

# **Hydraulische Belastingen Benedenrivieren**

**Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017**





# **Hydraulische Belastingen Benedenrivieren**

**Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017**

Nienke Kramer  
Alfons Smale  
Joost den Bieman  
Houcine Chbab

1230087-004



**Titel**

Hydraulische Belastingen Benedenrivieren

**Opdrachtgever**

RWS - WVVL

**Project**

1230087-004

**Kenmerk**

1230087-004-HYE-0001

**Pagina's**

104

**Trefwoorden**

Hydraulische Belastingen, Benedenrivieren, WBI-2017

**Samenvatting**

Het doel van het project WBI-2017 is o.a. het afleiden van de (nieuwe) Hydraulische Belastingen (HB) voor de volgende wettelijke toetsronde van primaire waterkeringen. De HB bestaan uit: lokale waterstand en golfcondities bij de normfrequentie en hydraulisch belastingniveau (HBN) voor golfoverslag. De HB worden bepaald met het nieuwe probabilistische instrumentarium Hydra-Ring, dat onderdeel uitmaakt van de rekenschil Ringtoets. Nieuw ten opzichte van WTI-2011 is de overstap naar de overstromingskansbenadering, nieuwe normering en het meenemen van kennisonzekerheden. Daarnaast zijn voor sommige gebieden de statistiek van de basisstochasten en de productieberekeningen geactualiseerd.

Dit document beschrijft de afleiding en controle van de HB voor de waterkeringen in het benedenrivierengebied. De resultaten zijn beoordeeld door middel van verschillanalyses met WTI-2011 en door analyse van de ruimtelijke variatie. Daarnaast, vormen de resultaten de basis voor de uiteindelijke keuze voor de te hanteren rekentechniek.

Bij de selectie van rekentechniek is het watersysteem onderverdeeld in verschillende deelgebieden, gebaseerd op de dominantie van stochastische variabelen. De deelgebieden zijn: faalkansgebied, bergingsgebied, overgangsggebied, afvoer gedomineerd (Waal en Lek) en Bergsche Maas. De aanbevolen rekeninstellingen variëren per deelgebied en per faalmechanisme.

Als het om de betrouwbaarheid gaat vinden we verschillen tussen de resultaten verkregen met de drie toegepaste rekentechnieken. De resultaten zouden nog verder verbeterd kunnen worden door in plaats van het volgen van het stappenplan op basis van de resultaten uit dit rapport per deelgebied een rekentechniek te selecteren. Deze oplossingsrichting is ook gehanteerd in de vervolgfase, waarin er voor de faalkans-gedomineerde en afvoer-gedomineerde deelgebieden verschillende rekentechnieken worden gebruikt. Daarnaast wordt een deel van het Benedenrivierengebied niet uitgeleverd (met name bergings-gedomineerd en overgangsggebied).

Voor de marginale statistiek van de golfhoogte is alleen rekenmethode I toegepast. Dit levert voor het merendeel van de locaties stabiele resultaten op. Maar ook hier geldt dat er voor een groot deel van de locaties voor individuele of voor alle herhalingstijden geen resultaten beschikbaar zijn. Dit komt door voornamelijk door droogval.

De verschillen tussen de Hydra-Ring (zonder kennisonzekerheden) en de Hydra-Zoet resultaten zijn goed te verklaren en komen bij de waterstanden, HBN's en golfhoogtes door (i) het niet repareren van de database, (ii) de nieuwe database (Ruimte voor de Rivier maatregelen, correlatie tussen de Rijn- en Maas en de ligging van de uitvoerlocaties) en (iii) toevoegen van obstakels in de golfberekeningen.

Het rapport geeft een verklaring voor het effect van de nieuwe statistiek en het effect van onzekerheden.

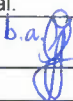


**Titel**  
Hydraulische Belastingen Benedenrivieren

**Opdrachtgever** RWS - WVWL      **Project** 1230087-004      **Kenmerk** 1230087-004-HYE-0001      **Pagina's** 104

Bij dit rapport worden spreadsheets geleverd met Hydraulische Belastingen (waterstand, HBN en golfhoogte) voor alle locaties en voor zeven herhalingstijden. In deze sheets wordt per locatie tevens aangegeven welke rekentechniek gebruikt is, of er sprake is van droogval en instabiliteit van de berekening.

**Referenties**

Plan van Aanpak WTI KPP 2016, maart 2016

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	Juni 2016	Alfons Smale		Hans de Waal		Marcel van Gent	
		Joost den Bieman					
		Houcine Chbab					
3	Aug 2016	Nienke Kramer et al.		Hans de Waal		Marcel van Gent	
4	Dec 2016	Nienke Kramer et al.		Joost Beckers		Marcel van Gent	
5	Apr 2017	Nienke Kramer et al.		Joost Beckers		Marcel van Gent	
6	Aug 2017	Nienke Kramer		Joost Beckers		Marcel van Gent	
		Alfons Smale					
		Joost den Bieman					
		Houcine Chbab					

**Status**  
definitief

## Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1	Positionering rapportage in WBI-2017 structuur	1
1.2	Overgang naar WBI-2017	3
1.3	Doelstelling	6
1.4	Algemene uitgangspunten berekeningen	6
1.5	Aanpak	9
1.6	Leeswijzer	9
1.7	Producten	9
1.8	Totstandkoming	10
<b>2</b>	<b>Vorbereidingsfase: probabilistische omgeving benedenrivieren</b>	<b>11</b>
2.1	Inleiding	11
2.2	Systeembeschrijving, dijktrajecten en regio's	11
2.2.1	Systeembeschrijving	11
2.2.2	Dijktrajecten en veiligheidsnormen	12
2.2.3	Regio's	13
2.3	Belastingmodel	13
2.4	Database	15
2.4.1	Correlatie Rijn- en Maasafvoer	16
2.4.2	Ruimte voor de riviermaatregelen	16
2.4.3	Uitvoerlocaties en bijbehorende rekenpunten in het WAQUA en SWAN model	17
2.4.4	Obstakels	17
2.5	Statistiek basisstochasten	18
2.5.1	Afvoerstatistiek van de Rijn bij Lobith	18
2.5.2	Afvoerstatistiek van de Maas bij Lith	20
2.5.3	Statistiek zeewaterstand Maasmond	22
2.5.4	Windstatistiek	23
2.5.5	Statistiek beheertoestand Europoortkering en inzet berging Volkerak-Zoommeer	25
2.6	Extra stochasten kennisonzekerheid	25
2.6.1	Modellering kennisonzekerheid	25
2.6.2	Modelonzekerheid waterstand	25
2.6.3	Modelonzekerheid golfcondities	28
2.6.4	Statistische onzekerheid basisstochasten	28
2.6.5	Voorspelfout sluiting Europoortkering en inzet Volkerak-Zoommeer	29
2.7	Probabilistisch model	29
2.7.1	Rekenteknik	29
2.7.2	Verschil FORM en DS	30
2.7.3	Verschil NTI en FBC	30
<b>3</b>	<b>Verschilanalyse BER</b>	<b>33</b>
3.1	Inleiding	33
3.2	Werkwijze analyse resultaten	33
3.3	Uitgangspunten berekening	33
3.3.1	Algemeen	33
3.3.2	Hydra instellingen	34

3.4	Vergelijking met Hydra-Zoet nieuwe en oude statistiek	37
3.4.1	Resultaten lokale waterstand	37
3.4.2	Resultaten HBN-resultaten	39
3.5	Verschil in rekentechniek in Hydra-Ring	41
3.5.1	Voorbeeld 1: Riviergedomineerd	41
3.5.2	Voorbeeld 2: Overgangsgebied	43
3.5.3	Voorbeeld 4: hoogwater maatregel	48
3.5.4	Voorbeeld 4: Droogval	50
3.5.5	Voorbeeld 5: hoogwater maatregel	52
3.5.6	Conclusie	54
3.6	Vergelijking Hydra-Zoet met Hydra-Ring	55
3.6.1	Inleiding	55
3.6.2	Resultaten lokale waterstand	55
3.6.3	Resultaten HBN	57
3.6.4	Marginale statistiek van de golfhoogte	59
3.7	Effecten onzekerheden	64
3.7.1	Resultaten lokale waterstand	64
3.7.2	HBN-resultaten	67
3.7.3	Resultaten Marginale statistiek van de golfhoogte	70
3.8	Vergelijking Hydra-Zoet met oude norm versus Hydra-Ring met nieuwe norm	72
<b>4</b>	<b>Resultaten HB Benedenrivierengebied</b>	<b>77</b>
4.1	Inleiding	77
4.2	Uitgangspunten productieberekeningen	77
4.3	Keuze rekentechniek	77
4.4	Rekenresultaten lokale waterstand bij de normfrequentie	79
4.5	Rekenresultaten HBN	80
4.6	Rekenresultaten golfhoogte	82
4.7	Revisie rekentechnieken	84
<b>5</b>	<b>Aansluiting watersystemen</b>	<b>87</b>
5.1	Inleiding	87
5.1.1	Lek en Benedenrijn	87
5.1.3	Maas en Benedenmaas	92
5.1.4	Benedenrijn en Benedenmaas	96
<b>6</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>101</b>
6.1	Conclusies	101
<b>7</b>	<b>Referenties</b>	<b>103</b>



## Summary

One of the goals of the WBI-2017 project is to determine Hydraulic Loads for the fourth safety assessment for the Dutch sea and flood defences. The Hydraulic Loads consist of: local water level and wave conditions at the norm frequency, hydraulic load level (HBN) for wave overtopping and wave conditions for other failure mechanisms such as failure of revetments. The Hydraulic Loads have been determined with the new probabilistic instrument Hydra-Ring, which is part of the GUI Ringtoets. Compared to WTI-2011 several new aspects have been implemented, such as the transition from the conventional probability exceedance approach to a more integral failure probability approach, new normative failure probabilities, and the inclusion of statistical and model uncertainties. Furthermore, for some areas the statistical distributions and the physical databases of hydrodynamic and wave model results have been adapted.

The present document describes the determination and checking of the Hydraulic Loads for the dikes along the lower stretches of the rivers Rhine and Meuse. The results were assessed by analysing the probability exceedance curves and differences with WTI-2011, as well as the spatial variation of the Hydraulic Loads.

For the selection of the Hydra-Ring calculation method the water system is divided into different areas depending on dominance of stochastic variables. The different areas identified are: barrier dominated, retention dominated, discharge dominated (Waal and Lek), Bergsche Maas and transition area. The recommended settings vary per area and per failure mechanism.

For the marginal statistics of the wave height only calculation method I was applied. This method provides stable results for the majority of the locations. However, there are still a large percentage of the locations without results. This is mainly due to dryness.

The differences between the Hydra-Ring (without uncertainty) and the Hydra-Zoet results can be explained by 1) modifications in the database by Hydra-Zoet, 2) the new database and 3) the introduction of obstacles in the wave calculations.

The report explains the effect of the new statistics and the impact of uncertainties.

Excel files with the Hydraulic Loads (water levels, hydraulic load levels, significant wave height) for all locations and for seven exceedance frequencies have been produced and will be attached to this report. In these sheets the locations where the local water level is lower than the bed level ("droogval") and with stability problems have been marked.



# 1 Inleiding

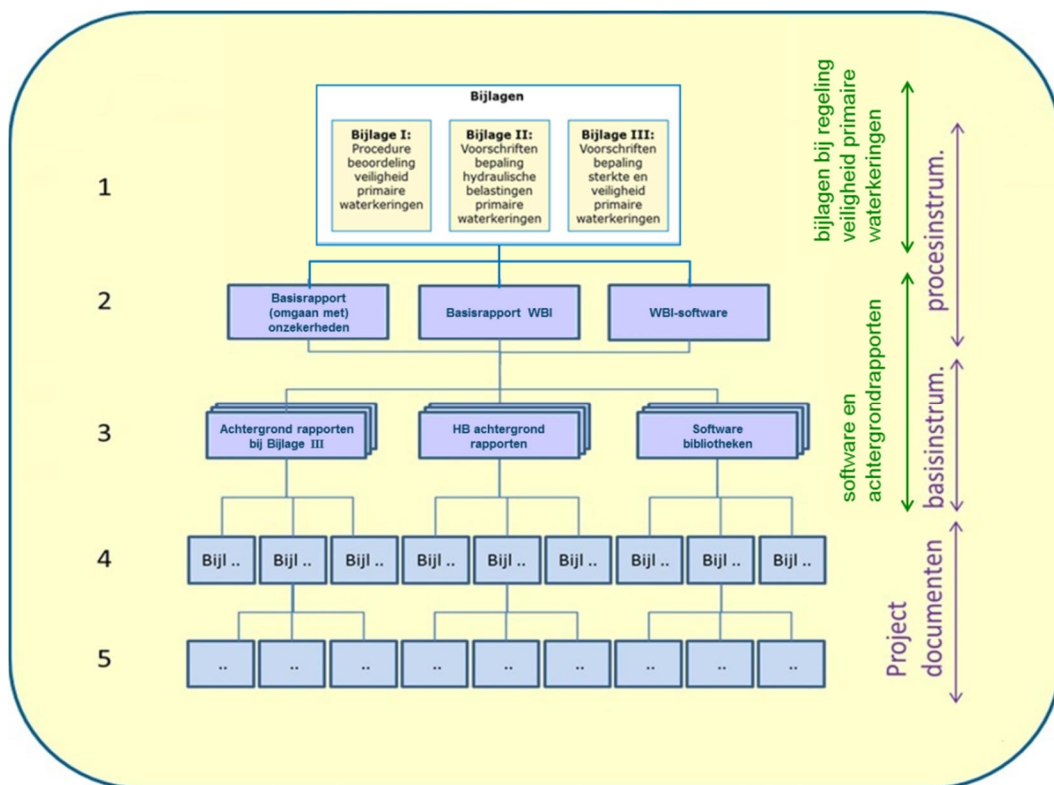
## 1.1 Positionering rapportage in WBI-2017 structuur

Primaire waterkeringen moeten getoetst worden aan de gestelde veiligheidsnormen. De beheerder van een primaire waterkering is verplicht iedere twaalf jaar aan de Minister van Infrastructuur en Milieu (I&M) verslag uit te brengen over de toestand van de primaire waterkeringen. De Minister van I&M houdt toezicht op de primaire waterkeringen.

De beoordeling wordt met ingang van 2017 uitgevoerd aan de hand van het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI). Het WBI is vastgelegd in een ministeriële regeling (Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017) met de volgende bijlagen:

- Bijlage I Procedure beoordeling veiligheid primaire waterkeringen  
In deze bijlage staat de procedure die moet worden doorlopen voor de beoordeling en worden de rapportageverplichtingen beschreven. In deze bijlage is een begrippenlijst opgenomen met een uitleg van alle begrippen die in het WBI 2017 worden gebruikt.
- Bijlage II Voorschriften bepaling hydraulische belasting primaire waterkeringen  
In deze bijlage wordt de methode beschreven om de hydraulische belastingen op de primaire waterkeringen te bepalen.
- Bijlage III Voorschriften bepaling sterkte en veiligheid primaire waterkeringen  
In deze bijlage staat op welke manier de primaire waterkering moet worden beoordeeld om te komen tot een oordeel over de veiligheid van de gehele kering.

De drie documenten vormen de eerste laag of het formele gedeelte van WBI-2017, zoals weergegeven in Figuur 1.1.



Figuur 1.1 Boomstructuur documentatie WTI 2017

De tweede laag wordt gevormd door een tweetal basisrapporten en applicatie-software. De basisrapporten bevatten uitgebreide beschrijvingen van de Hydraulische Belastingen en hun onderlinge samenhang. De ‘HB achtergrondrapporten’ uit laag 3 beschrijven voor alle watersystemen het instrumentarium, de gehanteerde uitgangspunten, het belastingmodel (inclusief gehanteerde verdelingen van basisstochasten en kennisonzekerheden), alsmede een beschrijving van de resultaten de HB berekeningen en een duiding van de resultaten, waaronder een verschilanalyse met de HB uit WTI-2011.

Aan de basisrapporten zijn achtergrondrapporten (laag 3) en bijlagen gekoppeld (laag 4 en 5), waarin meer details worden gegeven over specifieke onderdelen van het instrumentarium.

De voorliggende rapportage maakt deel uit van laag 4 in Figuur 1.1 en beschrijft de wijze waarop HB voor het Benedenrivierengebied zijn verkregen, hoe de resultaten er uit zien en hoe ze zich verhouden tot WTI-2011. Naast het Benedenrivierengebied zijn soortgelijke rapportages voor het Kustgebied, Bovenrivierengebied, Vecht-IJsseldelta en Merengebied opgesteld. Dit zijn dus allemaal specialistische achtergrondrapporten. Een aggregatie van deze rapporten vindt plaats in het HR achtergrondrapport.

Alvorens de doelstelling van voorliggende rapportage te specificeren (Paragraaf 1.3), gaan we in Paragraaf 1.2 in op de belangrijkste verschillen op het gebied van HB bij de overgang naar WBI-2017. Dit is een algemene beschrijving die ook terug te vinden is in “Bijlage II Voorschriften bepaling hydraulische belasting primaire waterkeringen” (in Figuur 1.1 aangeduid met ‘HR technisch deel’ in laag 1) en het basisrapport WTI (in laag 2). Ook de duiding van verschillen in HB met die van voorgaande toetsrondes is een belangrijk onderdeel van voorliggend rapport.

## 1.2 Overgang naar WBI-2017

Het thans nog vigerende wettelijke toetsinstrumentarium bestaat uit een voorschrift Toetsen op Veiligheid (VTV2006) en te hanteren Hydraulische Randvoorwaarden (HR2006). Hiermee zijn in de derde toetsronde (2007-2010) de Nederlandse primaire waterkeringen getoetst. De vierde toetsronde was beoogd in 2011 te starten en daartoe is in 2011 het WTI-2011 opgesteld.

Echter, omdat dit toetsinstrumentarium nooit formeel is vastgesteld hebben de nieuwe hydraulische randvoorwaarden (HR) geen formele status gekregen. De destijds nieuw afgeleide HR voor het Benedenriviereengebied staan bekend onder de naam CR2011, concept randvoorwaarden. De vierde toetsronde zal in 2017 starten. Het daartoe te gebruiken Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI-2017) maakt gebruik van een groot aantal onderdelen uit het WTI-2011. Desalniettemin zijn er vele verschillen.

De Hydraulische Belastingen (HB) per locatie bestaan uit een combinatie van waterstand en golfhoogte, -periode en -richting. De vigerende HR2006 gaat uit van de overschrijdingskansbenadering, die kijkt naar de kans op overschrijding van een kritieke belasting voor een tevoren vastgesteld faalmechanisme en (eigenschappen van) een van tevoren gekozen waterkeringssectie. In 2017 wordt een overstap gemaakt naar een overstromingskansbenadering. Dit houdt in dat gekeken wordt naar de kans op falen (rekening houdend met meerdere faalmechanismen) van een dijkkring of dijkringtraject, bestaande uit meerdere waterkeringssecties. Daarnaast wordt in WBI-2017 overgestapt op nieuwe veiligheidsnormen.

Het doel van het project WBI-2017 is o.a. het afleiden van de (nieuwe) HB voor de volgende toetsronde. Naast de overstap op de overstromingskansbenadering dient hierbij uitgegaan te worden van de nieuwe veiligheidsnormen (zie Figuur 1.2). Deze nieuwe normen zijn afgeleid van een economische kosten-baten analyse en een beschouwing van de slachtofferrisico's (zie samenvatting in Deltares, 2011) en op 4 juli 2016 door de tweede kamer goedgekeurd<sup>1</sup>.

In de huidige HR2006/VTV2006 en WTI-2011 wordt in beperkte mate rekening gehouden met onzekerheden. In geval van onzekere modelparameters of modelinvoer wordt veelal gebruik gemaakt van een beste schatting of van een gemiddelde waarde. Dit geldt voor zowel sterkte- als belastingparameters. Aan de belastingkant wordt alleen rekening gehouden met de natuurlijke variabiliteit (ook wel inherente onzekerheid genoemd) in de rivierafvoeren, het IJsselmeerpeil, de zeewaterstand en de wind. Kennisonzekerheden (bijvoorbeeld als gevolg van onvoldoende data/informatie) worden niet beschouwd. Dit kan leiden tot een onderschatting van de kans op falen van een kering. Tegelijk met de overstap van overschrijdingskans naar overstromingskansbenadering en een nieuwe normering wordt daarom in WBI-2017 ook een verbetering doorgevoerd ten aanzien van het omgaan met onzekerheden. In WBI-2017 worden alle relevante model- en kennis-onzekerheden beschouwd en meegenomen in de probabilistische berekeningen, zowel aan de sterkte- als de belastingkant.

---

<sup>1</sup> <https://www.tweedekamer.nl/kamerstukken/wetsvoorstellen/detail?id=2016Z06188&dossier=34436>



Figuur 1.2 Normfrequenties voor de primaire waterkeringen. Dit betreft in dit geval de ondergrens van het beschermingsniveau, d.w.z. de maximale overstromingskans of faalkans, die hoort bij het beschermingsniveau dat voor het desbetreffende dijktraject toelaatbaar wordt geacht.

Hydra-Ring is het nieuwe probabilistisch instrumentarium dat gebruikt gaat worden voor de probabilistische berekeningen binnen WBI-2017. Het ontwerp en de functionaliteit van Hydra-Ring staat beschreven in de Scientific Documentation Hydra-Ring (Diermanse et al, 2013).

Hierin staan daarnaast de (wetenschappelijke) achtergronden voor probabilistisch rekenen (rekentechnieken) en de wijze waarop de statistiek, modelonzekerheid, statistische onzekerheid en correlaties van de hydraulische belastingen en sterkteparameters worden

behandeld. Het document bevat ook een beschrijving van de faalmechanismen die ingebouwd zijn in Hydra-Ring.

De toetsing van de primaire keringen vormt een gelaagd proces. Er zijn drie lagen, variërend van eenvoudig via gedetailleerd naar een toets op maat. Voor de gedetailleerde toets wordt onderscheid gemaakt in een toets op vakniveau en een toets op trajectniveau. Bij de toets op vakniveau wordt onderscheid gemaakt tussen een semi-probabilistische en volledig probabilistische toets.

Bovenstaande uitleg wordt in Tabel 1.1 schematisch weergegeven. In deze studie wordt ingegaan op de rechterkolom van de tabel. Voor de eenvoudige toets is enkel de marginale statistiek van de waterstanden en golven van belang. Deze waarden zijn niet afhankelijk van een dijkprofiel, waardoor de vooraf berekende HB door Ringtoets direct getoond kan worden. Voor alle uitvoerlocaties wordt de vooraf bepaalde HB opgeleverd als product van het project WTI2017.

Voor de semi-probabilistische toets op vakniveau worden de HB door Ringtoets (met als rekenhart Hydra-Ring) bepaald wanneer de toetsers zijn dijkprofiel invoert. Omdat de HB hier afhankelijk is van het dijkprofiel wordt HB ook wel "rekenwaarde van de belasting" genoemd. Vervolgens worden in de toetsing met Ringtoets de HB vergeleken met de rekenwaarde voor de sterkte. In deze studie worden de HB met standaardinstellingen voor o.a. het dijkprofiel bepaald. De afgeleide HB zijn bedoeld als referentiewaarde, die gebruikt kunnen worden ter controle van de werkelijke HB voor een dijkprofiel.

Tabel 1.1 Gegevens behorend bij eenvoudige en gedetailleerde toets.

Toets:	Niveau:	Rekenmethode:	Faalmechanisme:	Faalkanseis:	Instrumentarium toetsers:	Resultaat deze studie:
<b>Eenvoudig</b>	vak	eenvoudig	selectie	Norm	Ringtoets	Productiesommen die direct worden getoond in Ringtoets (= marginale statistiek waterstand en golfhoogte)
<b>Gedetailleerd</b>	vak	Semi-prob.	overige	Norm, al dan niet aangepast voor lengte effect en faalkansverdeling	Ringtoets	referentie berekeningen (Lokale waterstand, HBN en golfcondities bij vaste waterstand)
		Volledig prob	Gras & duinen	Norm aangepast voor lengte effect en faalkansverdeling	Ringtoets	
	traject	Volledig prob.	alle	Gehele frequentielijn	Ringtoets	

Omdat de hydraulische belastingen per watersysteem verschillen hebben we er voor gekozen de HB voor ieder watersysteem apart te rapporteren. Zo maken we onderscheid in de watersystemen Kust, Meren, Bovenrivieren, Vecht- en IJsseldelta en Benedenrivieren. In deze rapportage beschouwen we de Benedenrivieren: het gebied van de Rijntakken en van de Maas waar invloed is van getij en/of stormopzet vanuit de zee. Aan de hand van een groot

aantal berekeningen zijn Hydraulische Belastingen (HB) voor de waterkeringen in het Benedenrivierengebied afgeleid. Deze bestaan uit:

- Marginale statistiek voor lokale waterstand en significante golfhoogte. Deze worden afgeleid voor de eenvoudige toets en vormen direct input voor Ringtoets.
- Lokale waterstand (t.b.v. geotechnische toetssporen), HBN (golfoverslag-gerelateerde toetssporen) en maatgevende golfcondities per waterstandsniveau (bekledingen). Deze worden afgeleid voor de semi-probabilistische toets op vakniveau en zijn bedoeld als referentiewaarde voor de Hydraulische Belastingen die de toetser uiteindelijk zelf met Ringtoets afleidt voor de diverse toetssporen. Deze referentiewaarden worden ook gebruikt om verschillen met de vigerende Hydraulische Belastingen te kwantificeren en te duiden.

### 1.3 Doelstelling

Doelstelling van dit rapport is drieledig:

1. Beschrijving van de aanpak van het afleiden van de HB, zodat reproductie mogelijk is.
2. Beschrijving en analyse van de resultaten om de betrouwbaarheid vast te stellen.
3. Vergelijking met WTI-2011 en duiding van de verschillen.

### 1.4 Algemene uitgangspunten berekeningen

Bij het bepalen van de productieberekeningen zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd.

Tot het gebied van de Benedenrivieren (ook Rijn- en Maasmonding genoemd) behoren alle riviertakken van de Rijn en/of de Maas waar getij en/of stormopzet vanuit zee invloed een rol speelt<sup>2</sup>. Dit zijn regio 3 en 4 in Figuur 1.3. De exacte overganglocaties worden beschouwd in Hoofdstuk 5.

- De Hydraulische Belastingen voor de eenvoudige toets vormen input voor Ringtoets en dienen om die reden op alle oeverlocaties te worden bepaald en voor alle relevante herhalingstijden. De relevante herhalingstijden zijn gegeven in Figuur 1.2, dit zijn: 100, 300, 1.000, 3.000, 10.000, 30.000, 100.000 jaar. De resultaten van de as locaties worden in dit rapport niet behandeld.
- Hydraulische Belastingen volgens WBI-2017 worden vergeleken met WTI-2011.
- Omdat de focus ligt op HB en niet op sterkte, beschouwen we in de berekeningen alleen standaardprofielen (taludhelling 1:3) en een kritiek overslagdebiet van 1 l/s/m. Overgang op een groter kritiek overslagdebiet (bijv. 5 l/s/m) of de overgang op een andere norm maakt onderdeel uit van een consequentie analyse en niet van de hier uitgevoerde verschilanalyse.
- Aangezien de referentieberekeningen van de semi-probabilistische toets op vakniveau zijn bedoeld om de verschillen met WTI-2011 te duiden is het slechts noodzakelijk deze referentiewaarden te bepalen voor een selectie van locaties (doch voldoende).

---

<sup>2</sup> Merk op dat Hydraulische Belastingen voor de Hollandse IJssel, Volkerak-Zoommeer en Afgedamde Maas buiten de scope van deze studie vallen.



- De Hydraulische Belastingen voor Europoort en voor het onderdeel bekledingen worden in dit rapport niet behandeld. Voor deze onderdelen zijn aparte rapportages gemaakt (Deltares, 2016d, 2016e).
- Waterstandsverlopen worden apart beschreven in Deltares (2016b) en komen in dit rapport niet aan bod.
- De betrouwbaarheid van de resultaten wordt mede bepaald door de keuze van de probabilistische rekentechniek. Deze is voor alle gebieden in overleg met Hydra-Ring ontwikkelaars vastgesteld. Desondanks kunnen we niet uitsluiten dat op sommige locaties HB worden berekend die minder betrouwbaar zijn. Waar dit optreedt zal in dit rapport zoveel mogelijk worden aangegeven. In een vervolganalyse (Deltares, 2017) zijn de gehanteerde rekentechnieken nader beschouwd in relatie tot de betrouwbaarheid van de resulterende HB.



Figuur 1.3 Overzichtskaart watersystemen zoals die onderverdeeld zijn in de software. Bron: Min. I&M (2016).

## 1.5 Aanpak

De productie van de Hydraulische Belastingen heeft plaatsgevonden in een aantal fases:

- 1 Analyse van resultaten op testlocaties, incl. duiding van verschillen met WTI-2011 op basis van Hydra-Ring berekeningen met initiële rekeninstellingen, welke zijn aanbevolen bij het beschikbaar komen van Hydra-Ring voor productieberekeningen.
- 2 Bepalen van Hydraulische Belastingen op alle oeverlocaties met instellingen waarvan we hebben vastgesteld dat ze tot een stabiel resultaat leiden, d.w.z. de overschrijdingsfrequentiecurve van de betreffende belastingparameter neemt toe met toenemende herhalingstijd.
- 3 Vaststellen van de optimale rekentechniek en verifiëren van de betrouwbaarheid van de afgeleide Hydraulische Belastingen met Hydra-NL resultaten.

In voorliggend rapport worden de resultaten van de fases 1 en 2 uitgebreid beschreven. De keuze van de optimale rekeninstellingen en de onderliggende analyse, welke is gebaseerd op een analyse van rekenresultaten op 230 locaties verdeeld over heel Nederland, is beschreven in Deltares (2017). De conclusies ten aanzien van de rekeninstellingen zijn overgenomen in dit rapport (Paragraaf 4.7).

De producten die we uitleveren en beschreven staan in Paragraaf 1.7 zijn gebaseerd op de fases 1 en 2. Dat betekent dat de geleverde Hydraulische Belastingen niet zijn afgeleid met de optimale rekeninstellingen, welke in Fase 3 zijn bepaald. Voor de wettelijke toetsing van een dijkvak of dijkkring zullen de HB voor de betreffende locaties dus opnieuw met WBI-2017 berekend moeten worden. De verwachting is dat deze HB slechts op enkele uitzonderingen na overeen zullen komen met resultaten in dit rapport.

## 1.6 Leeswijzer

In de volgende hoofdstukken is het volgende te lezen:

- 1 Beschrijven van het gebruikte belastingmodel voor de keringen in het Benedenrivierengebied (statistiek van basisstochasten en onderlinge correlaties, onzekerheden en de vertaling van stochastwaarden naar belasting bij de teen van de waterkering) en de probabilistische rekenmethode. Hierbij worden ook de verschillen met WTI-2011 besproken (Hoofdstuk 2).
- 2 Analyse van de resultaten om voldoende vertrouwen te krijgen in de resultaten, waarbij in Hoofdstuk 3 eerst een vergelijking wordt gemaakt met de resultaten van WTI-2011 en vervolgens het effect van het meenemen van kennisonzekerheden wordt onderzocht. Dit sluit aan bij de doelstelling om de betrouwbaarheid van de afgeleide HB te bepalen en de verschillen met WTI-2011. Deze analyse vindt plaats op een selectie van locaties.
- 3 In Hoofdstuk 4 worden de resultaten van de berekeningen voor alle locaties besproken. Daarbij beschouwen we onder andere de ruimtelijke variatie van de Hydraulische Belastingen als extra controleslag.
- 4 In Hoofdstuk 5 wordt ingegaan op de begrenzing van het benedenrivierengebied (regio 3 en 4) met de aanliggende regio's.

## 1.7 Producten

In dit rapport worden de volgende Hydraulische Belastingen bepaald:

- Lokale waterstanden (in de figuren aangeduid met MHW) t.b.v. eenvoudige toets en semi-probabilistische toets op vakniveau,

- Golfhoogte t.b.v. eenvoudige toets,
- Hydraulische Belastingniveau (HBN<sup>3</sup>) t.b.v. semi-probabilistische toets op vakniveau.

Bij dit rapport behoren de volgende gegevens en applicaties:

- Excel files met Hydraulische Belastingen (per locatie, herhalingstijd en type hydraulische belasting)
- Aansturingsscripts en pre- en postprocessingscripts

## 1.8 Totstandkoming

De uitvoering van de productieberekeningen en de analyse van deze resultaten zijn beschreven in voorliggend document.

Bijdragen aan dit document en onderliggende rekenresultaten zijn geleverd door:

- Alfons Smale
- Nienke Kramer
- Joost den Bieman
- Jacco Groeneweg
- Jamie Morris
- Wim van Balen
- Henri Steenbergen (TNO-Bouw)
- Geerten Horn (HKV Lijn in Water)

De projectleiding bij Deltares was in handen van Jacco Groeneweg. Het document is gereviewd door Hans de Waal en Joost Beckers.

Van de zijde van RWS is inbreng geleverd door:

- Deon Slagter
- Robert Slomp
- Marcel Bottema

De projectleiding bij RWS-WVL was in handen van Deon Slagter.

---

<sup>3</sup> Ook vaak 'benodigde kruinhoogte' genoemd.

## 2 Voorbereidingsfase: probabilistische omgeving benedenrivieren

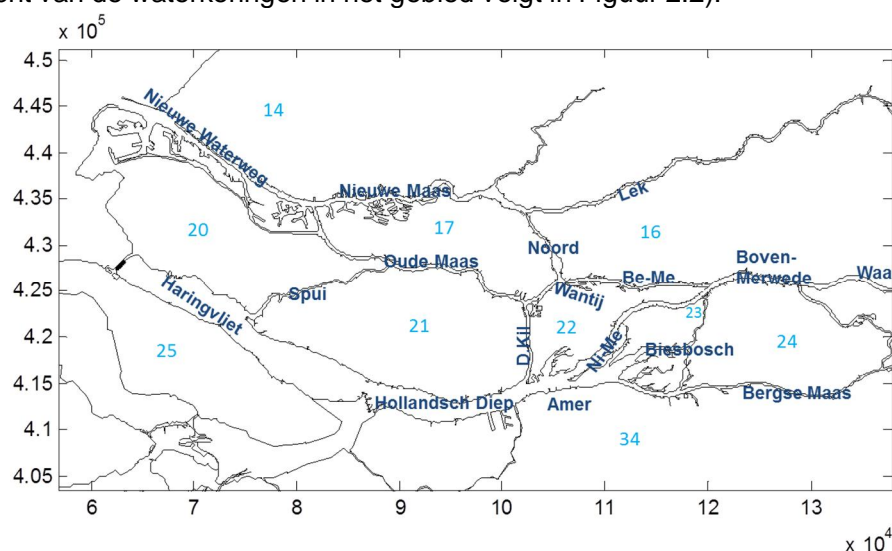
### 2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een systeembeschrijving gegeven en er wordt ingegaan op de veiligheidsnormen van de oude en nieuwe normering. Vervolgens wordt er in dit hoofdstuk een beschrijving gegeven van het belastingmodel voor keringen in het benedenrivierengebied. Daarnaast wordt ingegaan op de verschillen tussen de belastingmodellen in WTI-2006, WTI-2011 en WBI-2017.

### 2.2 Systeembeschrijving, dijktrajecten en regio's

#### 2.2.1 Systeembeschrijving

Het Benedenrivierengebied bestaat uit dat deel van de benedenstroomse takken van de Rijn en de Maas, waar tijdens afvoergolven de waterstanden nog invloed ondervinden van de stormen op de Noordzee. Het Benedenrivierengebied wordt aan de Westzijde begrensd bij de Maasmond en de Haringvlietdam. Aan de oostzijde ligt de begrenzing ongeveer bij Hagestein op de Lek, bij Gorinchem op de Boven Merwede / Waal en bij Heusden op de Maas. Een overzicht van de wateren van de Benedenrivieren is afgebeeld in Figuur 2.1. (Een completer overzicht van de waterkeringen in het gebied volgt in Figuur 2.2).



