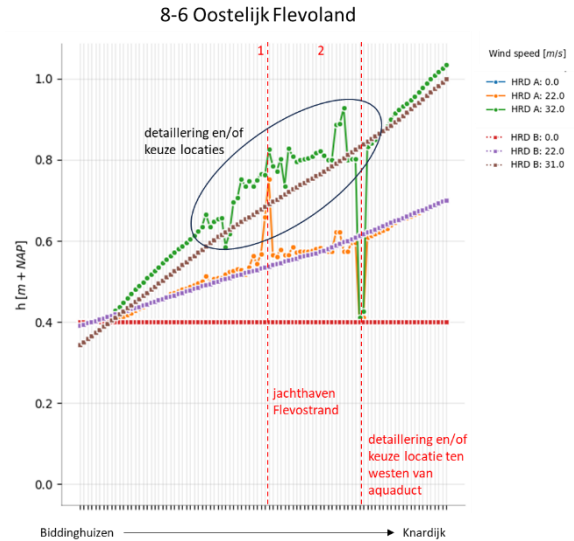


Figuur 42 Waterstandsverschillen langs Randmeren (traject 11-3 rand Veluwe) voor meerpeil +0,4 m+NAP, windrichting westen: links windsnelheid 32 m/s en rechts drie windsnelheden. (links WBI2017 resultaten geïnterpoleerd op BOI2023 datarooster, rechts BOI2023=HRD A en WBI2017=HRD B, uitleg begin 6.2.1).

We willen benadrukken dat langs de randmeren de resultaten van BOI2023 goed overeenkomen met de resultaten van WBI2017. In Figuur 43 is hiervan een voorbeeld te gegeven (normtraject 8-5 bij oosten wind). Daarnaast zien we b.v. in Figuur 44 duidelijk de (kleine) onregelmatigheden, die het gevolg zijn van obstakels in de oeverzone. Aandachtspunt is wel dat zowel in WBI2017 als BOI2023 niet de beoogde windreductiefactor van circa van 15% is toegepast (om de wind van Schiphol te vertalen naar het veel meer landinwaarts gelegen Veluwerandmeer).



Figuur 43 Waterstandsverschillen langs traject 8-5 bij westenwind (Mp040U32D270).



Figuur 44 Waterstandsverschillen langs traject 8-6 bij westenwind (Mp040U32D090, uitleg begin 6.2.1).

6.2.3 Conclusies en aanbevelingen

Net als voor het Markermeer constateren we een redelijk goede overeenkomst tussen de resultaten van BOI2023 en WBI2017. Strikt genomen kunnen we over de exacte verschillen veroorzaakt door de overstap van het oude naar het nieuwe waterbewegingsmodel, geen uitspraken doen. Dit is een ander onderzoeksresultaat dan in de andere verschilanalyses, maar wel bruikbaar voor de onderbouwing van een solide overstap naar de zesde generatie.

Inmiddels is duidelijk geworden dat een belangrijk aspect in zowel WBI2017 als BOI2023 ontbreekt, namelijk de windreductiefactor voor de Veluwerandmeren is in de productieberekeningen niet toegepast (Bottema, 2021). De verschillen die we zien tussen BOI2023 en WBI2017 achten we plausibel en goed verklaarbaar (ondanks dat het niet meer mogelijk is alle details te duiden). Met de aanleg van de Reevedam wordt de lengte van het meer verkort en ontstaan op het traject tussen Harderwijk en Reevedam hogere waterstanden bij wind uit de sector zuid tot west. We zien veel meer detaillering van de oever langs de Meren in de resultaten van de zesde generatie door de verbeteringen aan het modelrooster. De grootste verschillen worden volgens ons veroorzaakt door de keuze van de positie van de uitvoerlocaties in bebouwd buitendijks gebied, rondom kleine havens, bruggen en andere waterwerken. In de toegeleverde concept databases van BOI2023 zijn deze locaties nog niet weggefilterd door de standaard controleprocedures van het BOI.

De geanalyseerde uitschieters zijn het gevolg van gehanteerde uitgangspunten en modelleringskeuzen. Deze verschillen zeggen echter weinig tot niets over de kwaliteit van het zesde generatie instrumentarium, anders dan dat de resultaten plausibel en verklaarbaar zijn. Dit geeft aan dat het zesde generatie model de fysica goed simuleert.

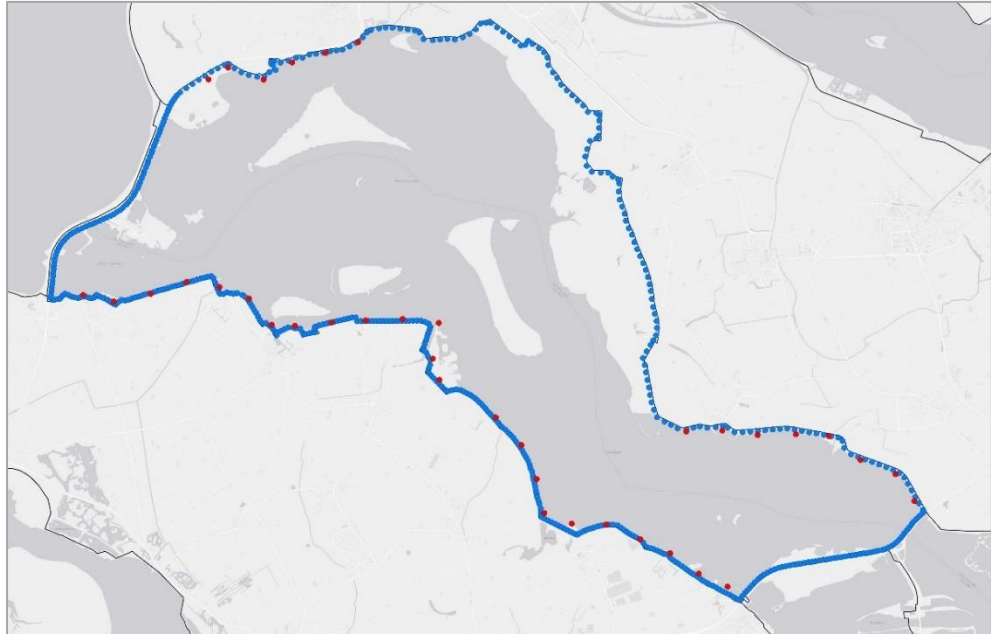
Modellering van de waterbeweging (en golven) in buitendijks gebied en havens is complex, waarin de keuze van uitvoerlocaties en de kwaliteit van de windinformatie een grote invloed hebben. Om de verbeterde detaillering van de havens in het zesde generatie model voor BOI daadwerkelijk volledig te benutten, adviseren wij om de keuze van de uitvoerlocaties verder te verbeteren en daarnaast (zie begin van deze paragraaf) om de windmodellering te verbeteren. Een alternatief zou zijn om voor de specifieke toepassing binnen BOI te kiezen om dergelijke locaties weg te laten. Het gewenste detailniveau kan bijvoorbeeld worden verkregen door HB-Havens toe te passen. Voor andere toepassingen van het model dan BOI, kan de detaillering in en rondom havens wel van meerwaarde zijn. Dat is hier niet onderzocht.

6.3 Grevelingen

6.3.1 Rond het Grevelingenmeer bij westen wind

Op het Grevelingen wordt in de productie gerekend met een constante windrichting in de tijd en de ruimte. De windsnelheid varieert wel in de tijd, maar is uniform in de ruimte. We beginnen de verklaring van de verschillen tussen BOI2023 en WBI2017 langs de Grevelingen met een “rondwandeling”, waarbij we per deeltraject van de rondwandeling de verschillen stuk voor stuk bespreken. In Figuur 46 t/m Figuur 53 is deze rondwandeling langs de oevers van de Grevelingen gevisualiseerd. De figuren bestaan net als eerder bij het Markermeer en de Veluwerandmeren steeds uit de volgende onderdelen:

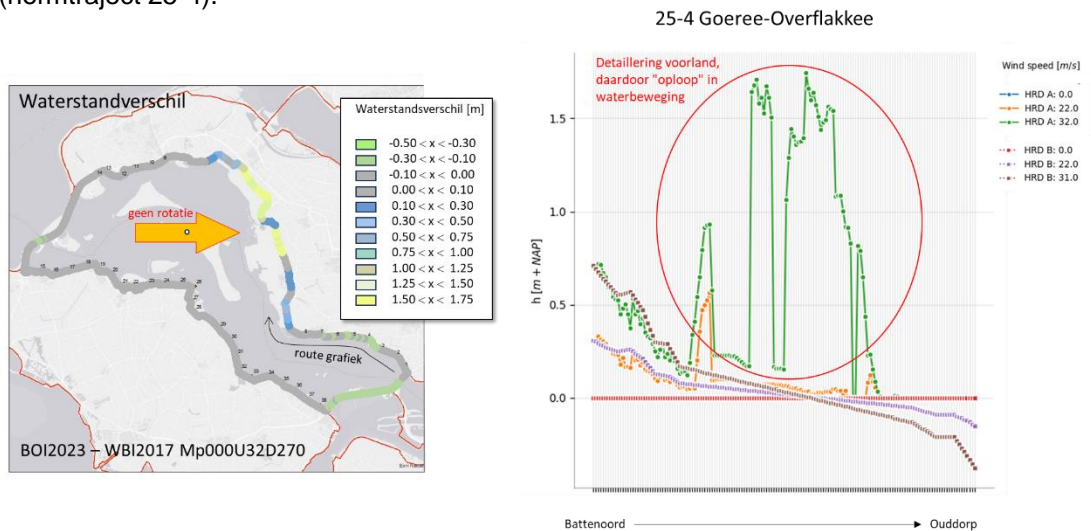
1. Aan de linkerzijde van de figuur staat een overzichtskaartje van de hele Grevelingen, met daarin per locatie het waterstandsverschil tussen BOI2023 en WBI2017 voor een specifieke belasting (Mn000U32D270, wat overeenkomt met een meerpeil van 0 m+NAP, een windsnelheid van maximaal 32 m/s en een constante windrichting uit het westen). In de BOI-databases zitten veel meer locaties per normtraject (blauwe punten in Figuur 45). Tussen de dichtstbijzijnde WBI2017 locaties (rode punten in Figuur 45) is geïnterpoleerd. Dit is een inschatting van de wijze waarop omgegaan kan worden met het kleinere aantal locaties in de concept WBI2017 databases. De linkerzijde van de figuur geeft dan ook een ruimtelijke indicatie van de verschillen. Het verschil betreft “BOI2023 minus WBI2017”, dus positieve waarden betekent dat BOI2023 hogere resultaten geeft, negatieve waarden betekent dat WBI2017 hoger is. In de figuur staat ook een pijl, die de windrichting weergeeft (windrotatie is niet meegenomen op het Grevelingenmeer). Tot slot is in het kaartje aan de linkerzijde een pijl (met de term “route”) te zien. Deze dient om een specifiek traject van de rondwandeling nader uit te lichten in de langfiguur aan de rechterzijde.
2. Aan de rechterzijde staat een langfiguur met daarin de absolute waterstanden voor een specifiek traject zonder inter- of extrapolatie. Dit traject komt overeen met de zwarte pijl (“route”) aan de linkerzijde. Aan de rechterzijde zijn waterstanden uit de databases fysica gevisualiseerd voor zowel BOI2023 als voor WBI2017. Voor beide zijn steeds 3 windsnelheden (0, 22 en 31/32 m/s) in beeld gebracht. De blauwe, oranje en groene doorgetrokken lijnen komen overeen met de resultaten uit de databases fysica van BOI2023 voor respectievelijk 0, 22 en 30 m/s. De rode, paarse en bruine gestreepte lijnen corresponderen met die uit de databases van WBI2017 voor respectievelijk 0, 23 en 30 m/s. De donkergekleurde markers op de lijnen geven de posities van de beschikbare uitvoerlocaties langs het traject.



Figuur 45 Weergave van de locaties langs de Grevelingen zoals beschikbaar in de BOI2023-databases (serie blauwe punten nabij de primaire keringen) en locaties beschikbaar in de WBI2017-databases (serie rode punten: minder locaties met grotere afstand tot primaire keringen).

Indien sprake is van afwaaiing op een uitvoerlocatie (een verlaging van de waterstand door wind), komt dit op een andere wijze in de databases van BOI2023 en WBI2017 terecht. In WBI2017 is de verlaging van de waterstand nabij het tijdstip van de maximale windsterkte weggeschreven in de database. In BOI2023 is het maximum van de waterstand gedurende de gehele doorgerekende periode weggeschreven naar de database (min of meer gelijk aan het opgelegde meerpeil). In de figuren geven we aan dat voor dit verschil door afwaaiing gecorrigeerd zou moeten worden.

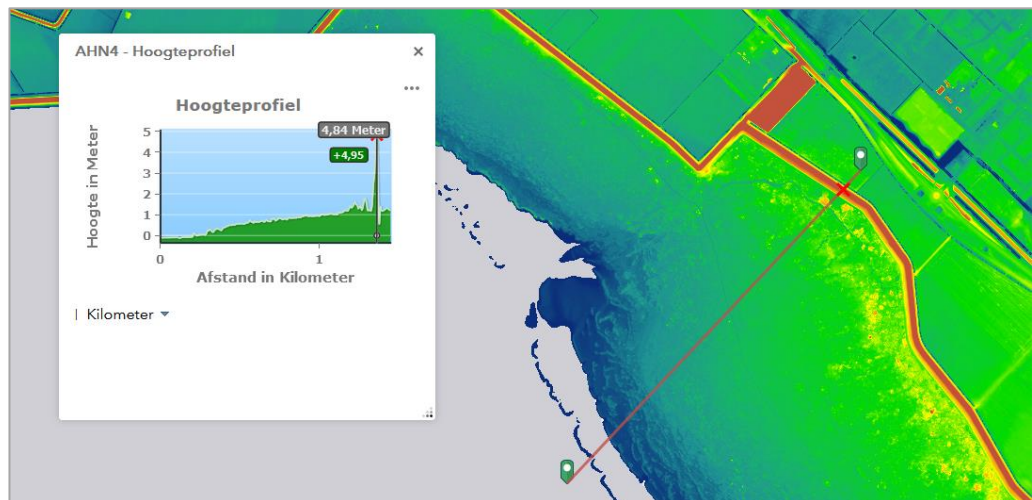
In Figuur 46 beginnen we de rondwandeling met het traject van Battenoord naar Ouddorp (normtraject 25-4).



Figuur 46 Waterstandsverschillen langs Grevelingen (traject 25-4) voor meerpeil +0,0 m+NAP, windrichting west: links windsnelheid 32 m/s en rechts drie windsnelheden. (links WBI2017 resultaten geïnterpoleerd op BOI2023 datarooster, rechts BOI2023=HRD A en WBI2017=HRD B, uitleg begin 6.3.1).

We constateren het volgende:

- Uit de geografische figuur aan de linkerzijde zien we verschillen die liggen tussen -0,4 en +1,75 m (BOI2023 komt hoger uit dan WBI2017).
- De BOI-resultaten liggen bóven het meerpeil van -0,0 m+NAP, de WBI-resultaten liggen daar soms boven, soms onder. Dit wordt weer veroorzaakt door de aanwezigheid van afwaaiing in de databases fysica van WBI2017, die niet aanwezig is in BOI2023 (zie rechterzijde van de langfiguur).
- Aan de rechterzijde is met name bij de hogere windsnelheden goed de invloed van de aanwezigheid van voorlanden langs het traject te zien. De verschillen tussen BOI2023 en WBI2017 zijn fors, wat vooral wordt veroorzaakt omdat in WBI2017 geen locaties beschikbaar waren op deze locaties. Om toch enigszins een beeld te geven, zijn de resultaten aan weerszijden van de voorlanden (locaties 8 en 9) gebruikt om de WBI2017 resultaten lineair te interpoleren naar tussengelegen locaties. Dit is grof en doet eigenlijk niet echt recht aan de aanwezigheid van de voorlanden, maar is vooral bedoeld om te laten zien hoe belangrijk het wel/niet meenemen van dergelijke voorlanden is in de BOI2023 resultaten.
- De waterstanden schieten op sommige locaties vrij steil omhoog en omlaag, wat op het oog hoge waterstanden oplevert op plaatsen waar juist voorlanden aanwezig zijn. Merk echter op dat de bodemhoogte zelf ter plaatse van de uitvoerlocaties vaak vergelijkbaar van hoogte is, door het oplopende voorland ter plaatse (zie voorbeeld in Figuur 47). Feitelijk bereikt op deze locaties dus slechts een dunne schijf water de waterkering.
- Door de harde wind uit westelijke richting gaat het meer scheef staan (verlaging bij de Brouwersdam, verhoging bij de Grevelingendam). Als het meer voldoende scheef staat, zal de waterstand aan de meerzijde van het voorland hoger komen dan de terreinhoogte. Het water wordt richting de dijk over het voorland geblazen. De wind geeft vervolgens een relatief dun laagje water van hooguit een paar decimeter dat richting de waterkering omhoog wordt gestuwd. De variatie van de waterstand langs de waterkering wordt met name veroorzaakt door lokale geometrie (oriëntatie van een dijk en aanwezigheid van geulen en plaatselijke verhogingen/verlagingen in het voorland). Het achterliggende fysische proces en de doorwerking van de wind op de waterstanden in het bekken staan in meer detail beschreven in (Oerlemans et al., 2022).

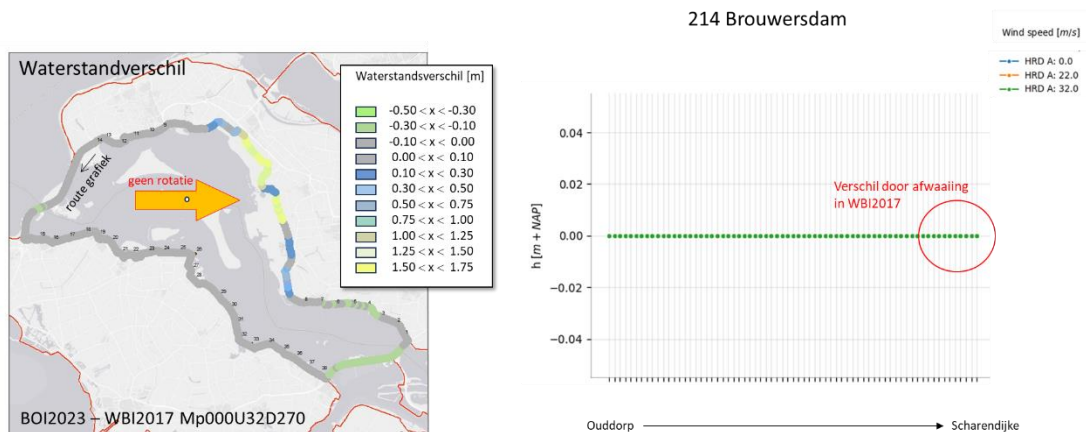


Figuur 47 Dwarsdoorsnede uit het AHN4 van het voorland langs normtraject 25-4.

- Op de locaties zonder voorland zijn de resultaten tussen BOI2023 en WBI2017 redelijk vergelijkbaar, namelijk een verschil van minder dan 0,1 m (linkerzijde rechterfiguur).

- De vergelijking tussen de BOI2023-resultaten en de WBI2017-resultaten bij een wind van 32 m/s is net niet helemaal correct, maar onvermijdelijk omdat in de verschillende programma's andere combinaties zijn doorgerekend (andere windsnelheden).

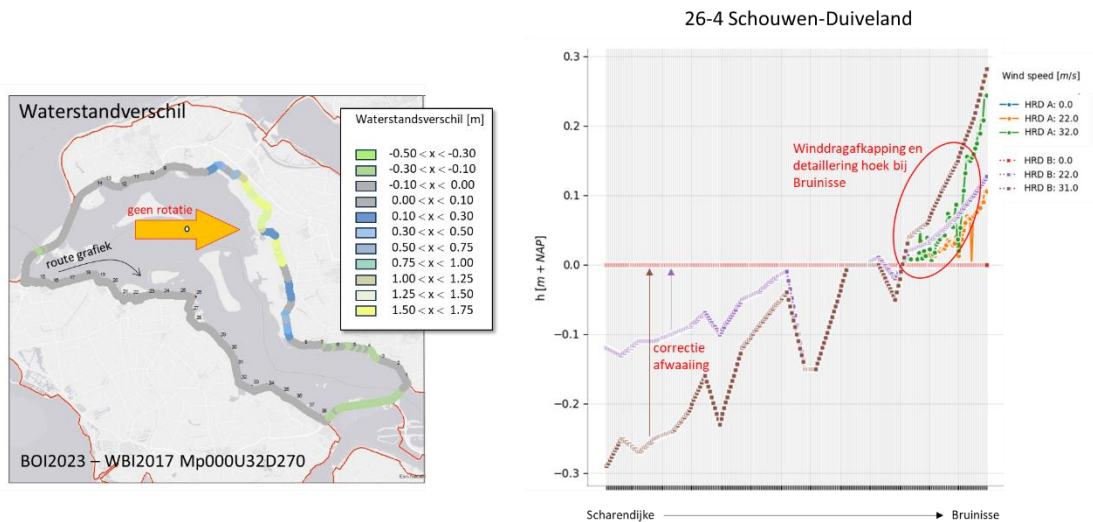
Het vervolg van de rondwandeling betreft het traject van Ouddorp naar Scharendijke (Brouwersdam), zie Figuur 48.



Figuur 48 Waterstandsverschillen langs Grevelingen (Brouwersdam) voor meerpeil +0,0 m+NAP, windrichting west: links windsnelheid 32 m/s en rechts drie windsnelheden. (links WBI2017 resultaten geïnterpoleerd op BOI2023 datarooster, rechts BOI2023=HRD A, uitleg begin 6.3.1, WBI2017 ontbreekt in de figuur omdat voor het traject Brouwersdam geen WBI2017 database is aangemaakt).

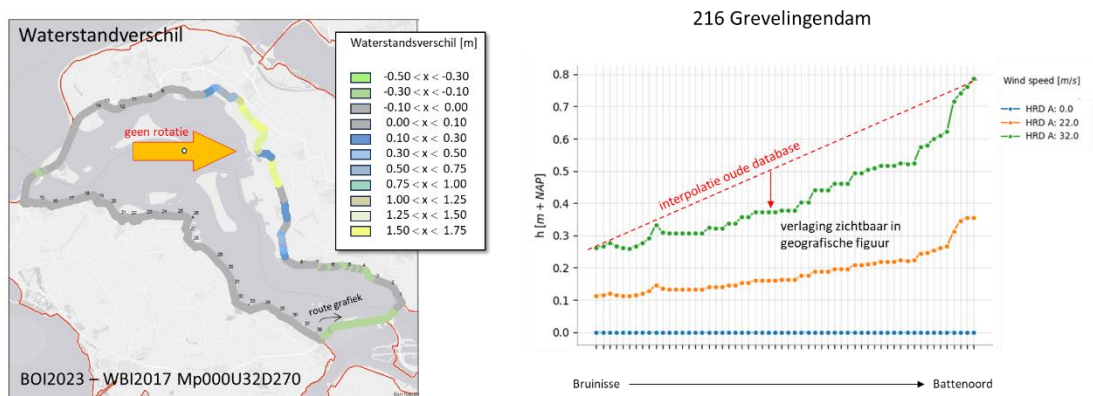
In de langsfiguur aan de rechterzijde zijn alleen de resultaten van BOI2023 zichtbaar (alle waterstanden gelijk aan het initiële meerpeil). In WBI2017 zijn geen waterstanden beschikbaar langs dit traject. Om toch enigszins een beeld te geven in de geografische figuur (linkerzijde), zijn de resultaten aan weerszijden van de Brouwersdam (locaties 14 en 15) gebruikt om de WBI2017 resultaten lineair te interpoleren naar tussengelegen locaties. Dit is vooral bedoeld om te laten zien hoe belangrijk het wel/niet meenemen van deze locaties is in de BOI2023 resultaten. Doordat we bij deze belastingcombinatie een effect van afwaaiing aanwezig is, is de meerwaarde van deze locaties in de BOI2023 resultaten niet echt zichtbaar.

Het volgende traject betreft 26-4 (tussen Scharendijke en Bruinisse) aan de zuidzijde van het meer (Figuur 49), langs de noordoever van Schouwen-Duiveland. De verticale as voor dit traject heeft in de rechtergrafiek een kleiner bereik dan in vergelijkbare andere figuren in dit hoofdstuk. We zien vergelijkbare resultaten als al eerder in dit rapport. Na correctie voor afwaaiing zijn de verschillen beperkt. Alleen in het uiterste zuiden (locaties 36 t/m 38 bij Bruinisse) zien we verschillen. De BOI2023-resultaten geven hier duidelijk meer variatie tussen opeenvolgende locaties t.o.v. WBI2017. Dit wordt enerzijds veroorzaakt door de fijnere detaillering van het BOI2023 rooster (b.v. in de haven) en anderzijds door het verschil in dichtheid van de locaties (in BOI2023 elke 100 m, in WBI2017 elke 1000 m).



Figuur 49 Waterstandsverschillen langs Grevelingen (traject 26-4 Schouwen-Duiveland) voor meerpeil +0,0 m+NAP, windrichting west: links windsnelheid 32 m/s en rechts drie windsnelheden. (links WBI2017 resultaten geïnterpoleerd op BOI2023 datarooster, rechts BOI2023=HRD A en WBI2017=HRD B, uitleg begin 6.3.1).

Het laatste deel van de rondwandeling van de Grevelingen betreft traject 216 (de Grevelingendam) aan de oostzijde van het meer (Figuur 50).



Figuur 50 Waterstandsverschillen langs Grevelingen (traject 216 Grevelingendam) voor meerpeil +0,0 m+NAP, windrichting west: links windsnelheid 32 m/s en rechts drie windsnelheden. (links WBI2017 resultaten geïnterpoleerd op BOI2023 datarooster, rechts BOI2023=HRD A en WBI2017=HRD B, uitleg begin 6.3.1).

Aan de linkerzijde van de figuur zien we dat de verschillen langs dit traject liggen tussen -0,1 en -0,3 m (BOI2023 valt lager uit dan WBI2017). Ook langs de Grevelingendam zijn geen WBI2017 resultaten beschikbaar. Om toch enigszins een beeld te geven in de geografische figuur (linkerzijde), zijn de resultaten aan de noord- en zuidzijde van de dam (locaties 1 en 38) gebruikt om de WBI2017 resultaten lineair te interpoleren naar tussengelegen locaties. In de langfiguur aan de rechterzijde zijn alleen de resultaten van BOI2023 te zien. In Figuur 46 en Figuur 49 is te zien dat bij locaties 38 en 1 nauwelijks een verschil tussen beide databases aanwezig is, daardoor geeft de rode onderbroken lijn een goed beeld van het geïnterpoleerde resultaat. De afstand tussen de rode en de groene lijn (ongeveer 0,1 – 0,15 m) wordt ook in de geografische figuur getoond. We tonen hiermee hoe belangrijk het wel/niet meenemen van deze locaties is in de BOI2023 resultaten.

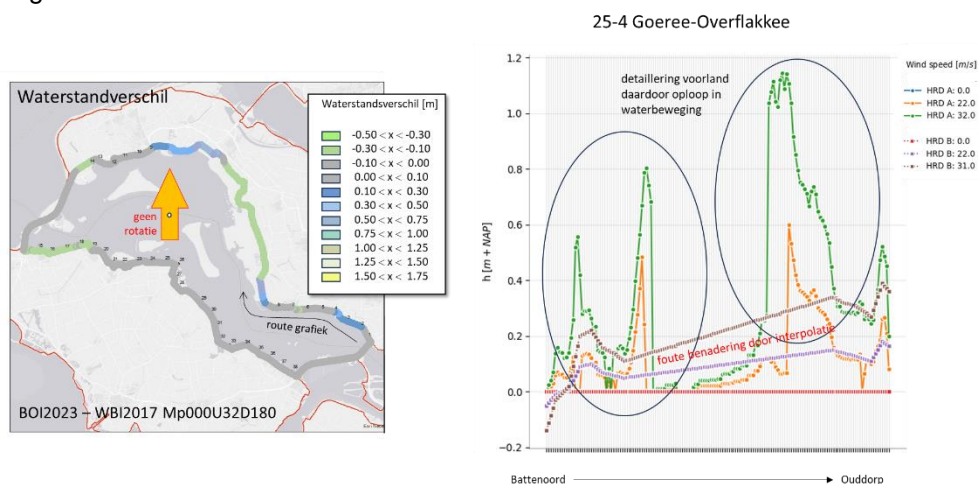
Bij een windsnelheid van 22 m/s heeft de het langsverloop van de maximale waterstand min of meer een lineair verloop tot op ongeveer 90% van de afstand op de horizontale as. Bij wind uit westelijke richting wordt het meer in de hoek tussen de Grevelingendam en normtraject 25-4 opgezet. Bij een snelheid van 32 m/s is dit effect nog groter. Het water van het meer wordt in de noordoostelijke hoek opgestuwd. Bij deze belastingcombinatie is de waterstand in de hoek van het meer aan de noordzijde van de dam (locatie 1) niet representatief voor de belasting op de Grevelingendam zelf.

Het piekje dat op ongeveer 20% van de afstand op de horizontale as in de waterstanden aanwezig is, is waarschijnlijk het gevolg van de strekdam die bij de haven van Bruinisse en de sluis naar de Oosterschelde ligt.

Hiermee is de rondwandeling langs het Grevelingenmeer voor deze specifieke belastingcombinatie afgerond.

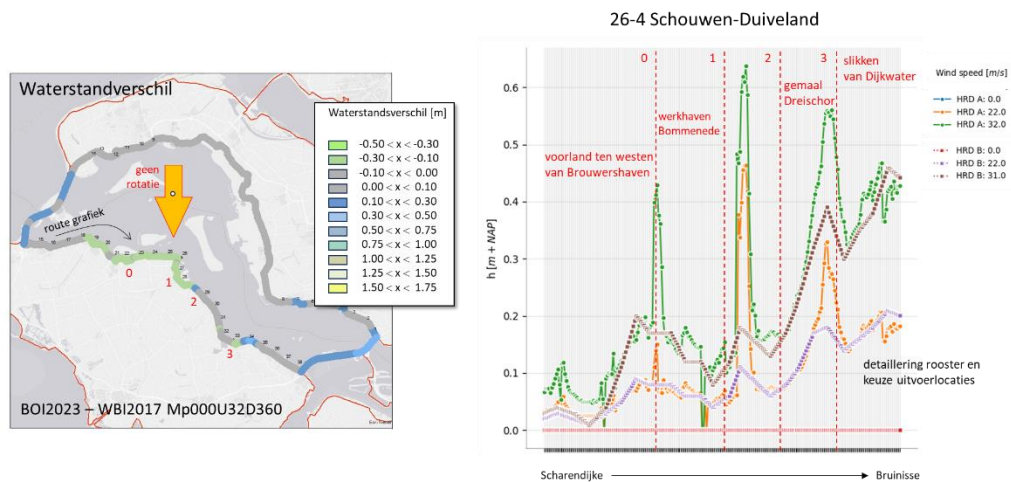
6.3.2 Verschil bij wind uit andere richting

Ook in onze analyse van de Grevelingen hebben we om een goed beeld te krijgen van de verschillen tussen BOI2023 en WBI2017 deze "rondwandeling" ook uitgevoerd bij wind uit het noorden (360°), het oosten (90°) en het zuiden (180°). Daaruit volgt hetzelfde beeld van de verschillen. In Figuur 51 staat het verschil bij zuiden wind (32 m/s) langs het traject van Battenoord naar Ouddorp (normtraject 25-4). De vergelijking tussen BOI2023 en WBI2017 resultaten is lastig, omdat langs een groot gedeelte van het traject geen WBI2017 resultaten beschikbaar zijn. Deze zijn destijds na kwaliteitscontrole uit de database verwijderd. Om toch een vergelijking te maken is (zoals eerder opgeschreven) tussen locaties geïnterpoleerd. Te zien is dat aan het begin en het einde van het traject (waar wel locaties aanwezig zijn in de database) de scheefstand van het meer in de BOI2023 resultaten overeenkomt met de WBI2017 resultaten. Te zien is dat in de BOI2023 veel meer detail aanwezig is. Dit wordt niet alleen veroorzaakt doordat meer locaties langs het traject aanwezig zijn in de database. Het detail in het rekenrooster zorgt dat langs het traject grote verschillen in waterstanden ontstaan door details van het voorland. Merk op dat de opzet van de waterstand niet (zoals verwacht) schaalt met het kwadraat van de windsnelheid. De lokale bodemligging en lokale waterdiepte op het voorland spelen blijkbaar een grote rol, in het geval als de opzet minder snel toeneemt dan met het kwadraat van de wind. Soms neem de opzet ook meer toe dan het kwadraat van de windsnelheid. De oorzaak hiervan is onduidelijk en niet verder uitgezocht.