Figuur 2.1 Geografisch overzicht rivierentakken Benedenrivieren inclusief dijkkringennummers behorende bij de oude normering.

In het Benedenrivierengebied bevinden zich in verband met de veiligheid tegen overstromingen zes kunstwerken die afhankelijk van de hydraulische omstandigheden bediend worden. Vier van deze keringen, de Maeslantkering, de Hartelkering, de keringen in de Hollandse IJssel en het Heusdenssch kanaal (ook de Kromme Nolkering genoemd) bevinden zich in open toestand onder normale hydraulische omstandigheden. De sluitprocedure is afhankelijk van de (lokale) omstandigheden en verschilt per kering. De vijfde kering in het gebied, de Haringvlietsluizen, opent en sluit ook tijdens normale omstandigheden. Het zesde kunstwerk betreft de Volkerak sluisen, welke bij extreme omstandigheden geopend worden zodat het Volkerak-Zoommeer als waterberging kan dienen.

Een hoge afvoer op de Rijn en/of de Maas zorgt voor waterstandverhogingen aan de oostwaartse randen van de Benedenrivieren. Een dergelijke verhoging van de waterstand en afvoer plant zich als afvoergolf voort in zeewaartse richting. De benedenstroomse rand bestaat uit de zeewaterstand, welke is samengesteld uit het astronomisch getij en een stormopzet. De bijbehorende waterstandsverhoging plant zich vanwege de open verbinding met de Noordzee landinwaarts voort in het Benedenrivierengebied maar dempt langzamerhand uit.

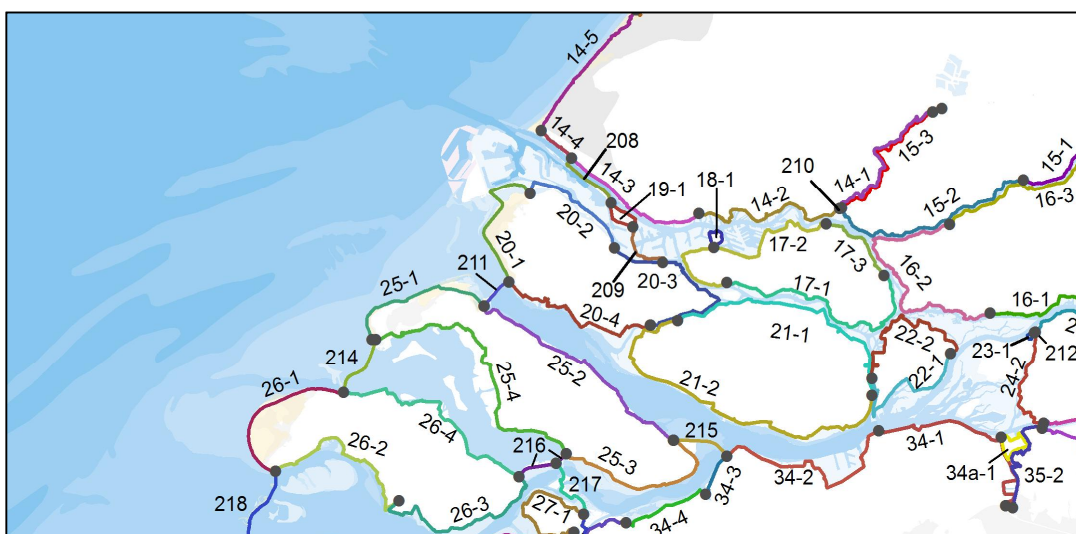
## 2.2.2 Dijktrajecten en veiligheidsnormen

Het Benedenrivierengebied omvat volgens de oude indeling in dijkkringgebieden en veiligheidsnormen de dijkkringgebieden uit Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Dijkkringgebieden in het Benedenrivierengebied

Dijkkring	Normfrequentie	Naam	Buitenwater
14	1/10000	Zuid-Holland	Nieuwe Waterweg, Nieuwe Maas
15	1/2000	Lopiker- Krimpenerwaard	Nieuwe Maas, Lek
16	1/2000	Alblasserwaard en de vijfheerenlanden	Lek, Boven- en Beneden Merwede, Noord
17	1/4000	IJsselmonde	Nieuwe Maas, Noord, Oude Maas
18	1/10000	Pernis	Nieuwe Maas
19	1/10000	Magentanburg	Nieuwe Waterweg, Calandkanaal
20	1/4000	Voorne-Putten	Hartelkanaal, Oude Maas, Spui, Haringvliet
21	1/2000	Hoekse Waard	Oude Maas, Dordtsche Kil, Hollandsch Diep, Spui, Haringvliet
22	1/2000	Eiland van Dordrecht	Oude Maas, Dordtsche Kil, Hollandsch Diep, Spui, Nieuwe Merwede
23	1/2000	Biesbosch	Nieuwe Merwede, Biesbosch
24	1/2000	Land van Altena	Boven Merwede, Maas, Bergsche Maas, Steurgat, Biesbosch
25	1/4000	Goeree-Overflakkee	Haringvliet
34	1/2000	West-Brabant	Bergsche Maas, Amer, Hollandsch Diep
34a	1/2000	Geertruidenberg	Bergsche Maas, Amer
35	1/2000	Donge	Bergsche Maas

In WBI-2017 wordt uitgegaan van de nieuwe veiligheidsnormen zoals afgebeeld in Figuur 1.2. In de nieuwe normering is het gebied van de Benedenrivieren, evenals de rest van de primaire keringen in Nederland, ingedeeld in verschillende dijktrajecten, zie Figuur 2.2. Elk dijktraject heeft een eigen veiligheidsnorm.



Figuur 2.2 Dijktrajecten Benedenrivieren en Zeeuwse wateren.

### 2.2.3 Regio's

Hydra-Ring kent 18 regio's. De vijf overige regio's in Figuur 1.3 betreffen voormalige C-keringen, die (nog) niet in Hydra-Ring zijn geïmplementeerd; de gebieden van het Benedenrivierengebied zijn in Hydra-Ring gedefinieerd als regio 3 (Rijndominant) en regio 4 (Maasdominant), Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Watersystemen ingedeeld in 18 regio's in Hydra-Ring.

1. Bovenrivieren (Rijn)	7. IJsselmeer	13. Hollandse Kust Zuid
2. Bovenrivieren (Maas)	8. Markermeer	14. Oosterschelde
3. Benedenrivieren (Rijn)	9. Waddenzee Oost	15. Westerschelde
4. Benedenrivieren (Maas)	10. Waddenzee West	16. Duinen
5. IJsseldelta	11. Hollandse Kust Noord	17. Europoort
6. Vechtdelta	12. Hollandse Kust Midden	18. Limburgse Maas

De belastingmodellen voor de regio's 3 en 4 zijn identiek met dien verstande dat voor regio 3 de statistiek van de Rijn bij Lobith geldt en voor regio 4 die van de Maas bij Lith. In dit rapport spreken we daarom van het belastingmodel Benedenrivieren, welke in de basis gelijk is aan het belastingmodel gehanteerd in WTI-2011. Voor wijzigingen van het belastingmodel ten opzichte van WTI-2011 wordt verwezen naar Deltares (2014a) en Deltares (2014b).

## 2.3 Belastingmodel

In Figuur 2.3 is een schematische weergave gegeven van het belastingmodel van het Benedenrivierengebied, geldend voor het faalmechanisme overslag. De stochasten Rijnafvoer bij Lobith, Maasafvoer bij Lith<sup>4</sup>, Zeewaterstand bij Maasmond<sup>5</sup>, windrichting en windsnelheid en Beheersituatie van de Europoortkeringen (Maeslant- en Hartelkering) en Volkerak-sluizen worden respectievelijk aangeduid met  $Q_{\text{Maas}}$ ,  $Q_{\text{Rijn}}$ ,  $H_{\text{zee}}$ ,  $R$ ,  $U$  en  $\Omega$ . De golfparameters  $H_s$ ,  $T_{m-1,0}$ ,  $T_p$  en  $\beta$  staan voor significante golfhoogte, gemiddelde (spectrale) golfperiode, piekperiode en gemiddelde golfrichting. Merk op dat de significante golfhoogte

<sup>4</sup> De statistiek van de Maas bij Lith volgt uit die bij Borgharen door middel van WAQUA berekeningen waarbij een aantal afvoergolven bij Borgharen vertaald worden naar bijbehorende afvoergolven bij Lith.

<sup>5</sup> De zeewaterstandstatistiek bij Maasmond volgt rechtstreeks uit die bij Hoek van Holland.

berekend met het spectrale golfmodel SWAN normaliter met  $H_{m0}$  wordt aangeduid. Golfhoogtes berekend met de empirische formulering van Bretschneider worden aangeduid met  $H_s$ . In dit rapport is overal voor de aanduiding  $H_s$  gekozen.

De basis van het belastingmodel voor de faalmechanismen golfoverslag, overloop en bekledingen is het Hydra-Ring model. Dit model wordt gevoed door de volgende invoer:

1. Statistiek: dit is de statistiek van de basisstochasten en hun onderlinge correlaties die de belangrijkste variabiliteit van het watersysteem beschrijven.
2. Database: de database geeft de vertaling van een representatieve set stochastcombinaties naar bijbehorende hydraulische belasting nabij de waterkering.
3. Informatie over dijkprofiel, kritiek overslagdebiet en frequentie.

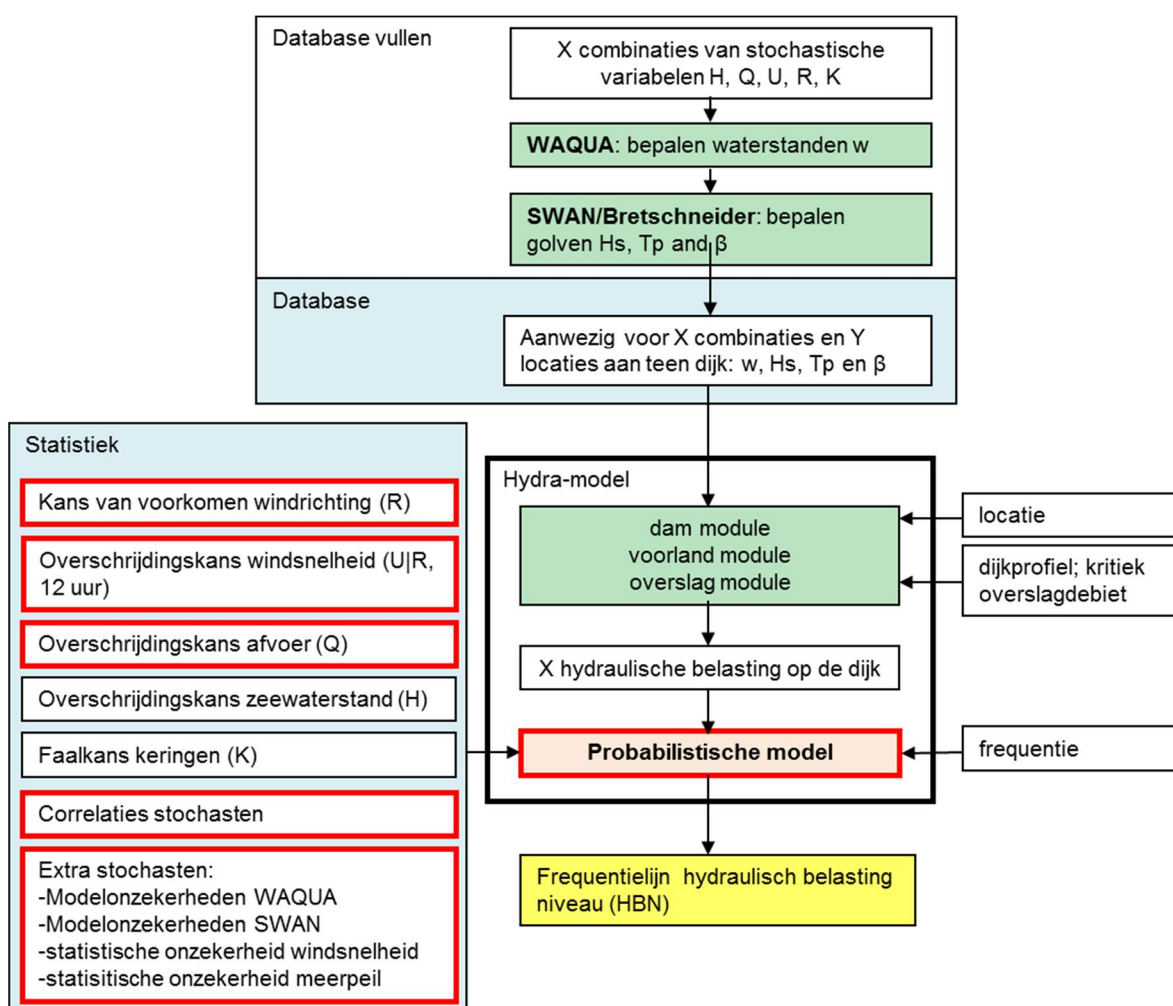
Het belastingmodel combineert realisaties van de basisstochasten, vertaalt deze naar een belasting bij de teen van de kering, berekent een overslagdebiet en bepaalt de kans op overschrijding van kritieke waarden. Het overslagdebiet wordt berekend met behulp van een generieke rekenmodule, waarbij een dam- en voorlandmodule kunnen worden ingeschakeld om het effect van lokale geometrie op de golfcondities te in rekening te brengen. In WBI-2017 zijn de dam- en voorlandmodule gewijzigd ten opzichte van eerdere versies. Deze modules zijn in deze studie echter niet gebruikt omdat de evaluatie van de dam- en voorlandmodule buiten de scope van deze studie valt. In deze studie beschouwen we alleen de waarden voor de Hydraulische Belastingen op de uitvoerlocaties. Deze liggen typisch 50 m van de teen van de dijk verwijderd.

Voor de opgegeven locatie vertaalt het Hydra-Ring model de belastingen uit de database nabij de dijk naar de belasting op de dijk. Vervolgens bepaalt het model aan de hand van een probabilistische berekening de overschrijdingskans van het hydraulisch belastingniveau voor de opgegeven locatie.

In de onderstaande paragrafen worden de genoemde onderdelen nader toegelicht. Daarbij wordt ook ingegaan op de verschillen tussen HR2006, WTI-2011 en WBI-2017. In Figuur 2.3 zijn de onderdelen die zijn gewijzigd in WBI-2017 rood omlijnd. De belangrijkste aanpassingen ten opzichte van WTI2011 voor het Benedenrivierengebied zijn:

- Nieuwe database met rekenresultaten van WAQUA, SWAN en Bretschneider berekeningen.
- Nieuw probabilistisch model Hydra-Ring i.p.v. Hydra-Zoet.
- Update van de windstatistiek en afvoerstatistiek.
- Introductie van kennisonzekerheden (statistische en modelonzekerheden).





Figuur 2.3 Schematische weergave belastingmodel Benedenrivieren. Hierin worden de componenten genoemd die nodig zijn bij het bepalen van de frequentielijn van het hydraulisch belasting niveau voor overslaggerelateerde faalmechanismen. Voor bepalen van de frequentielijn voor het faalmechanisme overloop (waterstanden) en bekledingen ziet het schema er iets anders uit. De rode componenten zijn aangepast in WBI-2017 t.o.v. WTI-2011 (dam- en voorlandmodule buiten beschouwing gelaten).

## 2.4 Database

In WBI2017 zijn nieuwe productiesommen met WAQUA en SWAN gedraaid voor het Benedenrivierengebied. Verschillen ten opzichte van WTI-2011 is het in de productiesommen zijn:

- Aanpassen correlatie Rijn- en Maasafvoer.
- Meenemen van Ruimte voor de rivier maatregelen.
- Uitvoerlocaties en bijbehorende rekenpunt in het WAQUA en SWAN model.
- Het meenemen van obstakels in SWAN.

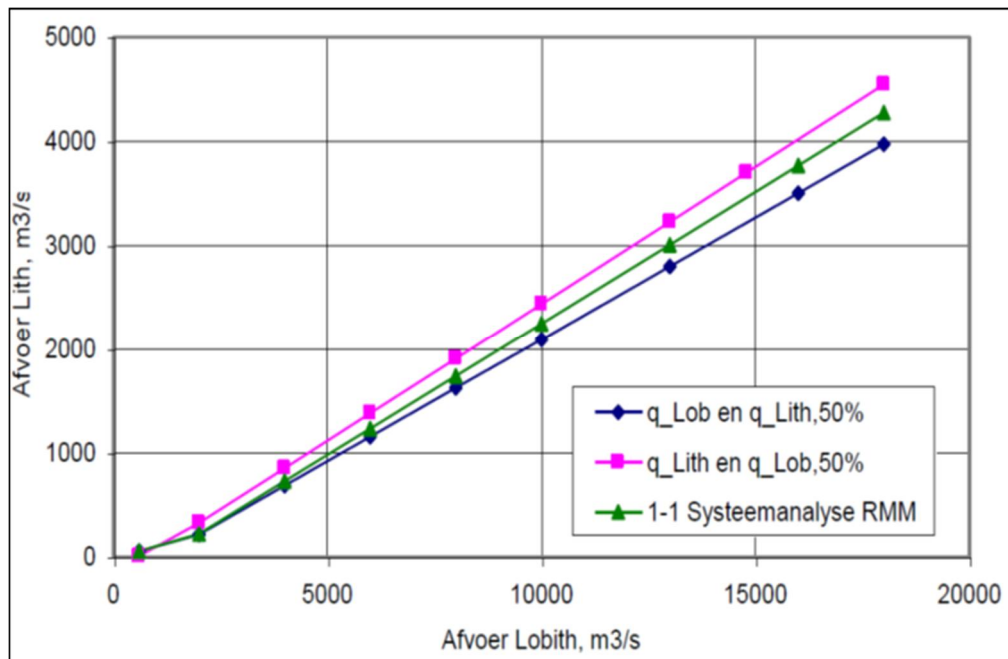
Bovenstaande punten worden hieronder toegelicht.

De databases van WBI2017 zijn niet voor 100% gevuld. In Deltares (2016c) is nagegaan in hoeverre de niet geheel gevulde database leidt tot onbetrouwbare resultaten. In het rapport wordt geconcludeerd dat dit voor slechts enkele individuele locaties het geval is.

### 2.4.1 Correlatie Rijn- en Maasafvoer

De Rijnafvoer bij Lobith is gecorreleerd met de Maasafvoer bij Lith. Deze correlatie speelt in het belastingmodel van de Benedenrivieren een rol bij zowel de productieberekeningen met WAQUA als bij de probabilistische berekeningen met Hydra-Ring.

Werd er in WTI-2011 nog uitgegaan van de zogenaamde 50%-relaties<sup>6</sup> of lijnen tussen de afvoeren van de Rijn bij Lobith en die van de Maas bij Lith, in WTI-2017 zijn deze 50%-lijnen verlaten; ze zijn vervangen door een lijn die de maximale correlatie tussen Rijn- en Maasafvoer weergeeft. De lijn die de maximale correlatie tussen Rijn en Maas weergeeft wordt ook de 1-1 relatie<sup>7</sup> genoemd. Ten behoeve van de productieberekeningen van WTI-2017 is uitgegaan van deze 1-1 relatie; zie voor motivatie (HKV, 2013). De belangrijke consequentie van het vervangen van de 50%-lijnen door één lijn is dat het aantal benodigde productieberekeningen met WAQUA wordt gehalveerd. Er worden dan namelijk slechts de Rijndominante sommen gemaakt; de Maasdominante sommen blijven achterwege. Het gevolg hiervan is dat vooral langs de Bergsche Maas de toetspeilen mogelijk onderschat worden; de onderschatting is echter klein en bedraagt enkele centimeters (Deltares, 2013a).



Figuur 2.4 50%-lijnen en 1-1 lijn voor de correlatie tussen Rijn en Maas.

### 2.4.2 Ruimte voor de riviermaatregelen

Alle Ruimte voor de rivier maatregelen in het benedenrivierengebied zijn weergegeven in Figuur 2.5. De belangrijkste zijn de waterberging Volkerak-Zoommeer, de ontpoldering Noordwaard en kadeverlaging Zuiderklip.

<sup>6</sup> Simpel gezegd geeft de 50%-lijn van de Rijn de mediane Rijnafvoer die bij een beschouwde Maasafvoer optreedt, terwijl de 50%-lijn van de Maas de mediane van de Maasafvoer die bij een gegeven Rijnafvoer optreedt.

<sup>7</sup> De 1-1 relatie tussen Rijn en Maas is, evenals de 50%-lijnen, bepaald op basis van dagwaarden van de Rijn- en de Maasafvoer (Fioole, 1999). N.B. De 1-1 lijn is dus niet afgeleid door de werklijnen van Lobith en Lith aan elkaar te koppelen.



Figuur 2.5 Ruimte voor de riviermaatregelen Benedenrivierengebied.

#### 2.4.2.1 Waterberging Volkerak-Zoommeer

Bij hoge zeewaterstanden sluiten de Europoortkeringen. Wanneer er een gelijktijdige hoge (vanaf zo'n 7000 m<sup>3</sup>/s) rivierafvoer optreedt dan kan het rivierwater dan niet afgevoerd worden. Voor die situaties kan waterberging Volkerak-Zoommeer ingezet worden. Wanneer de waterstand op het Hollandsch Diep bij Rak Noord groter is dan 2,6 m+NAP en de Europoortkeringen gesloten zijn (of gaan sluiten) worden de Volkeraksluizen geopend.

#### 2.4.3 Uitvoerlocaties en bijbehorende rekenpunten in het WAQUA en SWAN model

De uitvoerlocaties zijn in WBI2017 aangepast ten opzichte van WTI2011 (zie Deltares 2014b). Hierbij is de nieuwe dijkkringlijn 4.0 van RWS gebruikt. Voor het definiëren van de oeverlocaties zijn een aantal criteria gehanteerd, die consistent zijn voor alle watersystemen.

- In de WBI-2017 productiesommen zijn de uitvoerpunten gekozen om 100 meter op 80 meter uit de teen van de dijk. In het geval van droogval wordt de waterstand in de dichtstbijzijnde aslocatie en de bodemhoogte van het laagste punt in de cel bepaald. De laagste waarde van deze twee wordt gebruikt als waterstand.
- In WTI-2011 zijn drie sets met uitvoerpunten gekozen. Een 'basis set' gelegen op 50 meter uit de teen van de dijk, een 'extra set' gelegen op 100 meter uit de teen van de dijk en een 'natte set'. In de database zijn de locaties van de basis set opgenomen met uitzondering van de locaties waar droogval optreedt, hier is de extra of natte set gebruikt.

#### 2.4.4 Obstakels

Nieuw in WBI2017 is het meenemen van obstakels in de SWAN berekeningen. Dit geldt alleen voor de bredere wateren waar SWAN berekeningen zijn gemaakt.

## 2.5 Statistiek basisstochasten

De basisstochasten in het benedenrivierengebied betreffen windsnelheid, windrichting, afvoer Rijn bij Lobith, Afvoer Maas bij Lith, zeewaterstand en keringstoestand. De statistiek van deze stochasten, alsmede hun onderlinge correlatie worden hieronder nader toegelicht.

### 2.5.1 Afvoerstatistiek van de Rijn bij Lobith

De afvoerstatistiek van de Rijn bij Lobith is in WBI-2017 aangepast ten opzichte van WTI-2011. De nieuwe statistiek is bepaald met het model GRADE<sup>8</sup>, een combinatie van een stochastische neerslaggenerator en een hydraulisch/hydrologisch simulatiemodel van de Rijn bovenstrooms van Lobith. Met GRADE kunnen verschillende varianten worden beschouwd en doorgerekend: de situatie waarbij wel/geen overstromingen in de bovenstroomse delen van het stroomgebied worden beschouwd al dan niet in combinatie met noodmaatregelen om die overstromingen te beperken. Bij de berekeningen met GRADE voor de variant met overstromingen in Duitsland is daarnaast rekening gehouden met onzekerheden in klimaat, hydrologie en hydraulica (SOBEK). Onzekerheden in het SOBEK-model omvatten het al dan niet treffen van noodmaatregelen tegen overstromingen in Duitsland, de dijkhoogtes, het bergend volume achter de dijken, het al dan niet bezwijken van de dijken en de bodemfrictie; voor meer details wordt verwezen naar (Deltares, 2015a).

Tabel 2.3 Afvoeren van de Rijn bij Lobith inclusief 95% betrouwbaarheidsintervallen, voor de situatie met overstromingen in Duitsland in combinatie met noodmaatregelen. De mean en st.dev geven de in Hydra-Ring gebruikte statistische onzekerheid met een normale verdeling. (Bron: Deltares, 2015a).

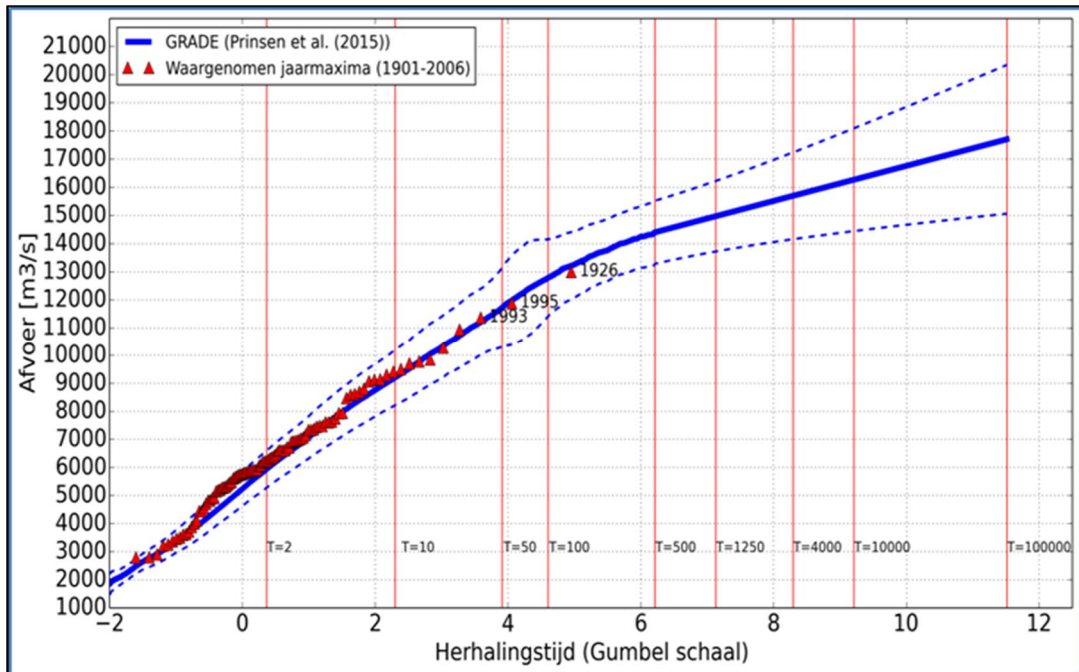
Herhalingstijd [jaar]	Afvoer [m <sup>3</sup> /s]	95% betrouwbaarheidsinterval		mean [m <sup>3</sup> /s]	St.dev [m <sup>3</sup> /s]
		ondergrens	bovengrens		
2	5.940	5.280	6.600	0	340
5	7.970	7.110	8.840	0	440
10	9.130	8.160	10.100	0	500
30	10.910	9.730	12.080	0	600
100	12.770	11.400	14.150	0	700
300	14.000	12.910	15.100	0	560
1.000	14.840	13.620	16.050	0	620
1.250	14.970	13.720	16.230	0	640
3.000	15.520	14.060	16.980	0	750
10.000	16.270	14.450	18.100	0	930
30.000	16.960	14.750	19.160	0	1120
100.000	17.710	15.060	2.0350	0	1350

De uitkomsten van GRADE met de variant met overstromingen in Duitsland in combinatie met noodmaatregelen worden gebruikt in WBI-2017 en staan beschreven in Tabel 2.3 en Figuur 2.6. Op basis van de betrouwbaarheidsintervallen van GRADE is een schatting gemaakt van de statistische onzekerheid. Aan de betrouwsintervallen is een normale verdeling gefit; de parameterschattingen zijn ook weergegeven in de tabel. Er geldt een gemiddelde van 0 m<sup>3</sup>/s en een standaardafwijking die afhangt van de herhalingstijd. De mean en standaardafwijking zijn invoer voor Hydra-Ring.

Voor een terugkeertijd van 1250 jaar wordt met GRADE een afvoer bij Lobith berekend van 14.970 m<sup>3</sup>/s (niet afgerond). De afvoer berekend met GRADE voor een herhalingstijd van 1250 jaar is daarmee aanzienlijk lager dan de huidige maatgevende afvoer van 16000 m<sup>3</sup>/s.

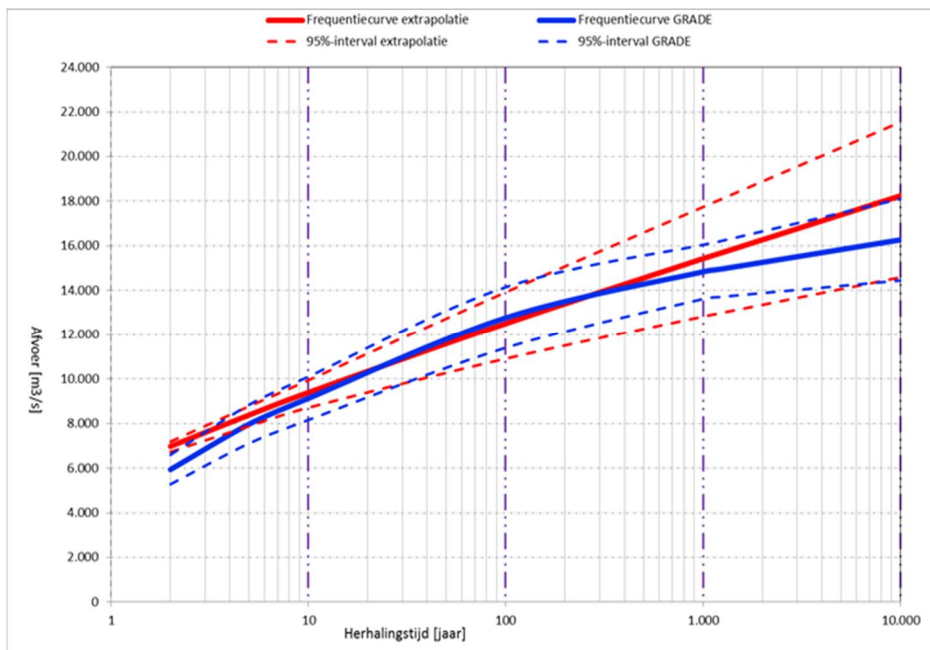
<sup>8</sup> GRADE = Generator of Rainfall And Discharge Extremes

De voornaamste oorzaak voor deze lagere afvoer is het feit dat er als gevolg van het meenemen van overstromingen bovenstrooms van Lobith afvlakking in de statistiek optreedt. Figuur 2.6 laat zien dat vanaf afvoeren van ca. 12.000 m<sup>3</sup>/s deze afvlakking optreedt in de werklijn van GRADE.



Figuur 2.6 Fit GRADE voor de Rijn bij Lobith rekening houdend met overstromingen in bovenstroomse delen van het stroomgebied en eventuele inzet van noodmaatregelen (Bron: Deltares, 2015a).

Vergeleken met de huidige werklijn, berekent GRADE voor herhalingstijden kleiner dan 10 jaar hogere afvoeren, ook is de onzekerheid van GRADE voor het lage bereik (1 – 10 jaar) relatief groot. Voor een herhalingstijd van 2 jaar bijvoorbeeld bedraagt het verschil tussen de extrapolatiemethode en GRADE ruim 1.000 m<sup>3</sup>/s (ca. 15%). In het midden bereik (herhalingstijden tussen 25 en 250 jaar) berekent GRADE hogere afvoeren. Voor het hoge en extreme bereik (herhalingstijd > 250 jaar) komt GRADE juist beduidend lager uit dan de huidige extrapolatiemethode. Het verschil loopt voor T = 10.000 jaar op tot bijna 2.000 m<sup>3</sup>/s. Voor herhalingstijden groter dan 10.000 jaar loopt het verschil nog gestaag op.



Figuur 2.7 Verschil tussen huidige werklijn en GRADE, inclusief 95%-betrouwbaarheidsintervallen.

## 2.5.2 Afvoerstatistiek van de Maas bij Lith

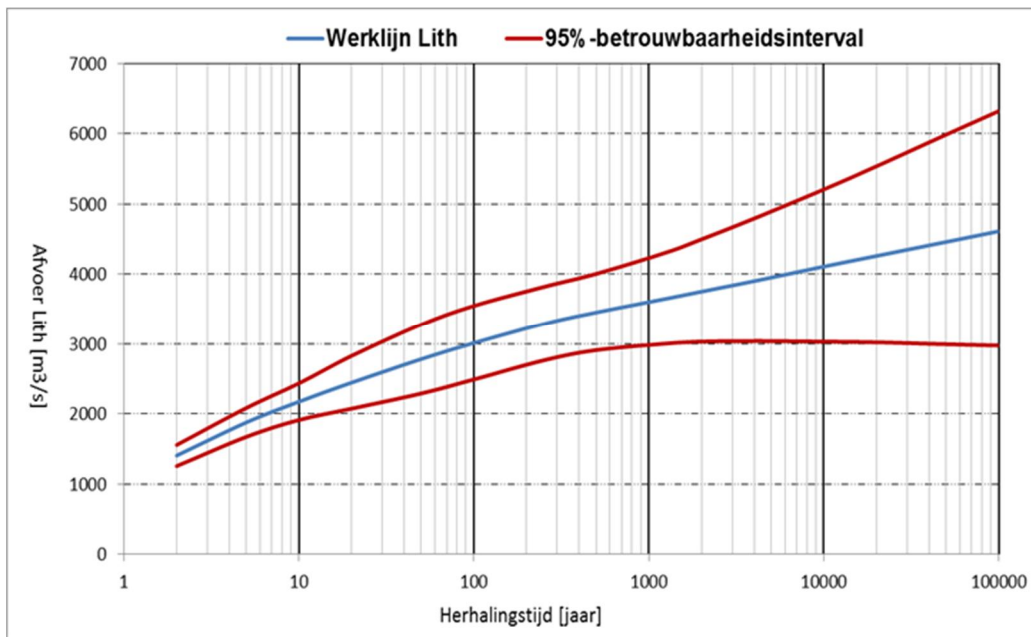
De afvoerstatistiek van de Maas bij Lith volgt uit de afvoerstatistiek bij Borgharen, welke gebaseerd is op GRADE voor de Maas. Hierbij zijn een aantal afvoergolven van de Maas bij Borgharen vertaald naar bijbehorende afvoergolven bij Lith door middel van WAQUA berekeningen (Deltares, 2016a) waarbij de Limburgse Maaskeringen als overstroombaar zijn meegenomen. Op basis van de 95%-betrouwbaarheidsintervallen is een schatting gemaakt van de statistische onzekerheid. Er is een normale verdeling gefit aan de betrouwbaarheidsintervallen. De afvoeren bij Lith, evenals de 95%-betrouwbaarheidsintervallen en de statistische parameters zijn weergegeven in Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Werklijn Maas bij Lith inclusief het 95%-betrouwbaarheidsinterval.