Figuur 51 Waterstandsverschillen langs Grevelingen (traject 25-4) voor meerpeil +0,0 m+NAP, windrichting zuid: links windsnelheid 32 m/s en rechts drie windsnelheden. (links WBI2017 resultaten geïnterpoleerd op BOI2023 datarooster, rechts BOI2023=HRD A en WBI2017=HRD B, uitleg begin 6.3.1).

In Figuur 52 staat het verschil bij noorden wind (32 m/s) langs het traject van Scharendijke naar Bruinisse aan de zuidzijde van het meer langs de noordoever van Schouwen-Duiveland. Ook hier zien we dat de scheefstand van het meer in de resultaten van WBI2017 en BOI2023 goed overeenkomen en ook hier zien we veel meer detail in de resultaten van BOI2023. De vergelijking wordt hier minder beperkt door interpolatie van WBI2017 resultaten (omdat meer gegevens in de database aanwezig zijn). De BOI2023-resultaten geven hier duidelijk meer variatie tussen opeenvolgende locaties t.o.v. WBI2017. Dit wordt enerzijds veroorzaakt door de fijnere detaillering van het BOI2023 rooster (b.v. in de haven) en anderzijds door het verschil in dichtheid van de locaties (in BOI2023 elke 100 m, in WBI2017 elke 1000 m).



Figuur 52 Waterstandsverschillen langs Grevelingen (traject 26-4 Schouwen-Duiveland) voor meerpeil +0,0 m+NAP, windrichting noord: links windsnelheid 32 m/s en rechts drie windsnelheden. (links WBI2017 resultaten geïnterpoleerd op BOI2023 datarooster, rechts BOI2023=HRD A en WBI2017=HRD B, uitleg begin 6.3.1).

In de volgende paragraaf wordt bij enkele specifieke locaties nog stil gestaan.

6.3.3 Detaillering in en om havens

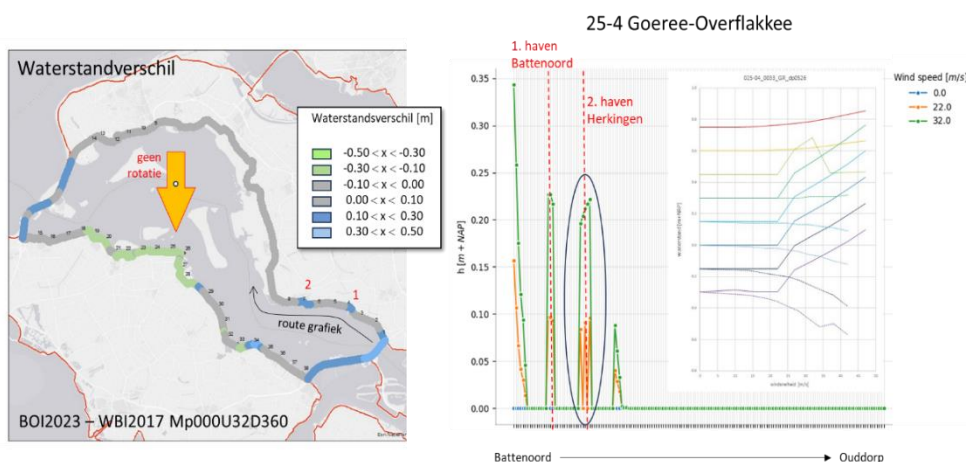
Tijdens de vergelijking van de resultaten zijn net als bij de andere meren enkele zaken opgevallen die we willen benoemen. Met name in en rondom havens in het gebied vinden we resultaten die afwijkend zijn van de omliggende locaties. Hoewel het binnen de scope van dit project niet de bedoeling is om alle BOI-resultaten toe te lichten, vinden we het de moeite waard om het te noemen en er later in dit hoofdstuk een aanbeveling over te geven. Vergelijkbare constatering zijn overigens gedaan in de rapportage over de productieberekeningen voor de Meren (Oerlemans et al., 2022). In Figuur 53 is een voorbeeld te zien van een situatie waarbij bovenstaande optreedt voor de belastingcombinatie met een meerpeil van 0 m+NAP en een windsnelheid van 32 m/s uit het noorden.

Te zien is dat b.v. bij de rood gemarkeerde locaties 1 en 2 in beide deelfiguren toenames in de waterstanden (+0,2 m) te zien zijn t.o.v. de omliggende locaties. Die uitschieters zijn duidelijk toe te kennen aan geografische locaties (havens). Hiervoor zijn tenminste 3 oorzaken aan te wijzen:

1. Ten eerste heeft een verfijning van het rekenrooster en de schematisatie plaatsgevonden, waarin meer detail in en om havens is terechtgekomen t.o.v. WBI2017.
2. Ten tweede betreft het in een aantal van dergelijke situaties een stuk kering met een voorland met kleine keringen daarop (bakjes), gecombineerd met een hoge bodemligging (droogval). Daardoor wijken de resultaten duidelijk af in geometrie t.o.v. naastgelegen locaties.

- Ten derde zijn de uitvoerlocaties ter plaatse van deze (kleinere) havens soms wat ongelukkig terecht gekomen (ze liggen b.v. op een havendam), waardoor de resultaten in sommige van dit soort situaties vertekend worden door lokale omstandigheden.

Het is met name de gekozen positie van de uitvoerlocaties en hoe omgegaan wordt met locaties die ‘droogvallen’ in de simulatie, die voor de verschillen in resultaten zorgen.



Figuur 53 Waterstandsverschillen langs Grevelingen (traject 25-4 Goeree-Overflakkee) voor meerpeil +0,0 m+NAP, windrichting noord: links windsnelheid 32 m/s en rechts drie windsnelheden. (links WBI2017 resultaten geïnterpoleerd op BOI2023 datarooster, rechts BOI2023=HRD A en WBI2017=HRD B, uitleg begin 6.3.1).

6.3.4 Conclusies en aanbevelingen

Net als bij de andere Meren, vinden we een redelijk goede overeenkomst tussen de resultaten van BOI2023 en WBI2017. De verschillen die we zien tussen BOI2023 en WBI2017 langs de Grevelingen zijn plausibel. Alhoewel we over strikt de verschillen veroorzaakt door de overstap van het oude naar het nieuwe waterbewegingsmodel, geen uitspraken doen. We zien veel meer detaillering in de resultaten door de toegenomen detaillering van het modelrooster. De grootste verschillen worden veroorzaakt door de gewijzigde modelrandvoorwaarden (het wel/niet meenemen van de winddragafkapping) en verbetering van het aantal locaties (onderlinge afstand) in de databases. Ten opzicht van de relatief beperkte opwaaiing op de Grevelingen zelf, zorgen de brede voorlanden bij West-Flakkee (traject 24-5) in de resultaten van BOI2023 voor een aanzienlijke extra opzet die niet in de resultaten van WBI2017 zat.

Omdat een gerichte kalibratie/validatie op het gedrag in specifieke gedeelten van het model niet kan worden uitgevoerd (beperking door beschikbare meetgegevens en windinformatie), is de nauwkeurigheid van de berekende waterstanden lastig te beoordelen. Dit speelt zeker in de buurt van complexe geometrieën met voorlanden of havens. De gegevens van de zesde generatie schematisatie zijn actueler en gedetailleerder. Daarmee zijn de resultaten op deze locaties verbeterd, de mate waarin is niet te valideren. Hierbij werkt de keuze van de positie van uitvoerlocaties verstrend, omdat deze keuze voor enkele locaties verbeterd moet worden.

6.4 Volkerak-Zoommeer

In deze paragraaf bespreken we de verschillen tussen BOI2023 en WBI2017 voor het Volkerak-Zoommeer voor de situatie waarin het meer niet wordt ingezet als waterberging voor de Rijn-Maasmonding. Deze analyse is slechts beperkt uitvoerbaar en bovendien slechts beperkt representatief (omdat de maatgevende condities veelal optreden tijdens de inzet als waterberging). Hier zijn twee redenen voor:

- Zoals eerder gesteld in deze rapportage (paragraaf 1.1) maakt het VZM onderdeel uit van de Rijn-Maasmonding. We bespreken hier de verschillen in de productieberekeningen van het type Meren (als waterberging niet wordt ingezet). Omdat de productieberekeningen van de Rijn-Maasmonding nog niet zijn uitgevoerd (en dus nog geen conceptdatabases beschikbaar zijn), is voor deze vergelijking gebruik gemaakt van een tussenproduct uit BOI2023.
- Wat namelijk wél beschikbaar is, zijn de resultaten van alle D-HYDRO berekeningen voor het BOI2023 voor het VZM als “meer”. Deze zijn binnen het BOI2023 gecontroleerd en specifiek voor deze vergelijking omgezet naar een database fysica (sqlite). *Deze database heeft niet de gebruikelijke BOI2023 kwaliteitscontrole en droogvalprocedure ondergaan en is dus een tussenproduct dat alleen gebruikt wordt voor de specifieke vergelijking in deze rapportage.*
- In de WBI2017 databases is per uitvoerlocaties niet de volledige set productieberekeningen opgenomen, omdat niet alle productieberekeningen een stabiel verloop van de waterstand opleverden.
- Daarnaast zijn in de WBI2017-databases slechts een beperkt aantal locaties beschikbaar voor het VZM. Om toch een vergelijking te kunnen maken, zijn veel resultaten geïnterpoleerd tussen wel beschikbare locaties. Dit maakt dat de verbeterde detaillering van bijvoorbeeld het modelrooster nauwelijks zinvol te bespreken is.
- We maken gebruik van databases die in een latere fase van het WBI2017 zijn opgeleverd in eerste instantie een verbeterde versie aan het BOI en daarna aan het project Rijkskeringen (Kuijper en Pleijter, 2020). Hier is een iets andere procedure gevolgd als bij het Markermeer, de Veluwerandmeren en de Grevelingen. Bij het uitlezen van de resultaten is dezelfde procedure gevolgd voor afwaaiing als in BOI2023, waardoor afwaaiing niet in de WBI2017 databases voor het VZM is opgenomen.

6.4.1 Rond het Volkerak-Zoommeer bij noorden wind

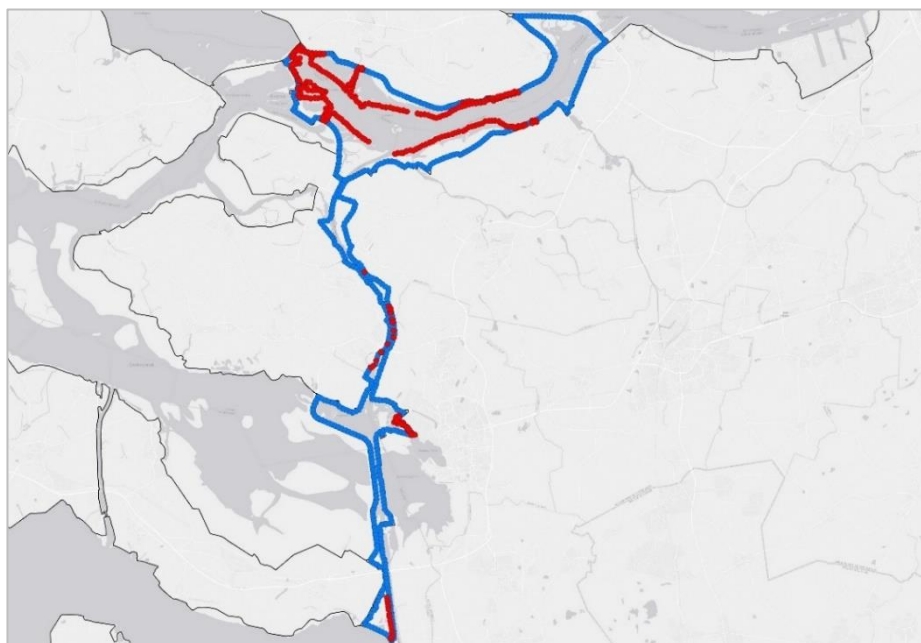
Op het Volkerak-Zoommeer wordt in de productie gerekend met een constante windrichting in de tijd en de ruimte. De windsnelheid varieert wel in de tijd maar is uniform in de ruimte. We verklaren de verschillen tussen BOI2023 en WBI2017 met een “rondwandeling” langs het Volkerak-Zoommeer, waarbij we per deeltraject van de rondwandeling de verschillen stuk voor stuk bespreken. In Figuur 55 t/m Figuur 67 is deze rondwandeling langs de oevers van het meer gevisualiseerd. De figuren bestaan net als in de bespreking van voorgaande Meren steeds uit de volgende onderdelen:

1. Aan de linkerzijde van de figuur staat een overzichtskaartje van het hele VZM, met daarin per locatie het waterstandsverschil tussen BOI2023 en WBI2017 voor een specifieke combinatie (Mn120U32D360, wat overeenkomt met een meerpeil van 1,2 m+NAP, een windsnelheid van 32 m/s en een windrichting uit het noorden). Het verschil betreft “BOI2023 minus WBI2017”, dus positieve waarden betekent dat BOI2023 hogere resultaten geeft, negatieve waarden betekent dat WBI2017 hoger is. In de concept BOI2023 databases zitten veel meer locaties per normtraject (blauwe punten in Figuur 54). Tussen de dichtstbijzijnde WBI2017 locaties (rode punten in Figuur 54) is geïnterpoleerd. Dit is een inschatting van de wijze waarop omgegaan kan worden met het kleinere aantal locaties in de definitieve WBI2017 databases. De linkerzijde van de figuur geeft dan ook een ruimtelijke indicatie van de verschillen.

In Figuur 55 staat ook een pijl, die de windrichting weergeeft (windrotatie is niet meegenomen op het VZM). Tot slot is in het kaartje aan de linkerkant een pijl (met de term "route") te zien. Deze dient om een specifiek traject van de rondwandeling nader uit te lichten in de langfiguur aan de rechterkant.

2. Aan de rechterkant staat een langfiguur met daarin de absolute waterstanden voor een specifiek traject zonder inter- of extrapolatie. Dit traject komt overeen met de pijl ("route") aan de linkerkant. Aan de rechterkant zijn waterstanden uit de databases fysica gevisualiseerd voor zowel BOI2023 als voor WBI2017. Voor beide zijn steeds 3 windsnelheden (0, 22/20 en 32/30 m/s) in beeld gebracht. De blauwe, oranje en groene doorgetrokken lijnen komen overeen met de resultaten uit de databases fysica van BOI2023 voor respectievelijk 0, 22 en 30 m/s. De rode, paarse en bruine gestreepte lijnen corresponderen met databases van WBI2017 voor respectievelijk 0, 23 en 30 m/s. De donkergekleurde markers op de lijnen geven de posities van de beschikbare uitvoerlocaties langs het traject.

Indien sprake is van afwaaiing (een verlaging van de waterstand door wind), komt dit op een andere wijze in de databases van BOI2023 en WBI2017. In WBI2017 is de waterstand nabij het tijdstip van de maximale windsterkte weggeschreven in de database. In BOI2023 is het maximum gedurende de gehele doorgerekende periode weggeschreven (min of meer gelijk aan het opgelegde meerpeil). In de figuren is dit aangegeven.

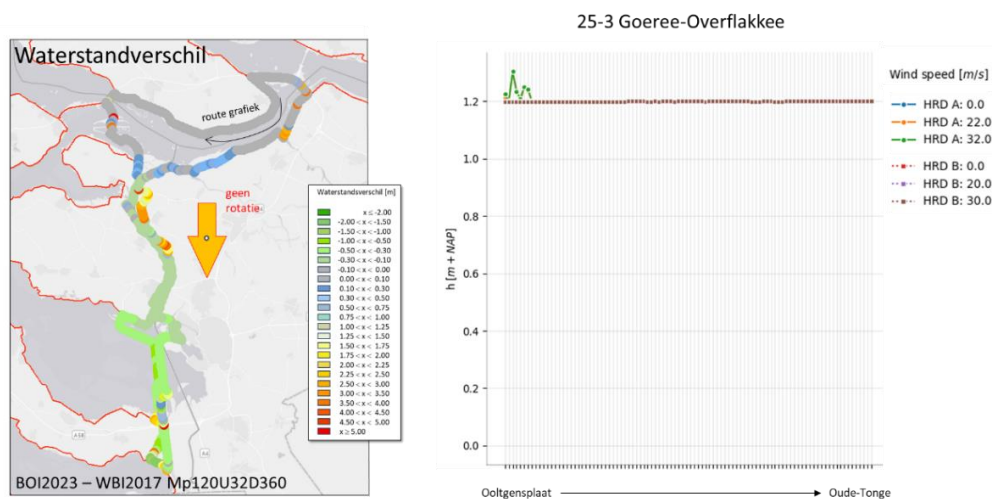


Figuur 54 Weergave van de locaties langs het VZM beschikbaar in de BOI-databases (serie blauwe punten nabij de primaire keringen) en locaties beschikbaar in de WBI-databases (serie rode punten: minder locaties met grotere afstand tot primaire keringen).