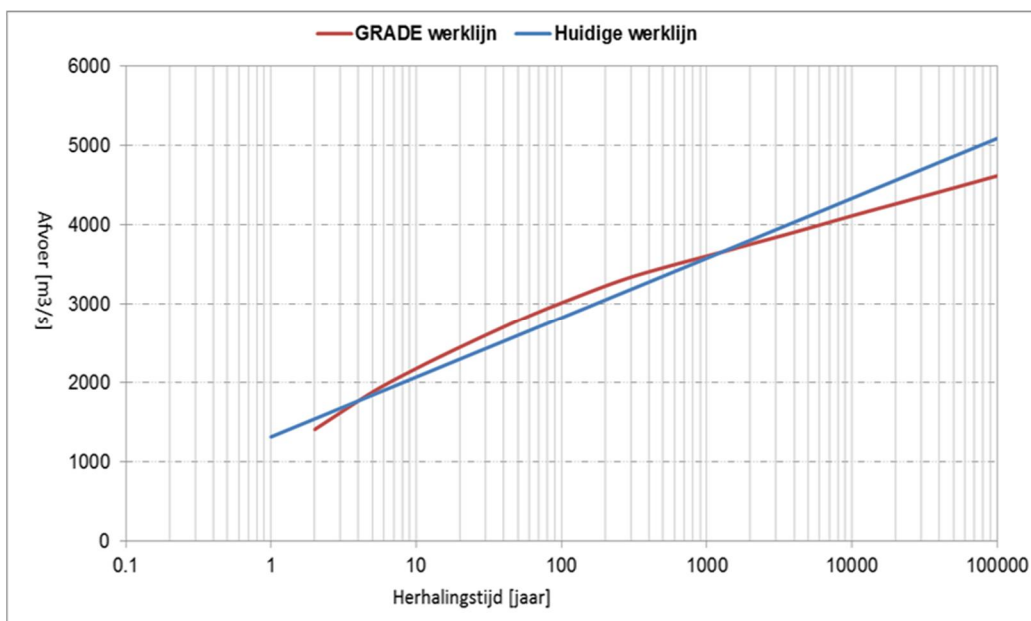
Herhalingstijd [jaar]	Afvoer Lith [m <sup>3</sup> /s]	95%-ondergrens [m <sup>3</sup> /s]	95%-bovengrens [m <sup>3</sup> /s]	Mean [m <sup>3</sup> /s]	St.dev [m <sup>3</sup> /s]
2	1409	1259	1559	0	75
5	1880	1675	2086	0	102
10	2177	1916	2439	0	130
20	2448	2077	2831	0	188
50	2785	2294	3282	0	247
100	3014	2493	3551	0	264
250	3291	2767	3822	0	263
500	3458	2913	4009	0	274
1250	3653	3005	4312	0	326
2000	3756	3032	4502	0	367
4000	3906	3042	4797	0	438
10000	4113	3032	5211	0	544
20000	4264	3023	5541	0	629
50000	4463	2996	5990	0	748
100000	4616	2977	6325	0	837



Ten opzichte van de vigerende werklijn resulteert de werklijn beschreven in Tabel 2.4 voor een herhalingsstijd van 1250 jaar in een afvoer bij Lith van dezelfde orde van grootte als de vigerende werklijn. De 1250-afvoer bedraagt volgens Tabel 2.4 3.650 m<sup>3</sup>/s (afgerond); dit is identiek aan de 1/1250 uit TMR-2006 en 30 m<sup>3</sup>/s hoger dan de officiële maatgevende afvoer uit HR-2006. Verder valt te constateren dat het verschil tussen Borgharen en Lith klein is voor afvoeren met hogere frequentie. Het verschil bedraagt 30 m<sup>3</sup>/s voor T = 2 jaar en loopt op tot ruim 300 m<sup>3</sup>/s voor T = 100.000 jaar.



Figuur 2.8 Werklijn Lith op basis van GRADE bij Borgharen inclusief het 95%- betrouwbaarheidsinterval.



Figuur 2.9 Huidige werklijn en werklijn GRADE bij Lith.

Figuur 2.9 laat een vergelijking zien tussen de huidige werklijn uit HR-2006 en de werklijn volgend uit GRADE voor station Lith. GRADE berekent voor herhalingstijden tussen 10 jaar en 1000 jaar hogere afvoeren dan de huidige werklijn; het verschil is het grootst voor  $T = 100$  jaar en bedraagt ca.  $190 \text{ m}^3/\text{s}$ . Vooral langs de dijktrajecten met relatief lagere normherhalingstijden (300 en 1.000 jaar) zal dit verschil leiden tot hogere waterstanden (ca. 1 dm). Voor herhalingstijden hoger dan 1.000 jaar is de werklijn van GRADE lager dan de huidige werklijn. Voor  $T = 100.000$  jaar bedraagt het verschil tussen beide werklijnen  $470 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### 2.5.3 Statistiek zeewaterstand Maasmond

De statistiek van de zeewaterstand te Maasmond volgt na twee correcties uit de statistiek van de zeewaterstand te Hoek van Holland. De statistiek van de zeewaterstand te Hoek van Holland, inclusief onzekerheidsbanden, is gepresenteerd in Tabel 2.5 en Figuur 2.10.

Zeewaterstanden te Maasmond liggen iets lager dan die te Hoek van Holland. De kansdichtheidsfuncties voor de zeewaterstand zijn getransformeerd van Hoek van Holland naar Maasmond door ze, net als in het verleden, met een vaste maat te verschuiven. Deze verschuiving is onafhankelijk van de beschouwde windrichting genomen en bedraagt 0.02 m. De statistiek van de zeewaterstand bij Hoek van Holland is gebaseerd op metingen t/m 1985. De hydraulische randvoorwaarden in WTI-2017 dienen representatief te zijn voor het peiljaar 2023. Daarom is een toeslag aangehouden voor de zeespiegelstijging van 0.1 m (Deltares, 2016a), dit is 2cm meer dan in WTI2011 het geval was. Deze toeslag wordt verwerkt door de zeewaterstanden simpelweg met deze maat te verschuiven.

De 95%-betrouwbaarheidsintervallen zijn afgeleid met een Bootstrapmethode (Geerse en Wojciechowska, 2014, 2015). Hierbij is gebruik gemaakt van statistische parameters uit een GEV<sup>9</sup> fit op basis van zeewaterstanden verkregen uit een lange synthetische reeks windgegevens van Hoek van Holland van het KNMI. Deze windgegevens beslaan een periode van 3439 jaren en zijn afgeleid van seizoensverwachtingen van het European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF (Van den Brink, 2015). Vervolgens is op basis van de 95%-betrouwbaarheidsintervallen een schatting gemaakt van de statistische onzekerheid. Er is een normale verdeling gefit aan de betrouwbaarheidsintervallen. Deze parameters zijn gebruikt als invoer van Hydra-Ring.

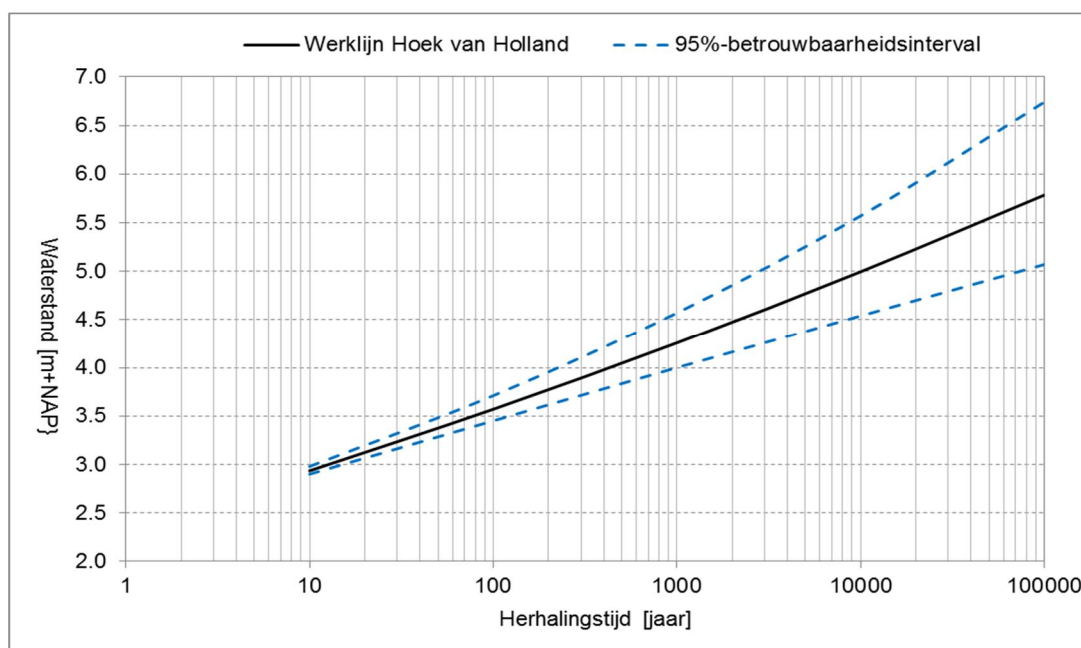
Tabel 2.5 Statistische onzekerheid zeewaterstandstatistiek Hoek van Holland, omni-directioneel.

Herhalingstijd [jaar]	Zeewaterstand [m+NAP]	95%- ondergrens [m+NAP]	95%- bovengrens [m+NAP]	Mean [m <sup>3</sup> /s]	St.dev [m <sup>3</sup> /s]
10	2.9348	2.90	2.98	0	0.02
100	3.5694	3.45	3.71	0	0.065
1000	4.2567	4.00	4.57	0	0.1425
10000	5.0000	4.54	5.57	0	0.2575
100000	5.7843	5.07	6.74	0	0.4175

N.B. de synthetische reeksen zijn enkel gebruikt om de betrouwbaarheidsbanden en derhalve de statistische onzekerheid in zeewaterstanden te schatten.

<sup>9</sup> Generalized Extreme Value kansverdeling





Figuur 2.10 Werklijn zeewaterstand Hoek van Holland.

#### 2.5.4 Windstatistiek

Wind heeft betrekking op twee onderdelen: windsnelheid (m/s) en windrichting (graden t.o.v. Noord). De statistiek van beide onderdelen is geactualiseerd in WBI-2017. Voor de benedenrivieren wordt de windstatistiek van het station Schiphol gebruikt.

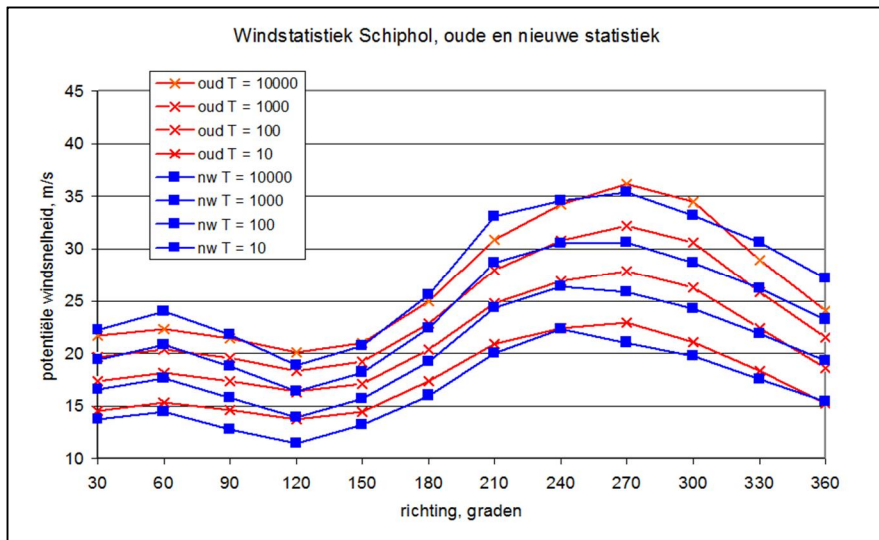
##### 2.5.4.1 Windsnelheid

In het kader van WTI-SBW is recentelijk in opdracht van Rijkswaterstaat onderzoek gedaan naar de windstatistiek waarbij o.a. windmetingen uit de periode vanaf 1970 zijn gebruikt. Op basis van deze langere en betrouwbaardere meetreeksen is door Deltares in samenwerking met het KNMI nieuwe windstatistiek voor potentiële windsnelheden afgeleid voor een groot aantal windstations verspreid over heel Nederland (Caires, 2009). Deze statistiek geeft per windsector van 30 graden de overschrijdingsfrequenties van hoge/extreme windsnelheden voor overschrijdingsfrequenties tot van circa 2 keer per jaar. In totaal zijn er dus 12 windsectoren.

Merk op dat voor het belastingmodel voor de Benedenrivieren gebruik wordt gemaakt van richtingsafhankelijke statistiek verdeeld over 16 windsectoren, hiertoe heeft een vertaling van 12 naar 16 sectoren plaats gevonden. Deze vertaling is beschreven in Wojciechowska (2016). De in deze paragraaf beschreven statistiek betreft de statistiek voor 12 sectoren.

Een vergelijking tussen de windstatistiek zoals gebruikt in WTI-2011 (volgens het Rijksoort-Weibull model) en de nieuwe windstatistiek voor het windstation Schiphol is weergegeven in Figuur 2.11. Hieruit kan geconcludeerd worden dat voor de richtingen met de hoogste snelheden:

- De kans op zeer hoge windsnelheden in de sector 210°N en 330°N wordt groter
- De kans op hoge windsnelheden in de sector 240°N blijft gelijk
- De kans op hoge windsnelheden in de sector 270°N en 300°N wordt kleiner.



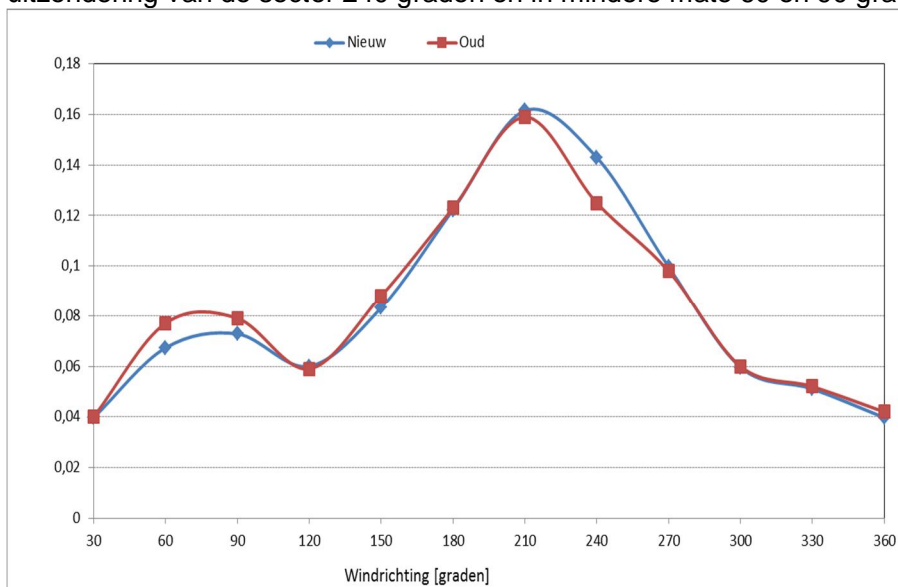
Figuur 2.11 Vergelijking oude (Rijkoort Weibull) en nieuwe (Exponentieel) windstatistiek voor relevante windstations en herhalingsstijden. Bron: Deltares, 2016a

Voor probabilistische berekeningen is naast de statistiek van hoge windsnelheden ook de statistiek van het lage bereik nodig. Deze statistiek is afgeleid van uurlijkse winddata (Geerse en Verkaik, 2010).

De richtingsafhankelijke statistiek van de windsnelheid is bepaald door het samenvoegen van de statistiek van de hoge en lage windsnelheden. Daarnaast is transformatie van de (half)jaarlijkse windstatistiek naar de statistiek voor kortere periodes per windrichting. In Hydra-Ring betreft het per windrichting periodes van een getij of 12 uur.

### Windrichting

Aan de hand van de windmetingen is ook de kansverdeling van de windrichting opnieuw bepaald. Figuur 2.12 laat voor station Schiphol het verschil zien tussen de oude en nieuwe kansverdeling van de windrichting (sectoren van 30 graden). Het verschil is marginaal, met uitzondering van de sector 240 graden en in mindere mate 60 en 90 graden.



Figuur 2.12 Vergelijking van de kansverdeling op windrichting (30 graden) voor Schiphol. Bron: Deltares, 2016a

- 2.5.5 Statistiek beheertoestand Europoortkering en inzet berging Volkerak-Zoommeer  
 In de kans dat een sluitcommando ook daadwerkelijk resulteert in sluiting speelt de faalkans van de Europoortkering een centrale rol. Deze is in WTI-2017 gelijk gesteld aan 1/100 per sluitcommando en is onveranderd ten opzichte van WTI-2011. Indien sprake is van falen, dan betekent dit dat zowel de Maeslant- als de Hartelkering niet sluiten en dus geheel geopend blijven. Bij niet falen geldt dat de keringen sluiten conform het sluitregiem.

De inzet van de berging Volkerak-Zoommeer is gekoppeld aan het sluiten van de Europoortkering: pas als de Europoort kering is gesloten en als een kritieke waterstand op Rak Noord wordt overschreden wordt de berging ingezet. Het falen van de inzet van de Europoortkering leidt dan automatisch tot het niet inzetten van de berging Volkerak-Zoommeer. De faalkans van de inzet van het Volkerak-Zoommeer als bergingsgebied wordt dus niet meegenomen.

## 2.6 Extra stochasten kennisonzekerheid

- 2.6.1 Modelleren kennisonzekerheid  
 Kennisonzekerheid (statistische en modelonzekerheid) kan als extra stochast worden toegevoegd aan Hydra-Ring.

Hydra-Ring houdt voor het Benedenrivierengebied rekening met de volgende kennisonzekerheden:

1. Modelonzekerheid lokale waterstand,
2. Modelonzekerheid golfhoogte ( $H_s$ ),
3. Modelonzekerheid golfperiode ( $T_p$  en/of  $T_{m-1,0}$ ),
4. Statistische onzekerheid Rijnafoer bij Lobith,
5. Statistische onzekerheid Maasafvoer bij Lith,
6. Statistische onzekerheid zeewaterstand bij Maasmond/Hoek van Holland,
7. Statistische onzekerheid windsnelheid Schiphol
8. Voorspelfout sluiting Europoortkering en inzet Volkerak-Zoommeer

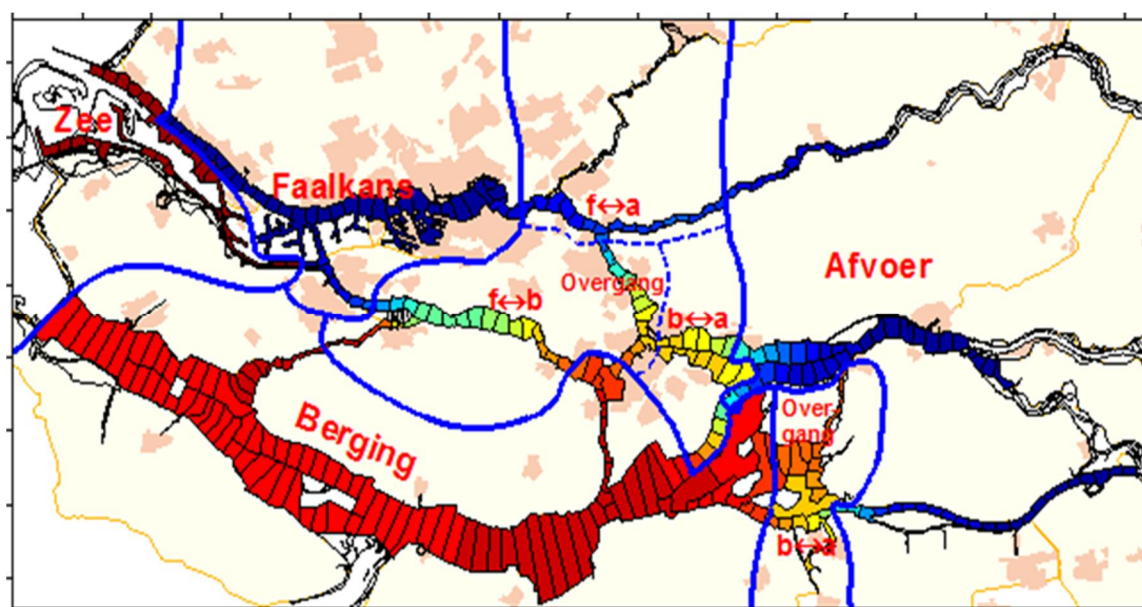
- 2.6.2 Modelonzekerheid waterstand

Met betrekking tot kwantificering en implementatie in Hydra-Ring van modelonzekerheid in lokale waterstand gelden de volgende uitgangspunten; zie voor een uitgebreide beschrijving (Diermanse, 2013). Als eerste uitgangspunt geldt dat modelonzekerheid (in lokale waterstand) normaal verdeel is en wordt (in principe) uitgedrukt in een bias ( $\mu$ ) en een standaardafwijking ( $\sigma$ ). Omdat de productieberekeningen uitgevoerd worden met gekalibreerde en gevalideerde modellen, waarbij de kalibratie als doel heeft een bias te minimaliseren, is in WTI-2017 de modelonzekerheid in waterstand enkel uitgedrukt in een standaardafwijking en de bias is gelijk aan nul gesteld voor alle riviertakken. Het tweede uitgangspunt is dat er één getal wordt gebruikt voor het hele waterstandsbereik voor de betreffende locatie. Bij de vaststelling van dit getal is rekening gehouden met extreme situaties. Het uitgangspunt houdt feitelijk in dat modelonzekerheid niet afhangt van de terugkeertijd. Voor lage terugkeertijden kan er bijgevolg sprake zijn van een overschatting van modelonzekerheid, maar dit bereik is in veel gevallen minder relevant voor de hydraulische belastingen.

Modelonzekerheid voor het gebied van de Benedenrivieren is beschreven in (Deltares, 2015c). Zonder details te vermelden, doen we hier opgave van gemaakte schattingen voor modelonzekerheid. Modelonzekerheid in lokale waterstand voor de Benedenrivieren is beschreven in (Deltares, 2015b). In vergelijking met Bovenrivieren spelen in het

Benedenrivierengebied naast afvoeren, zeewaterstanden/getij, wind en de Europoortkering een belangrijke rol. Daarnaast worden de Benedenrivieren bedreigd door beide rivierafvoeren: Rijn en Maas. Afhankelijk van locatie spelen al deze aspecten in meer of mindere mate een rol. Om deze reden is het gebied van de Benedenrivieren opgesplitst in deelgebieden zoals beschreven in Figuur 2.13. De deelgebieden zijn:

- Afvoergebied: De maatgevende situatie wordt in dit gebied (volledig) bepaald door hoge rivierafvoer van orde 16.000-17.000 m<sup>3</sup>/s voor Rijndominantgebied of 3.800-4.000 m<sup>3</sup>/s voor Maasdominantgebied.
- Zeegebied: De maatgevende situatie wordt in het zeegebied volledig bepaald door hoge stormvloed langs de Hollandse kust waarbij een waterstand te Maasmond van ca. 5,00 m+NAP wordt bereikt. De Europoortkeringen zijn gesloten en veroorzaken enige opstuwning in het Europoortgebied.
- Faalkansgebied: De maatgevende situatie in dit gebied is een middelbare storm met een waterstand van ca. 3,5 m+NAP te Maasmond in combinatie met het falen van de sluiting van de Europoortkeringen.
- Bergingsgebied: De maatgevende situatie in dit gebied is een middelbare afvoer van 6.000 á 10.000 m<sup>3</sup>/s (met soms nog hogere afvoeren) die samenvalt met een middelbare storm die de afvoer vanuit de Rijn- en Maasmonding naar zee enige tijd stremt. De Europoortkeringen zijn meestal gesloten. Door de relatief hoge afvoer zijn de hoge waterstanden in dit gebied gevoelig voor de stormduur, al dan niet in combinatie met het faseverschil tussen opzet en getij.
- Overgangsggebied: In het overgangsggebied is sprake van een combinatie van bovenstaande bedreigingen in wisselende samenstelling. Er komen drie overgangen voor:
  - f-a: De maatgevende situatie is altijd met open Europoortkeringen, maar gaande van het faalkansgebied naar het rivierengebied wordt de rol van de afvoer steeds belangrijker en die van de stormopzet minder.
  - f-b: De maatgevende situatie gaat gaande van faalkansgebied naar bergingsgebied van open naar dichte keringen, onder maatgevende omstandigheden stijgt de afvoer van ca. 2.000 naar 6.000 á 10.000 m<sup>3</sup>/s bij vrije constante middelbare stormopzet van ca. 3,5 m+NAP.
  - b-a: De maatgevende situatie gaat gaande van berging naar afvoergebied van dichte naar open stormvloedkeringen waarbij de rol van de afvoer steeds hoger wordt en die van de stormopzet terugloopt.



Figuur 2.13 Deelgebieden van het benedenrivierengebied: zee-, faalkans-, afvoer-, bergings- en overgangsgebied.

Onderstaande Tabel 2.6 bevat de schattingen voor modelonzekerheid per gebied dat wordt gedomineerd door afvoer van de Rijn.

Tabel 2.6 Modelonzekerheid waterstand per deelgebied in regio 3: Benedenrivieren Rijn

Gebied	Standaard deviatie [m]	
	Open keringen	Gesloten keringen
Afvoergebied Lek: bovenstrooms van km 981 Boven Merwede Beneden Merwede bovenstrooms van km 968, Nieuwe Merwede bovenstrooms van 970	0.15	0.15
Faalkansgebied Nieuwe Maas Nieuwe Waterweg binnenzijde Oude Maas, beneden km 997	0.15	0.25
Zeegebied: het gebied buiten de stormvloedkeringen	0.15	0.15
Bergingsgebied	0.25	0.30
Overgangsgebied		
f-a	0.15	0.25
f-b	0.25	0.30
b-a	0.25	0.30

Per deelgebied in regio 3 gelden in principe verschillende onzekerheidsbronnen. In het afvoergebied van regio 3 is de Rijnafvoer de belangrijkste stochast en de belangrijkste onzekerheidsbronnen hangen dan voornamelijk hiermee samen. Ruwheden en morfologische veranderingen onder extreme omstandigheden vormen dan ook de belangrijkste onzekerheidsbronnen. Voor het faalkansgebied van regio 3 vormt de onzekerheid in stormopzetduur de belangrijkste onzekerheidsbron. Andere bijdragende onzekerheidsbronnen zijn faseverschil tussen getij en opzet, windmodellering, schematisatie

en onafhankelijk falen de keringen. De belangrijkste onzekerheidsbronnen voor het bergingsgebied zijn stormopzetduur, faseverschil tussen opzet en getij, windmodellering en ruwheden/morfologische veranderingen. In overgangsgebieden is sprake van een combinatie van bovengenoemde onzekerheidsbronnen in wisselende samenstelling.

Regio 4 bestaat uit locaties in de Benedenrivieren die Maasgedomineerd zijn; deze liggen langs de Bergsche Maas en de Maas. Het betreft alle locaties die bovenstrooms van km 246 liggen.

Tabel 2.7 Modelonzekerheid waterstand in regio 4: Benedenrivieren Maas

Riviertak	Bias [m]	Standaardafwijking [m]
Bergsche Maas en Maas	0	0.35

In het rivierengebied waar de Maas dominant is gelden in principe dezelfde onzekerheidsbronnen als in het Rijndominante gebied. Daarnaast draagt de onzekerheid in laterale toestroom bij aan de totale onzekerheid.

### 2.6.3 Modelonzekerheid golfcondities

Ruwweg zijn drie onzekerheidsbronnen onderscheiden:

- 1) benadering van fysische processen
- 2) onzekerheden in modelinvoer (bijv. wind boven open water), schematisatie
- 3) het in zijn geheel niet modelleren van fysische aspecten en/of grootheden (bijv. stroming bij gebruik Bretschneider). Bij het gebruik van de formulering van Bretschneider geldt een sterke versimpeling van de werkelijkheid ten aanzien van bodemhoogte en strijklengte en er worden aannames gedaan ten aanzien van het verwaarloosbaar zijn van o.a. stroming.

Voor de brede wateren (Haringvliet, Hollandsch Diep en Biesbosch) is SWAN toegepast om te komen tot golfcondities aan de teen van de kering. Voor de smalle wateren in het rivierengebied wordt Bretschneider toegepast. De modelonzekerheid in golfparameters voor de verschillende systemen is weergegeven in Tabel 2.8, zie ook (Deltares, 2015c).

Tabel 2.8 Modelonzekerheid golfparameters systemen, uitgedrukt in dimensieloze relatieve afwijkingen

Hoofdsysteem	$H_s$		$T_{m-1,0}$		$T_p$	
	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$
I. Kust, IJsselmeer	-0.01	0.19	-0.04	0.11	-	-
II. Brede wateren in rivierengebied	-0.06	0.15	-0.11	0.04	-0.01	0.07
III. Smalle wateren in rivierengebied	-0.04	0.27	-	-	+0.03	0.13

### 2.6.4 Statistische onzekerheid basisstochasten

#### 2.6.4.1 Statistische onzekerheid Rijnafvoer bij Lobith

Voor de statistische onzekerheid van de Rijnafvoer bij Lobith wordt verwezen naar sectie 2.5.1.

#### 2.6.4.2 Statistische onzekerheid Maasafvoer bij Lith

Voor de statistische onzekerheid van de Maasafvoer bij Lith wordt verwezen naar sectie 2.5.2.

#### 2.6.4.3 *Statistische onzekerheid zeewaterstand Maasmond*

Voor de statistische onzekerheid van de zeewaterstand te Maasmond wordt verwezen naar sectie 2.5.2

#### 2.6.4.4 *Statistische onzekerheid windsnelheid*

De afgeleide statistische onzekerheid van de windsnelheid is afhankelijk van de herhalingstijd, zie (Deltares, 2016a). Dit wil zeggen dat de spreiding afhankelijk is van de herhalingstijd. De windsnelheid is verder afhankelijk van de windrichting. De consequentie hiervan is dat ook van de richtingsafhankelijke windsnelheid de statistische onzekerheid bekend moet zijn. Verkennende berekeningen met Hydra-Ring hebben laten zien dat het verschil in hydraulische belasting (zowel waterstand als HBN) berekend op basis van tussen een constante spreiding danwel en een spreiding die afhankelijk is van de herhalingstijd op de hydraulische belasting (zowel waterstand als HBN) marginaal is (enkele millimeters). Om deze reden maar ook andere praktische bezwaren (o.a. complexiteit) is ervoor gekozen om de statistische onzekerheid in windsnelheid uit te drukken in een constante spreiding. Omdat de statistische onzekerheid van de richtingsafhankelijke windstatistiek groter is (vanwege relatief weinig data dan bij de omni-directionele windstatistiek) dan de statistische onzekerheid van de omni-directionele statistiek, is besloten om de spreiding behorende bij het 10.000-kwantiel te gebruiken, zie (Deltares, 2016a). De gehanteerde spreiding is 0.047 voor het gehele bereik.

#### 2.6.5 Voorspelfout sluiting Europoortkering en inzet Volkerak-Zoommeer

Bij de kans op een sluitcommando spelen naast bovengenoemde sluitcriteria de statistiek van de nauwkeurigheid van de waterstandsvoorspelling voor Hoek van Holland een rol. Deze statistiek wordt beschreven met een normale verdeling met gemiddelde  $\mu$  gelijk aan -0.09 m en een standaardafwijking  $\sigma$  gelijk aan 0.18 m. Dit is de enige vorm van kennisonzekerheid (modelonzekerheid) die reeds in eerdere WTI edities is meegenomen. De hier gehanteerde kwantificering komt overeen met die voor HR2006 en WTI2011.

Zoals besproken in paragraaf 2.5.5 is de inzet van de berging Volkerak-Zoommeer gekoppeld aan de sluiting van de Europoortkering. Dit betekent dat de voorspelfout voor de sluiting van de Europoortkering ook van invloed is op de inzet van berging Volkerak-Zoommeer.

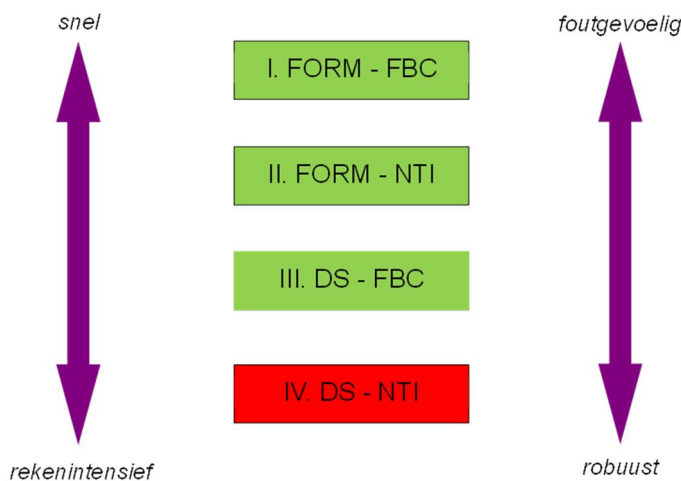
## 2.7 Probabilistisch model

### 2.7.1 Rekentechniek

De vigerende HR-2006 zijn bepaald met Hydra-B. De betreffende rekenmethode is later geïmplementeerd in Hydra-Zoet. Daar waar in WTI-2011 gebruik wordt gemaakt van Hydra-Zoet, wordt in WBI-2017 gebruik gemaakt van het nieuwe probabilistische instrumentarium Hydra-Ring. Ten aanzien van deze ontwikkeling zijn keuzes gemaakt over de implementatie van de functionaliteit in de belastingmodellen op basis van "Scientific Documentation Hydra-Ring" (Diermanse et al, 2013).

Een groot verschil tussen Hydra-Ring en Hydra-Zoet is de rekentechniek. Hydra-Zoet maakt gebruik van numerieke integratie. In Hydra-Ring kunnen veel verschillende rekentechnieken gekozen worden. Door het meenemen van kennisonzekerheden in de vorm van extra stochasten, zijn de rekentijden enorm opgelopen bij gebruik van de numerieke integratie. Voor het benedenrivierengebied zijn om deze reden andere rekentechnieken gehanteerd:

FORM-FBC<sup>10</sup>. Dit is een FORM berekening in combinatie met de tijdsintegratiemethode FBC. Indien een FORM-FBC berekening instabiliteiten (wiggles) vertoont, wordt automatisch overgestapt op FORM in combinatie met NTI. Bij blijvende instabiliteiten wordt automatisch overgestapt op de robuuste rekentechniek Directional Sampling in combinatie met FBC. Een volgende stap zou zijn om te rekenen met Directional Sampling in combinatie met NTI, echter dit is qua rekentijden momenteel niet haalbaar.



Figuur 2.14 Schema voor de keuze van de rekentechniek.

## 2.7.2 Verschil FORM en DS

De faalkans wordt door FORM (First Order Reliability Method) bepaald door in de kansruimte direct naar het illustratiepunt te zoeken. Directional Sampling doet verschillende trekkingen in het faalgebied. FORM is daarmee een snelle methode, maar kan niet goed omgaan met onregelmatigheden in de belastingfunctie.

## 2.7.3 Verschil NTI en FBC

Net als in WTI-2011 wordt er in het probabilistische model gewerkt met trage en snelle stochasten. De vorm (tijdsverloop) van de afvoer als trage stochast is in Hydra-Ring gemodelleerd door middel van trapezia van 30 dagen in de basis, zie Figuur 2.15. De topduren van de trapezia hangen af van het afvoerniveau; voor Rijnafvoeren hoger dan 6.000 m<sup>3</sup>/s is de topduur constant en bedraagt 12 uur. Voor de snelle stochasten wordt een blokduur van 12 uur aangehouden.