In Figuur 55 beginnen we de rondwandeling met het traject van Ooltgensplaat naar Oude-Tonge (25-3 Goeree-Overflakkee). We constateren het volgende:

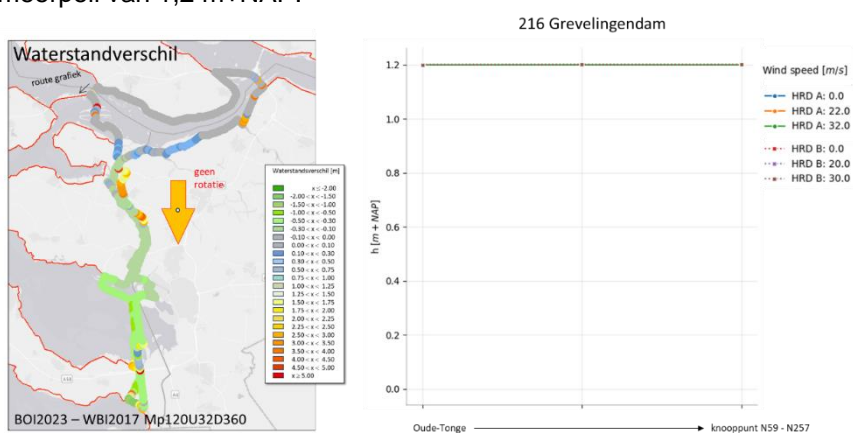
- Uit de geografische figuur aan de linkerkant zien we verschillen die liggen tussen de 0 en +0,1 m.
- Aan de rechterkant zien we in de langfiguur nauwelijks verschillen tussen BOI2023 en WBI2017. De BOI- en WBI- resultaten liggen beide op het initiële meerpeil van 1,2 m+NAP (afwaaiing).

- Aan de rechterzijde van Figuur 55 is met name bij de hoogste windsnelheden nog een klein verschil te zien (groen en oranje lijnen van BOI2023). Op een enkele plek, in de hoek van de Hellegatsdam en het begin van normtraject 25-3 (in het noordwesten van het getoonde tracé), zien we dat de BOI2023 resultaten een kleine verhoging geven: dit wordt naar verwachting veroorzaakt door een fijnere detaillering van bepaalde geografische elementen in het rooster van het zesde generatie model. Waarschijnlijk is de uitvoerlocatie in de doorgerekende combinatie niet in directe verbinding met de rest van het meer, waardoor de waterstand op deze locatie ook afwijkt van de rest van het meer. Door schotjes in het rekenrooster of een lokale terreindepressie op hoger gelegen voorland kan er wel water aanwezig zijn op de uitvoerlocatie, maar wijkt deze af van de rest van het meer. Omdat hier de ongecorrigeerde waarden van BOI2023 gebruiken voor de vergelijking, is het ook mogelijk dat in de grafiek de lokale bodemhoogte wordt getoond. Er is niet gecontroleerd of de uitgelezen waarde wel een waterstand is.



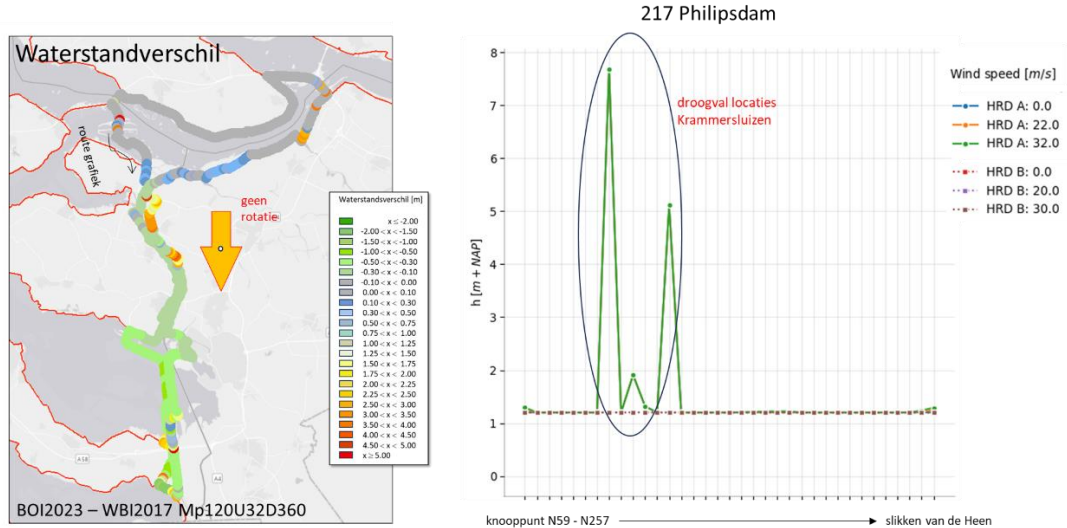
Figuur 55 Waterstandsverschillen langs Volkerak-Zoommeer (traject 25-3) voor meerpeil +1,2 m+NAP, windrichting noord: links windsnelheid 32 m/s en rechts drie windsnelheden. (links WBI2017 resultaten geïnterpoleerd op BOI2023 datarooster, rechts BOI2023=HRD A en WBI2017=HRD B, uitleg begin 6.4.1).

Het vervolg van de rondwandeling betreft het traject van Oude Tonge naar autoweg N257 (Grevelingendam), zie Figuur 56. Ook hier is goed te zien dat er nauwelijks verschil is tussen WBI2017 en BOI2023. De waterstanden aan de rechterzijde zijn gelijk aan het initiële meerpeil van 1,2 m+NAP.



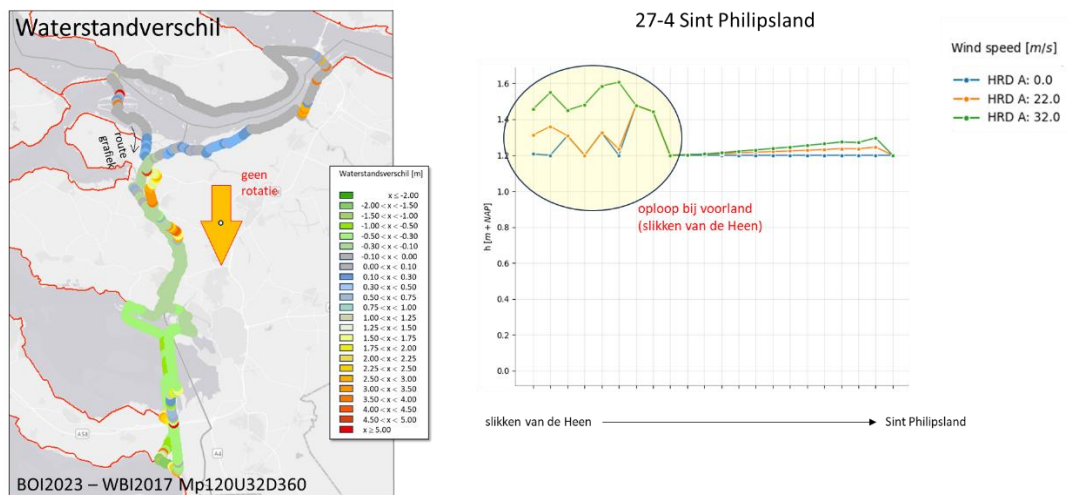
Figuur 56 Waterstandsverschillen langs Volkerak-Zoommeer (traject 216 Grevelingendam) voor meerpeil +1,2 m+NAP, windrichting noord: links windsnelheid 32 m/s en rechts drie windsnelheden. (links WBI2017 resultaten geïnterpoleerd op BOI2023 datarooster, rechts BOI2023=HRD A en WBI2017=HRD B, uitleg begin 6.4.1).

Het volgende traject betreft de Philipsdam (tussen de Grevelingendam en de slikken van de Heen) aan de westzijde van het meer (Figuur 57). We zien een vergelijkbaar resultaat als dat bij het vorige traject. De verschillen zijn over grote delen van het traject beperkt. Op enkele plaatsen geven de BOI2023-resultaten grote verhogingen t.o.v. WBI2017. Dit wordt veroorzaakt door droogval bij de Krammersluizen (hier is de locatie van de uitvoerpunten ongelukkig gekozen). De blauwe, oranje en groene lijnen liggen op elkaar (bij een windsterkte van 0 m/s en 32 m/s is de verhoging hetzelfde), wat overeenkomt met de lokale bodemhoogte.



Figuur 57 Waterstandverschillen langs Volkerak-Zoommeer (traject 217 Philipsdam) voor meerpeil +1,2 m+NAP, windrichting noord: links windsnelheid 32 m/s en rechts drie windsnelheden. (links WBI2017 resultaten geïnterpoleerd op BOI2023 datarooster, rechts BOI2023=HRD A en WBI2017=HRD B, uitleg begin 6.4.1).

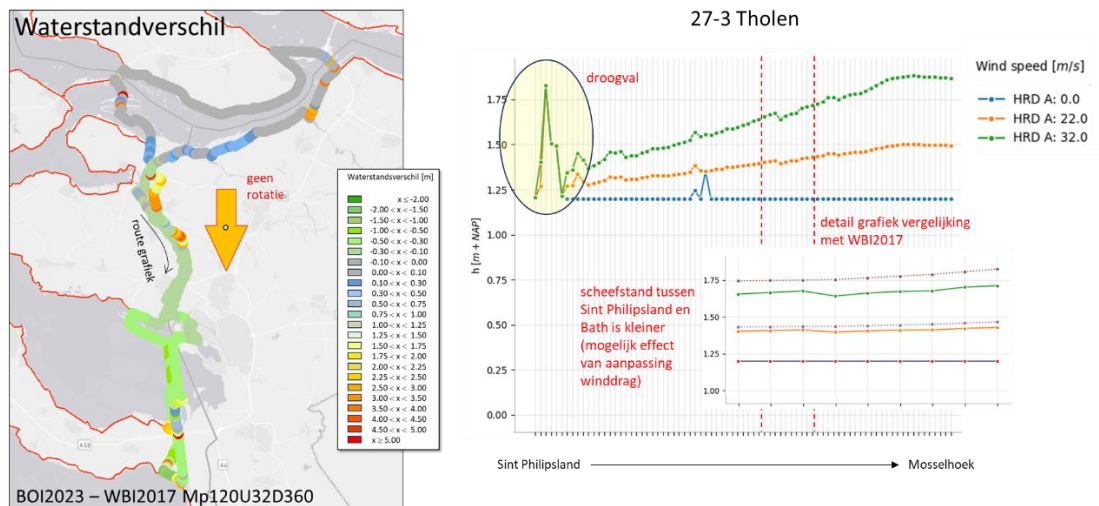
Het volgende traject betreft 27-4 (tussen de slikken van de Heen en Sint Philipsland) aan de westzijde van het meer (Figuur 58).



Figuur 58 Waterstandverschillen langs Volkerak-Zoommeer (traject 27-4 Sint Philipsland) voor meerpeil +1,2 m+NAP, windrichting noord: links windsnelheid 32 m/s en rechts drie windsnelheden. (links WBI2017 resultaten geïnterpoleerd op BOI2023 datarooster, rechts BOI2023=HRD A en WBI2017=HRD B, uitleg begin 6.4.1).

Voor dit normtraject zijn géén locaties beschikbaar uit WBI2017. Aan de linkerkzijde wordt het verschil gepresenteerd tussen de resultaten op uitvoerlocaties van BOI2023 en een interpolatie van locaties langs de Philipsdam en locaties langs Tholen. Het gepresenteerde resultaat in de rechterfiguur betreft alléén het BOI2023 resultaat. Het is van belang om het verschil in verticale schaal van Figuur 57 en Figuur 58 op te merken. De variatie in waterstand (bij 0, 22 en 32 m/s wind) aan het begin van het tracé in Figuur 58 is vergelijkbaar met de variatie aan het eind van het tracé in Figuur 57. Op het begin na, is de waterstand langs het tracé min of meer gelijk aan het initiële meerpeil. In het begin van het tracé verwachten we dat sprake is van het oplopen van een relatief dun laagje water over de bodem van orde 0,2 – 0,3 m over de Slikken van de Heen, zie ook paragraaf 6.3.1 voor de achtergrond.

De resultaten voor traject 27-3 (tussen Sint Philipsland en Mosselhoek) staan in Figuur 59.



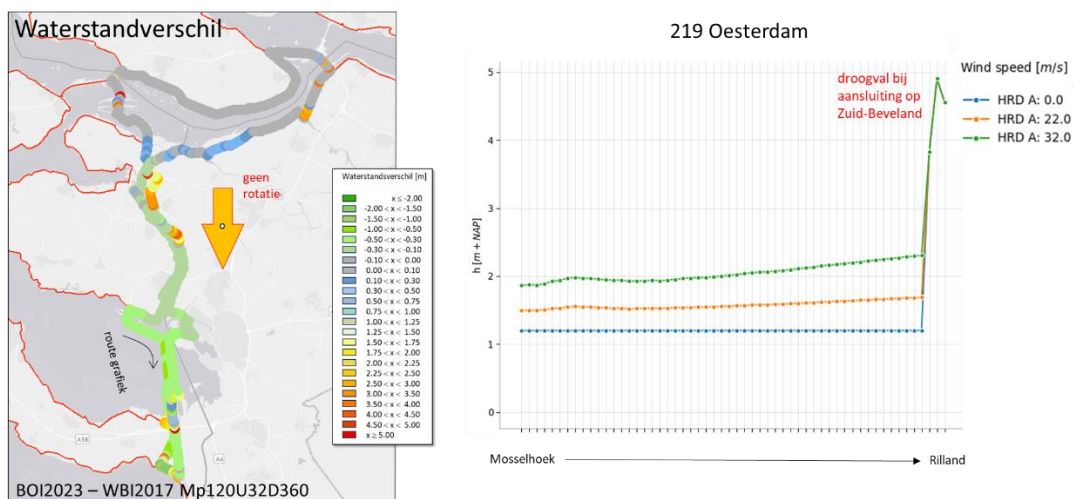
Figuur 59 Waterstandsverschillen langs Volkerak-Zoommeer (traject 27-3 tussen Sint Philipsland en Mosselhoek) voor meerpeil +1,2 m+NAP, windrichting noord: links windsnelheid 32 m/s en rechts drie windsnelheden. (links WBI2017 resultaten geïnterpoleerd op BOI2023 datarooster, rechts BOI2023=HRD A en WBI2017=HRD B, uitleg begin 6.4.1).

Hier zien we in de linkerfiguur voor het eerst duidelijke verschillen tussen BOI2023 en WBI2017, die zowel positief als negatief uit kunnen pakken. Het effect verschilt per windsnelheid. Een aantal zaken vallen op:

- De resultaten in de linkerdeelfiguur zijn beperkt betrouwbaar vanwege het beperkte aantal WBI2017 locaties dat beschikbaar is (interpolatie tussen de resultaten op de groene punten uit Figuur 54).
- Voor slechts een klein gedeelte van het traject zijn resultaten uit WBI2017 beschikbaar. In de rechterfiguur is in een detailafbeelding een vergelijking gemaakt tussen deze WBI-resultaten en de BOI-resultaten. Te zien is dat bij 0 m/s (blauwe lijn) het resultaat van beide simulaties gelijk is aan elkaar en aan het initiële meerpeil. Bij 22/20 m/s (oranje lijn) is een verschil van 0,01 – 0,02 m aanwezig tussen beide simulaties. Bij 32/30 m/s is het verschil orde 0,1 – 0,2 m. Dit grotere verschil wordt mogelijk veroorzaakt door de aanpassing van de winddragafkapping in de nieuwe productieberekeningen van BOI2023, waardoor de waterstanden wat lager uitvallen. In BOI2023 is de winddrag verwerkt in de productieberekeningen. Er kan nog een andere oorzaak zijn voor dit verschil, maar dat is vanwege beschikbare tijd en middelen niet verder uitgezocht.

- Over ongeveer driekwart van het traject neemt de opzet van de waterstand veroorzaakt door de windsterkte (relatief) snel toe. Langs het zuidelijk gelegen (laatste) kwart van het traject is deze toename wat minder groot. Mogelijk dat de oriëntatie van het normtraject van dit laatste kwart ervoor zorgt dat de toename minder groot is.
- Aan het begin van het traject treedt droogval op. Ook bij een windsnelheid van 0 m/s wordt een waarde van het simulatieresultaat uitgelezen die meer dan 0,5 m boven het initiële meerpeil ligt.