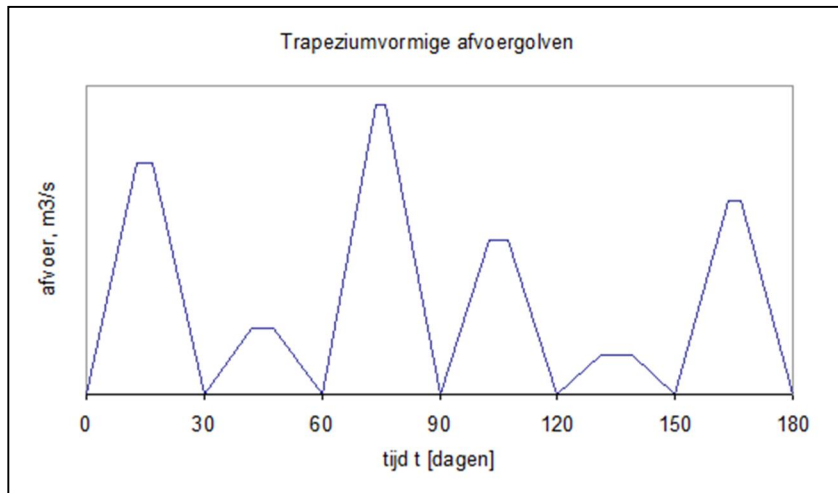
De rekentechniek NTI doorloopt de 30 dagen numeriek netjes in tijdstappen van een halve dag (getijperiode), dus 60 stappen totaal. FBC maakt er 1 grote tijdstap van. De grootte van die tijdstap is afhankelijk van het ontwerppunt op twee manieren:

- 1 is afvoer/meerpeil dominant (trage stochast) of zee, of wind (snelle stochast)?
- 2 de waarde van de trage stochast (afvoer/meerpeil) in het ontwerppunt: hoe lang wordt deze gemiddeld overschreden bij een enkele overschrijding?

<sup>10</sup> FORM-FBC wordt gebruikt voor HBN berekeningen. Voor waterstanden wordt gebruik gemaakt van FDIR-FBC. In FDIR-FBC wordt in het geval dat FORM niet convergeert automatisch overgestapt op Directional Sampling.



FBC bepaalt in 3 iteraties welke waarde van de tijdstap optimaal is. Daarom is FBC 20 keer sneller dan NTI ( $60/3=20$ ). Echter, voor gebieden waar zowel snelle als langzame stochasten van belang zijn, zal NTI wellicht nauwkeuriger zijn. Zie voor details Diermanse et al (2013).



Figuur 2.15 Modelling afvoeren door trapezia, basisduur 30 dagen, topduur hangt af van topwaarde.



## 3 Verschilanalyse BER

### 3.1 Inleiding

Doelstelling van de analyse van verschillen tussen HB uit WTI-2011 en WBI-2017 is om vertrouwen te krijgen in de afgeleide HB2017 en om verschillen met WTI-2011 te kunnen verklaren. Daartoe worden in deze paragraaf voor een beperkt aantal locaties de Hydra-Ring resultaten vergeleken met onder andere Hydra-Zoet resultaten.

De verschilanalyse richt zich voornamelijk op de Hydraulische Belastingen t.b.v. de semi-probabilistische toets op vakniveau. Het gaat hier dus vooral om (de statistiek van de) lokale waterstanden en HBN's. Maar er wordt ook ingegaan op de invoer van de eenvoudige toets en de marginale statistiek van de golven.

### 3.2 Werkwijze analyse resultaten

Per locatie worden voor lokale waterstand, HBN en golfhoogte de volgende stappen doorlopen:

- 1 Vergelijk van Hydra-Zoet (zonder onzekerheden, nieuwe statistiek) resultaten met Hydra-Zoet (oude statistiek) referentieberekeningen: Hiermee wordt het verschil als gevolg van nieuwe statistiek geduid.
- 2 Vergelijking van de performance van de verschillende rekentechnieken in Hydra-Ring.
- 3 Vergelijk van Hydra-Ring (zonder onzekerheden, nieuwe statistiek) resultaten met Hydra-Zoet (nieuwe statistiek) referentieberekeningen: Hiermee wordt het verschil als gevolg van overgang op een nieuwe rekentechniek (Hydra-Ring met FDIR en Hydra-Zoet met Numerieke Integratie) en de nieuwe database geduid.
- 4 Vergelijking Hydra-Ring resultaten met onzekerheden en zonder onzekerheden. Hiermee wordt het effect van het meenemen van onzekerheden geduid.
- 5 Vergelijk Hydra-Zoet (zonder onzekerheden, oude statistiek en oude normen) met Hydra-Ring (met onzekerheden, nieuwe statistiek en nieuwe normen)

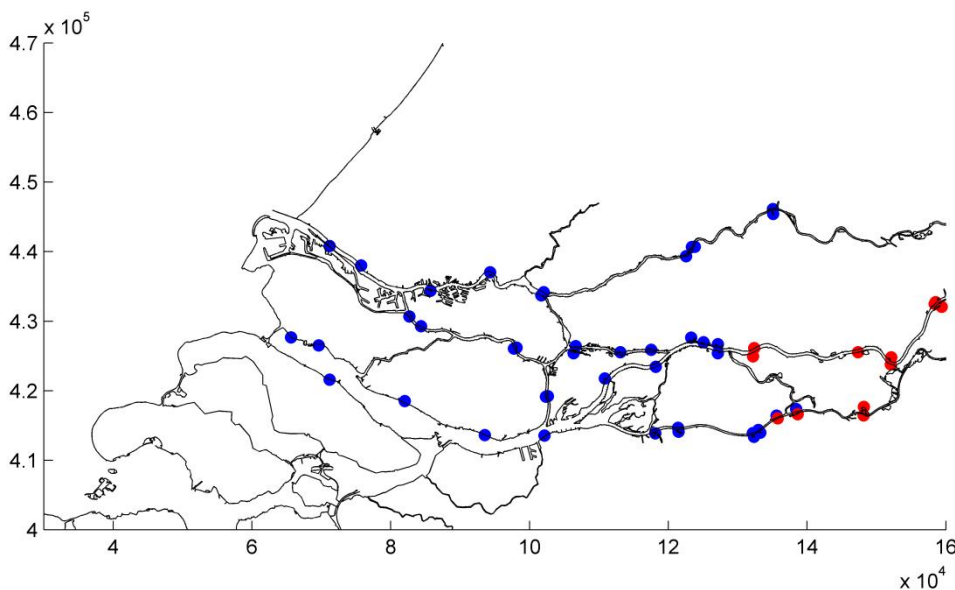
Voor stap 1 t/m 4 worden alle berekeningen voor het gehele frequentiebereik uitgevoerd.

Voor de marginale statistiek van de golfhoogte is enkel stap 3 en 4 uitgevoerd. De vergelijking tussen de oude en nieuwe windstatistiek (stap 1) niet gemaakt, omdat de marginale statistiek van de golfhoogte in WBI-2017 voor het eerst als belastingparameter wordt afgeleid. Stap 2 wordt niet gemaakt omdat er voor het bepalen marginale statistiek van de golfhoogte alleen rekentechniek I is toegepast.

### 3.3 Uitgangspunten berekening

#### 3.3.1 Algemeen

In de analysefase zijn de resultaten op een subset van alle beschikbare locaties beschouwd. De selectie (zie Figuur 3.1) zorgt voor een goede ruimtelijke dekking, met 56 locaties verdeeld over het benedenrivierengebied. Merk op dat als gevolg van herdefinitie van uitgangspunten met betrekking tot ligging uitvoerlocaties, de ligging van locaties niet gelijk hoeft te zijn ten opzichte van CR2011. In die gevallen waarvoor locaties verschoven zijn, is de dichtstbijzijnde locatie uit de CR2011 locaties gebruik voor de analyse.



Figuur 3.1 Geselecteerde locaties in het benedenrivierengebied (blauw: locaties behorende bij benedenrivierengebied en rood: locaties behorende bij bovenrivierengebied in CR2011).

### 3.3.2 Hydra instellingen

Om de drie vergelijkingen te kunnen maken zijn er voor de genoemde locaties vier type berekeningen gemaakt, te weten:

- Hydra-Zoet zonder onzekerheden en nieuwe windstatistiek (Tabel 3.1);
- Hydra-Zoet zonder onzekerheden en oude statistiek (Tabel 3.2);
- Hydra-Ring met onzekerheden en nieuwe windstatistiek (Tabel 3.3);
- Hydra-Ring zonder onzekerheden en nieuwe windstatistiek (Tabel 3.3).

De instellingen van bovengenoemde berekeningen worden hieronder besproken.

Tabel 3.1 Instellingen berekening Hydra-Zoet zonder onzekerheden en met nieuwe statistiek

Berekening Hydra-Zoet zonder onzekerheden en met nieuwe statistiek		
Onderdeel	Naam	Bestand & bron
Instrument	Hydra-Zoet versie 1.6.3	
Databases	Benedenrivieren CR2011 Bovenrivieren TMR2006	
Statistiek	Zeewaterstand Maasmond	WBI 2011, zie Deltares (2016a)
	Windsnelheid per richting Schiphol	WBI 2017, zie Deltares (2016a)
	Kans op windrichting Schiphol	WBI 2017, zie Deltares (2016a)
	Afvoerstatistiek Lobith	WBI 2017, zie Deltares (2016a)
	Afvoerstatistiek Lith	WBI 2017, zie Deltares (2016a)
Profiel (tbv HBN en bekledingen)	Dijknormaal	MetalInfo_BER.xlsx
	ruwheidsparameter	1.0
	Helling	Standaard 1 op 3
Criteria HBN	Kritiek overslagdebiet	1 l/s/m
uitvoer	belastingparameter	Lokale waterstand, HBN
		Bij 10 herhalingstijden berekent Hydra de bijbehorende belastingparameter
	oeverlocaties	56

In Tabel 3.2 zijn alleen de onderdelen weergegeven die zijn aangepast t.o.v. de Hydra-Zoet berekening met nieuwe statistiek.

Tabel 3.2 Instellingen Berekening Hydra-Zoet zonder onzekerheden en met oude statistiek

Berekening Hydra-Zoet zonder onzekerheden en met oude statistiek		
Onderdeel	Naam	Bestand & bron
Statistiek	Zeewaterstand Maasmond	WTI 2011, zie Deltares (2016)
	Windsnelheid per richting Schiphol	WTI 2011, zie Deltares (2016)
	Kans op windrichting Schiphol	WTI 2011, zie Deltares (2016)
	Afvoerstatistiek Lobith	WTI 2011, zie Deltares (2016)
	Afvoerstatistiek Lith	WTI 2011, zie Deltares (2016)

Tabel 3.3 Instellingen berekening Hydra-Ring met/zonder onzekerheden en nieuwe wind statistiek

Berekening Hydra-Ring met/zonder onzekerheden en nieuwe wind statistiek		
Onderdeel	Naam	Bestand & bron
Instrument	Hydra-Ring versie 10 juni 2015	-
Databases	Benedenrivierengebied WTI2017	HRD benedenrijn.sqlite (mei, 2016) HRD benedenmaas.sqlite (mei, 2016)
Statistiek	Statistiek zeewaterstand Hoek van Holland	WBI 2017, zie Deltares (2016a)
	Windsnelheid per richting Schiphol	WBI 2017, zie Deltares (2016a)
	Kans op windrichting Schiphol	WBI 2017, zie Deltares (2016a)
	Statistiek afvoer bij Lobith	WBI 2017, zie Deltares (2016a)
	Statistiek afvoer bij Lith	WBI 2017, zie Deltares (2016a)
	Statistiek beheertoestand Europoortkering	WBI 2017, zie Deltares (2016a)
	Statistische onzekerheden zeewaterstand	WBI 2017, zie Deltares (2016a)
	Statistische onzekerheden windsnelheid	WBI 2017, zie Deltares (2016a)
	Voorspelfout sluiting Europoortkering	WBI 2017, zie Deltares (2016a)
	Modelonzekerheden waterstanden	WBI 2017, zie Deltares (2015c)
	Modelonzekerheden golven	WBI 2017, zie Deltares (2015c)
Profiel (tbv HBN en bekledingen)	Dijknormaal	MetalInfo_ijsselmeer.xlsx MetalInfo_markermeer.xlsx
	ruwheidsparameter	1.0
	Helling	Standaard 1 op 3
Criteria HBN	Kritiek overslagdebiet	1 l/s/m
Instellingen	TijdsInt.	FBC
	Rekentechiek	FDIR, FORM voor HBN
	Startmethode	9, 4 voor MHW
	Rel.Fact.	0.15
	$\epsilon_{\beta}$	0.005
	$\epsilon_{HOH}$	0.005
	$\epsilon_z$	0.005
	Nr. Iter.	150
uitvoer	belastingparameter	Lokale waterstand, HBN, golfhoogte
	Type 2 en 3	Type 2: voor een reeks van vooraf gespecificeerde herhalings tijden berekent Hydra-Ring de bijbehorende waarde van de belastingparameter. Type 3: voor een reeks van vooraf gespecificeerde waarden van een belastingparameter berekent Hydra-Ring de bijbehorende frequentie.
	oeverlocaties	Alle

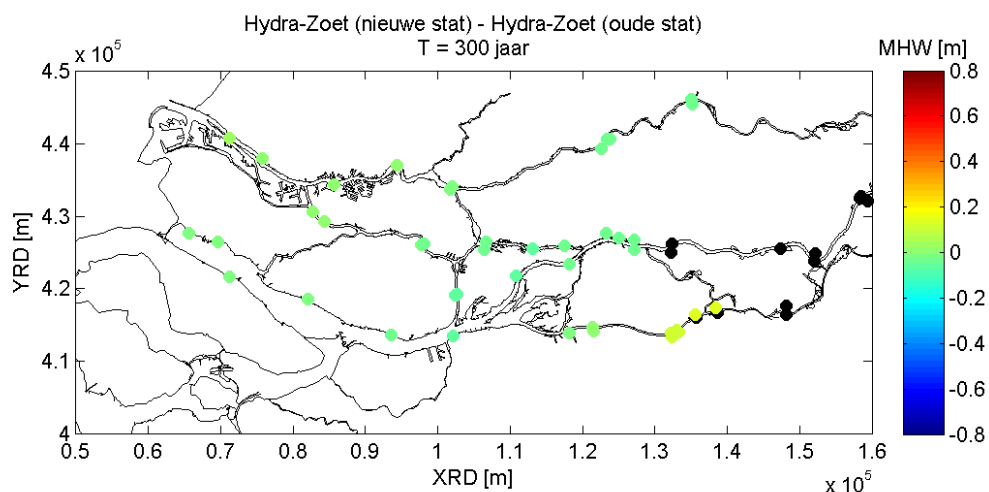
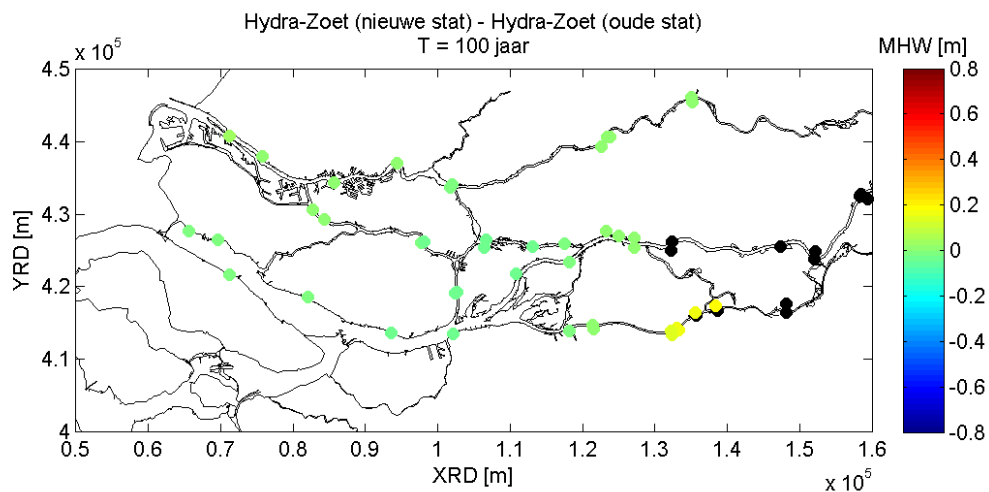
### 3.4 Vergelijking met Hydra-Zoet nieuwe en oude statistiek

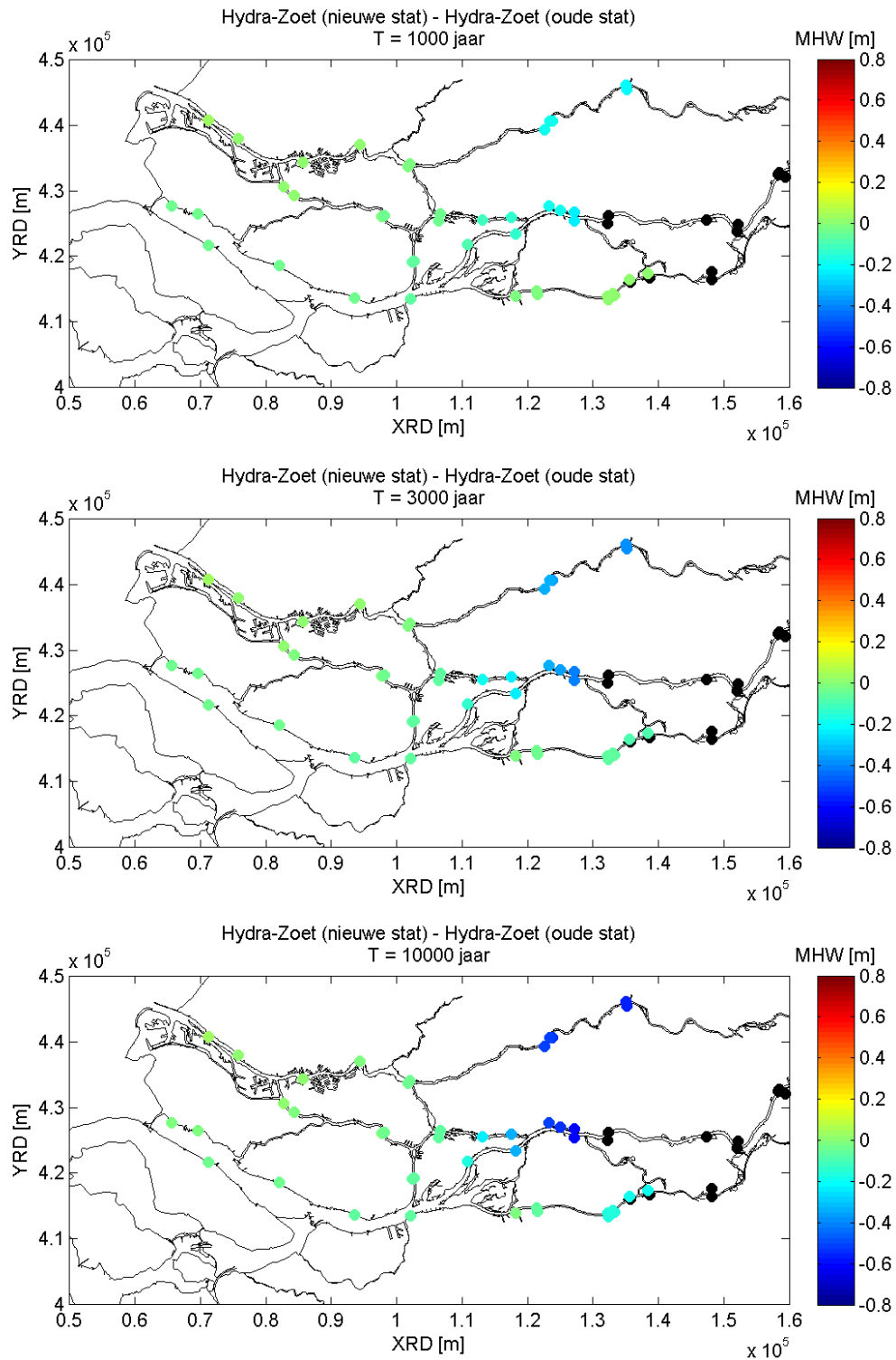
Hiermee bepalen we het effect van aanpassen van de wind- en afvoerstatistiek.

#### 3.4.1 Resultaten lokale waterstand

Voor het bepalen van het effect van de nieuwe wind- en afvoerstatistiek op de lokale waterstanden, zijn er voor verschillende herhalingstijden ruimtelijke plots gemaakt (zie Figuur 3.2). Wanneer we deze figuren bekijken dan zien we het volgende beeld:

- Op de Bergsche Maas neemt het MHW bij de lagere herhalingstijden (1=100 en T=300 jaar) met zo'n 20 cm toe, dit heeft te maken met de nieuwe afvoerstatistiek van de Maas die juist in dit bereik net hoger ligt dan de oude statistiek.
- Voor de hogere herhalingstijden neemt bij het bovenstroomse deel van het Rijngedomineerde deel (Lek, Biesbosch, Beneden Merwede, Boven Merwede) het MHW af tot 60cm bij T=10.000 jaar. Dit heeft te maken met de nieuwe afvoerstatistiek en is conform de verwachtingen.
- In het benedenstroomse gedeelte van het benedenrivierengebied zijn de verschillen klein (<15 cm). Dit duidt er op dat de aanpassing van de windstatistiek nauwelijks invloed heeft. Dit komt overeen met de verwachtingen, in (Geerse en Verkaik, 2010) wordt ook genoemd dat de effecten van de nieuwe windstatistiek op de toetspeilen en HBN-waarden (benodigde kruinhoogten) verschillen per watersysteem, maar zijn over het algemeen klein en bedragen enkele centimeters.





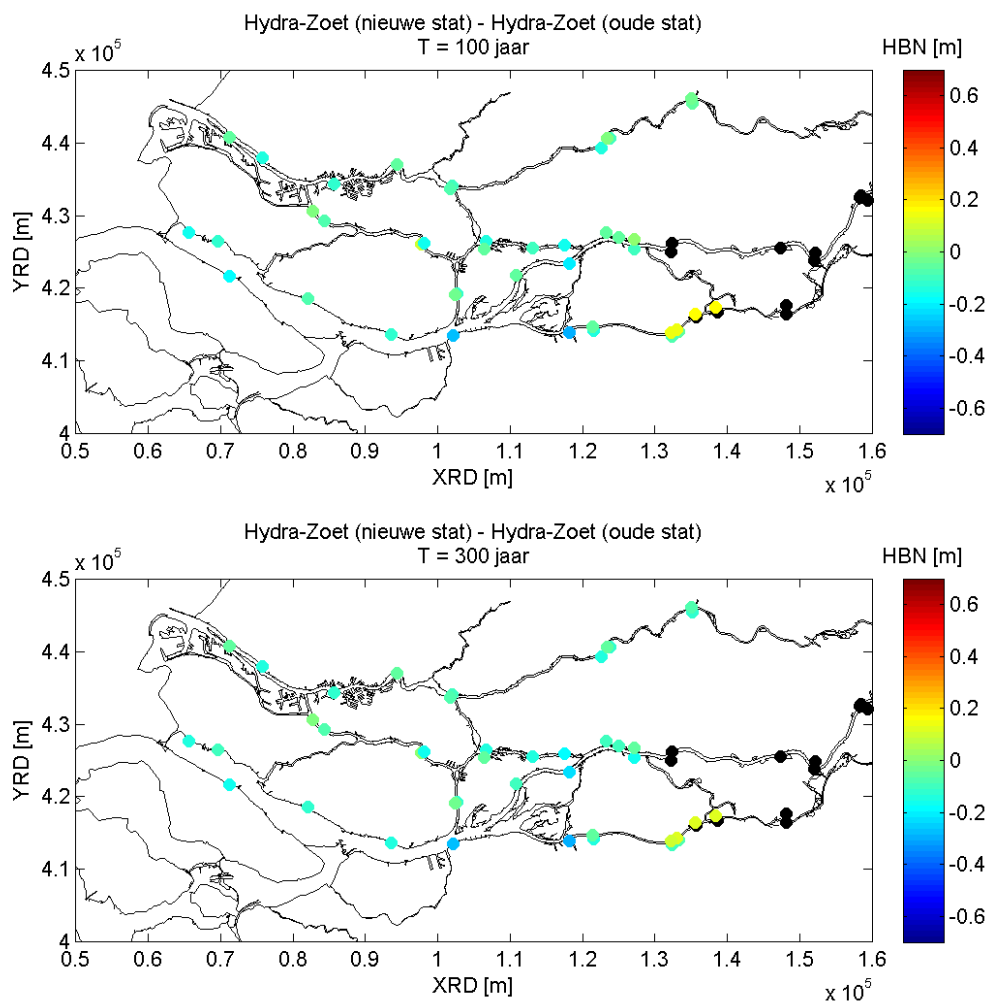
Figuur 3.2 Ruimtelijke verdeling van het verschil tussen MHW bij een herhalingsijd van 100, 1000, 3000 en 10.000 jaar berekend door Hydra-Zoet met de oude statistiek en nieuwe statistiek.

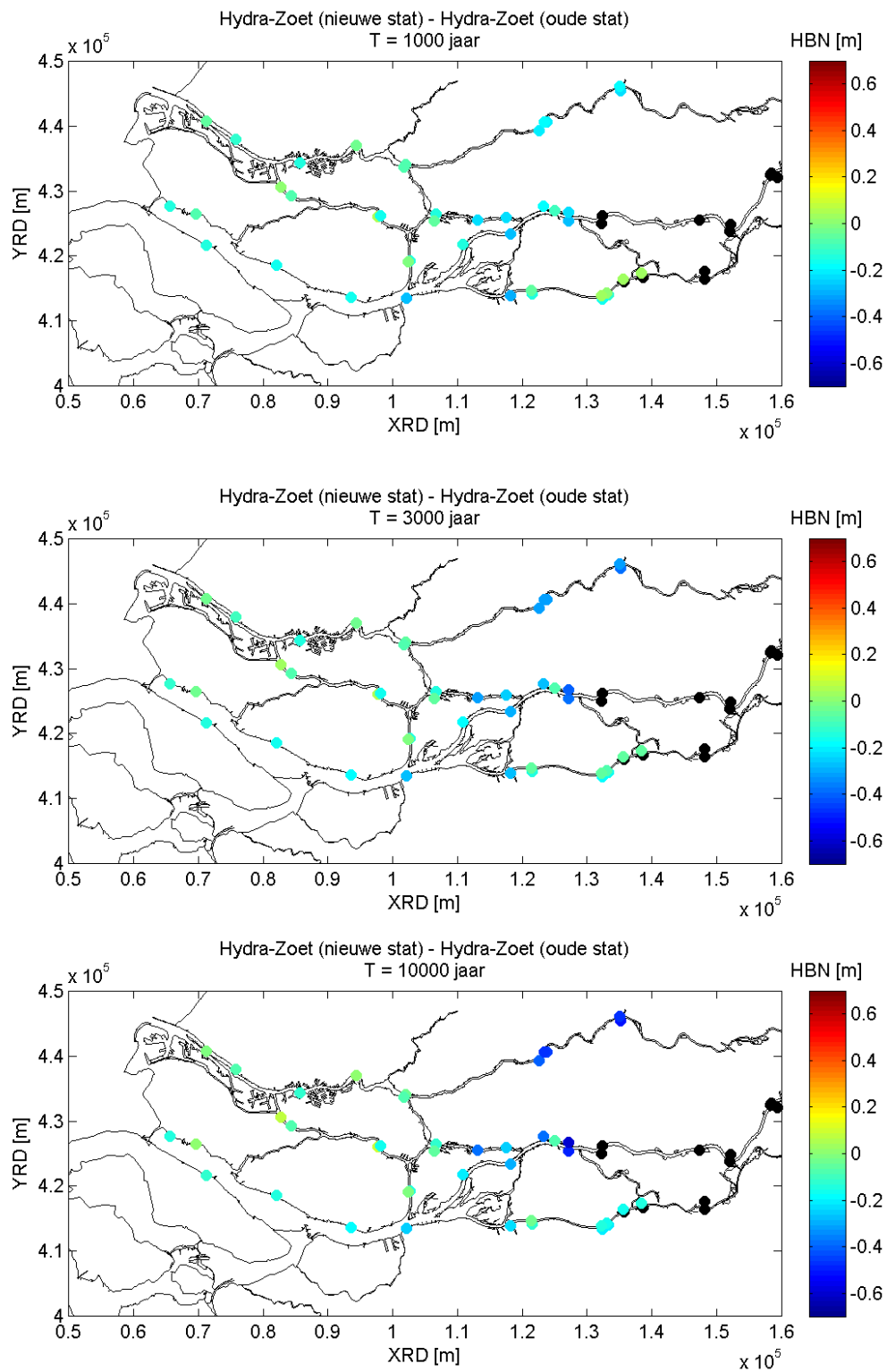


### 3.4.2 Resultaten HBN-resultaten

Voor het bepalen van het effect van de nieuwe wind- en afvoerstatistiek op de lokale waterstanden, zijn er voor verschillende herhalingstijden ruimtelijke plots gemaakt (zie Figuur 3.3). Wanneer we deze figuren bekijken dan zien we het volgende beeld:

- Net als bij de waterstanden is er op de Bergsche Maas een toename van het HBN bij een herhalingstijd van 100 en 300 jaar. Aangezien dit een afvoergedomineerd deel is, is dit conform de verwachtingen.
- Bij hoge herhalingstijden neemt het HBN op Lek, Biesbosch, Boven en Beneden Merwede juist af. Verder is het algemene beeld dat bij hoge herhalingstijden de HBN's iets afnemen door de nieuwe wind- en afvoerstatistiek, dit is conform de aanpassingen in de statistiek.
- Geometrische verschillen (oriëntatie, strijklengtes) zijn grotendeels verantwoordelijk voor het springerige gedrag tussen de locaties.





Figuur 3.3 Ruimtelijke verdeling van het verschil tussen HBN bij een herhalingsijd van 100, 300, 1000, 3000 en 10.000 jaar berekend door Hydra-Zoet met de oude statistiek en nieuwe statistiek

### 3.5 Verschil in rekentechniek in Hydra-Ring

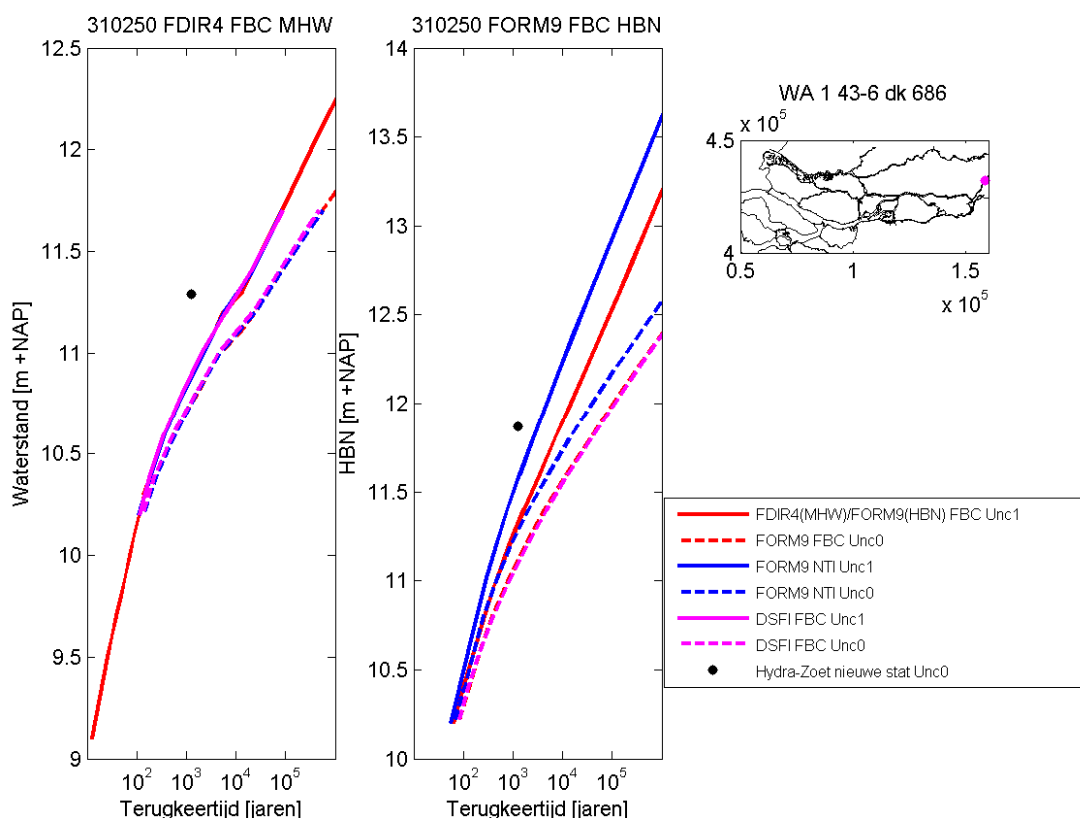
Zoals in paragraaf 2.7 is toegelicht worden er stapsgewijs drie rekentechnieken toegepast in het benedenrivierengebied, dit zijn:

- I. FDIR/FORM-FBC
- II. FORM-NTI
- III. DSFI-FBC

Onafhankelijk van de resultaten zijn voor de 56 testlocaties alle drie deze rekentechnieken toegepast. In deze paragraaf worden aan de hand van een aantal voorbeelden de resultaten besproken.

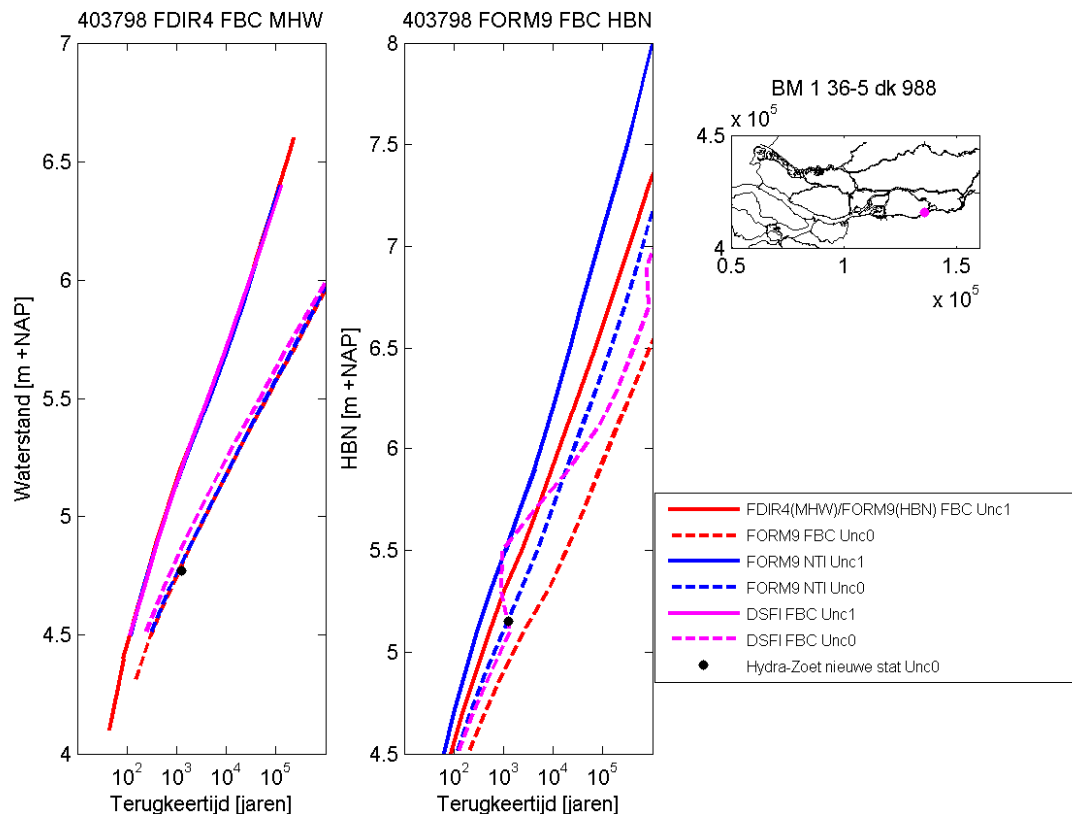
#### 3.5.1 Voorbeeld 1: Riviergedomineerd

In Figuur 3.4 is voor de riviergedomineerde Waal locatie “WA 1 43-6 dk686” de overschrijdingsfrequentielijnen van de drie rekentechnieken gegeven, te zien is dat voor de waterstanden de drie rekentechnieken vrijwel exact overeenkomen. Bij het HBN liggen de resultaten van rekentechniek I en III zo'n 10 cm lager dan die van rekentechniek II. Aanbevolen wordt om dit laatste nader te onderzoeken.

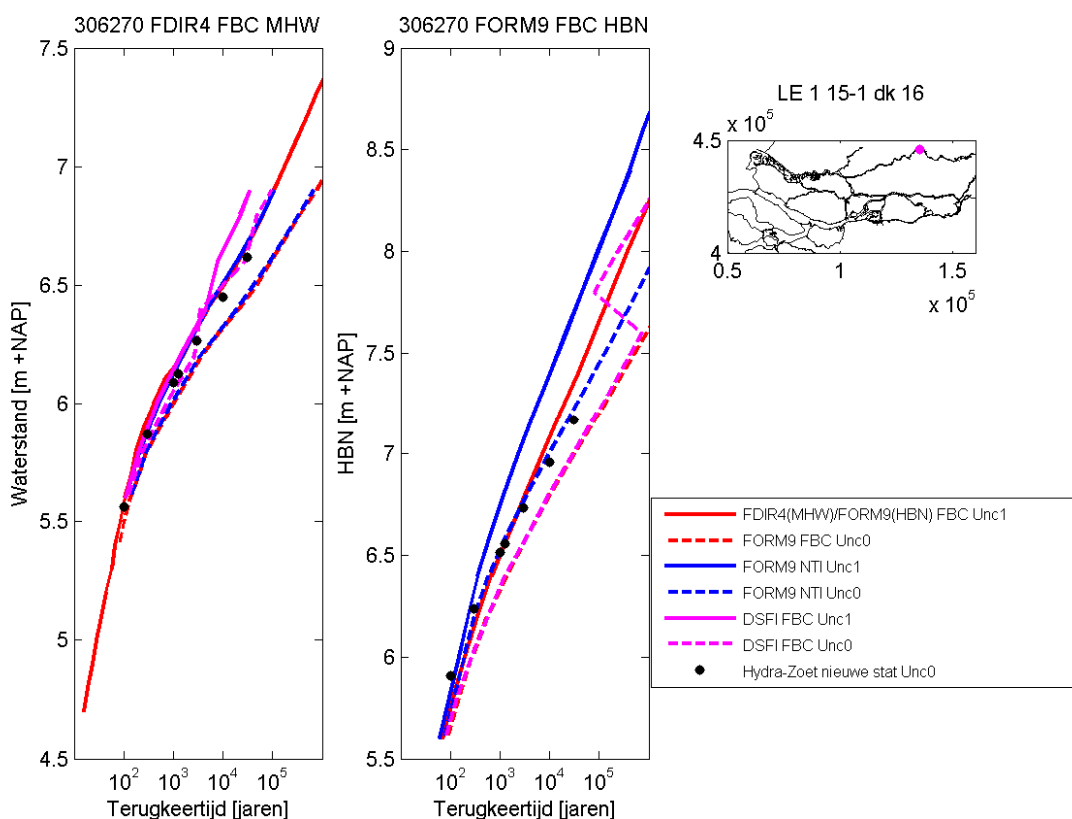


Figuur 3.4 Overschrijdingsfrequentielijnen lokale waterstand en HBN verkregen met Hydra-Ring en Hydra-Zoet resultaten voor de oeverlocatie “WA 1 43-6 dk686”. De rode, blauwe en magenta lijn geven respectievelijk de resultaten van rekentechniek I, II en III. Hierin geeft de doorgetrokken lijn de resultaten met onzekerheden (=Unc1) en de gestippelde lijn de resultaten zonder onzekerheden (=Unc0). Boven de figuren is aangegeven welke rekentechniek geselecteerd zou worden volgens het stappenplan in paragraaf 2.7, voor deze locatie is dit voor zowel MHW al HBN rekentechniek I. De zwarte stip geeft het Hydra-zoet resultaat voor een enkele herhalingsstijd.

Vergelijkbare resultaten zijn waar te nemen voor locaties langs de Lek en Bergsche Maas, verder valt op dat rekentechniek III (DSFI-FBC) voor deze locaties vaak geen monotoon oplopende lijn of helemaal geen resultaten geeft. Geen resultaat betekent dat de berekening niet binnen de maximale rekentijd van 10 dagen is geconvergeerd. Het is dan ook niet aan te raden om voor deze locaties rekentechniek III toe te passen.



*Figuur 3.5 Overschrijdingsfrequentielijnen lokale waterstand en HBN verkregen met Hydra-Ring en Hydra-Zoet resultaten voor de oeverlocatie 'BM 1 36-5 dk 988'. De rode, blauwe en magenta lijn geven respectievelijk de resultaten van rekentechniek I, II en III. Hierin geeft de doorgetrokken lijn de resultaten met onzekerheden en de gestippelde lijn de resultaten zonder onzekerheden. Boven de figuren is aangegeven welke rekentechniek geselecteerd zou worden volgens het stappenplan in paragraaf 2.7, voor deze locatie is dit voor zowel MHW al HBN rekentechniek I. De zwarte stip geeft het Hydra-zoet resultaat voor een enkele herhalingsstijl.*



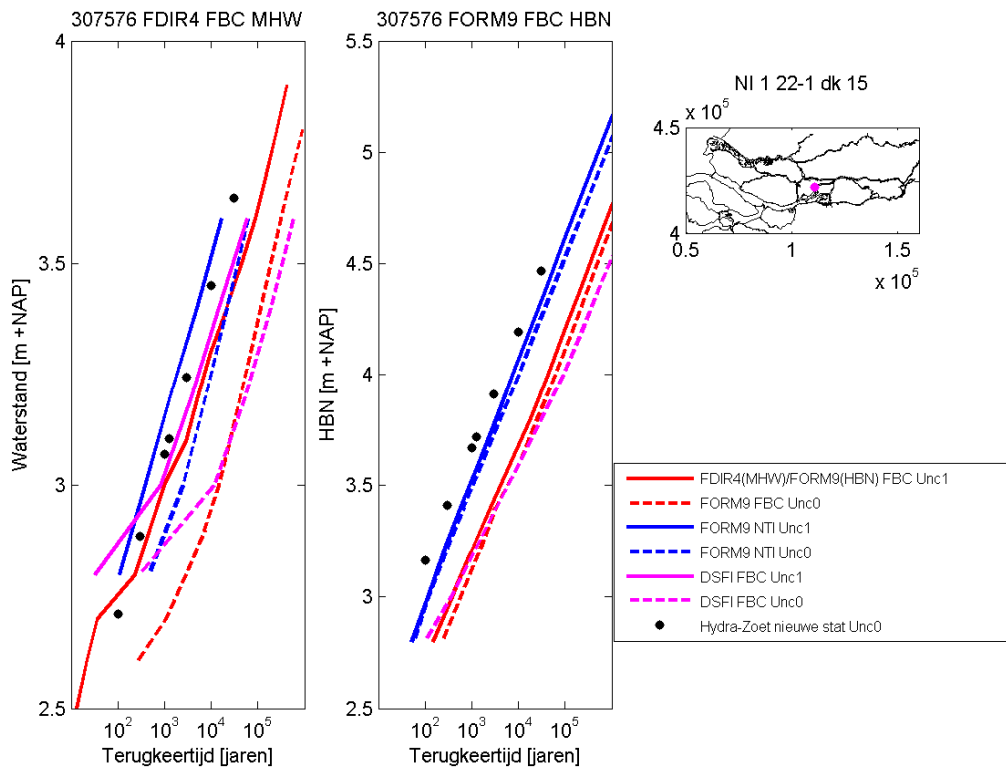
Figuur 3.6 Overschrijdingsfrequentielijnen lokale waterstand en HBN verkregen met Hydra-Ring en Hydra-Zoet resultaten voor de oeverlocatie 'LE 1 15-1 dk 16'. De rode, blauwe en magenta lijn geven respectievelijk de resultaten van rekentechniek I, II en III. Hierin geeft de doorgetrokken lijn de resultaten met onzekerheden en de gestippelde lijn de resultaten zonder onzekerheden. Boven de figuren is aangegeven welke rekentechniek geselecteerd zou worden volgens het stappenplan in paragraaf 2.7, voor deze locatie is dit voor zowel MHW al HBN rekentechniek I. De zwarte stippen geven de Hydra-zoet resultaten met nieuwe statistiek en zonder onzekerheden

### 3.5.2 Voorbeeld 2: Overgangsgebied

Locatie 'NI 1 22-1 dk 15' is gelegen in het overgangsgebied van afvoer- naar zeewaterstand gedomineerd. In Figuur 3.7 zijn voor deze locatie de overschrijdingsfrequentielijnen gegeven, hieruit kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

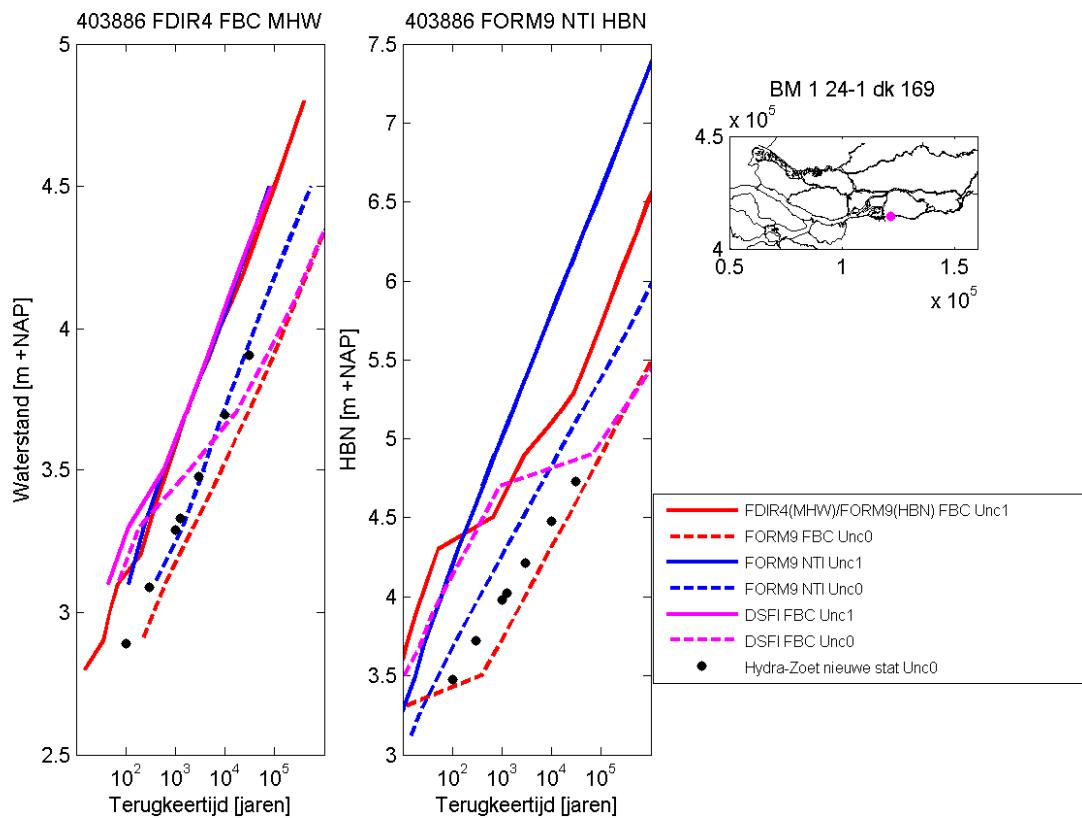
- De lijnen van rekentechniek I en III zijn sterk vergelijkbaar (magenta en rode lijn), beide rekentechnieken maken gebruik van de tijdsintergratie methode FBC.
- De blauwe lijn van rekentechniek II is het meest vloeiend. Vanwege het feit dat deze locatie gelegen is in het overgangsgebied waar snelle en trage stochasten van belang zijn, lijkt de tijdsintegratiemethode NTI ook goed te passen. Echter, dit is niet de rekentechniek die geselecteerd is volgens het stappenplan uit paragraaf 2.7. Wat maakt dat de waterstanden en HBN's zo'n 20 cm lager liggen dan wanneer gebruik was gemaakt van rekentechniek II.
- De onzekerheden in de waterstand zijn groter dan de onzekerheden in het HBN (orde 20 versus 5 cm). Dit komt door verschil in steilheid van de frequentielijn. Bij een vlak verloop is de frequent voorkomende waterstand nagenoeg gelijk aan de "extreme" waterstand. Het illustratiepunt zal in dit geval bestaan uit een frequent voorkomende waterstand en grote toeslag voor onzekerheid. Bijna alle kansruimte gaat dus naar de

modelonzekerheid. De optelsom van waterstand + onzekerheid komt daardoor veel hoger uit. Bij steiler lopende frequentielijnen is dat niet het geval.

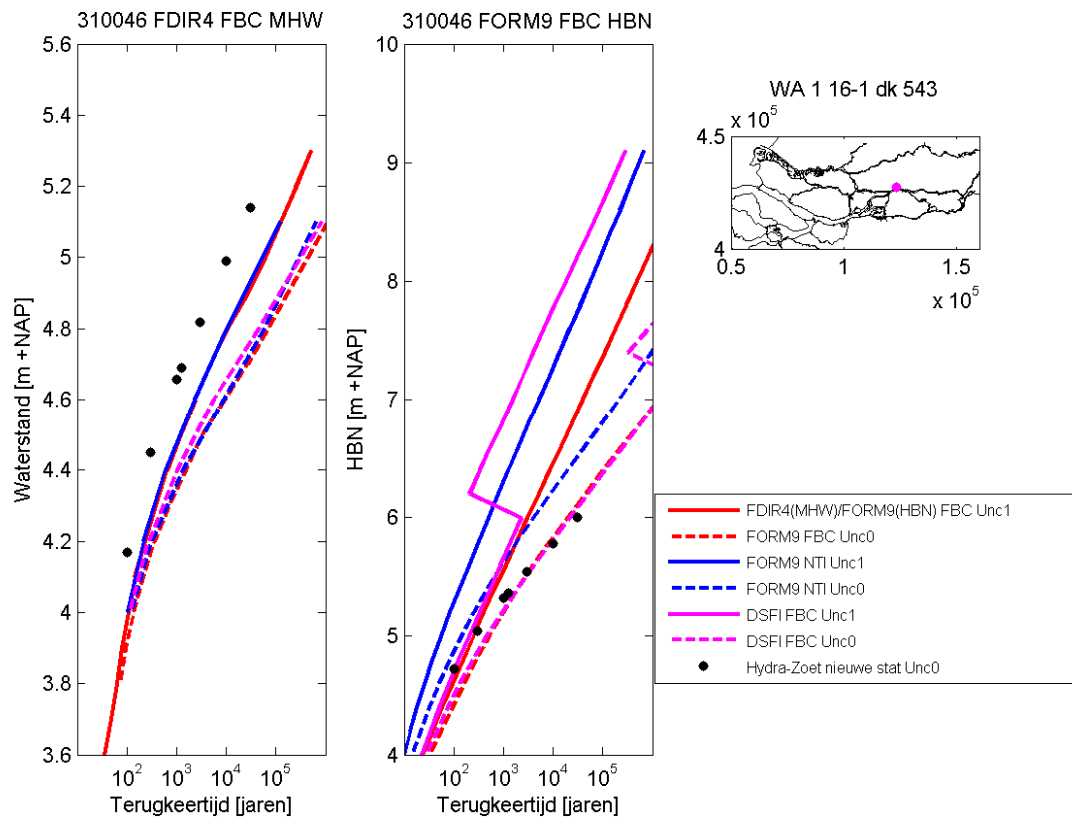


*Figuur 3.7 Overschrijdingsfrequentielijnen lokale waterstand en HBN verkregen met Hydra-Ring en Hydra-Zoet resultaten voor de oeverlocatie 'NI 1 22-1 dk 15'. De rode, blauwe en magenta lijn geven respectievelijk de resultaten van rekentechniek I, II en III. Hierin geeft de doorgetrokken lijn de resultaten met onzekerheden en de gestippelde lijn de resultaten zonder onzekerheden. Boven de figuren is aangegeven welke rekentechniek geselecteerd zou worden volgens het stappenplan in paragraaf 2.7, voor deze locatie is dit rekentechniek I. De zwarte stippen geven de Hydra-zoet resultaten met nieuwe statistiek en zonder onzekerheden.*

Vergelijkbare resultaten zijn te zien bij omliggende locaties (Figuur 3.8 t/m Figuur 3.11). Hierin geeft Rekentechniek II (FORM9-NTI) de meest vloeiende lijn. Wel valt het op dat in Figuur 3.10 en Figuur 3.11 bij rekentechniek II de invloed van het meenemen van onzekerheden in het HBN zeer klein of zelfs negatief is. Dit wordt veroorzaakt door de gekozen parameters van de golfonzekerheid. Voor de bredere wateren geldt een bias van -0.06 m en een standaardafwijking van 0.15 m. Omdat de frequentielijn in dit voorbeeld relatief stijf loopt leidt de spreiding van de onzekerheid tot weinig verhoging. Door de negatieve bias komt de totale waarde lager uit dan de berekening zonder onzekerheid.

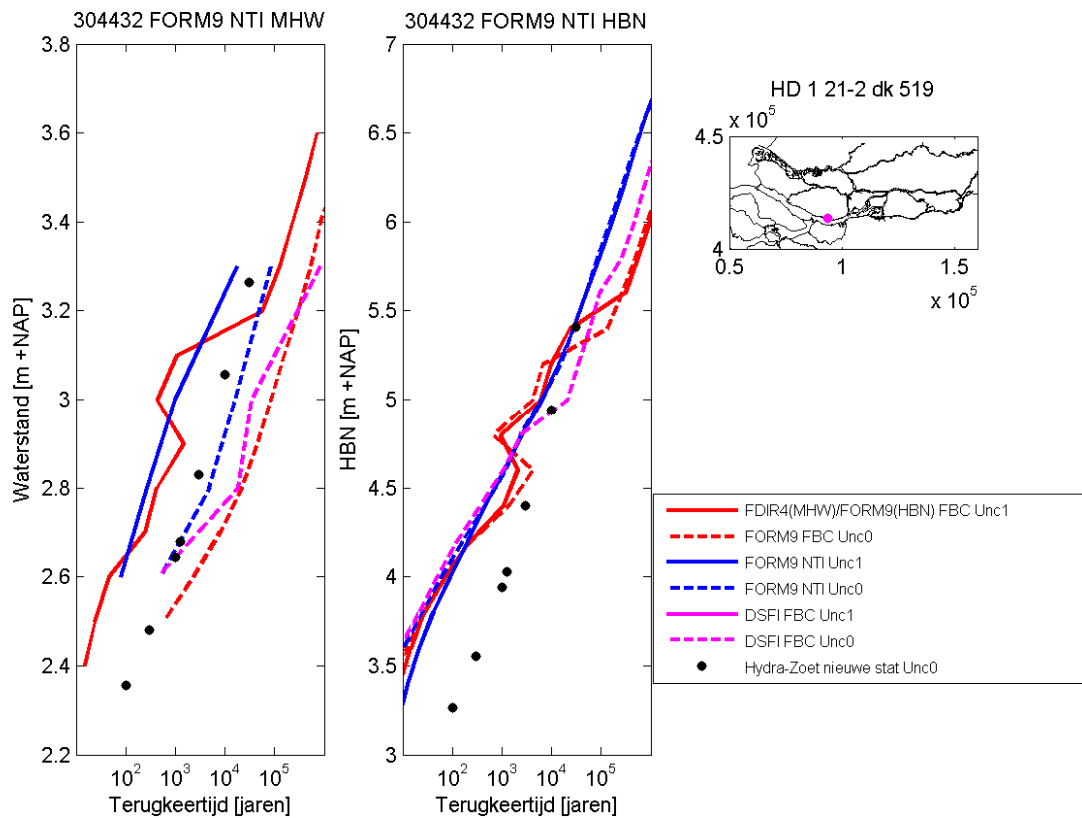


Figuur 3.8 Overschrijdingsfrequentielijnen lokale waterstand en HBN verkregen met Hydra-Ring en Hydra-Zoet resultaten voor de oeverlocatie 'BI 1 24-1 dk 169'. De rode, blauwe en magenta lijn geven respectievelijk de resultaten van rekentechniek I, II en III. Hierin geeft de doorgetrokken lijn de resultaten met onzekerheden en de gestippelde lijn de resultaten zonder onzekerheden. Boven de figuren is aangegeven welke rekentechniek geselecteerd zou worden volgens het stappenplan in paragraaf 2.7. Voor het MHW is dit rekentechniek I en voor het HBN rekentechniek II. De zwarte stippen geven de Hydra-zoet resultaten met nieuwe statistiek en zonder onzekerheden. In het HBN-figuur ontbreekt de magenta doorgetrokken lijn, dit komt omdat deze berekening niet klaar was binnen de gestelde maximale rekentijd.

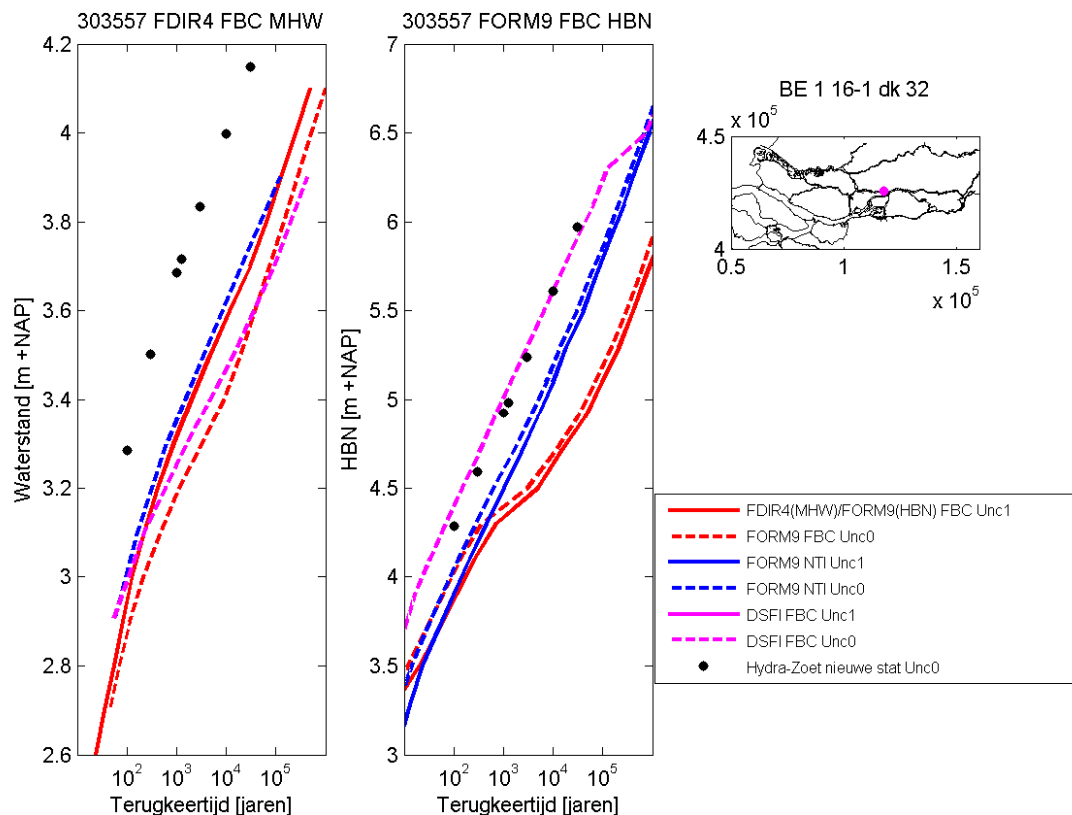


Figuur 3.9 Overschrijdingsfrequentielijnen lokale waterstand en HBN verkregen met Hydra-Ring en Hydra-Zoet resultaten voor de oeverlocatie 'WA 1 16-1 dk 543'. De rode, blauwe en magenta lijn geven respectievelijk de resultaten van rekentechniek I, II en III. Hierin geeft de doorgetrokken lijn de resultaten met onzekerheden en de gestippelde lijn de resultaten zonder onzekerheden. Boven de figuren is aangegeven welke rekentechniek geselecteerd zou worden volgens het stappenplan in paragraaf 2.7, voor deze locatie is dit rekentechniek I. De zwarte stippen geven de Hydra-zoet resultaten met nieuwe statistiek en zonder onzekerheden.





Figuur 3.10 Overschrijdingsfrequentielijnen lokale waterstand en HBN verkregen met Hydra-Ring en Hydra-Zoet resultaten voor de oeverlocatie 'HD 1 21-2 dk 519'. De rode, blauwe en magenta lijn geven respectievelijk de resultaten van rekentechniek I, II en III. Hierin geeft de doorgetrokken lijn de resultaten met onzekerheden en de gestippelde lijn de resultaten zonder onzekerheden. Boven de figuren is aangegeven welke rekentechniek geselecteerd zou worden volgens het stappenplan in paragraaf 2.7, voor deze locatie is dit rekentechniek II. De zwarte stippen geven de Hydra-zoet resultaten met nieuwe statistiek en zonder onzekerheden. In het HBN-figuur ontbreekt de magenta doorgetrokken lijn, dit komt omdat deze berekening niet klaar was binnen de gestelde maximale rekentijd.



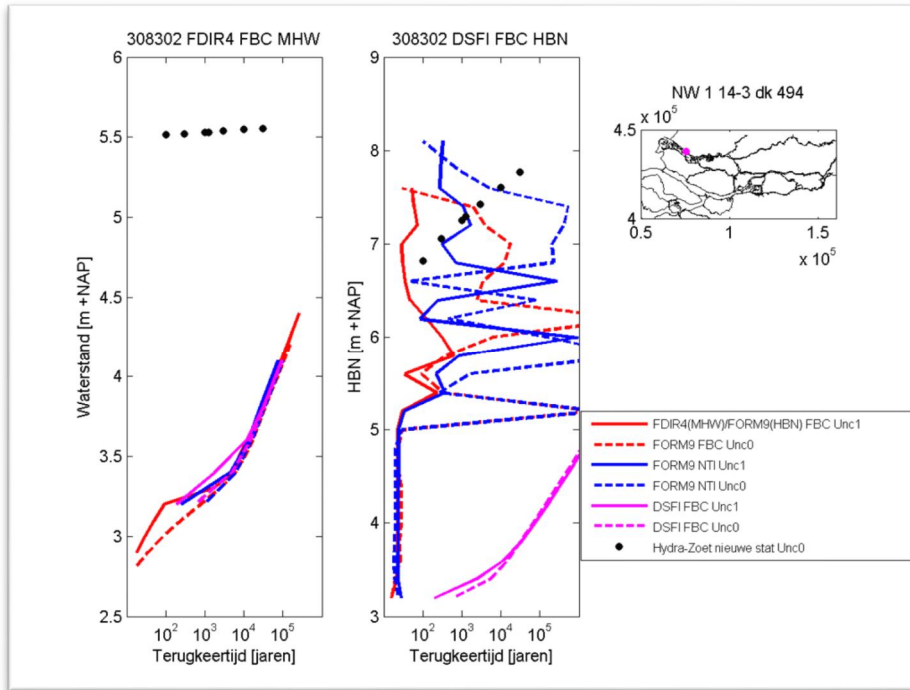
Figuur 3.11 Overschrijdingsfrequentielijnen lokale waterstand en HBN verkregen met Hydra-Ring en Hydra-Zoet resultaten voor de oeverlocatie 'BE 1 16-1 dk 32'. De rode, blauwe en magenta lijn geven respectievelijk de resultaten van rekentechniek I, II en III. Hierin geeft de doorgetrokken lijn de resultaten met onzekerheden en de gestippelde lijn de resultaten zonder onzekerheden. Boven de figuren is aangegeven welke rekentechniek geselecteerd zou worden volgens het stappenplan in paragraaf 2.7, voor deze locatie is dit rekentechniek I. De zwarte stippen geven de Hydra-zoet resultaten met nieuwe statistiek en zonder onzekerheden. In de figuren ontbreekt de magenta en blauwe doorgetrokken lijn, dit komt omdat deze berekening niet klaar was binnen de gestelde maximale rekentijd.

### 3.5.3 Voorbeeld 4: hoogwater maatregel

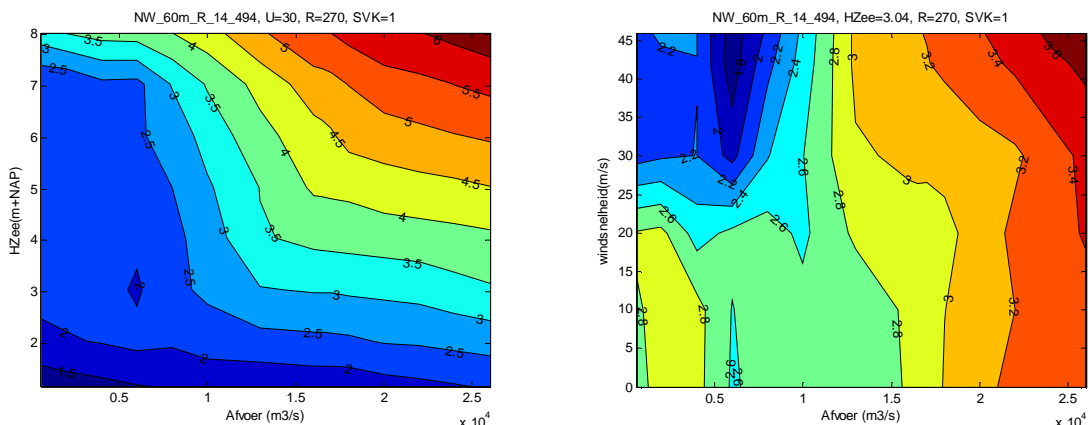
Locatie 'NW 1 14-3 dk 494' (=NW\_60m\_R\_14\_494) ligt aan de noordoever van de Nieuwe Waterweg. In Figuur 3.12 is te zien dat de Hydra-Ring overschrijdingsfrequentielijn van de lokale waterstand stabiele resultaten geeft voor alle drie de rekentechnieken.

De HBN frequentielijn vertoont echter voor beide FORM rekentechnieken (FORM9\_FBC en FORM9\_NTI) instabiliteit. De stabiliteit problemen met de FORM som zijn goed te verklaren wanneer we naar de gegevens in de database kijken, zie Figuur 3.13. De waterstanden zijn bij toenemende windsnelheden niet monotoon oplopend en FORM kan hier niet goed mee omgaan. Op enkele uitschieters na zijn de resultaten in de database wel te verklaren. Bij een windsnelheid boven de 20 m/s is er sprake van het sluiten van de Maeslant- en Hartelkering, waardoor de waterstanden dalen.

In de figuur is te zien dat DSFI-FBC voor het HBN wel goede resultaten geeft. De HBN-lijn is hier vrijwel gelijk aan de waterstands-lijn. Dit is ook de verwachting aangezien er alleen bij heel hoge waterstanden golven optreden, dit wordt later in deze paragraaf nader toegelicht.



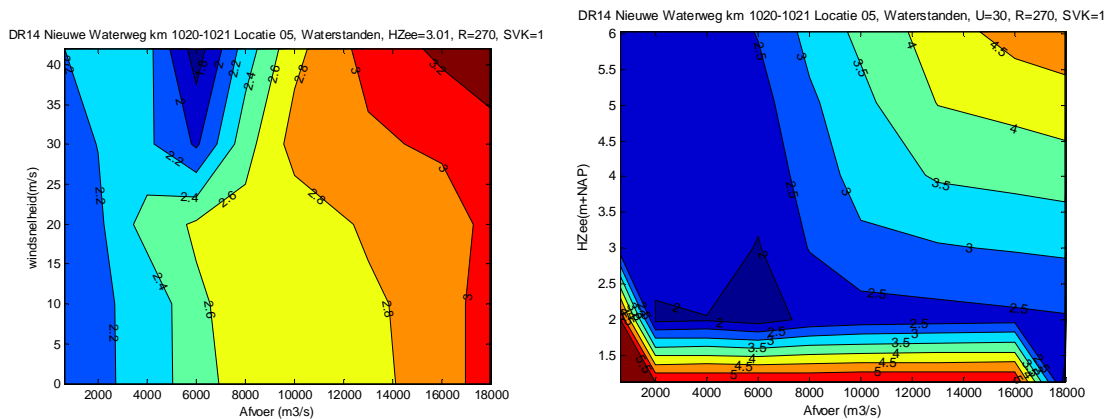
Figuur 3.12 Overschrijdingsfrequentielijnen lokale waterstand en HBN verkregen met Hydra-Ring en Hydra-Zoet resultaten (nieuwe statistiek) voor de oeverlocatie 'NW 1 14-3 dk 494'. De rode, blauwe en magenta lijn geven respectievelijk de resultaten van rekentechniek I, II en III. Hierin geeft de doorgetrokken lijn de resultaten met onzekerheden en de gestippelde lijn de resultaten zonder onzekerheden. Boven de figuren is aangegeven welke rekentechniek geselecteerd zou worden volgens het stappenplan in paragraaf 2.7, voor het MHW is dit rekenmethode I en voor het HBN rekenmethode III. De zwarte stippen geven de Hydra-zoet resultaten met nieuwe statistiek en zonder onzekerheden.



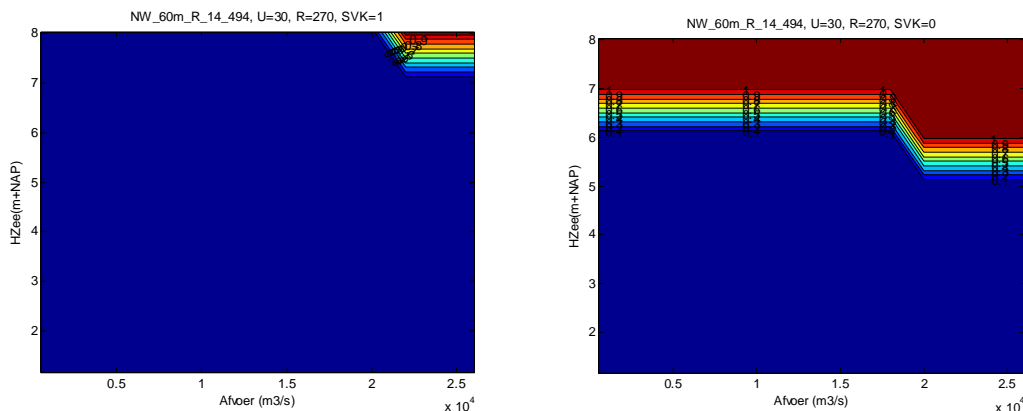
Figuur 3.13 Waterstanden in de Hydra-Ring database voor locatie "NW\_60m\_R\_14\_494", waarbij R staat voor de windrichting en SVK=1 voor een gesloten Maeslant- en Hartelkering.

Echter, ook Hydra-Zoet heeft moeite met deze locatie. In Figuur 3.14 geeft een overzicht van waterstanden in deze Hydra-Zoet database. Dat Hydra-Zoet vaak wel gladde lijnen krijgt heeft ermee te maken dat Hydra-Zoet de informatie uit de database repareert. Dit is dan ook de verklaring dat dat in Figuur 3.12 de Hydra-Zoet frequentielijn zo hoog - op 5,5m+NAP - ligt.