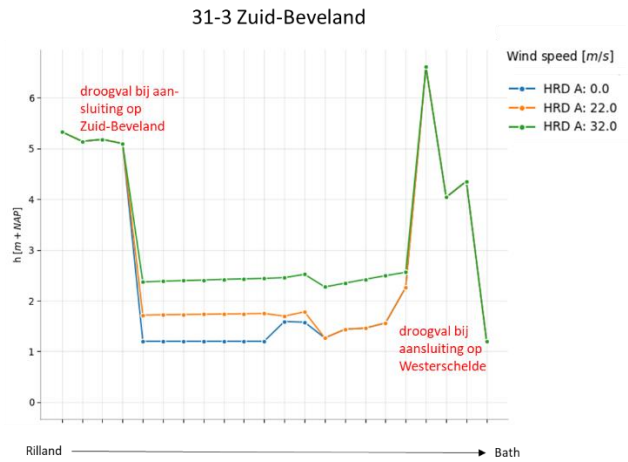
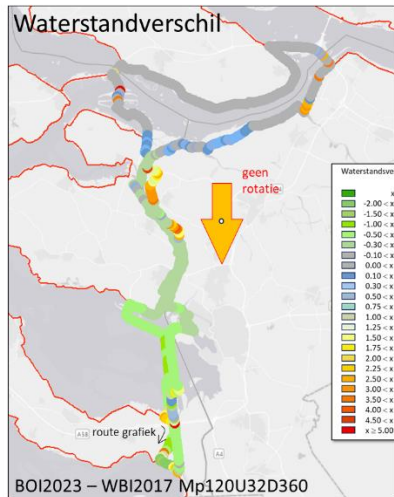
Het traject tussen Mosselhoek en Rilland is gevisualiseerd in Figuur 60.



Figuur 60 Waterstandsverschillen langs Volkerak-Zoommeer (traject 219 Oesterdam) voor windrichting noord, meerpeil +1,2 m+NAP: links windsnelheid 32 m/s en rechts drie windsnelheden. (links WBI2017 resultaten geïnterpoleerd op BOI2023 datarooster, rechts BOI2023=HRD A en WBI2017=HRD B, uitleg begin 6.4.1).

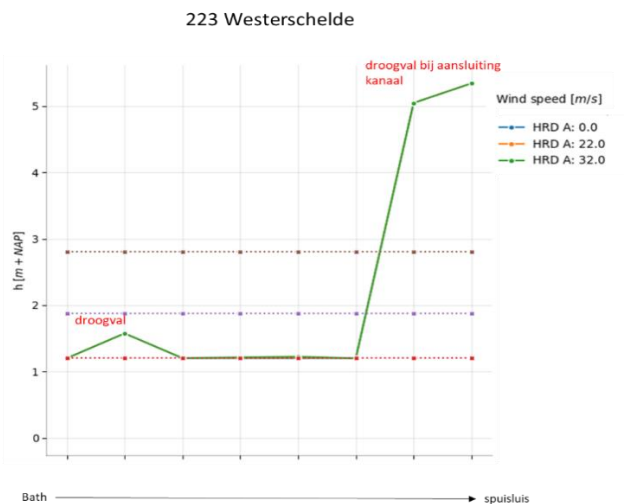
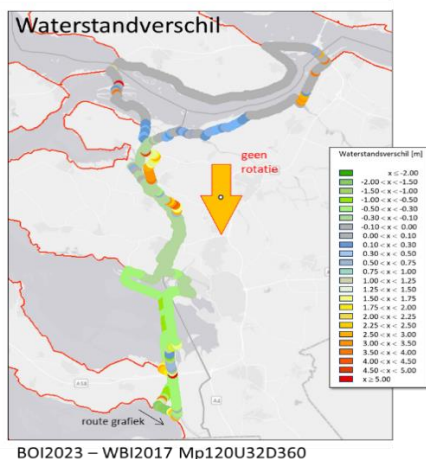
Aan de rechterzijde van de figuur is te zien dat de waterstand langs de Oesterdam door de windsterkte gestaag blijft toenemen van noord naar zuid. Aan het eind van het tracé bij de aansluiting van de dam bij Zuid-Beveland ontstaat droogval, waarvoor nog niet is gecorrigeerd. In de WBI2017 databases zitten geen resultaten voor locaties langs de Oesterdam, waardoor de vergelijking in de linkerfiguur berust op interpolaties tussen locaties bij Tholen en locaties bij de Bathse spuisluis. De scheefstand over het Zoommeer is in de resultaten van Tholen naar Bath duidelijk groter. De oorzaak hiervan is niet verder uitgezocht. Om dit goed uit te zoeken ontbreken teveel WBI2017 resultaten.

De resultaten voor het traject tussen Rilland en Bath zijn te vinden in Figuur 61 (beide plaatsen liggen niet aan het traject, maar zijn namen van relatief bekende plaatsen die de oriëntatie van het traject voldoende duiden). Aan het begin en het eind van het traject treedt droogval op (bodemhoogten zijn uitgevoerd i.p.v. waterstanden). Daartussen is hetzelfde resultaat te zien als in de rechterzijde van de voorgaande Figuur 59 en Figuur 60. De waterstand neemt richting het zuiden wat toe, doordat water in het Zoommeer wordt geblazen. Het beeld aan de linkerzijde van de figuur is ook vergelijkbaar met voorgaande figuren. Ook hier merken we op dat de WBI-resultaten ontbreken langs dit tracé (er is geïnterpoleerd).



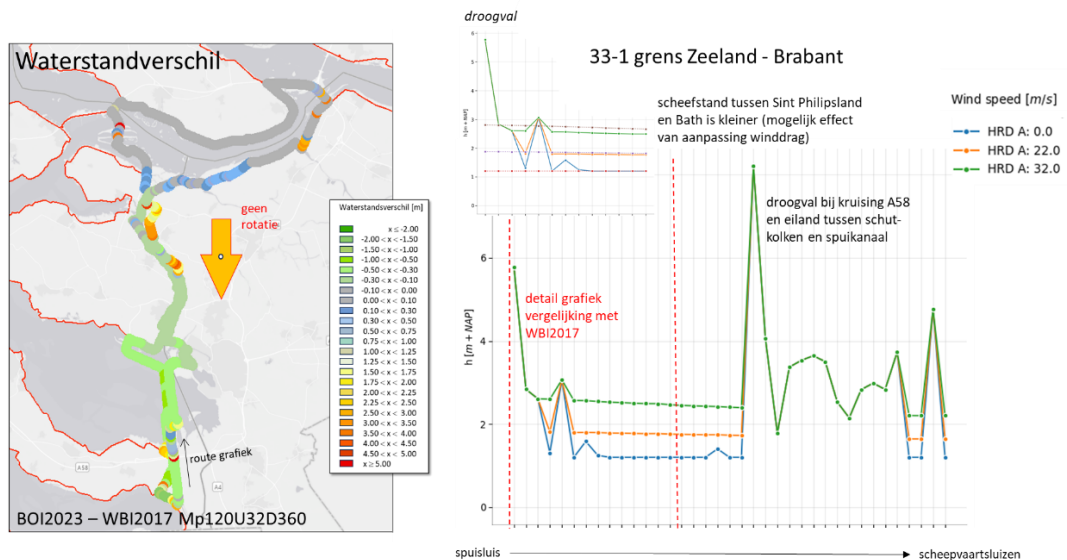
Figuur 61 Waterstandsverschillen langs Volkerak-Zoommeer (traject 31-2 van Rilland naar Bath) voor meerpeil +1,2 m+NAP, windrichting noord: links windsnelheid 32 m/s en rechts drie windsnelheden. (links WBI2017 resultaten geïnterpoleerd op BOI2023 datarooster, rechts BOI2023=HRD A en WBI2017=HRD B, uitleg begin 6.4.1).

In Figuur 62 staan de resultaten van het tracé tussen het dorp Bath en de spuisluis. De rechtstreeks door D-Hydro geproduceerde resultaten uit het BOI2023 zijn nog niet gecorrigeerd. In Figuur 61 en Figuur 63 (hierna) worden BOI-resultaten getoond die deels veel hoger liggen dan de WBI2017-resultaten bij windsnelheid 22 en 32 m/s.



Figuur 62 Waterstandsverschillen langs Volkerak-Zoommeer (traject 223 Westerschelde) voor windrichting noord, meerpeil +1,2 m+NAP: links windsnelheid 32 m/s en rechts drie windsnelheden. (links resultaten WBI geïnterpoleerd op BOI2023 datarooster, rechts BOI2023=HRD A en WBI2017=HRD B, uitleg begin 6.4.1).

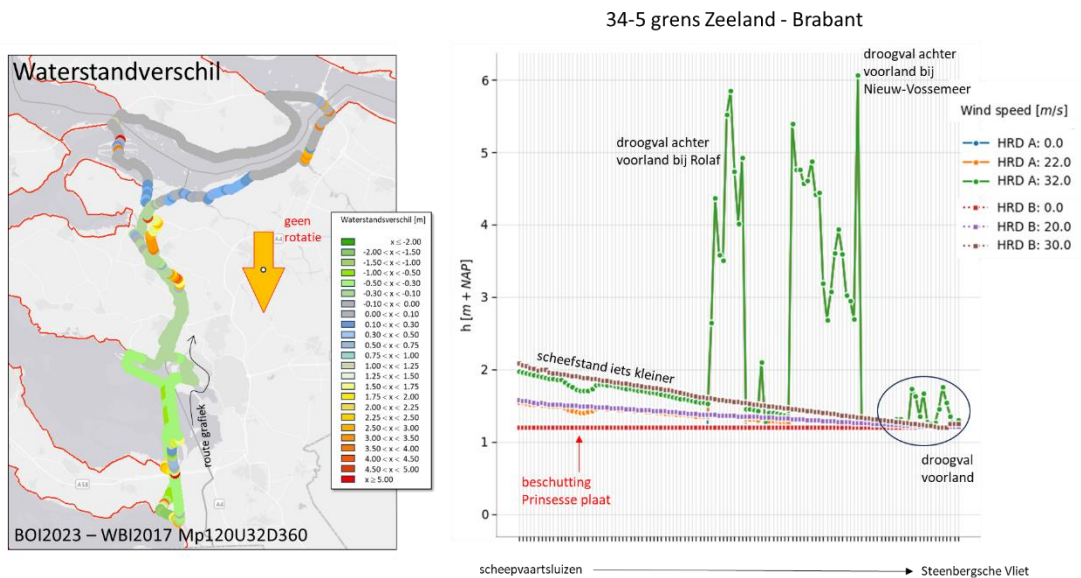
Een snelle analyse duidt erop dat een voorliggende kade hier voorkomt dat water tegen de primaire kering komt te staan. Dat zal met het uitvoeren van de droogvalprocedure binnen BOI2023 gecorrigeerd moeten worden.



Figuur 63 Waterstandverschillen langs Volkerak-Zoommeer (traject 31-3 grens Zeeland - Brabant) voor meerpeil +1,2 m+NAP, windrichting noord: links windsnelheid 32 m/s en rechts drie windsnelheden. (links WBI2017 resultaten geïnterpoleerd op BOI2023 datarooster, rechts BOI2023=HRD A en WBI2017=HRD B, uitleg begin 6.4.1).

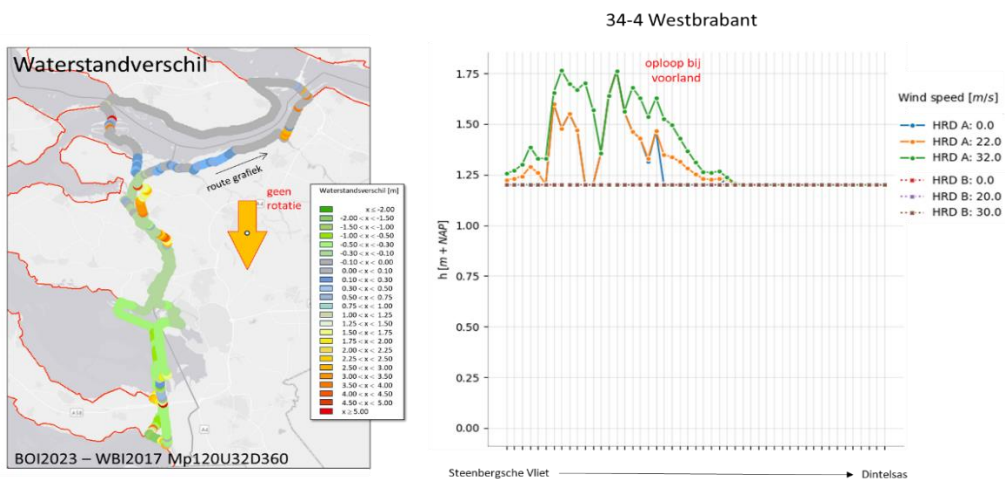
De resultaten van de rondwandeling in Figuur 63 bevindt zich tussen de spuisluis en de scheepvaartsluizen langs de grens tussen Zeeland en Brabant. Dit traject ligt langs de kade tussen het spuikanaal en het scheepvaartkanaal (Schelde-Rijnverbinding) richting Antwerpen. Aan het begin van het tracé (in het zuiden nabij de Westerschelde) en vanaf de kruising met de A58 naar het noorden komt veel droogval voor in de resultaten, wat weer duidt op een niet optimale ligging van de uitvoerlocaties voor toepassing binnen BOI. Bij het vullen van de uiteindelijke databases fysica voor BOI2023 zal hiervoor gecorrigeerd moeten worden. Het deel van het traject daartussen laat zien dat de waterstand bij een windsterkte van 32 m/s tot ruim 2,5 m wordt opgestuwd (bijna 1,5 m boven het initiële meerpeil). Langs dit tracé zijn maar zeer beperkt WBI-resultaten beschikbaar. In de inzet in de rechterfiguur is te zien dat bij 0 m/s de WBI-resultaten gelijk zijn aan de BOI-resultaten, bij 22/20 m/s zijn de resultaten nagenoeg gelijk (enkele centimeters verschil) en bij 32/30 m/s zijn de verschillen door toepassing van winddragafkapping binnen BOI2023 groter (orde 0,10 – 0,2 m). Immers de afkapping is in BOI2023 verwerkt in de productieberekeningen en in WBI2017 in de statistiek van de wind.

Het traject tussen de scheepvaartsluizen en de Steenbergsche Vliet langs de grens tussen Zeeland en Brabant is te zien in Figuur 64. Aan de rechterzijde van de figuur wordt het beeld verstoord door de droogval die nog niet uit de BOI-resultaten is gefilterd. Als we dat buiten beschouwing laten, is te zien dat de windopzet van de waterstand naar het zuiden in de WBI-resultaten goed overeenkomt met de opzet in de BOI-resultaten. In de WBI resultaten is de opzet wat groter, bij 22/20 m/s 0,05 t/m 0,1 m en bij 32/30 m/s 0,1 – 0,3 m. Op ongeveer een kwart van het traject ter hoogte van de Prinsesseplaat bij Bergen op Zoom is in de BOI-resultaten het effect van de detaillering van het modelrooster te zien.

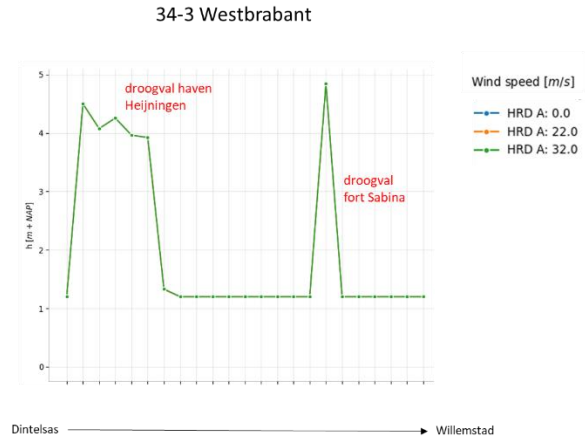
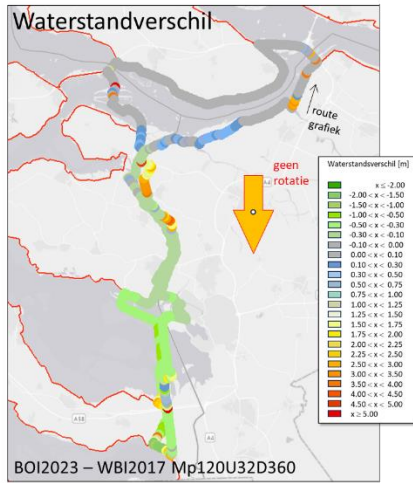


Figuur 64 Waterstandverschillen langs Volkerak-Zoommeer (traject 34-5 grens Zeeland - Brabant) voor meerpeil +1,2 m+NAP, windrichting noord: links windsnelheid 32 m/s en rechts drie windsnelheden. (links WBI2017 resultaten geïnterpoleerd op BOI2023 datarooster, rechts BOI2023=HRD A en WBI2017=HRD B, uitleg begin 6.4.1).

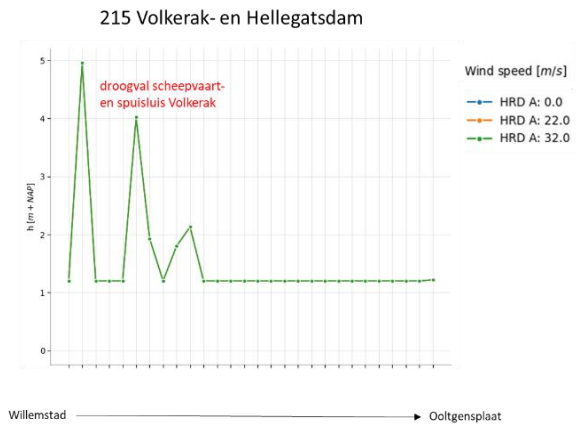
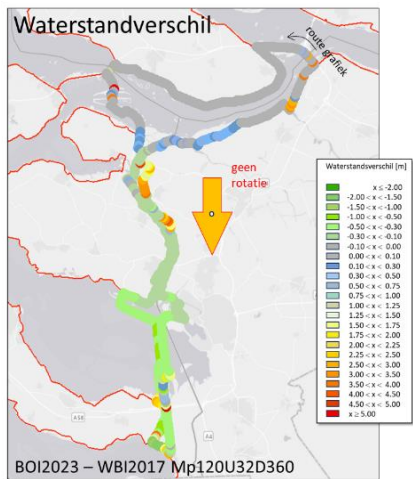
Het resterende deel van de rondwandeling via de monding van de Steenbergsche Vliet, via Dintelsas naar Willemstad en langs de zuidkant van de Volkerak- en Hellegatsdam behandelen we gezamenlijk. In Figuur 65 t/m Figuur 67 worden aan de rechterzijde alleen BOI-resultaten getoond. WBI-resultaten ontbreken hier. De vergelijkingen aan de linkerzijde zijn gemaakt op basis van interpolatie. De waterstand in dit gedeelte van het meer wordt verlaagd (afwaaiing) t.o.v. het initiële meerpeil bij wind uit noordelijke richting. Verschillen met het initiële meerpeil worden veroorzaakt door droogval. Verwacht mag worden dat in het definitieve resultaat van de BOI2023, dat deze droogval is gecorrigeerd.



Figuur 65 Waterstandverschillen langs Volkerak-Zoommeer (traject 34-4 West-Brabant) voor meerpeil +1,2 m+NAP, windrichting noord: links windsnelheid 32 m/s en rechts drie windsnelheden. (links WBI2017 resultaten geïnterpoleerd op BOI2023 rooster, rechts BOI2023=HRD A en WBI2017=HRD B, uitleg begin 6.4.1).



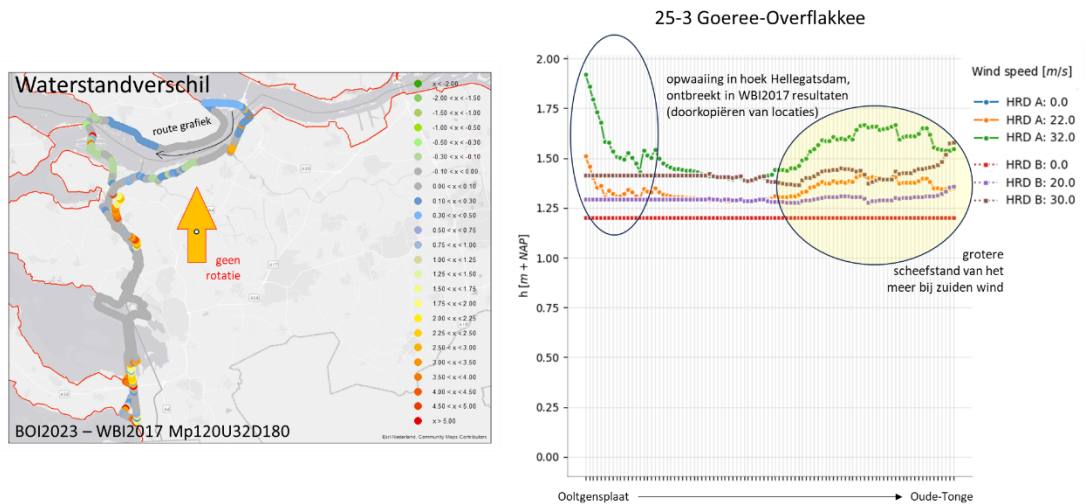
Figuur 66 Waterstandsverschillen Volkerak-Zoommeer (traject 34-3 West-Brabant) voor meerpeil +1,2 m +NAP, windrichting noord: links windsnelheid 32 m/s en rechts drie windsnelheden. (links WBI2017 resultaten geïnterpoleerd op BOI2023 rooster, rechts BOI2023=HRD A en WBI2017=HRD B, uitleg begin 6.4.1).



Figuur 67 Waterstandsverschillen Volkerak-Zoommeer (traject 215 Volkerak- en Hellegatsdam) voor meerpeil +1,2 m +NAP, windrichting noord: links snelheid 32 m/s en rechts drie snelheden. (links WBI2017 resultaten geïnterpoleerd op BOI2023 datarooster, rechts BOI2023=HRD A en WBI2017=HRD B, uitleg begin 6.4.1).

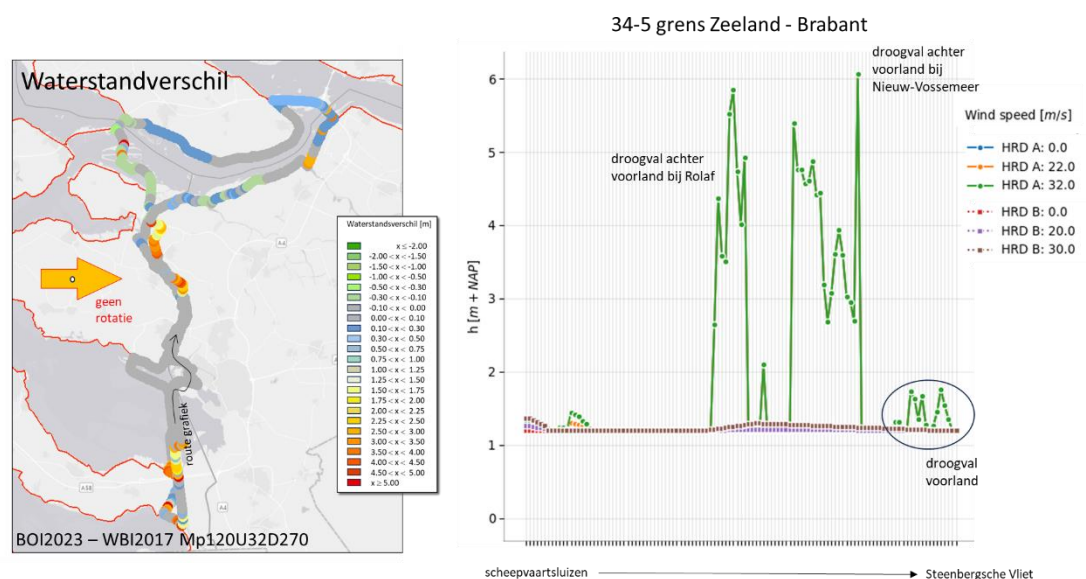
6.4.2 Verschil bij wind uit andere richting

In onze analyse van het Volkerak-Zoommeer hebben we om een goed beeld te krijgen van de verschillen tussen BOI2023 en WBI2017 de "rondwandeling" ook uitgevoerd bij wind uit het noorden (360°), het oosten (90°) en het zuiden (180°). Daaruit volgt hetzelfde beeld van de verschillen. In Figuur 68 staat het verschil langs het traject van Ooltgensplaat naar Oude-Tong (25-3 Goeree-Overflakkee) bij zuiden wind. Te zien is dat daar waar een voorland aanwezig is, dat er een verschil ontstaat in de resultaten van WBI2017 en BOI2017. We merken op dat de BOI2023 resultaten nog niet gecorrigeerd zijn voor droogval. In de hoek waar de Hellegatsdam aansluit op waterkering langs Goeree-Overflakkee ontstaat een aanzienlijk verschil. Dit wordt veroorzaakt door het ontbreken van WBI2017 resultaten in deze hoek, waardoor over een te grote afstand de WBI2017 resultaten moet worden aangevuld. In de figuur worden de BOI2023 resultaten nu vergeleken met doorgekopieerde resultaten van WBI2017 (interpolatie).



Figuur 68 Waterstandsverschillen langs Volkerak-Zoommeer (traject 25-3) voor meerpeil +1,2 m+NAP, windrichting zuid: links windsnelheid 32 m/s en rechts drie windsnelheden. (links WBI2017 resultaten geïnterpoleerd op BOI2023 datarooster, rechts BOI2023=HRD A en WBI2017=HRD B, uitleg begin 6.4.1).

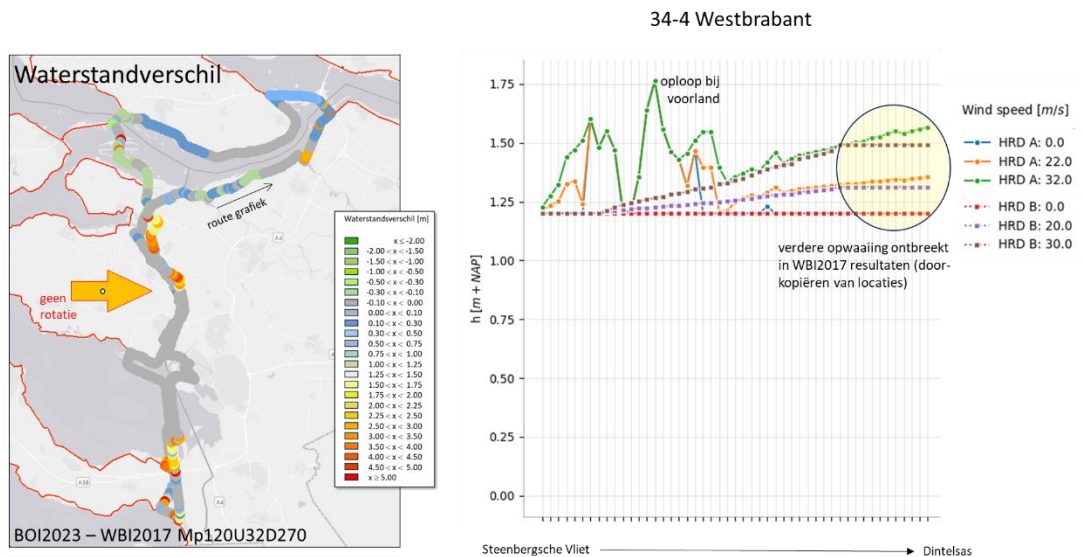
Verderop langs het traject nabij Oude Tonge (aan zuidkant van het eiland) zijn wel resultaten van WBI2017 aanwezig in de database en is ook een duidelijk verschil te zien met BOI2023 resultaten (orde 0,25 m bij 32 m/s). We nemen aan dat door de aanpassing van het rooster in meer detail het over-/onderlopen van het voorland te zien is in de resultaten van BOI2023. Het kantelpunt van op- en afwaaiing ligt vrij noordelijk doordat de Krammer een relatief groot wateroppervlak heeft t.o.v. de rest van de Schelde-Rijn-verbinding. Dit gegeven in combinatie met het gegeven dat veel WBI-uitvoerpunten op een grotere (maar ook wisselende) afstand van de oever liggen (zie Figuur 54) dan BOI-locaties, lijkt dit een valide verklaring voor de verschillen tussen WBI2017 en BOI2023.



Figuur 69 Waterstandsverschillen langs Volkerak-Zoommeer (traject 34-5 grens Zeeland - Brabant) voor meerpeil +1,2 m+NAP, windrichting west: links windsnelheid 32 m/s en rechts drie windsnelheden. (links WBI2017 resultaten geïnterpoleerd op BOI2023 datarooster, rechts BOI2023=HRD A en WBI2017=HRD B, uitleg begin 6.4.1).

Het traject tussen de scheepvaartsluizen en de Steenbergsche Vliet langs de grens tussen Zeeland en Brabant is te zien in Figuur 69 op de volgende pagina.

Het aansluitende traject tussen de Steenbergsche Vliet (Beneden Sas) en Dintel Sas staat in Figuur 70. In beide figuren is te zien dat daar waar een voorland aanwezig is, dat ook een duidelijk verschil aanwezig is. We veronderstellen dat de verschillen in Figuur 69 voor een deel zullen verdwijnen als gecorrigeerd wordt voor droogval (waterstand bij 22 m/s is gelijk aan de waterstand bij 32 m/s). Het voorland ten noorden van de Steenbergsche Vliet (Figuur 70) wordt onder water gezet door de windbelasting. Daar zien we het effect van de toegenomen detaillering van het modelrooster. Als het voorland afwezig is, verdwijnt ook het verschil tussen WBI2017 en BOI2023. De scheefstand van het Volkerak is vergelijkbaar in WBI2017 en BOI2023 resultaten. Nabij Dintelsas (aan het eind van het traject in Figuur 70) ontstaat een verschil doordat in de database WBI2017 resultaten ontbreken (resultaten van andere locaties worden gekopieerd/geïnterpoleerd).



Figuur 70 Waterstandsverschillen langs Volkerak-Zoommeer (traject 34-4 West-Brabant) voor meerpeil +1,2 m+NAP, windrichting west: links windsnelheid 32 m/s en rechts drie windsnelheden. (links WBI2017 resultaten geïnterpoleerd op BOI2023 datarooster, rechts BOI2023=HRD A en WBI2017=HRD B, uitleg begin 6.4.1).

6.4.3 Conclusies en aanbevelingen

De verschillen tussen BOI2023 en WBI2017 langs het VZM zijn plausibel. Eén van de grootste mankementen die een goede vergelijking belemmeren is het beperkte aantal beschikbare uitvoerlocaties voor het VZM uit WBI2017. Daarnaast zien we uit de ruwe (concept) D-HYDRO resultaten van BOI2023 dat sprake is van veel droogval (ongefilterd). Hoewel fysisch correct, bemoeilijkt dit een goede vergelijking met WBI2017 (waarvan wel gefilterde resultaten zijn gebruikt). Hiervoor zal in de definitieve databases fysica voor BOI2023 dan ook gecorrigeerd moeten worden (met droogvalprocedure, controle en visuele inspecties).

Bovenstaande twee punten maken het tevens lastig om uitspraken te doen over de precieze bijdrage van een verbeterde detaillering in het modelrooster. Als globaal gekeken wordt naar de BOI-resultaten langs het Markermeer, de Veluwerandmeren en de Grevelingen in vergelijking met de BOI-resultaten van het VZM, is duidelijk dat het ontbreken van de droogvalprocedure de resultaten voor het VZM verstoort. Overigens zien we geen aanleiding om te twifelen aan de uitkomsten van het zesde generatie model, aangezien dit voor het VZM gebaseerd is op precies dezelfde fysische principes en modellering als de overige drie Meren. Het is wel duidelijk dat zorg besteed moet worden aan de keuze van de uitvoerlocaties en dat de droogvalprocedure noodzakelijk is, voordat de verbeterde detaillering van het modelrooster een meerwaarde heeft voor toepassing in BOI2023.

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Conclusies

In het voorliggende rapport is voor vier verschillende Meren een verschilanalyse uitgevoerd tussen de nieuwe, zesde generatie modellen en eerdere generaties. Deze verschilanalyse voor deze Meren kijkt af van de vergelijkbare analyses voor andere watersystemen. Dit rapport beschrijft de verschilanalyse van dieptegemiddelde (2DH) modellen voor het Markermeer, Veluwerandmeren, Grevelingen en Volkerak-Zoommeer en gaat in op toepassing daarvan voor het BOI. Alleen verschillen in de berekende waterstand zijn onderzocht.

De rapportage kijkt af ten opzichte van de watersystemen Maas, Rijntakken en Rijn-Maasmonding (RMM) omdat voor het Markermeer en de Veluwerandmeren eigenlijk geen sprake is van een overstap van vijfde naar zesde generatie modellen, maar van een 'pre-baseline' generatie uit 1997-2002 naar de zesde generatie. Dit maakt dat een zuivere vergelijking niet mogelijk is, simpelweg omdat de modellen niet langer beschikbaar of operationeel zijn. Gekozen is om de verschillen te bespreken op basis van de beschikbare validatie rapportages (waargenomen bereik) en de beschikbare databases fysica (extreme bereik). Voor de Grevelingen en het Volkerak-Zoommeer wordt wel een overstap gemaakt van vijfde naar zesde generatie, maar is dezelfde keuze gemaakt.