Echter, de waarde van 5,5m valt ook te bediscussiëren als we de waarden in de database bekijken.



Figuur 3.14 Waterstanden in de Hydra-Zoet database, waarbij R staat voor de windrichting en SVK=1 voor een gesloten Maeslant- en Hartelkering.

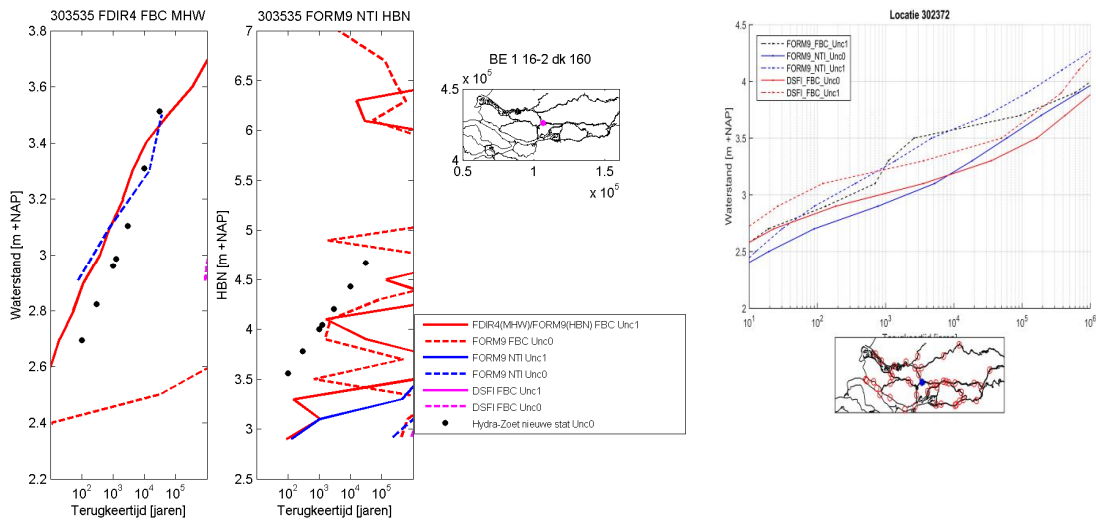


Figuur 3.15 Golfhoogtes in de Hydra-Ring database voor locatie "NW\_60m\_R\_14\_494", waarbij R staat voor de windrichting en SVK=1 voor een gesloten Maeslant- en Hartelkering. In het blauwe vlak zijn de golfhoogtes nul en bij de meer extreme belastingcombinaties lopen ze hier in dit figuur op tot 0,9m.

### 3.5.4 Voorbeeld 4: Droogval

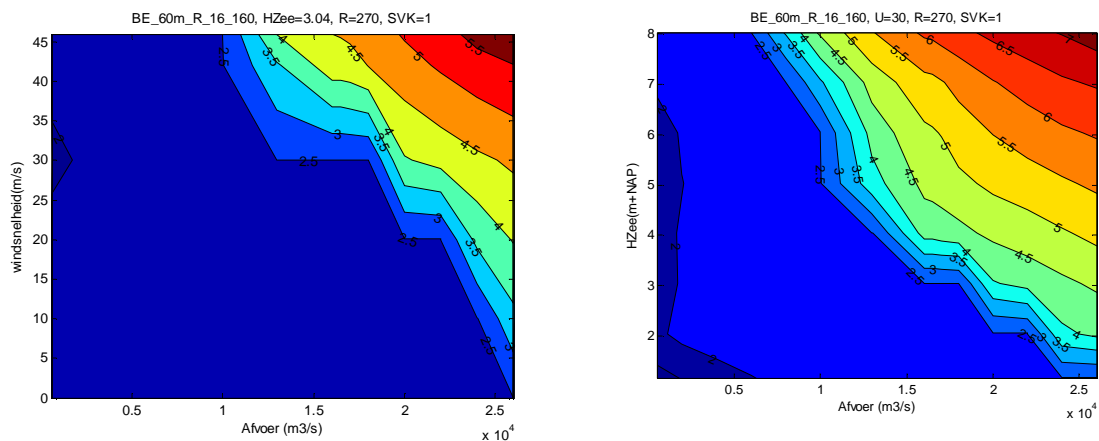
Voor de locatie "BE\_60m\_R\_16\_160" (303535) ligt in de beneden Merwede. De frequentielijn van deze locatie vertoont voor zowel de lokale waterstand en het HBN instabiliteiten, zie linkerfiguur in Figuur 3.16. Opvallend is dat de frequentielijn van de naastgelegen rivieraslocatie geen instabiliteiten vertoont (rechter figuur).

Een verklaring van de instabiliteiten voor de oeverlocaties ligt in de resultaten in de database. Figuur 3.17 laat zien dat de waterstanden in de database niet altijd monotoon oplopend zijn. Dit wordt veroorzaakt door droogval van de locaties en opvullen van de database: voor veel combinaties staat de waterstand op 2,49 m+NAP, dit is waarschijnlijk het bodemniveau. Dat er ook lagere waterstanden in de database voorkomen komt doordat hier de waterstand de bijbehorende aslocatie lager ligt. In dat geval wordt de waterstand op de aslocatie genomen.



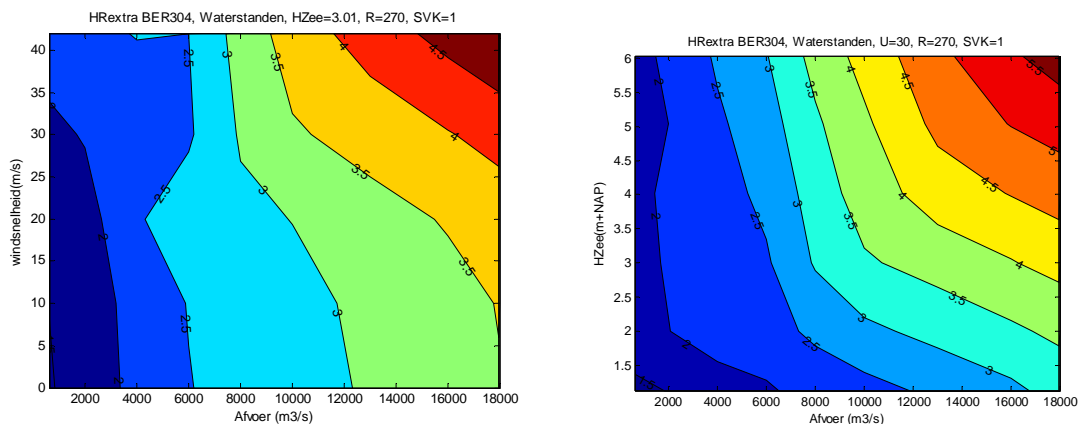
Figuur 3.16 Links: Overschrijdingsfrequentielijnen lokale waterstand en HBN verkregen met Hydra-Ring en Hydra-Zoet resultaten (nieuwe statistiek) voor de oeverlocatie ‘BE 1 16-2 dk 160’. De rode, blauwe en magenta lijn geven respectievelijk de resultaten van rekentechniek I, II en III. Hierin geeft de doorgetrokken lijn de resultaten met onzekerheden (=Unc1) en de gestippelde lijn de resultaten zonder onzekerheden (=Unc0). Boven de figuren is aangegeven welke rekentechniek geselecteerd zou worden volgens het stappenplan in paragraaf 2.7. De zwarte stippen geven de Hydra-zoet resultaten met nieuwe statistiek en zonder onzekerheden.

Rechts: Overschrijdingsfrequentielijnen lokale waterstand op de naastgelegen as-locatie. Hier geeft de zwarte, blauwe en rode lijn respectievelijk de resultaten van rekentechniek I, II en III. De doorgetrokken lijn geeft de resultaten zonder onzekerheden en de gestippelde lijn de resultaten met onzekerheden.



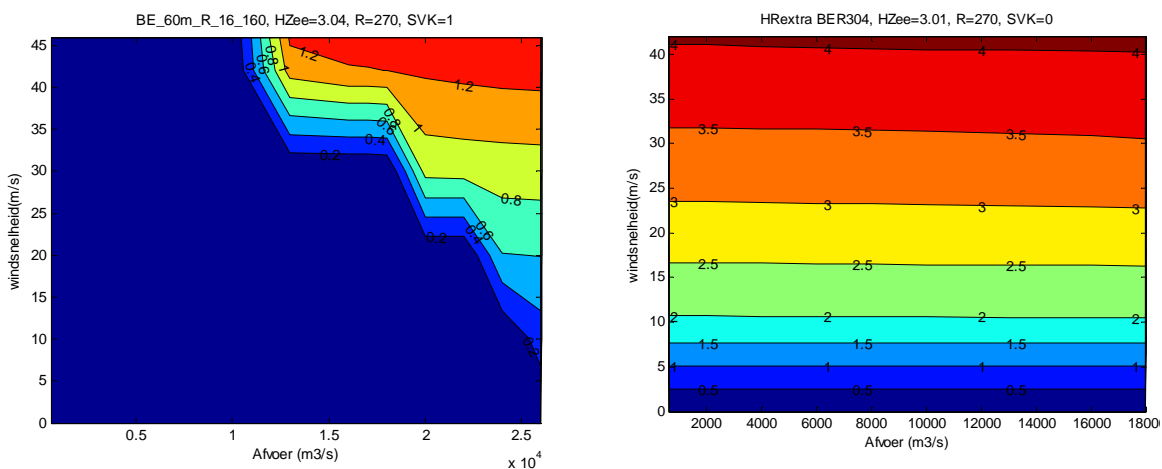
Figuur 3.17 Waterstanden in de Hydra-Ring database voor locatie “BE\_60m\_R\_16\_160”, waarbij R staat voor de windrichting en SVK=1 voor een gesloten Maeslant- en Hartelkering.

Verder valt op dat de waterstanden in de Hydra-Ring database verschillen van de Hydra-Zoet database (vergelijken Figuur 3.17 en Figuur 3.18). De naamgeving van de hydra-Zoet locatie begint met extra, dit duidt er ook op dat deze 100 meter uit de teen van de dijk ligt, in de Hydra-Ring database is dit 80 meter.



Figuur 3.18 Waterstanden in de Hydra-Zoet database, waarbij R staat voor de windrichting en SVK=1 voor een gesloten Maeslant- en Hartelkering.

Figuur 3.19 laat zien dat er ook een groot verschil zit in de golven database van Hydra-Zoet en Hydra-Ring. In de Hydra-Ring database zijn er alleen golven bij de meer extreme belastingcombinaties, terwijl Hydra-Zoet voor bijna alle belastingcombinaties golfhoogtes bevat. Ook dit komt doordat het uitvoerpunt van Hydra-Ring dichterbij de teen van de dijk ligt dan het Hydra-Zoet uitvoerpunt.



Hydra-Ring

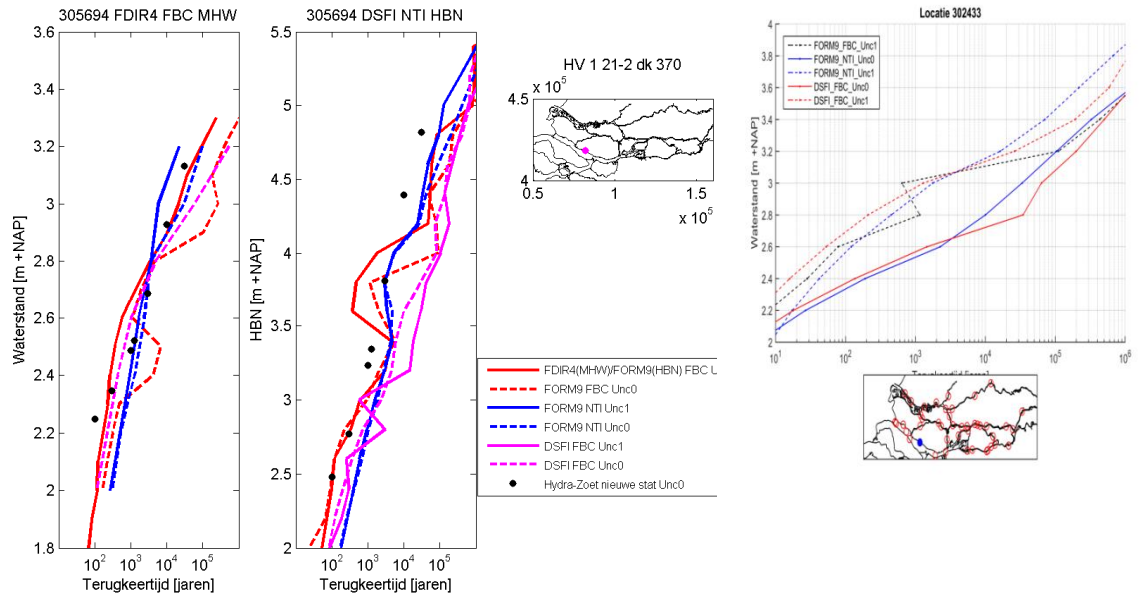
Hydra-zoet

Figuur 3.19 Golfhoogtes in de Hydra-Ring database voor locatie "NW\_60m\_R\_14\_494", waarbij R staat voor de windrichting en SVK=1 voor een gesloten Maeslant- en Hartelkering.

### 3.5.5 Voorbeeld 5: hoogwater maatregel

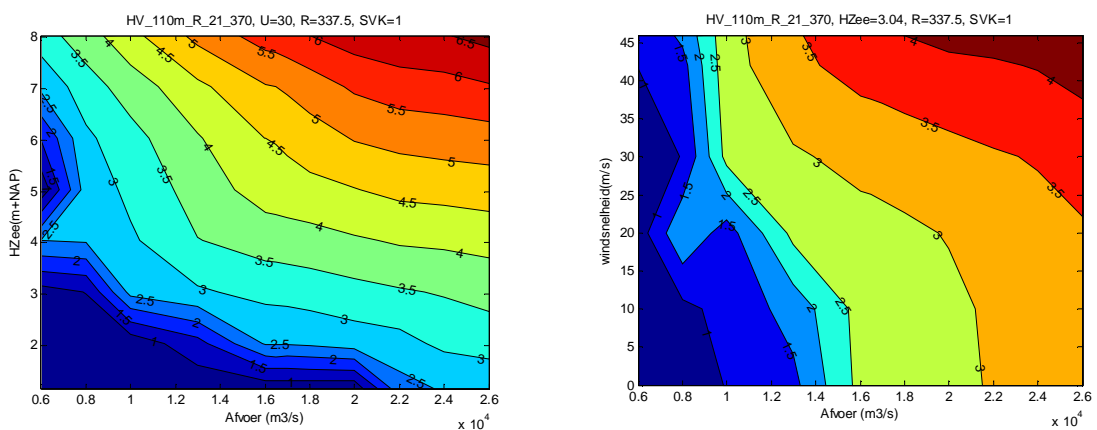
De locatie 'HV\_110m\_R\_21\_370' (= 'HV 1 21-2 dk 370'.) is gelegen aan de noordkant van het Haringvliet. De frequentielijn van deze locatie vertoont voor zowel de lokale waterstand en het HBN instabiliteiten, zie linkerfiguur in Figuur 3.20. Opvallend is dat de frequentielijn van de naastgelegen rivieras geen instabiliteiten vertoont (rechter figuur).

Een verklaring van de instabiliteiten voor de oeverlocaties ligt in de resultaten in de database. Figuur 3.21 en Figuur 3.22 laten zien dat de waterstanden en golfhoogtes in de database niet altijd monotoon oplopend zijn. Dat dit zo is heeft te maken met onder andere de inzet van het Volkerak-Zoommeer als bergingsgebied vanaf een Rijnaafvoer van zo'n 7000 m<sup>3</sup>/s. Verder ligt de bodemhoogte van deze locatie op 0.56m+NAP, vanaf deze waterstand ontstaan er dan ook golven.



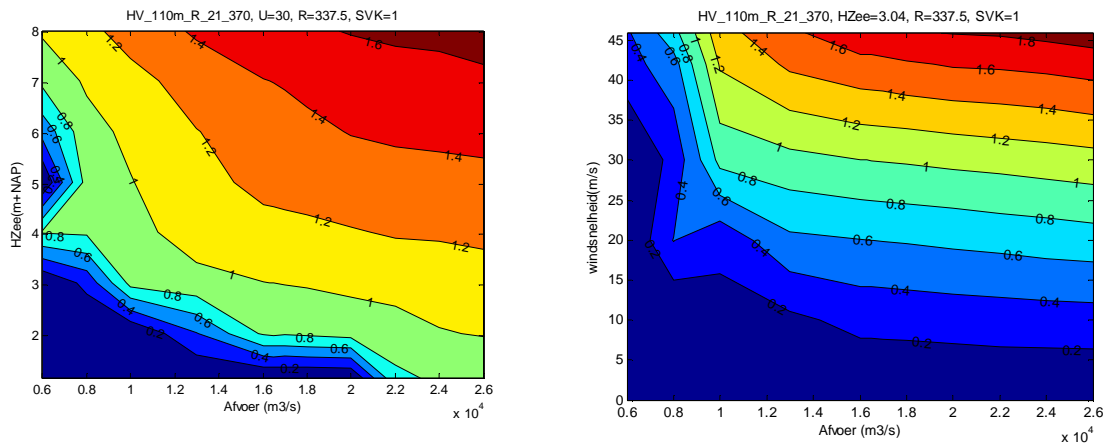
Figuur 3.20 Links: Overschrijdingsfrequentielijnen lokale waterstand en HBN verkregen met Hydra-Ring en Hydra-Zoet resultaten (nieuwe statistiek) voor de oeverlocatie 'HV 1 21-2 dk 370'. De rode, blauwe en magenta lijn geven respectievelijk de resultaten van rekentechniek I, II en III. Hierin geeft de doorgetrokken lijn de resultaten met onzekerheden (=Unc1) en de gestippelde lijn de resultaten zonder onzekerheden (=Unc0). Boven de figuren is aangegeven welke rekentechniek geselecteerd zou worden volgens het stappenplan in paragraaf 2.7. De zwarte stippen geven de Hydra-zoet resultaten met nieuwe statistiek en zonder onzekerheden.

Rechts: Overschrijdingsfrequentielijnen lokale waterstand op de naastgelegen as-locatie. Hier geeft de zwarte, blauwe en rode lijn respectievelijk de resultaten van rekentechniek I, II en III. De doorgetrokken lijn geeft de resultaten zonder onzekerheden en de gestippelde lijn de resultaten met onzekerheden.



Figuur 3.21 Waterstanden in de Hydra-Ring database, waarbij R staat voor de windrichting en SVK=1 voor een gesloten Maeslant- en Hartelkering.





Figuur 3.22 Golfhoogtes in de Hydra-Ring database voor locatie "HV\_110m\_R\_21\_370", waarbij R staat voor de windrichting en SVK=1 voor een gesloten Maeslant- en Hartelkering.

### 3.5.6 Conclusie

Rekentechnieken I en II geven in het riviergedomineerde deel (Waal, Boven Merwede, Bergsche Maas en een deel van de Lek) monotoon oplopende waterstanden. De resultaten van rekentechniek III bevatten vaak instabiliteiten. Wel zitten er verschillen in de berekende belasting-waarde tussen rekentechniek I en II. Het is op basis van bovenstaande resultaten is niet te zeggen welke rekentechniek beter is.

In overgangsgebieden waarbij zowel trage als langzame stochasten van belang zijn treden er stabiliteitsproblemen op bij het gebruik van de tijdsintegratiemethode FBC (rekentechniek I en III). Rekentechniek II op basis van NTI geeft hier betere resultaten. Tot het overgangsgebied behoren Haringvliet, Hollandsch Diep, Amer, Spui, Dordtse Kil en Nieuwe Merwede (blauwe punten in Figuur 4.2).

Gebieden waar hoogwatermaatregelen worden in gezet (Maeslantkering, inzet van het Volkerak-Zoommeer), hebben vaak te maken met niet monotoon oplopende waterstanden en golven in de database. De rekentechniek FORM kan hier niet goed mee omgaan. Geadviseerd wordt dan ook om hier rekentechniek III toe te passen. Indien deze locaties ook nog gelegen zijn in het overgangsgebied zou eigenlijk rekentechniek IV (DSFI-NTI) toegepast moeten worden. Vooralsnog is dit vanwege de lange rekentijd niet haalbaar.

Ook in de Hydra-Zoet database zitten niet-monotoon oplopende waterstanden, bijvoorbeeld voor locaties achter de Maeslantkering. Hydra-Zoet lost dit op door het repareren van de informatie uit de database. Het nadeel hiervan is dat er relevante informatie wordt weggegooid, en dat Hydra-Zoet de lokale waterstanden en HBN's overschat.

Veel locaties hebben te maken met droogval, hierdoor ontstaan stabiliteitsproblemen en kan het zo zijn dat de effecten van het meenemen van onzekerheden onrealistisch klein of zelfs negatief worden. De gekozen rekentechniek om om te gaan met droogval lijkt niet goed te werken. Aanbevolen wordt om de database op dit punt te verbeteren.

Afwezigheid van resultaten in de marginale statistiek van de golfhoogte komt doordat er bij veel locaties enkel golfgegevens beschikbaar zijn vanaf hoge waterstanden (de laag frequent voorkomende belastingcombinaties).



### 3.6 Vergelijking Hydra-Zoet met Hydra-Ring

#### 3.6.1 Inleiding

In deze vergelijking worden de volgende verschillen geduid:

- Verschil als gevolg van overgang op een nieuwe rekentechniek (Hydra-Ring met FDIR en Hydra-Zoet met Numerieke Integratie).
- Verschil van de nieuwe database, de grootste veranderingen zijn hierbij:
  - Het meenemen van de Ruimte voor de Rivier maatregelen, correlatie tussen de Rijn- en Maas en de ligging van de uitvoerlocaties.
  - Manier van omgaan met droogval. Zowel in Hydra-Ring als Hydra-Zoet wordt de waterstand gecorrigeerd in het geval sprake is van droogval. Indien een groot deel van de belastingcombinaties droog vallen, dan wordt in Hydra-Zoet overgestapt op een meer in de as van de rivier gelegen locatie. Indien slechts een deel van de belastingcombinaties last hebben van droogval, dan wordt de waterstand voor deze locaties gelijk genomen aan de bodemhoogte. In Hydra-Ring is slechts 1 set uitvoerlocaties beschikbaar. Bij de belastingcombinaties waar sprake is van droogval wordt de laagste waarde overgenomen van de waterstand in dichtstbijzijnde as-locatie en de bodemhoogte van het laagste punt in de cel.
  - In Hydra-Zoet worden in de “reparaties” toegepast indien de belastingfunctie daalt bij een stijgende stochastwaarde. Hierdoor wordt o.a. afwaaiing niet meegenomen. Deze “reparaties” worden niet toegepast in Hydra-Ring.
  - Het meenemen van obstakels bij het bepalen van de golven met SWAN.

In de figuren in volgende paragraaf is een vergelijking tussen Hydra-Zoet en Hydra-Ring niet altijd mogelijk, deze locaties zijn zwart gekleurd, dit kan drie oorzaken hebben, te weten:

- 1 Er wordt gebruik gemaakt van een type 3 berekening, hierbij berekent Hydra-Ring voor een reeks van vooraf gespecificeerde waarden de bijbehorende frequentie. Deze vooraf gespecificeerde waarden zijn niet altijd juist gekozen, waardoor er niet altijd voor alle interessante herhalingstijden resultaten beschikbaar zijn.
- 2 Voor 3 locaties vertonen alle drie de rekentechnieken instabiliteiten (wiggles) in de HBN-frequentielijn. In de frequentielijn van de waterstand komt dit niet voor.
- 3 Voor locaties die in WTI2011 tot het bovenrivierengebied behoorden zijn alleen resultaten voor T=1250 jaar beschikbaar.

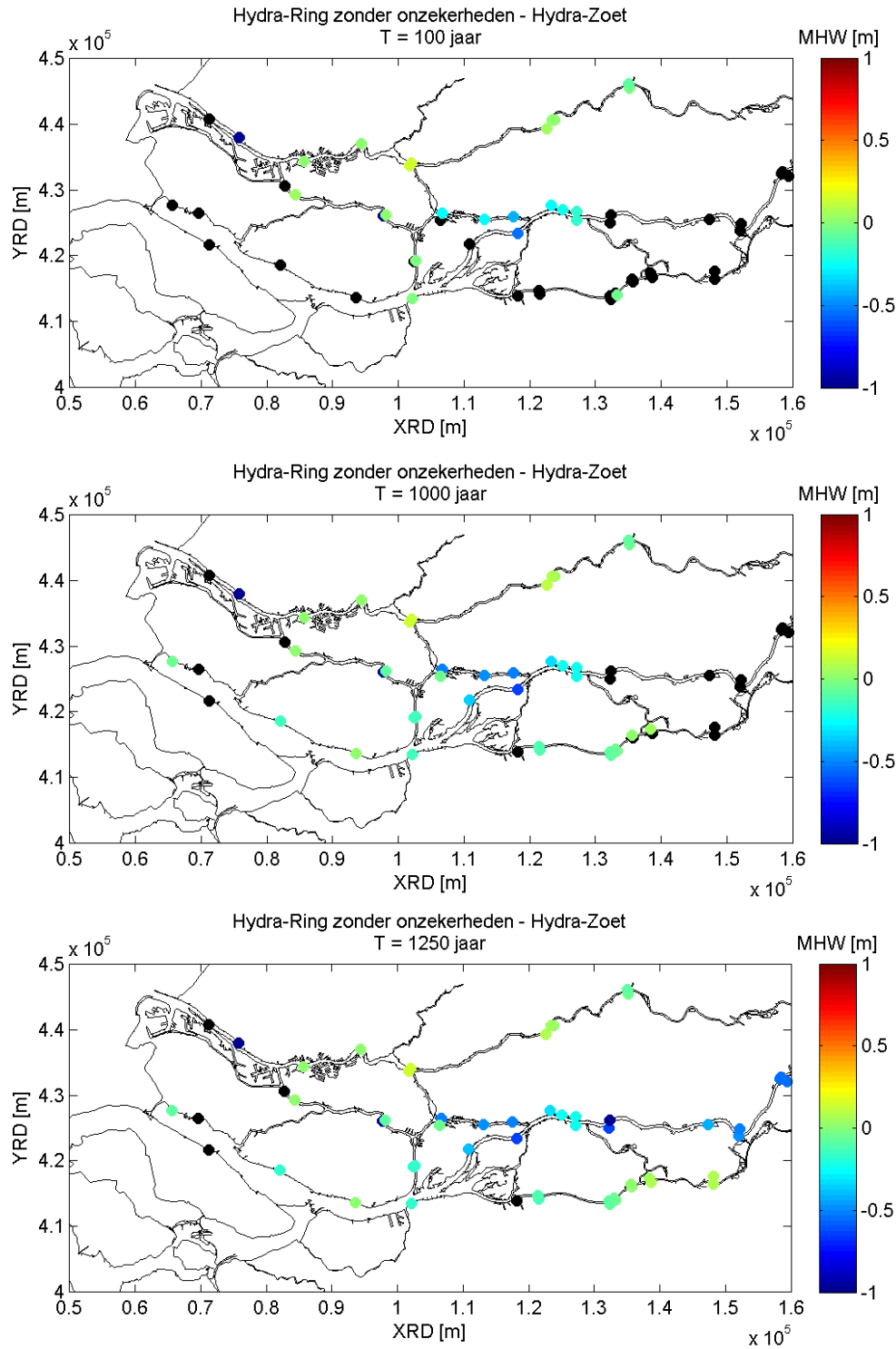
#### 3.6.2 Resultaten lokale waterstand

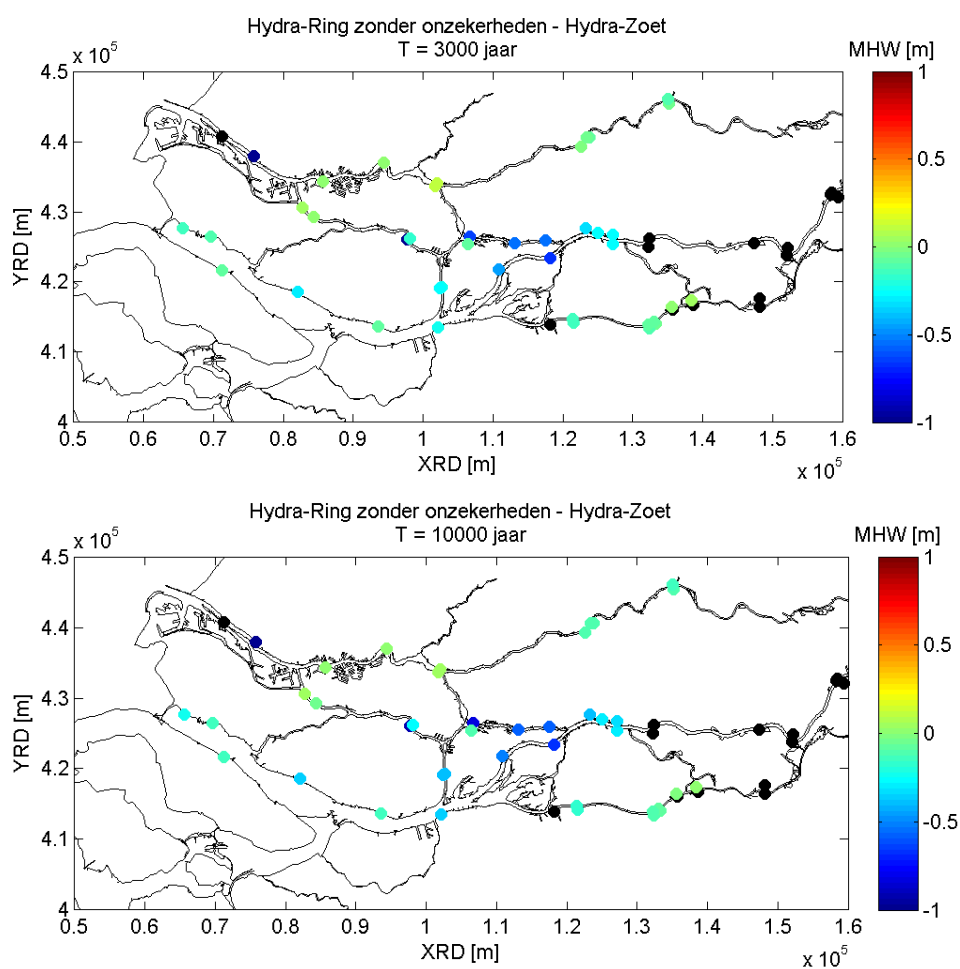
De resultaten in Figuur 3.23 zijn eigenlijk slecht te verklaren vanwege de grote hoeveelheid veranderingen in één keer, echter hierbij een aantal algemene bevindingen betreffende de lokale waterstanden:

- Het verschil in waterstand op de locatie achter de Maeslantkering en de locatie aan de zuid-oever van de Oude Maas wordt veroorzaakt door het repareren van de database in Hydra-Zoet, zie paragraaf 3.5.3.
- De verlaging van de waterstanden in de Biesbosch komt door de Ruimte voor de Rivier maatregelen.
- In het Haringvliet en Hollandsch Diep wordt de verlaging van de waterstanden veroorzaakt door inzet Volkerak-Zoommeer.

Daarnaast geldt dat er veel resultaten in Figuur 3.23 ontbreken (zwarte bolletjes). In het bovenstroomse gedeelte komt dit doordat de Hydra-Zoet resultaten hier enkel voor de herhalingstijd van 1250 jaar zijn bepaald. Voor de meer benedenstroomse locaties komt dit door droogval en/of doordat er bij Hydra-Ring gebruik is gemaakt van een type 3 berekening. Hierbij berekent Hydra-Ring voor een reeks van vooraf gespecificeerde waarden de

bijbehorende frequentie. Deze vooraf gespecificeerde waarden zijn niet altijd adequaat gekozen, waardoor er niet altijd voor alle interessante herhalingsstijden resultaten beschikbaar zijn.

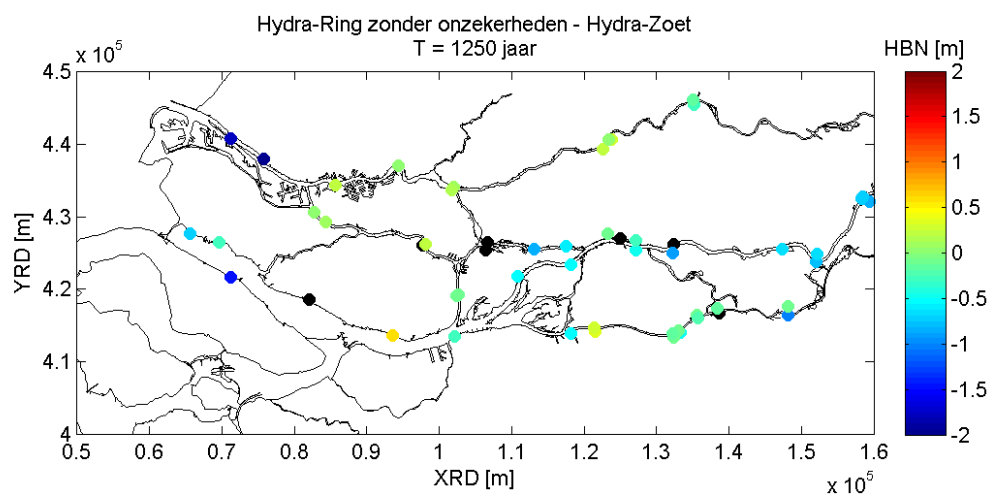
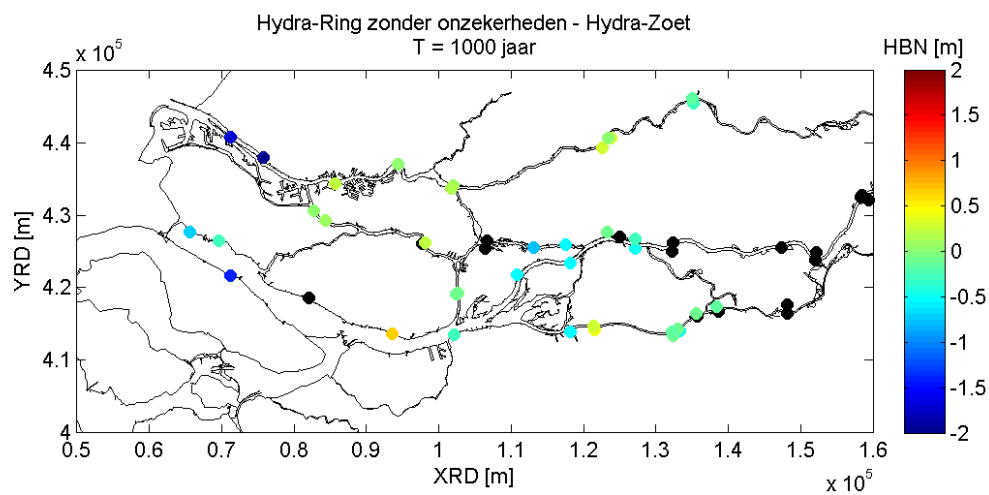
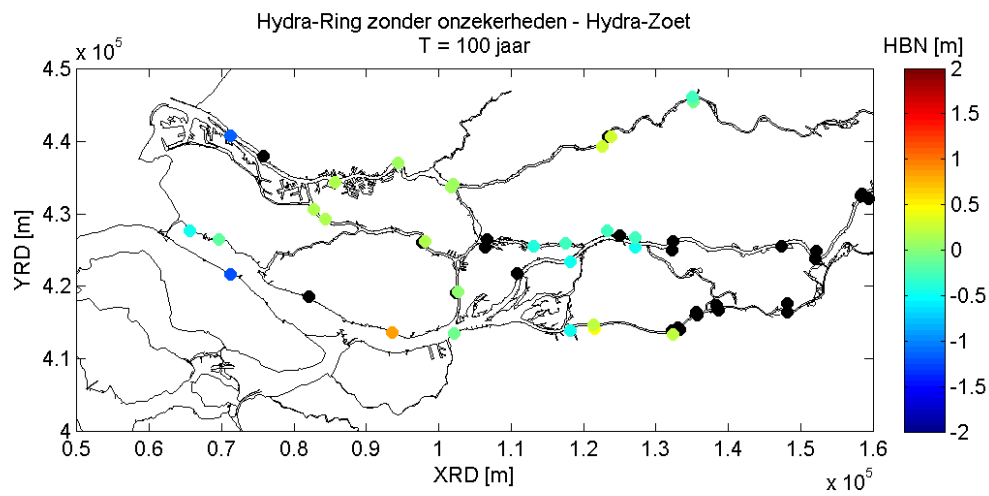


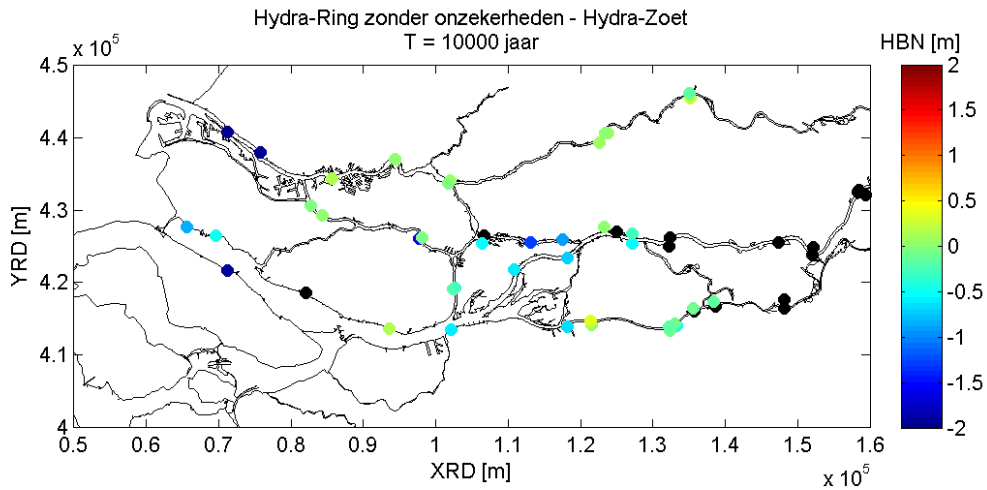


Figuur 3.23 Ruimtelijke verdeling van het verschil tussen MHW bij een herhalingsjijd van 100, 1000, 1250, 3000 en 10.000 jaar berekend door Hydra-Zoet en die berekend door Hydra-Ring zonder onzekerheden.