Deze verschilanalyse is een dossieronderzoek. We hebben niet zelf gerekend, maar alleen documenten bestudeerd en een vergelijking gemaakt tussen toegeleverde databases fysica van WBI2017 en BOI2023. Dit maakt dat oorzaken voor de verschillen niet "uit elkaar te trekken" zijn en slechts kwalitatief besproken zijn. Op basis daarvan trekken we de volgende conclusies, ingedeeld naar de hieronder benoemde categorieën:

Effecten op software

Voor de zesde generatie modellen wordt de overstap gemaakt van de WAQUA naar de D-HYDRO software. Het gebruik van de D-HYDRO Suite biedt namelijk op diverse vlakken nieuwe kansen en verbeteringen, die eerder niet aanwezig waren. Het gaat hier o.a. om verbeterde modelleerflexibiliteit, gebruik van een flexibel rekenrooster, roosteronafhankelijke invoer, andere parameters en modelconcepten en betere afstemming tussen waterbeweging, golven, morfologie en waterkwaliteit. Omdat er geen nieuwe berekeningen met de 'pre-baseline', vijfde en de zesde generatie modellen zijn gemaakt, kan er voor de Meren geen zuivere vergelijking worden gemaakt van de verschillen in software. Dit onderdeel laten we daarom verder buiten beschouwing.

Rekenrooster

In de zesde generatie modellen zien we meer detaillering in de resultaten door de verbeteringen aan het modelrooster. Door de grotere detaillering in het rekenrooster komen droogvallende punten beter in beeld (zie ook paragraaf 7.2 met aanbevelingen). De zesde generatie modelroosters biedt de mogelijkheid om gedetailleerder te rekenen. Door toename van het detail is het mogelijk om te rekenen tot aan de teen van de dijk (op het voorland), bij het waterfront en in de havenbekkens. Dat andere resultaten op deze locaties worden berekend is plausibel in het waargenomen en extreme bereik. De detaillering geeft een verbetering van de berekende waterstand, alhoewel we de berekening bij de teen van de dijk, bij het waterfront en in de havenbekkens niet kunnen valideren met gemeten waterstanden op dergelijke specifieke locaties.

Schematisatie

Voor elk van de onderzochte meren is de (basis)schematisatie aangepast naar de meest recente stand van de kennis (2019). Er zijn duidelijke verbeteringen doorgevoerd in de zesde generatie modellen. In uithoeken van de Meren, bij de overgang van water naar land bij voorlanden (slikken en schorren), in havens en nabij waterfronten van stedelijk gebied leveren de verbeteringen van het detailniveau in de modellering meerwaarde. Enkele voorbeelden hiervan zijn de actualisatie van IJburg (het aantal gemodelleerde eilanden komt nu overeen met het aantal aangelegde), de verlegging van de grens tussen Vossemeer en Drontermeer met de aanleg van de Reevedam (waardoor de randmeren een kortere strijklengte hebben t.o.v. de maatgevende windrichting) en/of de doorvaarbare haven bij Harderwijk. Daarnaast is een grote slag gemaakt in het aantal en de ligging van de oeverlocaties: deze liggen nu grotendeels langs de teen op 60 m van de waterkering en zijn grofweg elke 100 meter beschikbaar. Dit wordt ook mogelijk, omdat de modelgrens beter aansluit bij de ligging van de primaire kering. De gegevens van de zesde generatie schematisatie zijn actueler en bieden de mogelijkheid om gedetailleerder te rekenen. Net als voor het rekenrooster geldt dat het logisch is dat de resultaten op deze locaties (op het voorland, bij het waterfront en in havenbekkens) anders zijn (verbeterd), maar dat het verschil niet goed is te valideren.

Parameters (en modelconcepten)

Enkele van de grotere veranderingen die wél van toepassing zijn voor de Rijntakken en de Maas zijn nauwelijks van belang voor de Meren. Zo speelt de overstap van de overlaat-formulering van Tabellenboek naar Villemonte naar verwachting eigenlijk geen rol, omdat in de Meren nauwelijks overlaten aanwezig zijn of (waar wel aanwezig) niet overlopen met een aanzienlijk debiet (wat met name leidt tot verschillen in de modellen van de rivieren). Een belangrijke oorzaak voor verschillen tussen de zesde generatie modellen voor de Meren en eerdere generaties wordt veroorzaakt door de winddragafkapping. In de zesde generatie wordt hier wel rekening mee gehouden, in eerdere generaties was dit niet het geval. Bij hoge windsnelheden (>30 m/s) beïnvloedt dit in significante mate de waterstanden (scheefstand).

Modelrandvoorwaarden

Wat een andere belangrijke oorzaak voor de verschillen is gebleken, zijn sommige keuzes voor de modelrandvoorwaarden. Als niet optimaal wordt geprofiteerd van de toegenomen detaillering in de zesde generatie modellen, dan is de beschikbare kennis over de wind-forcering de belangrijkste oorzaak. In de nieuwste berekeningen voor BOI2023 is gewerkt met een groter aantal stochastcombinaties dan eerder om zoveel mogelijk inter- en extrapolatie tussen de resultaten in de probabilistische berekening (met bijv. Riskeer of Hydra-NL) te voorkomen. Zo is de discretisatie van de meerpeilen aangepast van 3 meerpeilen in eerdere generaties naar 10 meerpeilen voor het BOI. Een andere keuze die oorzaak is van verschillen, is de mate van windrotatie die wordt gehanteerd voor een bepaalde windrichting en de toekenning van een bepaalde windrichting aan de oostelijke- of westelijke windrichtingssectoren. Resterende keuzes, zoals een wijziging van de luchtdruk, het verloop in tijd van de wind, de grootte van de gehanteerde windsectoren (22,5° i.p.v. 30°), of het (wel/niet) gebruik van ruimtelijk variabele windvelden veroorzaken kleinere verschillen tussen de zesde en eerdere generaties.

Kalibratie en validatie

De zesde generatie is even betrouwbaar als de voorgaande generaties. Bestudering van de reproductie van de waterstanden – de validatie – geeft een vergelijkbaar beeld als in het verleden. Een gerichte validatie van de resultaten van het model is echter niet mogelijk voor een aantal specifieke gedeeltes in het model zoals havens, de voorlanden in de Grevelingen en het Volkerak-Zoommeer, of locaties in de Gouwzee in het Markermeer.

In de beschikbare rapportages van de uitgevoerde validatie is gesteld dat betrouwbare informatie over de wind ontbreekt. Dit is ook de belangrijkste reden waarom er niet is gekalibreerd. De meetgegevens geven onvoldoende informatie om van de default (theoretische) waarden af te wijken. Het gebruik van verschillende wind-stations geeft logischerwijs andere validatieresultaten. Omdat in de uithoeken van de Meren (ook) metingen van de waterstand ontbreken, is alleen een expertbeoordeling van de modellen op deze locaties mogelijk. Die is uitgevoerd en de resultaten van de zesde generatie zijn plausibel beoordeeld.

Eindconclusie

Het is onze inschatting dat de in deze rapportage geanalyseerde verschillen vooral het gevolg zijn van de gehanteerde verschillen in uitgangspunten en modelleringskeuzen. Modelleren van de waterbeweging (en golven) in havens (en op voorlanden) is complex en vraagt vaak specialistische modellen die de vertaling van buiten naar binnen in een haven uitvoeren. Net als bij voorgaande generaties geven ook de uitgevoerde controles (validatie/kalibratie) van de zesde generatie modellen nauwelijks informatie over de nauwkeurigheid in deze complexe delen van het modelgebied.

De verschillen die we zien tussen BOI2023 en WBI2017 langs de onderzochte Meren (Markermeer, Grevelingen, Veluwerandmeren en Volkerak-Zoommeer) achten we goed verklaarbaar, ondanks dat het niet meer mogelijk is de verschillen één voor één af te pellen. De zesde generatie modellen zijn daarmee even geschikt (of beter geschikt vanwege de verdiscontering van nieuwe, geaccepteerde kennis en actualisatie van de schematisaties) voor de toepassing bij de kerntaken van Rijkswaterstaat dan eerdere generaties waterbewegingsmodellen. De onderzochte schematisaties zijn niet beperkend in de toepassing bij deze kerntaken.

Controle van de reproductie van de waterstanden – de validatie - geeft vergelijkbare resultaten als in het verleden. In het verleden gaf de validatie van de vijfde en de eerdere generaties voldoende vertrouwen in het instrumentarium. Uit de gemaakte analyse van de gerapporteerde betrouwbaarheid van de modellen (validatie) blijkt dat de zesde generatie waterbewegingsmodellen voor de Meren een vergelijkbare betrouwbaarheid heeft als de voorgaande generaties.

Consequenties voor BOI

Op basis van bovenstaande conclusies zien we vanuit het perspectief van BOI geen reden om niet over te stappen naar het zesde generatie modelinstrumentarium. Wel zien we ruimte voor verbetering, hiervoor verwijzen we naar de volgende paragraaf met de aanbevelingen.

7.2 Aanbevelingen

Met de verbeteringen die in het zesde generatie instrumentarium zijn doorgevoerd, is het mogelijk om de waterbeweging in een grote mate van detail te simuleren. Wel is het belangrijk te onderkennen dat de berekende stormopzet (verhoging van de waterstand door de wind) met name bepaald wordt door de opgelegde windinvoer, omdat deze opzet (meer dan) kwadratisch afhangt van de windsnelheid. De eigenschappen (en de empirische en modelmatige onderbouwing) van de gebruikte windinvoer hebben daardoor een significante invloed op de kalibratiemogelijkheden, de kwaliteit van een kalibratie, de validatie en de berekeningen bij een toepassing van het model voor de Meren. Dit is een wezenlijk verschil met de toepassing van de modellen voor de watersystemen Maas, Rijnakken en RMM (waar wind geen of een kleinere rol speelt).

Onze eerste aanbeveling is dan ook om de (fysische) modellering van de windvelden op de Meren nader te onderzoeken: bekijk of de kwaliteit van de windforcering kan worden vergroot. Vooral als het gaat om de vertaling van KNMI-referentiegegevens naar de Meren. Daarnaast ook als het gaat om *spatiotemporele* modellering van de wind, zowel in het waargenomen bereik als in het extreme bereik. Daarmee wordt het mogelijk om de waterbeweging op de Meren beter te beoordelen.

De wijze waarop de hydraulische modellen voor de bestudering van de Meren worden toegepast, wijkt af van de toepassing bij de rivieren. Voor de rivieren is het gebruikelijk om een aanzienlijke inspanning te doen om de modellering te toetsen aan gemeten historische gebeurtenissen. Uit de beschikbare rapportage voor de Meren blijkt dat het gebruikelijk is om een kleinere inspanning voor de validatie te hanteren in de modelbouw van de Meren. Dat is het gevolg van de beschikbare mogelijkheden om te kalibreren en te valideren. Gegeven de uitdagingen voor bebouwd buitendijks gebied, of het thema Building-with-Nature (waarbij schorren, slikken en/of opgespoten land ook worden ingezet voor de waterveiligheid), zien we de verbetering van de mogelijkheden om het model te toetsen op de betrouwbaarheid in uithoeken van het modelgebied als een uitdaging voor de komende jaren.

Werk voor de langere termijn aan verbetering van de modelinvoer (net name wind) en naar verbetering van de validatiemogelijkheden. Een redelijk actueel en compleet overzicht van de meetbehoefte voor de modelvalidatie wordt gegeven in [Informatiebehoefte WBI-BOI veldmetingen](#) (Bottema, 2019). Aanvullend wordt aanbevolen om nader onderzoek te doen naar de volgende onderdelen:

Verbetering windinformatie: Waterstanden en stormopzet zijn zeer gevoelig voor de gebruikte wind: elke procent extra wind levert (ruim) twee procent extra stormopzet. De huidige vertaling van wind naar open water berust op achterhaalde en [foute aannames](#) (Sterl, 2019), Verbeteringen zijn:

1. Toepassen en testen van een nabewerking op HIRLAM- en HARMONIE-weermodellen om *downscaling* toe te passen op de berekende informatie. Dit ontwikkeltraject is geagendeerd binnen Kennis voor Keringen maar heeft nog geen budget.
2. Verbeteren van de validatiemogelijkheden van de windmodellen, waarvoor representatieve, betrouwbare en meerjarige windmetingen nodig zijn op elk van de Meren (is dus een aanvullende verbetering op de informatiebehoefte).
3. Verbeterde modellering tijdsafhankelijkheid en windstatistiek, wat op basis van de huidige lengte van de meetreeksen feitelijk onhaalbaar is. Lange berekende meetreeksen bieden veel perspectief voor [de Noordzeekust](#) (Van den Brink, 2023), maar vragen voor de Meren nog aanvullende *downscaling* van de windinformatie (zie punt 1).
4. Verbeteren van de ruimtelijke windmodellering, hiervan is de meerwaarde minder groot (als de voorgaande punten), namelijk als de bulk van het windveld voldoende nauwkeurig is, hoeft niet elke oeverzone exact te worden gemodelleerd.

Verbetering validatie/kalibratie: Voor de toepassing van het BOI bestaat de uitgevoerde kalibratie/validatie van de zesde generatie modelschematisaties uit een validatie van 1 of 2 stormen veelal met wind uit dezelfde richting, waardoor de schematisatie bij lang niet alle maatgevende belastingcombinaties wordt getoetst.

Hiervoor kan het volgende worden aanbevolen:

1. Het wordt aanbevolen om scherp de meetbehoefte ten behoeve van modelvalidatie te definiëren, en vervolgens de gewenste en/of vereiste metingen te realiseren (Bottema, 2019). Wanneer méér metingen beschikbaar zijn, kan ook de validatie-methodiek nader worden beschouwd. Bijvoorbeeld door op meer data dan 1 of 2 stormen te kalibreren en/of te valideren, of door aanvullende variabelen te meten en te valideren (zoals windgedrevenstroming).
2. Een kalibratie van bodemruwheid en windschuifspanning op basis van gemeten wind, waterstanden en stroomsnelheden voor het Delft3D slibmodel van het Markermeer is wel degelijk nuttig gebleken. Eén van de aanbevelingen uit Genseberger et al (2019) is daarom om na te gaan wat daaruit bruikbaar is en op basis daarvan een kalibratiestrategie uit te werken (en vervolgens toe te passen).
3. Met name voor de kleinere meren zijn slechts beperkt metingen beschikbaar (Bottema, 2019), waarmee de invoer en uitvoer van modellen kunnen kan worden gevalideerd. Vaak betreft het (slechts enkele) waterstandsmeetlocaties, terwijl windinformatie ontbreekt. Met name op ondiepe locaties en locaties die regelmatig droogvallen (natuurlijke of aangelegde voorlanden, buitendijks bebouwd gebied) zijn veelal helemaal geen (waterstands-) metingen beschikbaar.
4. In de rapportages van de modelbouw is aangegeven dat voor de kalibratie/validatie gezocht is naar perioden waarin alleen sprake is van een storm, zodat afwijkend peilbeheer niet verstorend kan werken. Het is zeker nuttig om dergelijke ‘geïsoleerde’ stormen te bekijken. De periode november-december van 2023 heeft laten zien dat gebeurtenissen waarin wind en een verhoogd meerpeil in samenhang optreden, maatgevend kunnen zijn. Naast validatie op geïsoleerde windforcering, biedt validatie op gebeurtenissen met een verhoogd peil tijdens een storm ook een meerwaarde.
5. Het is van belang om scherp toe te zien dat de modelkalibratie en/of -validatie en de (WBI-/BOI-)modeltoepassing alle onderling consistent zijn. Zodat de validatie-resultaten van een voorgaande generatie eenduidig kan worden vergeleken met de actuele validatie. In het verleden op de Veluwerandmeren een windreductie-factor afgeleid voor validatie- en productieberekeningen. Recent is achterhaald dat deze factor ontbreekt in WBI2017 (Bottema, 2021) maar ook in de toepassing van de zesde generatie voor BOI. Als modelvalidatie van opeenvolgende generaties onderling vergelijkbaar zijn, worden dergelijke omissie eerder opgemerkt en wordt de afhankelijkheid van individuen (experts) tot een minimum beperkt.