### 3.6.3 Resultaten HBN

De HBN resultaten in Figuur 3.24 zijn luidend ruimtelijk gezien tot vergelijkbare bevindingen als bij de lokale waterstand in de vorige paragraaf, enkel is de toe- of afname iets groter dan het geval was bij de waterstanden.

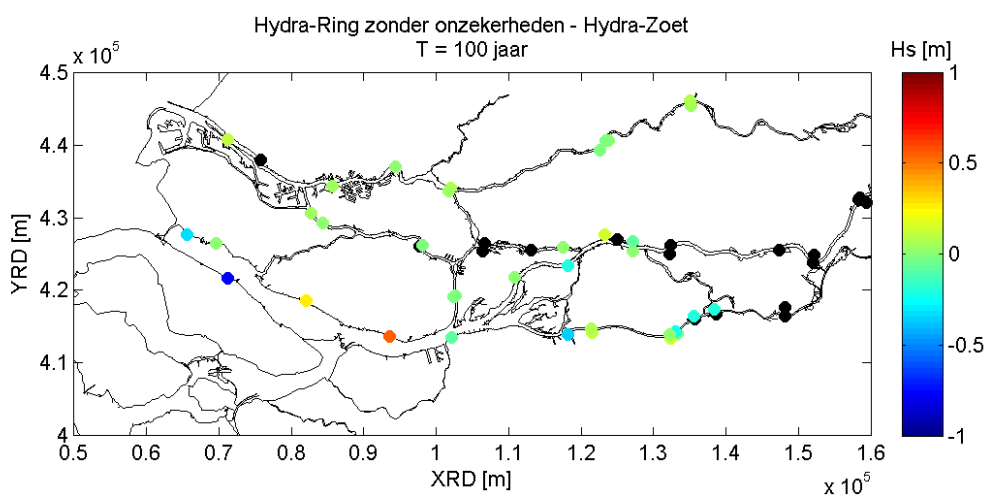


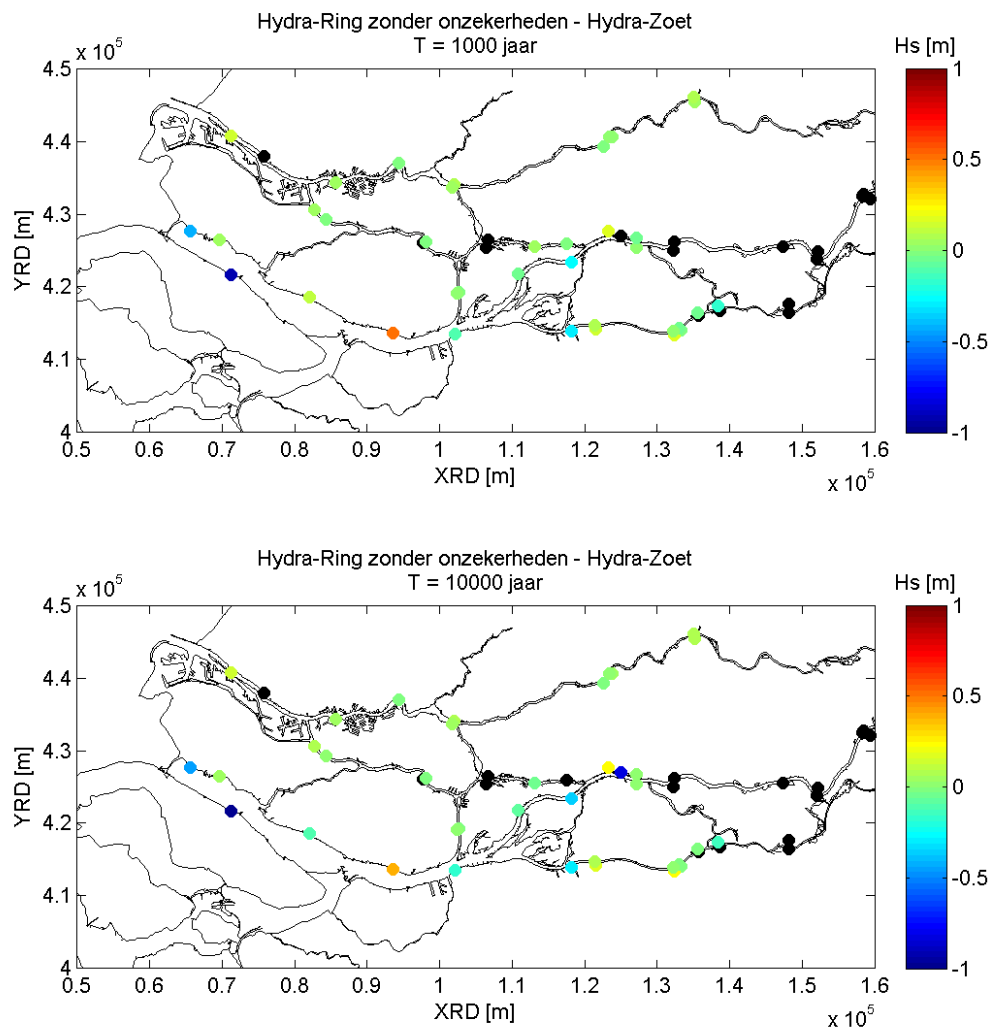


Figuur 3.24 Ruimtelijke verdeling van het verschil tussen HBN bij een herhalingsjijd van 100, 1000, 1250 en 10.000 jaar berekend door Hydra-Zoet en die berekend door Hydra-Ring zonder onzekerheden.

### 3.6.4 Marginale statistiek van de golfhoogte

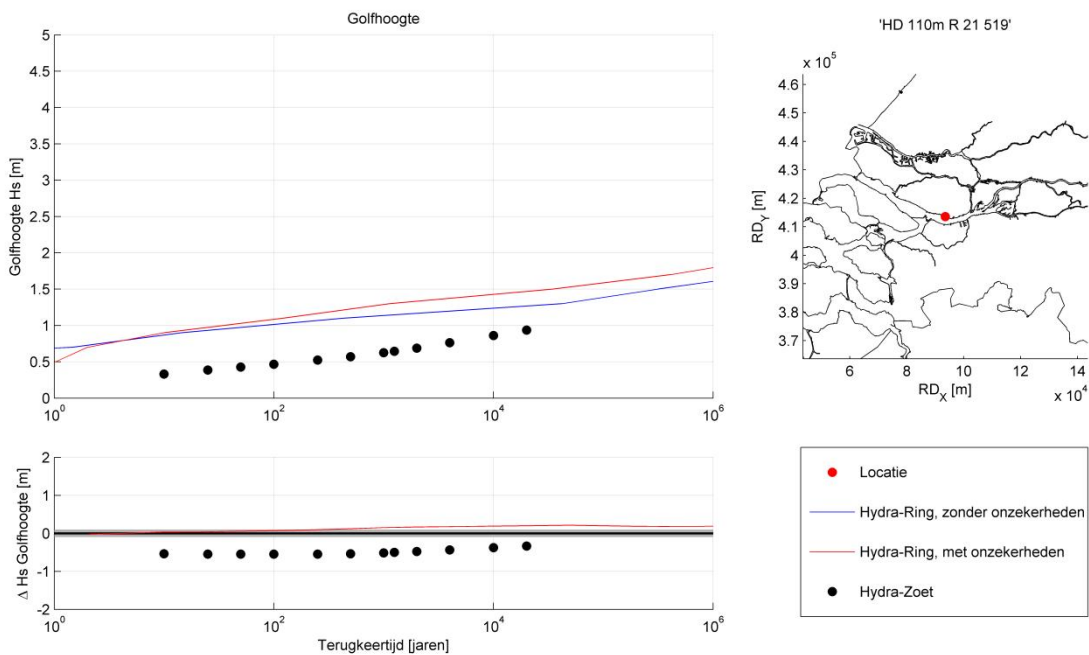
In Figuur 3.25 zijn de Hydra-Ring resultaten (zonder onzekerheden) vergeleken met Hydra-Zoet. De berekeningen zijn echter wel met Hydra-NL gemaakt omdat Hydra-Zoet de functionaliteit van het bepalen van de marginale statistiek van de golfhoogte niet bevat. Wel zijn de instellingen verder gelijk als aangegeven in Tabel 3.1. Hieruit blijkt dat de resultaten ofwel overeen komen ofwel dat de afwijking te verklaren is. De voornaamste verklaringen voor verschillen zijn (i) gewijzigde ligging van de uitvoerlocatie, (ii) toevoeging van obstakels in de golfmodellering en (iii) gewijzigde strijklengtes als gevolg van rivier verruimende maatregelen. Hieronder wordt voor een aantal locaties een verklaring gegeven.





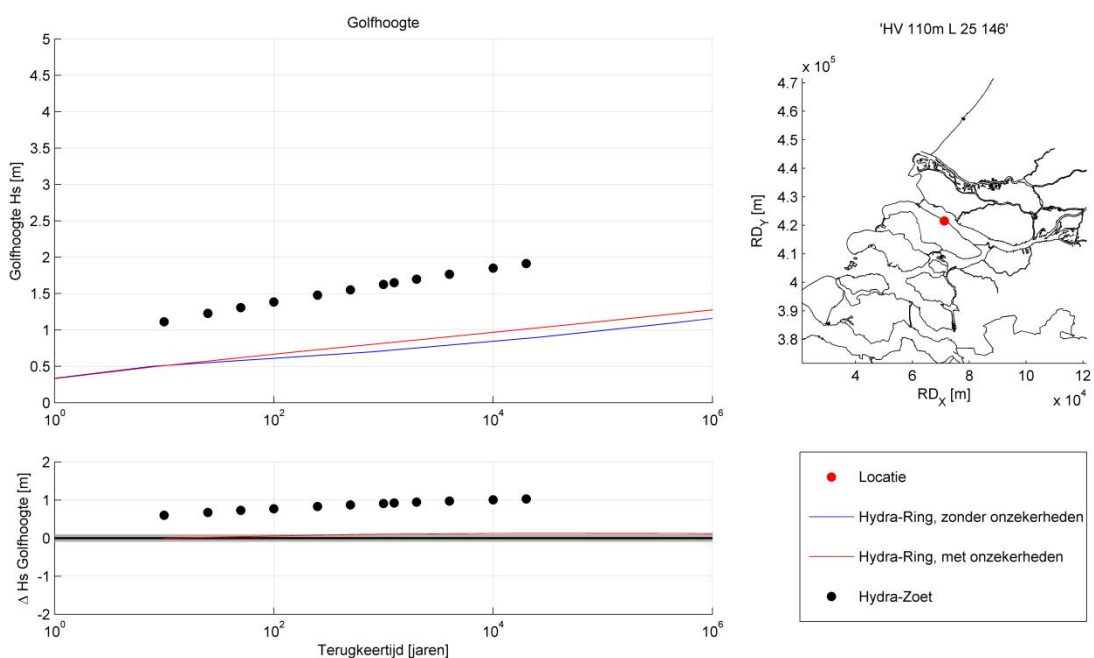
Figuur 3.25 Ruimtelijke verdeling van het verschil tussen  $H_s$  bij een herhalingsijd van 100, 1000 en 10.000 jaar berekend door Hydra-NL en die berekend door Hydra-Ring zonder onzekerheden.

In Figuur 3.26 is een locatie geplote waarvoor sprake is van een verzwaring van de golfcondities ten opzichte van CR2011. Deze verzwaring is terug te leiden naar zwaardere golfcondities behorende bij het ontwerp punt. Deze zwaardere golfcondities (zoals opgenomen in de database fysica) zijn het gevolg van een verschuiving van de uitvoerlocatie ten opzichte van CR2011: meer zuidelijk en dus in dieper water. Dit leidt tot een toename van de golfhogte op deze locatie.



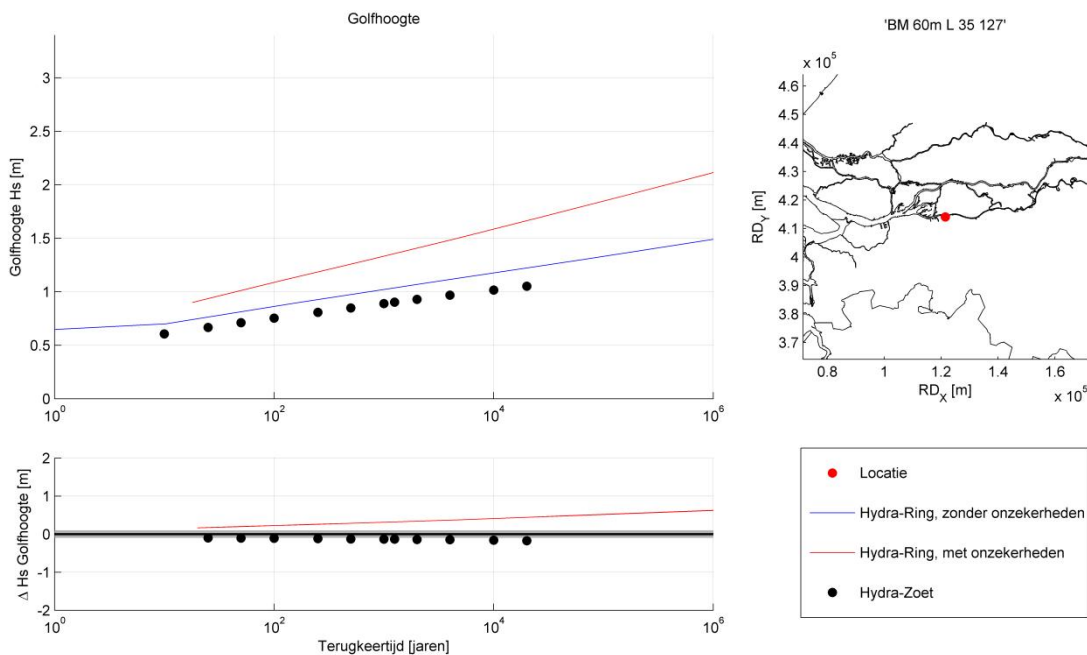
Figuur 3.26 Voorbeeld van een locatie waarbij ligging uitvoerlocatie is gewijzigd: "HD 110m R 21 519"

Figuur 3.27 toont een locatie waarvoor geldt dat de marginale statistiek van de golfhoogte significant is afgenomen als gevolg van het meenemen van obstakels in de bepaling van de golfcondities. De golfmodellering uitgevoerd om de golfcondities te bepalen laat juist voor deze uitvoerlocatie een aantal obstakels zien welke tot een significante reductie van de golfhoogte leiden. Deze reductie is nagenoeg een op een terug te zien in de marginale statistiek van de golfhoogte.



Figuur 3.27 Voorbeeld van een locatie waarvoor meenemen obstakels invloed heeft: "HV 110m L 25 146"

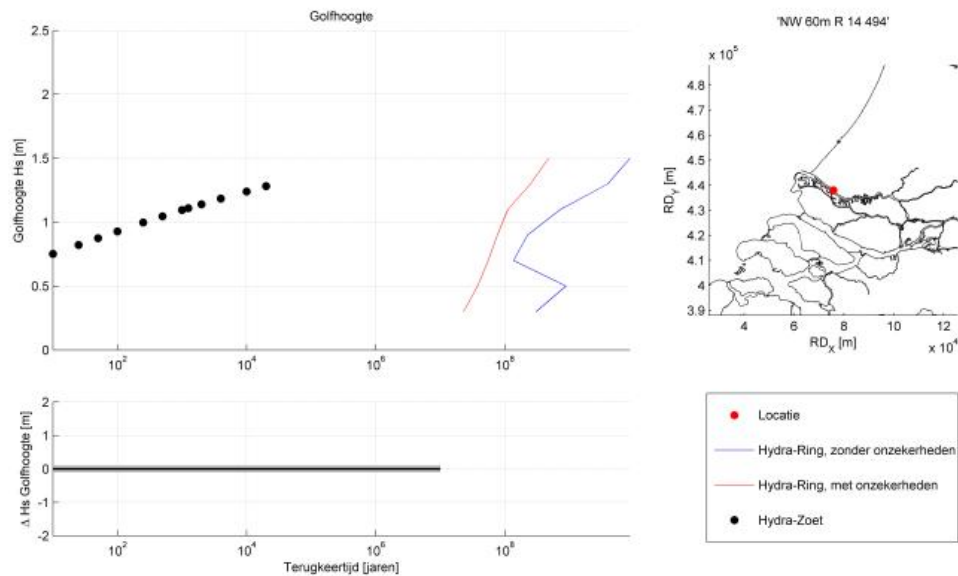
Figuur 3.28 toont tot slot een locatie op de Bergsche Maas waarvoor geldt dat de strijklengte is toegenomen als gevolg van een Ruimte voor de Rivier maatregel: Overdiepse Polder. De toename van de strijklengte leidt tot grotere golfcondities in de database bij gelijke forcering (mits niet dieptegelimiteerd). Dit leidt gevoeglijk tot een toename van de marginale statistiek van de golfhoogte.



Figuur 3.28 Voorbeeld van een locatie waarvoor strijklengte is toegenomen: "BM 60m L 35 127"

Figuur 3.29 geeft een voorbeeld van een locatie waarvoor ligging van het uitvoerpunt invloed heeft. Deze resultaten zijn goed te verklaren wanneer we naar de database kijken in Figuur 3.15. Voor het merendeel van de belastingcombinaties is de golfhoogte gelijk aan nul. Alleen voor de heel extreem voorkomende combinaties (waterstanden > 6m) zijn er golfgegevens beschikbaar. Waarschijnlijk hebben we hier te maken met een kademuur.



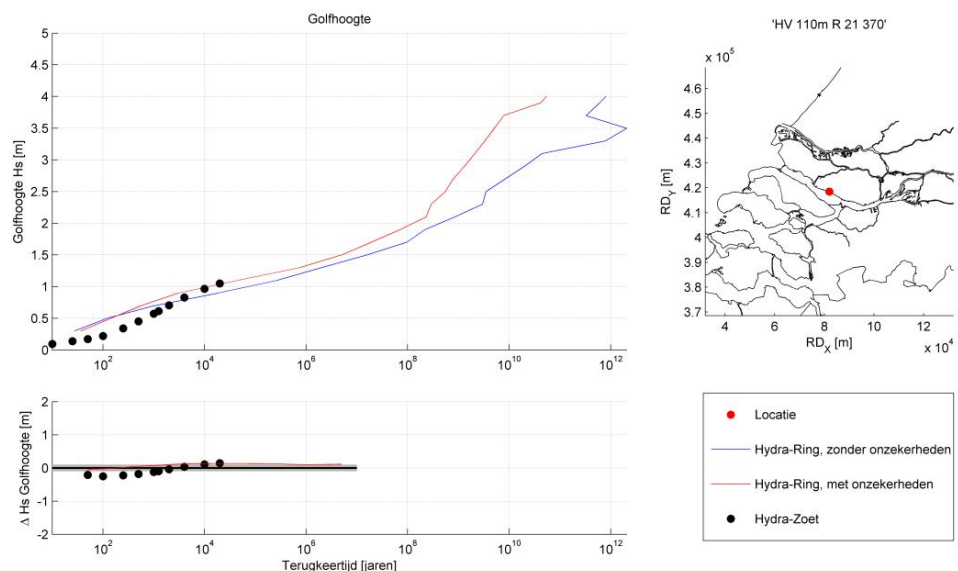


Figuur 3.29 Voorbeeld van een locatie waarbij ligging uitvoerlocatie is gewijzigd voor locatie '308302'.

Figuur 3.30 laat zien dat voor golfhoogtes kleiner dan 0.5 meter dat de frequentielijn met onzekerheden lager ligt dan zonder onzekerheden. Dit kan twee oorzaken hebben:

- Ten eerste geldt voor de bredere wateren een bias van  $-0.06\text{m}$  en een standaardafwijking van  $0.15\text{ m}$ . Omdat de frequentielijn in dit voorbeeld relatief stijf loopt heeft de spreiding van de onzekerheid weinig effect. Maar door de negatieve bias komt de totale waarde lager uit.

De tweede mogelijke reden is dat de golfhoogtes in de database niet altijd monotoon oplopen. Dit is te zien in Figuur 3.22. Als de zeewaterstand toeneemt, dan neemt de golfhoogte niet altijd toe.



Figuur 3.30 Voorbeeld van een locatie waarbij de Hydra-Ring resultaten met en zonder onzekerheden elkaar kruisen, locatie 305694.

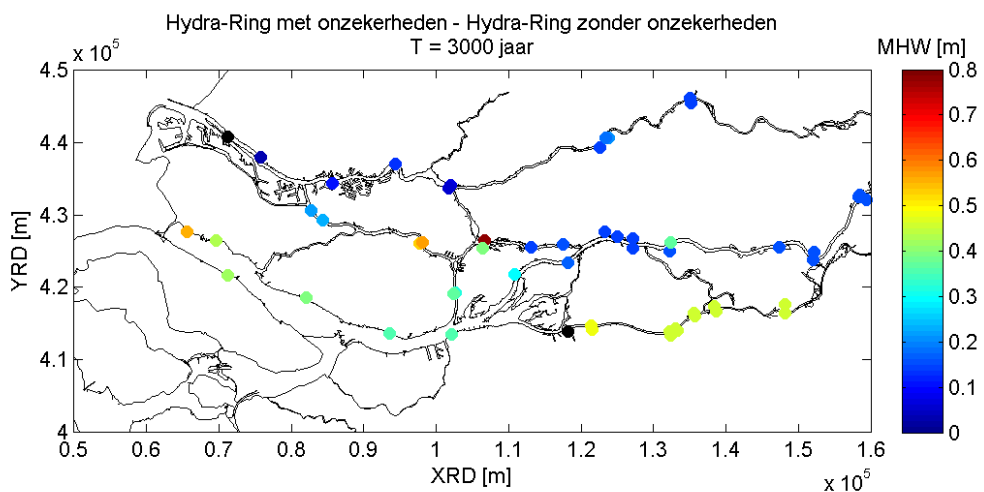
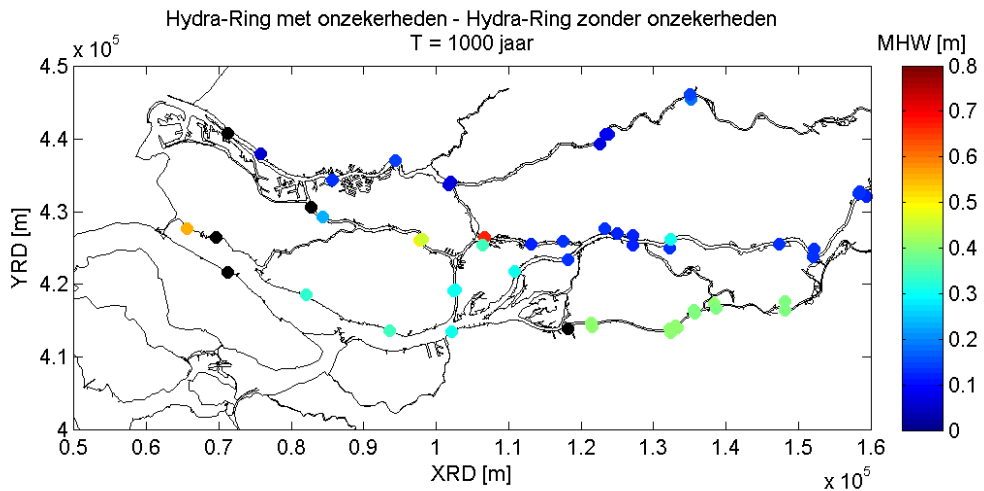
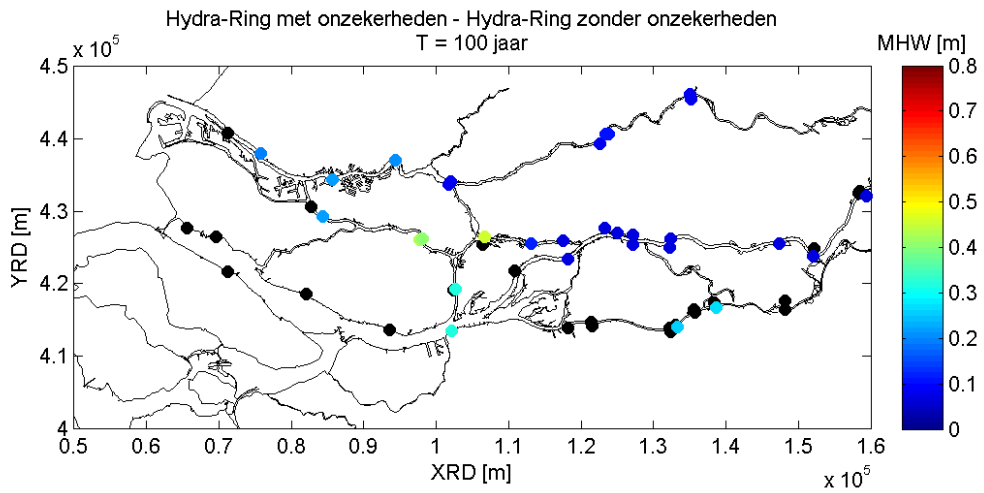
### 3.7 Effecten onzekerheden

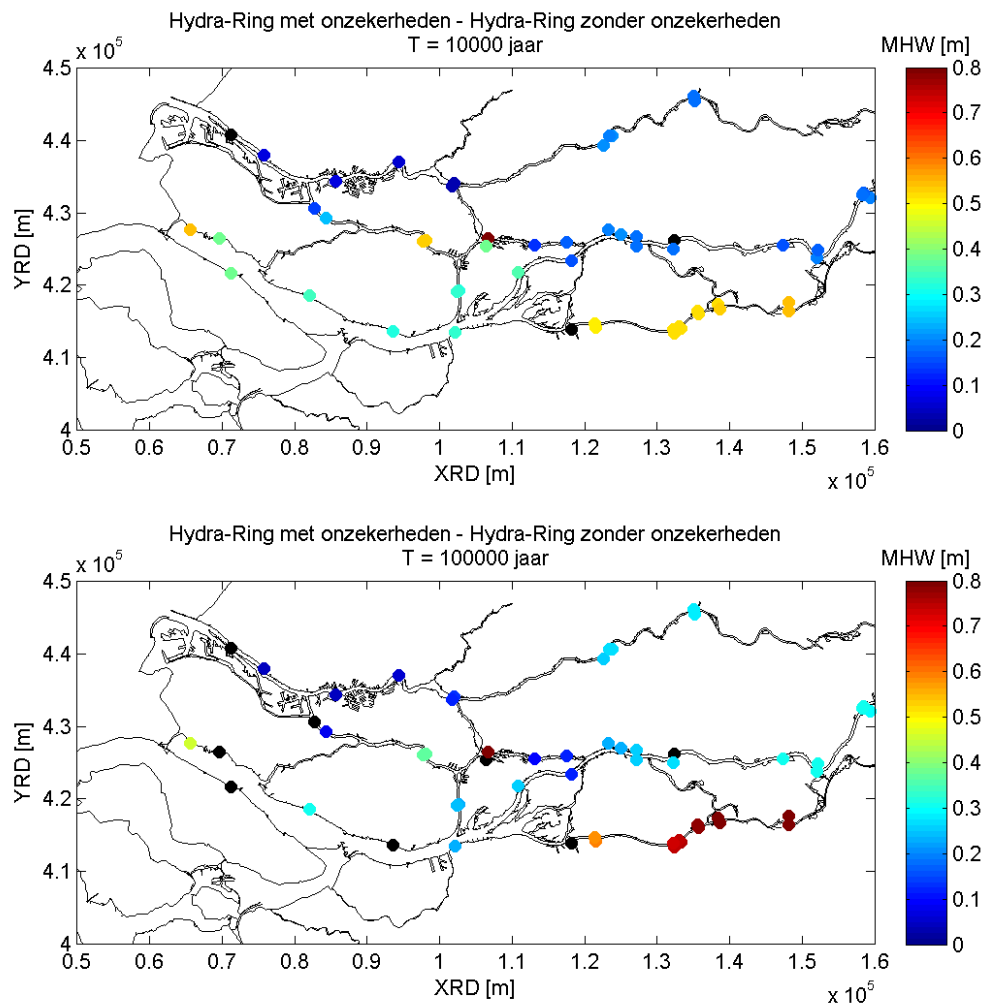
In deze paragraaf wordt naar het effect van het meenemen van onzekerheden in de probabilistische berekening gekeken. Hiertoe worden de Hydra-Ring resultaten met en zonder onzekerheden als extra stochasten met elkaar vergeleken.

#### 3.7.1 Resultaten lokale waterstand

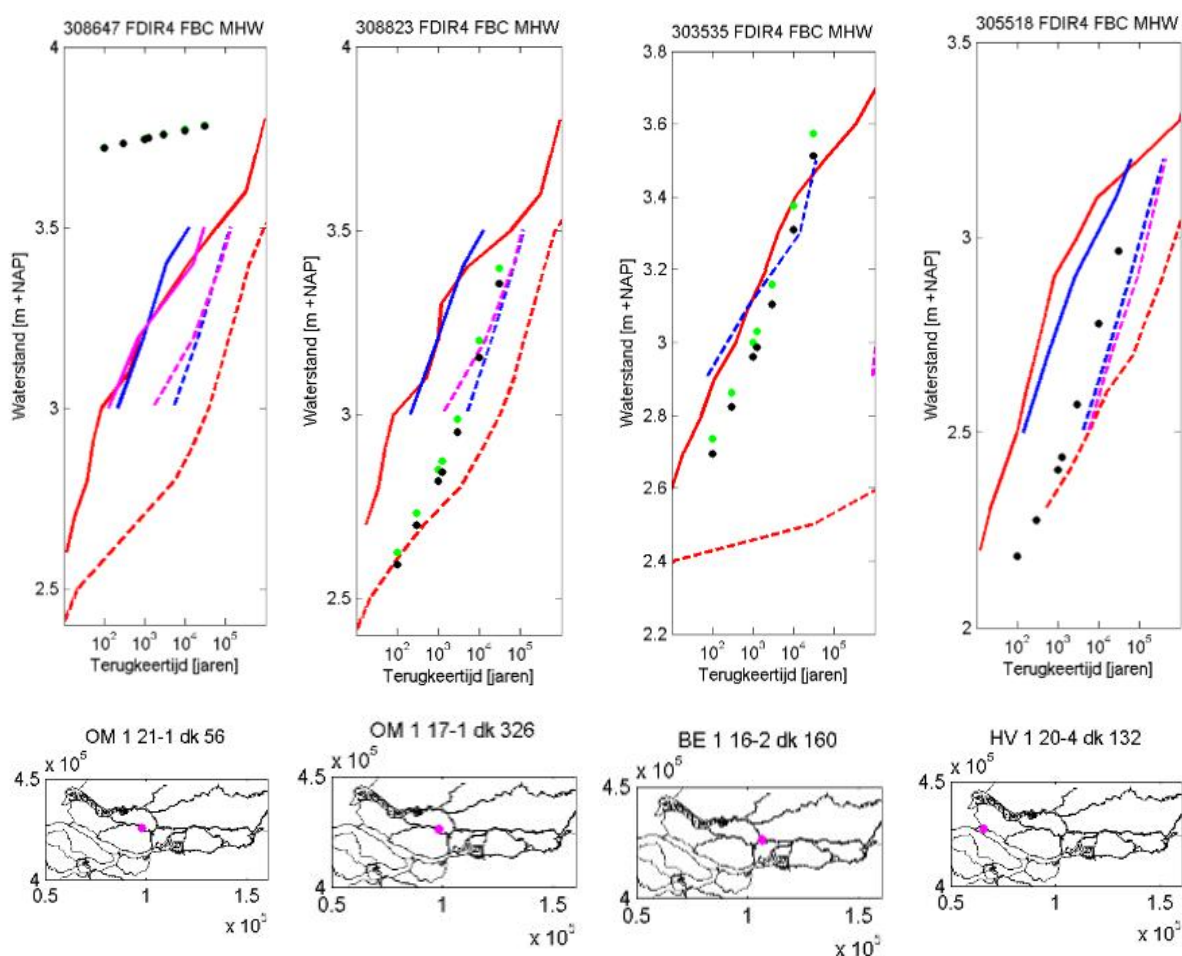
Uit Figuur 3.31 kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- Op de Bergsche Maas is het effect van onzekerheden het grootst (circa 50 cm bij  $T=10.000$  jaar), gevolgd door het Haringvliet, Hollandsch Diep, Waal en de Lek (orde 30 cm).
- Verder zijn er in het Rijngedomineerde deel vier locaties t waar de bijdrage van onzekerheden relatief groot is, dit is de meest benedenstroomse locatie op het Haringvliet, een op de kruising van de Noord en de Beneden Merwede en twee locaties op de Oude Maas. De bijdrage van onzekerheden is hier zo groot omdat de frequentielijn heel vlak loopt, zie Figuur 3.32. Door het vlakke verloop is de frequent voorkomende waterstand nagenoeg gelijk aan de "extreme" waterstand. Het illustratiepunt zal in dit geval bestaan uit een frequent voorkomende waterstand en grote toeslag voor onzekerheid, bijna alle kansruimte gaat dus naar de modelonzekerheid. De optelsom van waterstand + onzekerheid komt daardoor veel hoger uit. Bij steiler lopende frequentielijnen is dat niet het geval. Bovenstaande reden zorgt er ook voor dat voor drie van de vier locaties de onzekerheid niet monotoon toeneemt met de herhalingstijd, daar waar de gestippelde rode lijn in Figuur 3.32 vlak loopt is de onzekerheid groter dan bij de steilere delen. Als laatste geldt dat voor al deze locaties gebruik is gemaakt van rekentechniek I, rekentechniek II geeft hier kleinere onzekerheidsbanden.
- Het is opvallend dat het effect van onzekerheden op de Nieuwe waterweg, Nieuwe Maas en Merwede zeer klein is, dit komt door het relatief steile verloop van de frequentielijn.