Tot slot doen we enkele aanbevelingen die meer op het gebruik van de modellen voor het BOI gericht zijn:

- Onderzoek of de mate van detaillering rondom havens, voorlanden en waterfronten in de hier geanalyseerde waterbewegingsmodellen binnen BOI2023 zinvol gebruikt kan worden. Een alternatief zou zijn om te werken met een model dat de verplaatsing van buiten naar binnen in een haven maakt, of te werken met een model dat in detail het verloop van de waterstand over het voorland kan simuleren. Binnen BOI2023 zou dit kunnen door bijvoorbeeld HB Havens of de Voorlandmodule toe te passen. Deze modellen zijn eenvoudiger toe te passen (zijn flexibeler), waardoor in een toets op maat (onderbouwde) uitzonderingen kunnen worden gemaakt.
- Zorg voor een verdere verbetering van de ligging van de BOI-uitvoerlocaties en dat deze ook tijdig beschikbaar zijn binnen de Baseline schematisatie van een model. Dit is een tijdrovende zaak, waarbij de benodigde hoeveelheid handwerk, expertise en watersysteemkennis gauw worden onderschat. Beschouw hierbij de afstand tot de teen/kruin van de kering, de kwaliteit van het windveld, de ligging van locaties t.o.v. het modelrooster en de mogelijkheden om te repareren (droogvalprocedure). Voor BOI gaat het er uiteindelijk om welke informatie in de databases terecht komt.

Ondanks de inspanning die geleverd is in de productie van de BOI-databases voor het Markermeer, de Veluwerandmeren en de Grevelingen, zijn er nog locaties (zie hoofdstuk 6), waarvan de waterstanden niet geschikt zijn om de belasting op de kering mee te berekenen.

- Besteed bij de selectie van BOI-uitvoerlocaties ook aandacht aan de bodemligging om potentiële droogval zoveel mogelijk te voorkomen. Locaties die (bijvoorbeeld) zelfs onder de meeste extreme belastingcondities niet nat worden, voegen weinig toe. Net zo goed, dat hooggelegen locaties onder alle omstandigheden onder water staan door de keuze van de initiële condities, niet zouden moeten voorkomen in de productieberekeningen. Hier zou aan de voorkant prima rekening mee kunnen worden gehouden.
- Verbeter de kwaliteit van de windforcering in het extreme bereik. Ook voor de toepassing binnen BOI2023 geldt dat de windvelden voor de Meren in het extreme bereik niet ruimtelijk gedifferentieerd zijn, omdat ook hierover op dit moment nog onvoldoende kennis beschikbaar is. Een betere detaillering in de windforcering in het extreme bereik zal de berekening van de hydraulische belastingen op de primaire keringen in de Meren verder verbeteren (dit vraagt met name een nieuwe kennis van het KNMI).

De modellering van de waterbeweging en de mogelijkheden van de zesde generatie zijn geen beperking meer om de kwaliteit aanzienlijk te verbeteren.

Referenties

- Van Agthoven et al. (1997), Achtergronden Hydraulische Belastingen Dijken IJsselmeergebied. Deel 3 : Statistiek windklimaat IJsselmeergebied (concept). A. Agthoven, E.J. Blaakman en H.C. Twuiver, Rijkswaterstaat rapportage. Lelystad. Maart 1997.
- Bak (2024), Notitie als antwoord op helpdeskvraag vraag 24 11 3916 (vergelijking rekenrooster OOM-studie en zesde generatie), C. Bak (Deltares) in opdracht van Rijkswaterstaat, Lelystad, 2024.
- Bom en Spaans (2024). Verschilanalyse overstap zesde-generatie modellering Rijn-Maasmonding, Effect software, rekenrooster, parameters & modelconcepten, schematisatie en modelrandvoorwaarden. S. Bom. en L. Spaans. Deltares rapport 12209233-004-ZWS-0010. Delft 2024.
- Bottema (2007), Measured wind-wave climatology Lake IJssel (NL), Main results for the period 1997-2006, M. Bottema, Report RWS RIZA 2007.02, Lelystad 2007.
- Bottema (2019), Informatiebehoefte WBI-BOI veldmetingen vanaf 2018, met focus op Wadden en IJsselmeergebied, versie 2.0. M. Bottema, Rijkswaterstaat-WVL, Lelystad, 2019.
- Bottema (2021), Analyse Hydraulische Belastingen Veluwe Randmeer, aandachtspunten voor het vervolg in BOI, M. Bottema, Rijkswaterstaat WVL, Lelystad, 2021.
- Van den Brink (2022), Het gebruik van de ECMWF seizoensverwachtingen voor het berekenen van de klimatologie van extreme waterstanden langs de Nederlandse kust. H. van den Brink, KNMI rapportage TR-385, De Bilt, 2020.
- Van den Brink (2023), Update van de statistiek van extreme zeewaterstand en wind op basis van meetgegevens en modelsimulaties. H. van den Brink, KNMI rapportage TR-406, De Bilt, 2023.
- Caires (2009), Extreme wind statistics for the Hydraulic Boundary Conditions for the Dutch primary water defences. SBW-Belastingen: Phase 2 of subproject "Wind Modelling". Sofia Caires, 2009. Deltares rapport 1200264-005.
- Caires et al. (2012), Assessing the uncertainties of using land-based wind observations for determining extreme open-water winds, S. Caires, H. de Waal, J. Groeneweg, G. Groen, N. Wever, C. Geerse en M. Bottema. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 110, November 2012, Pages 70-85.
- Chavarrías (2023). Role of fixed weirs in 6th generation models for BOI. V. Chavarrías. Deltares memorandum I1000641-010-OA-0001_v1.0.25. Delft. 30 November 2023.
- Delft Hydraulics & Witteveen+Bos (2005). Productieberekeningen Hydraulische Randvoorwaarden 2006. IJburg en de Eem. In opdracht van Rijkswaterstaat RIZA. December 2005.
- Genseberger (2016). Merenmodellen in D-HYDRO – Pilot-applicatie Markermeer. M. Genseberger. Deltares rapport 1230071-011-ZWS-0019. 2016.
- Genseberger et al. (2019). Ontwikkeling zesde-generatie Markermeer en Veluwrandmeren model. Modelbouw en validatie. M. Genseberger, C. Eijsberg – Bak, A. Fujisaki, C. Thiange. Deltares project 11200569-009-ZS-0013. December 2019.

- Genseberger (2021a), Uniformering modelinvoer D-HYDRO modelschematisatie Markermeer, M. Genseberger, Deltares memo 11206813-012-ZWS-0004, 2021.
- Genseberger (2021b). Uniformering modelinvoer D-HYDRO modelschematisatie Veluwerandmeren. M. Genseberger. In opdracht van RWS-WVL. Deltares memo 11206813-012-ZWS-0005. December 2021.
- De Goede (2011): Validatie van Villemonte overlaattformulering in WAQUA met praktijkmetingen, E. D. de Goede. Tech. Rep. 1204153-001-ZWS-0001, Deltares, Delft.
- Duits (2020). Extra locaties in databases Volkerak-Zoommeer, M. Duits, HKV-memo PR4214.10 in opdracht van Rijkswaterstaat – WVL, Lelystad, 2020
- Groenenboom et al. (2020). Ontwikkeling zesde-generatie modelschematisatie D-HYDRO Grevelingen, Modelbouw, kalibratie en validatie. J. Groenenboom, L. van der Heijden, A.A. Markus en S.C. Laan. Deltares project 11205259-006-ZKS-0007. December 2020.
- Kernkamp et al. (2005). A unified formulation for the threedimensional shallow water equations using orthogonal co-ordinates: theory and application. H.W.J. Kernkamp, H.A.H. Petit, H. Gerritsen, E.D. de Goede, Ocean Dynamics volume 55, pages 351–369, 2005.
- Kernkamp et al. (2011): Efficient scheme for the shallow water equations on unstructured grids with application to the Continental Shelf, H.W.J. Kernkamp, A. van Dam, G.S. Stelling, E.D. de Goede. Ocean Dyn., vol. 61, no. 8, pp. 1175–1188, Delft, 2011.
- Kieftenburg, A. en H. Chbab (2012), Achtergrondrapport WTI-2011 voor IJsselmeer, Concept hydraulische randvoorwaarden HR2011 voor het IJsselmeer, Ketelmeer en Vossemeer. Deltares rapport 1204143-003-ZWS-0024, Delft, juli 2012.
- Kok et al. (1999), Kwaliteitsborging Markermeerstudie (eindrapportage). M. Kok, I. Lammers en A. Wijbenga. HKV rapport PR0215. Juni 1999.
- Kramer et al (2016), 3D model van het Volkerak-Zoommeer voor waterkwaliteit en primaire productie: modelbeschrijving, kalibratie- en validatiedocument. L. Kramer, H. Los, T. Troost, M. Genseberger, M. Tiessen en P. Boderie. Deltares rapport 1220070-000-ZKS-0034. Delft: 2016.
- Kuiper et al. (2014), Volkerak-Zoommeer WAQUA-model vijfde generatie; Modelopzet en validatie stormopzet en afwaaiing. C. Kuiper, Th. van der Kaaij, en D. Kerkhoven, Deltares Ref: 1209448-005-ZKS-0005, Delft 17 december 2014.
- Kuijper en Pleijter (2020), Uitbreiding databases fysica voor het Volkerak-Zoommeer, HKV-memo PR4214.11 in opdracht van Programma Rijkskeringen – Rijkswaterstaat, Lelystad, 2020.
- Lievens (1998). Waqua model Grevelingenmeer 1998 – presentatie 2DH waterbewegings-model voor de Grevelingen. P. Lievens, Rijkswaterstaat, directie Zeeland rapport nr. AX 98.005, Middelburg, 1998.
- Lievens (2002). WAQUA-model Volkerak-Zoommeer 2002 – presentatie 2DH waterbewegingsmodel voor het Volkerak-Zoommeer. P. Lievens, Rijkswaterstaat, directie Zeeland rapport, Middelburg, 2002.
- Lodder (2006). Voorstel voor het Achtergrondrapport HR2006 voor de Meren (concept versie 0.1). Q. Lodder, Rijkswaterstaat RIZA, Lelystad. December 2006.

- Lopez de la Cruz et al. (2010). The Evolution of Storms on the Wadden Sea. SBW-Belastingen. J. Lopez de la Cruz, A. Tijssen en J. Beckers. In opdracht van Rijkswaterstaat Waterdienst, Deltares rapport 1200264-004-HYE-0012, Delft, februari 2010.
- Minns en Gaytan Aguilar (2015). vijfde generatie WAQUA model Grevelingen; modelverificatie voor stormopzet en afwaaiing. T. Minns en S. Gaytan Aguilar, Deltares, rapport 1220073-007-ZKS-0003. Delft, 2015.
- Minns et al. (2019). Specificaties zesde-generatie modellen met D-HYDRO - Generieke technische en functionele specificaties. T. Minns, A. Spruyt en D. Kerkhoven. Voorlopig Deltares rapport 11203714-013-ZWS-0001. Delft, 2019
- Minns, T., A. Spruyt, D. Kerkhoven (2022): Specificaties zesde-generatie modellen met D-HYDRO – Generieke technische en functionele specificaties (v1-2022). Deltares rapport 11208053-012-ZWS-0002.
- Oerlemans et al. (2022), Productieberekeningen BOI2023, versie 1.4, C. Oerlemans, J.W. Stijnen, M.P. Bénit, J. Adema. HKV rapport PR4539 in opdracht van Rijkswaterstaat WVL, Lelystad, 29 september 2022.
- Platzek (2019). Advection errors and grid dependency in numerical river - Comparing codes Telemac, D-Flow FM, UnTRIM and Delft3D. F. Platzek, Project report version 1.0. Delft 2019.
- Rongen et al. (2021) Ruimtelijke windvariatie boven Nederland. Een advies voor het meenemen van windvariatie in de BOI-productieberekeningen. G. Rongen, B. Strijker en C. Geerse. HKV-rapport PR4489.10, Lelystad, juni 2021.
- RWS (2008). Hydraulische Randvoorwaarden 2006 voor het toetsen van primaire waterkeringen categorie c voor de derde toetsronde 2006-2011. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Water, Den Haag, 2008
- RWS (2021). Kader Toepassing Netwerkmodellen Water en Scheepvaart – versie 2021.1, Den Haag. 19 juli 2021.
- Sterl (2019), Wind across land-water transitions: Application of an analytical model to numerical model output. Andreas Sterl, 2019. KNMI-rapport TR-381. De Bilt, 2019.
- Spruyt et al. (2017): Ontwikkeling Zesde-Generatie Modellen Met D-HYDRO - Generieke Technische En Functionele Specificaties. A. Spruyt, T. Minns, F. Zijl, M. Genseberger, M. Yossef, T. van der Kaaij en E. de Goede. Deltares rapport 11200569-000. Delft, 2017.
- Spruyt et al. (2023a): Verschilanalyse overstap zesde-generatie modellering Maas - Effect software, rekenrooster, parameters & modelconcepten, schematisatie en modelrandvoorwaarden. A. Spruyt, B. Domhof en J. de Jong. Deltares rapport 11209233-002-ZWS-0001. Delft 2023.
- Spruyt et al. (2023b): Verschilanalyse overstap zesde-generatie modellering Rijntakken - Effect software, rekenrooster, parameters & modelconcepten, schematisatie en modelrandvoorwaarden. A. Spruyt, B. Domhof en J. de Jong. Deltares rapport 11209233-003-ZWS-0004. Delft, 2023.
- Stijnen en Daggenvoorde (2019). Ruimtelijk variabele wind in de Vecht-IJsseldelta. Gevoeligheidsanalyse met een windklimaatgradiënt. J.W. Stijnen en R.J. Daggenvoorde. In opdracht van Provincie Overijssel. HKV-rapport PR4014.10, Lelystad, september, 2019.
- Sterl (2019). Wind across land-water transitions: Application of an analytical model to numerical model output. A. Sterl Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI De Bilt, December 2019

- Uittenbogaard et al. (2005). Eddy viscositeit in WAQUA modellen voor Rijntakken en Maas. R.E. Uittenbogaard, C. Stolker, E.D. de Goede, J.A.T.M. van Kester, H.R.A. Jagers en J.H.A. Wijbenga, WL Delft Hydraulics, Report Q3846, Delft, 2005.
- Van der Lugt et al. (2021). Ontwikkeling zesde-generatie modelschematisatie D-HYDRO Volkerak-Zoommeer, Modelbouw, kalibratie en validatie voor hydrodynamica en waterkwaliteit. M. van der Lugt, L. van der Heijden, A. Markus en M. Tiessen. Deltares project 11206814-007-ZKS-0006. Delft. December 2021.
- Van Veen en Slootjes (2008a). Hydraulische randvoorwaarden voor categorie c-keringen, Achtergrondrapport keringen langs de Veluwe Randmeren (dijkkring 8, 11 en 45). N.J. van Veen en N. Slootjes. HKV rapport 1322 in opdracht van Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Lelystad, 2018.
- Van Veen en Slootjes (2008b). Hydraulische randvoorwaarden voor categorie c-keringen, Achtergrondrapport keringen langs het Grevelingenmeer (dijkkring 25 en 26). N.J. van Veen en N. Slootjes. HKV rapport 1322 in opdracht van Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Lelystad, 2018.
- Van Veen en Slootjes (2008c). Hydraulische randvoorwaarden voor categorie c-keringen Achtergrondrapport keringen langs het Volkerak-Zoommeer (dijkkring 25, 27, 31, 33, 34). N.J. van Veen en N. Slootjes. HKV rapport 1322 in opdracht van Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Lelystad, 2018.
- Van Vledder (2017). Stappenplan aanpassing hydraulische randvoorwaarden op basis van nieuwe inzichten winddrag. Herziene versie (vvc55m1r4). G. Ph. van Vledder. Van Vledder Consulting, opdrachtgever: RWS-WVL, 24 november 2017.
- Verkaik (2006), On Wind and Roughness over Land. J.W. Verkaik, April 2006. Wageningen. PhD Thesis.
- De Waal (2003). Windmodellering voor bepaling waterstanden en golven. Een analyse van de bouwstenen. J.P. de Waal. Rijkswaterstaat RIZA, RIZA werkdocument 2003.118x, Lelystad Juli 2003.
- WL | Delft Hydraulics (1996), Manual DELFT3D-FLOW, version 0.1, User Manual, release 2.48, Augustus 1996.
- WL | Delft Hydraulics (1997). Onafhankelijk Onderzoek Markermeer, Technisch inhoudelijke en integrerende studie. Verslag fase 1b3, Stormprofiel en windvelden. Y.H.G. van Haaren. In opdracht van Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde, WL | Delft Hydraulics rapport H3211, Delft, juli 1997.
- Wijbenga (2004) Veluwerandmeren Hydraulische omstandigheden. J.H.A. Wijbenga, W.E.W. van den Braak en C.A.H. Wouters in opdracht van Rijkswaterstaat, Directie IJsselmeergebied, HKV rapport PR0704, Lelystad, 2004.

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