Figuur 3.31 Ruimtelijke verdeling van het verschil tussen waterstanden bij een herhalingsstijd van 100, 1000, 3000 10.000 en 100.000 jaar berekend door Hydra-Ring met en zonder onzekerheden.

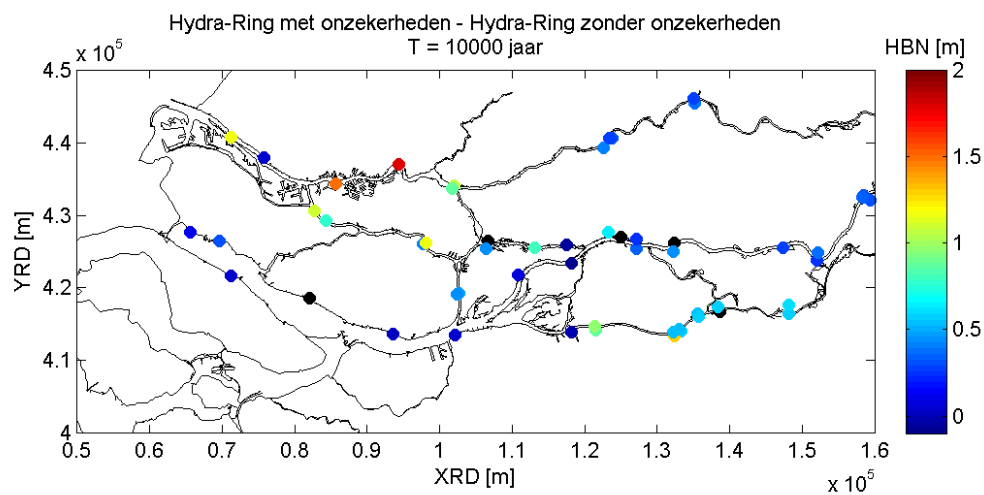
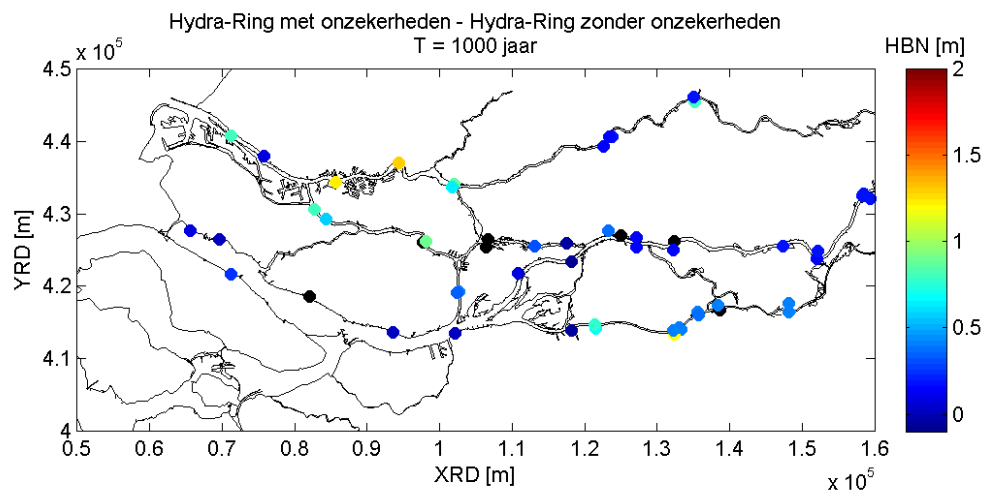
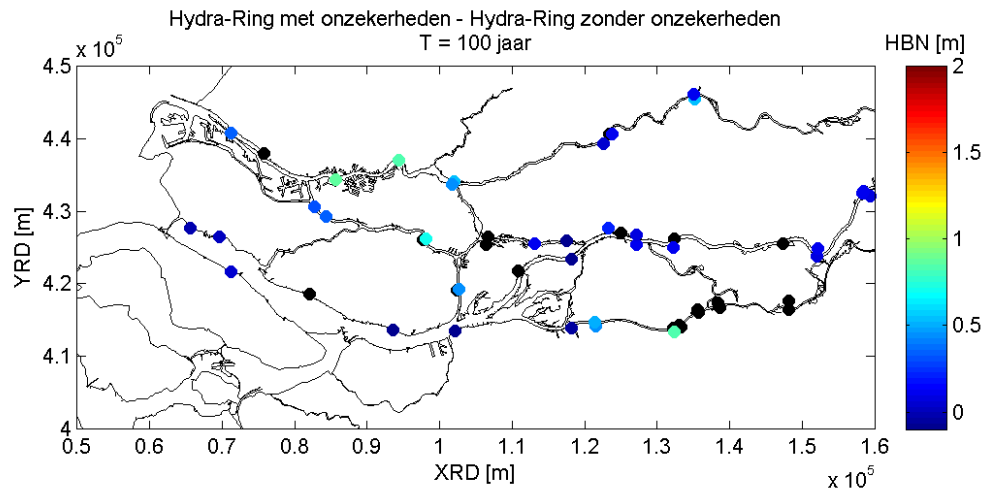


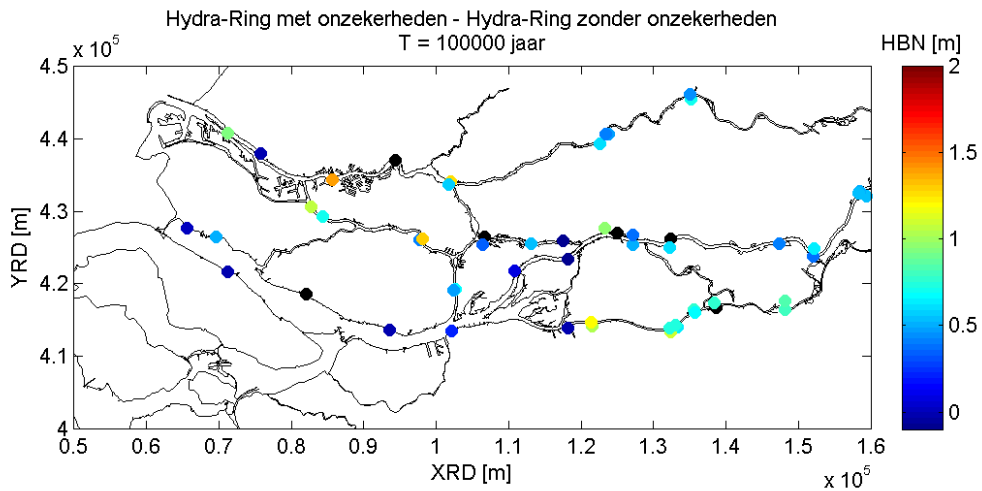
Figuur 3.32 Frequentielijn waterstand voor de vier locaties. De rode, blauwe en magenta lijn geven respectievelijk de resultaten van rekentechniek I, II en III. Hierin geeft de doorgetrokken lijn de resultaten met onzekerheden (=Unc1) en de gestippelde lijn de resultaten zonder onzekerheden (=Unc0). Boven de figuren is aangegeven welke rekentechniek geselecteerd zou worden volgens het stappenplan in paragraaf 2.7, voor alle locaties is dit rekentechniek I. De groene en zwarte stippen geven de Hydra-zoet resultaten met nieuwe statistiek, met en zonder onzekerheden.

### 3.7.2 HBN-resultaten

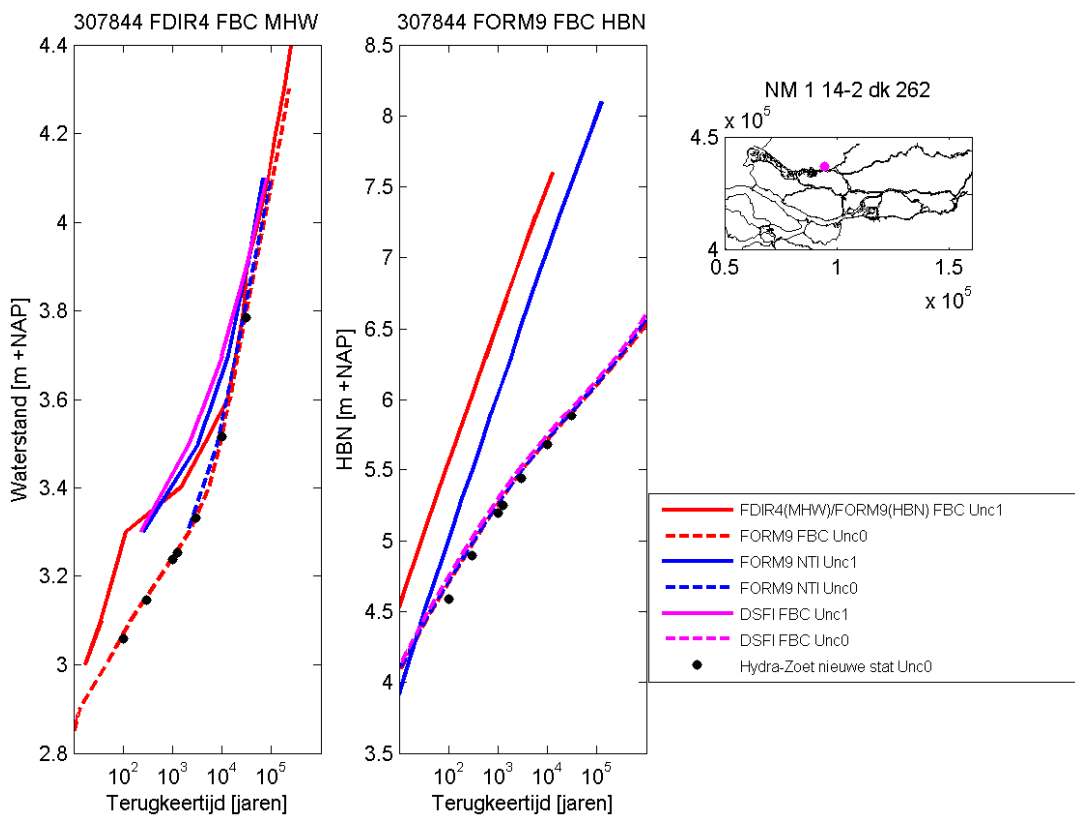
In Figuur 3.33 zijn ruimtelijke plots van het effect van onzekerheden voor het HBN gegeven. Hieruit zijn de volgende conclusies te trekken:

- Voor de meeste locaties langs de Bergsche Maas, Amer, Hollandsch Diep en Haringvliet nemen de onzekerheden licht toe ten opzichte van de waterstand (orde 30-60 cm bij  $T=10.000$  jaar). Rond dijkkring 17 (Nieuwe Maas, Oude Maas, Wantij en Nieuwe Waterweg) nemen de onzekerheden juist sterk toe. Waar het effect van de onzekerheid zo'n 10 cm was bij de waterstanden loopt hij op tot maximaal 2 meter bij het HBN. In Figuur 3.34 en Figuur 3.35 zijn hiervan twee voorbeelden gegeven. Dit heeft waarschijnlijk te maken met de modelonzekerheid van de golven. Zo geldt voor het Haringvliet voor de modelonzekerheid van de golfhoogte een standaarddeviatie van 0.15 m, voor de smalle wateren geldt een modelonzekerheid van de golfhoogte met een standaarddeviatie van 0.27 m.
- De onzekerheden bij Rotterdam zijn groot vanwege het relatief flauwe verloop van de frequentielijn van het HBN.

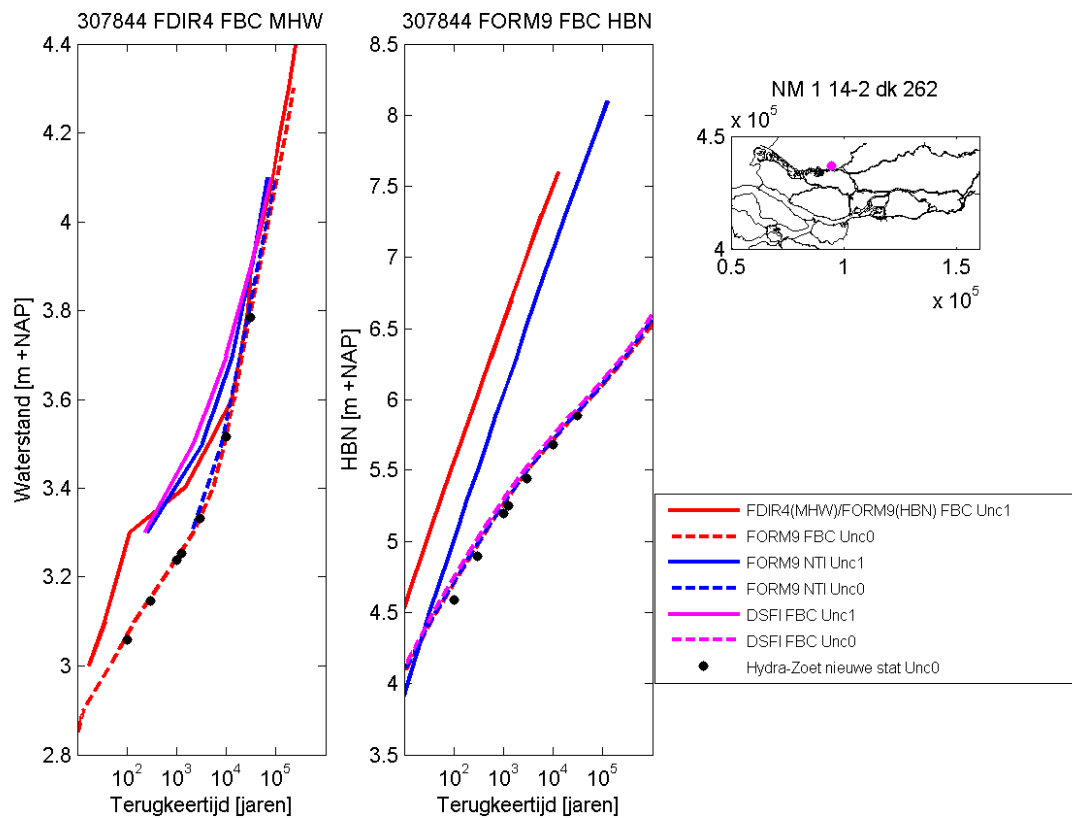




Figuur 3.33 Ruimtelijke verdeling van het verschil tussen HBN bij een herhalingsstijd van 100, 1000, 10.000 en 100.000 jaar berekend door Hydra-Ring met en zonder onzekerheden.



Figuur 3.34 Voorbeeld van een locatie waarbij de onzekerheid van het HBN groot is, locatie '307844'.

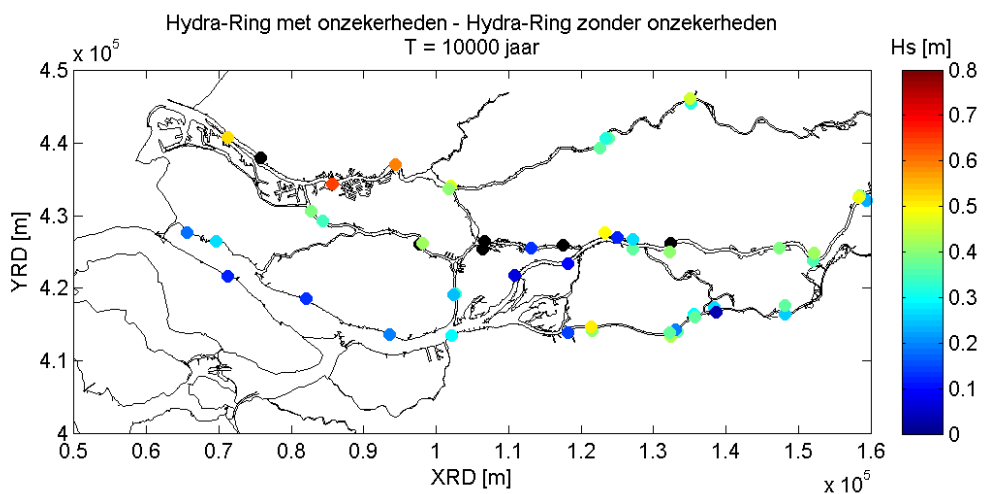
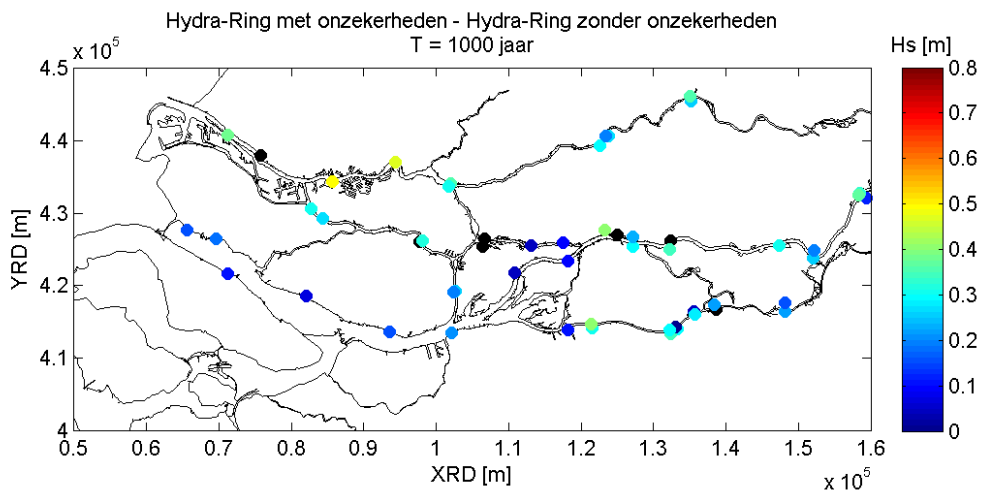
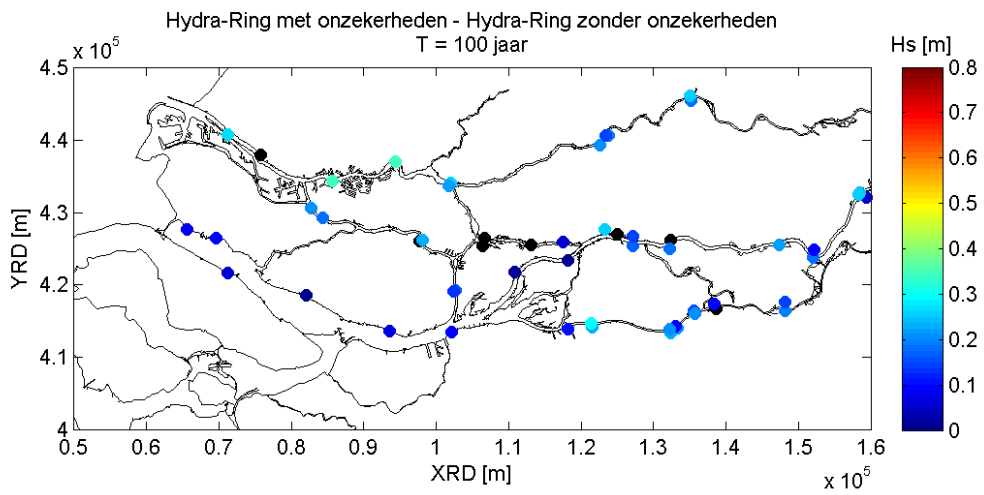


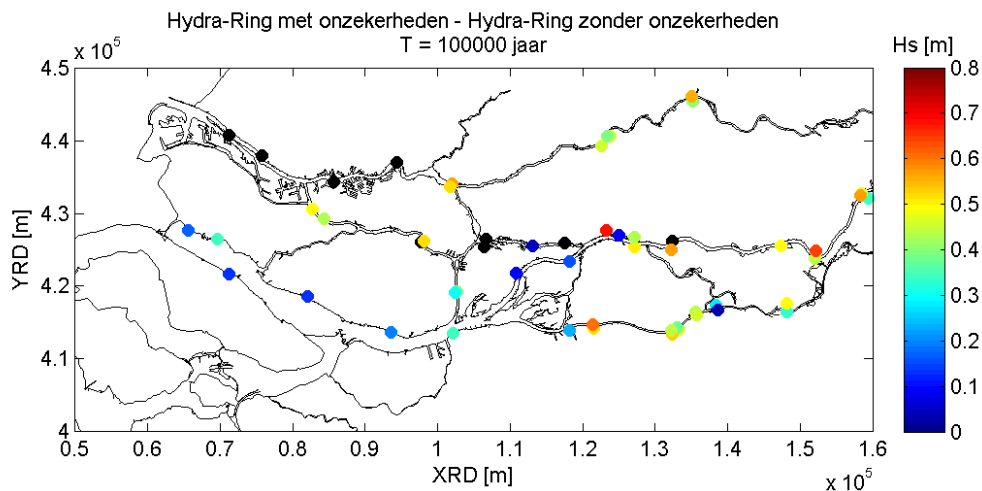
Figuur 3.35 Voorbeeld van een locatie waarbij de onzekerheid van het HBN groot is, locatie '308823'.

### 3.7.3 Resultaten Marginale statistiek van de golfhoogte

In Figuur 3.30 zijn ruimtelijke plots van het effect van onzekerheden voor de golfhoogte gegeven. Voor bredere wateren (Haringvliet, Hollandsch Diep en Biesbosch) geldt voor de modelonzekerheid van de golfhoogte een standaarddeviatie van 0.15, voor de overige (smalle) wateren geldt een modelonzekerheid van de golfhoogte met een standaarddeviatie van 0.27. Dit verschil in modelonzekerheid is nadrukkelijk zichtbaar in de ruimtelijke figuren.







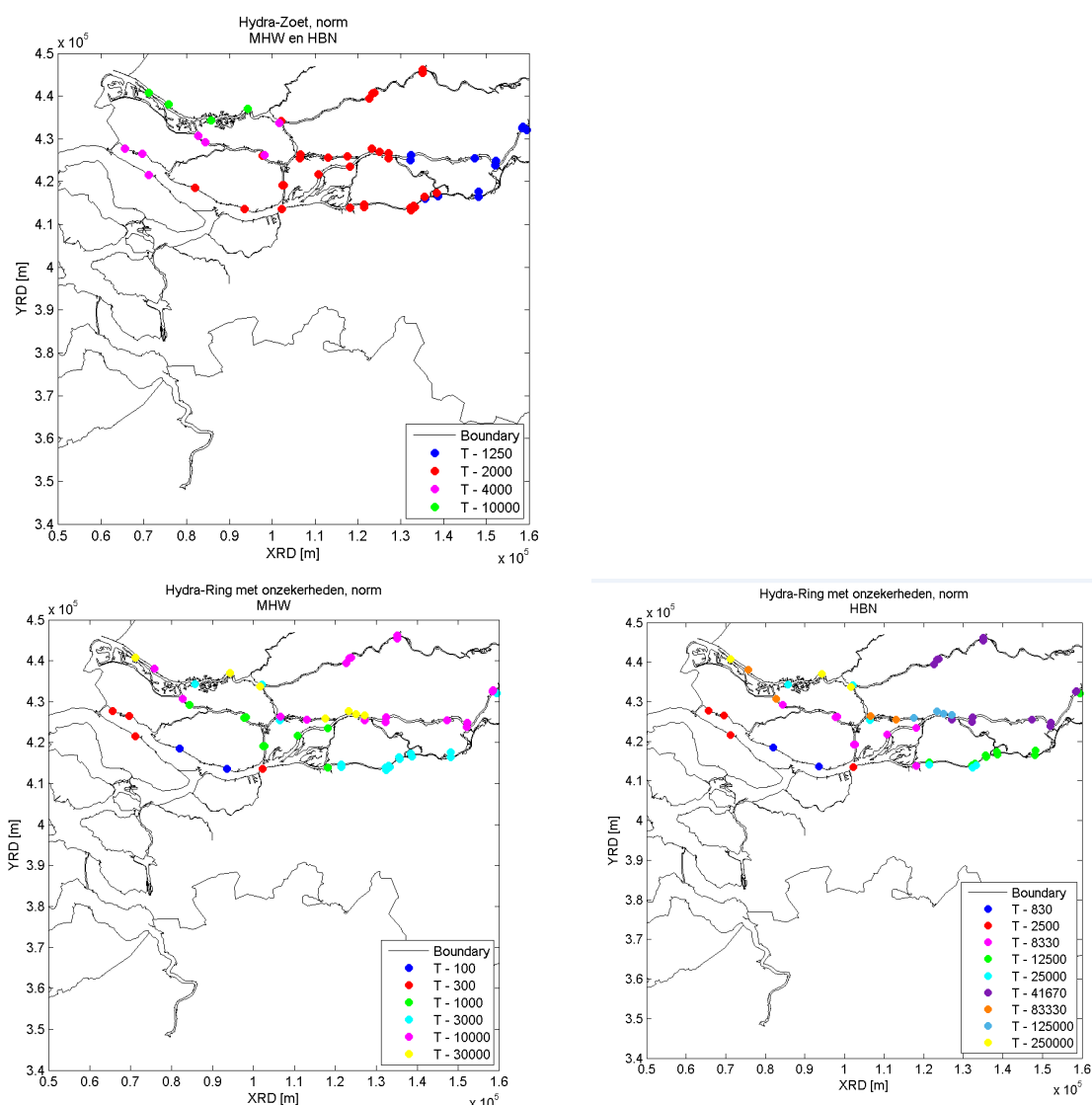
Figuur 3.36 Ruimtelijke verdeling van het verschil tussen waterstanden bij een herhalingstijd van 100, 1000, 10.000 en 100.000 jaar berekend door Hydra-Ring met en zonder onzekerheden.

### 3.8 Vergelijking Hydra-Zoet met oude norm versus Hydra-Ring met nieuwe norm

Voor zowel de lokale waterstand als het HBN is in deze paragraaf het verschil bepaald tussen de belastingparameters zoals berekend met Hydra-Ring bij de nieuwe norm en die met Hydra-Zoet bij de oude norm. Hiermee worden vele veranderingen samen bekeken, dit zijn de veranderingen in het belastingmodel, de overstap op een ander probabilistisch model, de verdiscontering van onzekerheden, de nieuwe fysica en de overstap op een nieuwe norm.

Voor HBN is de faalkanseis beschouwd door de trajectnorm te vermenigvuldigen met het faalkansbudget (0.24) en te delen door de lengte-effect-factor (RWS, 2015). Merk op dat we voor de trajectnorm uit gaan van de ondergrens (maximaal toelaatbare faalkans) zoals weergegeven in Figuur 3.37.

Voor alle testlocaties zijn de oude normen, zoals gehanteerd in de Hydra-Zoet berekeningen, en de nieuwe normen (ondergrens), weergegeven in Figuur 3.37. Ten aanzien van de nieuwe normen is onderscheid gemaakt tussen de normen die worden beschouwd bij de berekeningen van de lokale waterstanden (ondergrens van de trajectnorm) en HBN (faalkanseis).



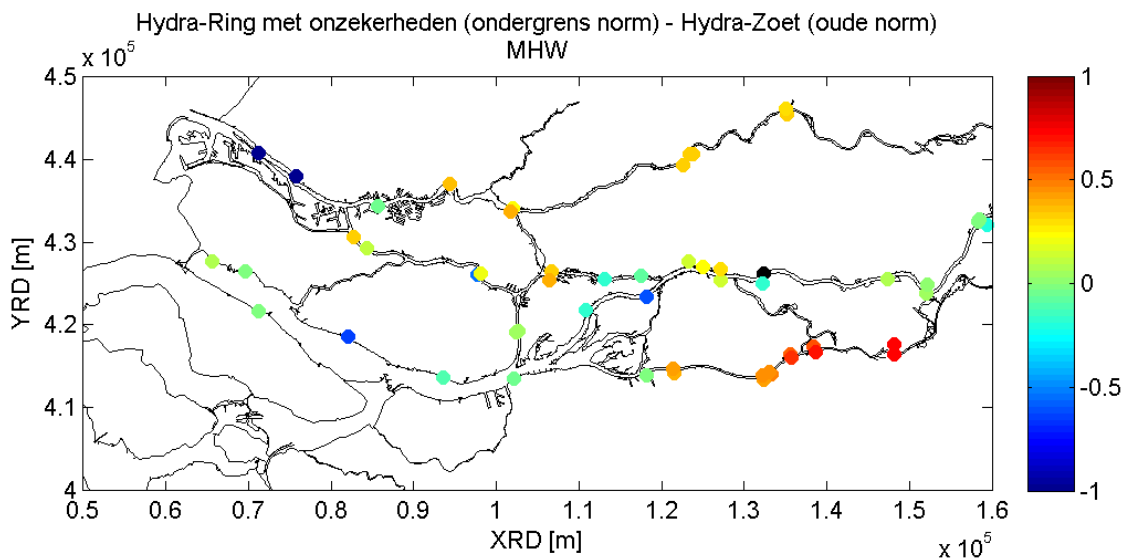
Figuur 3.37 Gehanteerde normen op testlocaties: Oude normen (boven), nieuwe normen bij trajectnorm, ondergrens (links onder) en faalkanses voor HBN berekeningen (rechts onder). In de oude normering had deze locatie wel een norm omdat hij toen opgenomen was in een dijkring.

Voor de norm van de lokale waterstand geldt dat deze minder streng (factor 2 tot 20) wordt in de Biesbosch, Oude Maas, Dordste Kil, Holland Diep en Haringvliet. Vooral in het bovenstroomse gedeelte van het benedenriviereengebied wordt de norm juist strenger, bij de Beneden Merwede is dit zelfs een factor 15.

Op het Haringvliet na wordt de norm van de HBN's voor de alle locaties strenger. Voor de Beneden Merwede is dit zelfs een factor 62,5. Maar ook locaties rond de Maas, Waal, Lek en Boven Merwede kunnen lopen de normen sterk op.

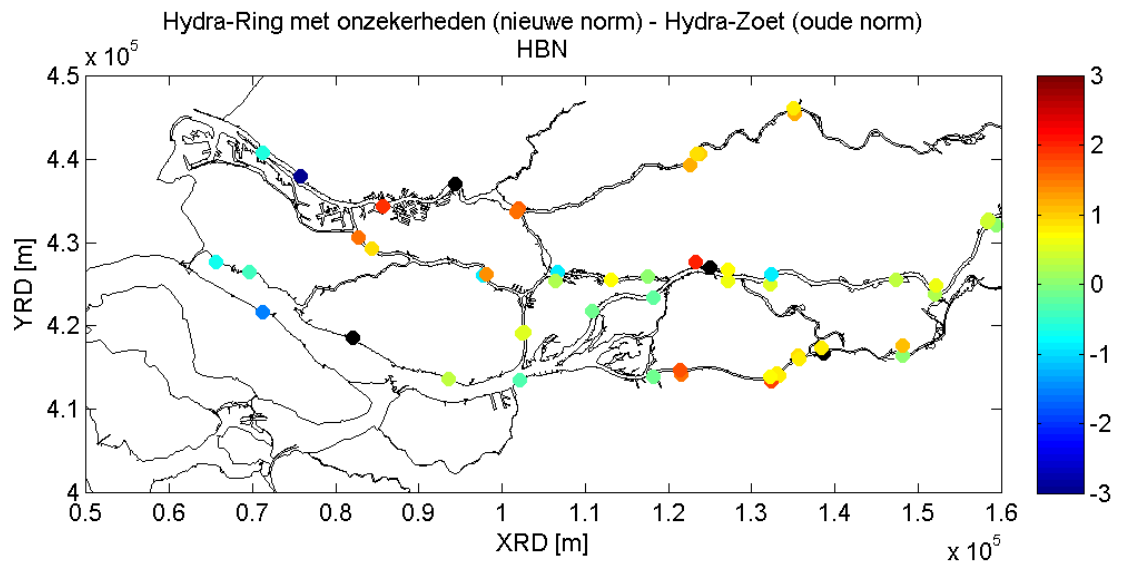
De verschillen in lokale waterstand en HBN als gevolg van de nieuwe normering, nieuwe statistiek, nieuwe database, en het meenemen van onzekerheden en een ander belastingmodel zijn weergegeven in Figuur 3.38 respectievelijk Figuur 3.39.

Figuur 3.38 laat zien dat, er voor de meeste locaties een toename is van de MHW's. De grootste stijging is waar te nemen op de Bergsche Maas, de verschillen lopen hier op tot bijna een meter. Dit is vooral te wijten aan de verhoogde norm en aan het meenemen van onzekerheden.



Figuur 3.38 Ruimtelijke verdeling van het verschil tussen lokale waterstand berekend met Hydra-Ring (met onzekerheden) bij de nieuwe norm en door Hydra-Zoet bij de oude norm.

Wanneer we in Figuur 3.39 naar de HBN's kijken dan zien we voor alle locaties een stijging van het HBN. Voor meerdere locaties loopt de toename met bijna 3 meter toe. Dit is vooral te wijten aan een strengere norm, de nieuwe database, meenemen van onzekerheden en de keuze van de uitvoerlocaties. Voor een een locatie op de Nieuwe waterweg neemt het HBN juist met 3 meter af. De voornaamste oorzaak hier is het niet toepassen van reparaties aan de databases (zie Figuur 3.12). Langs het Haringvliet en Hollandsch Diep nemen de HBN's af vanwege de soepelere norm en door inzet van de hoogwatermaatregel Volkerak-Zoommeer. Opgemerkt moet worden dat bij de vergelijking gewerkt is met een standaard 1:3 profiel en een overslagdebiet van 1 l/s/m, de resultaten zijn dus slechts een indicatie.



*Figuur 3.39 Ruimtelijke verdeling van het verschil tussen HBN zoals berekend met Hydra-Ring (met onzekerheden) bij de nieuwe norm en door Hydra-Zoet bij de oude norm.*



## 4 Resultaten HB Benedenrivierengebied

### 4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de productiesommen voor de eenvoudige toets besproken en gecontroleerd. Het gaat hierbij om de marginale statistiek van de lokale waterstanden en golfhoogtes bij de normfrequentie voor alle locaties bij keringen in het Benedenrivierengebied. Daarnaast worden de HBN's voor dezelfde locaties besproken, hoewel dit geen invoer is voor de eenvoudige toets.

Bij dit rapport worden spreadsheets geleverd met de resultaten voor alle locaties en voor zeven herhalingstijden. In deze sheets wordt per locatie tevens aangegeven welke rekentechniek gebruikt is, of er sprake is van droogval en instabiliteit van de berekening.

### 4.2 Uitgangspunten productieberekeningen

De productieberekeningen HBN zijn uitgevoerd voor een standaard dijkprofiel van 1:3 en voor een kritiek overslagdebiet van 1 l/s/m. De modelinstellingen staan genoemd in paragraaf 3.3.2 in de tabel "Berekening Hydra-Ring met onzekerheden en nieuwe windstatistiek".

De resultaten worden getoond voor alle uitvoerlocaties voor de volgende herhalingstijden: 100, 300, 1.000, 3.000, 10.000, 30.000, 100.000 jaar. Aangezien het hier gaat om de belastingparameter per herhalingstijd worden de resultaten van de type 2 berekening weergegeven.

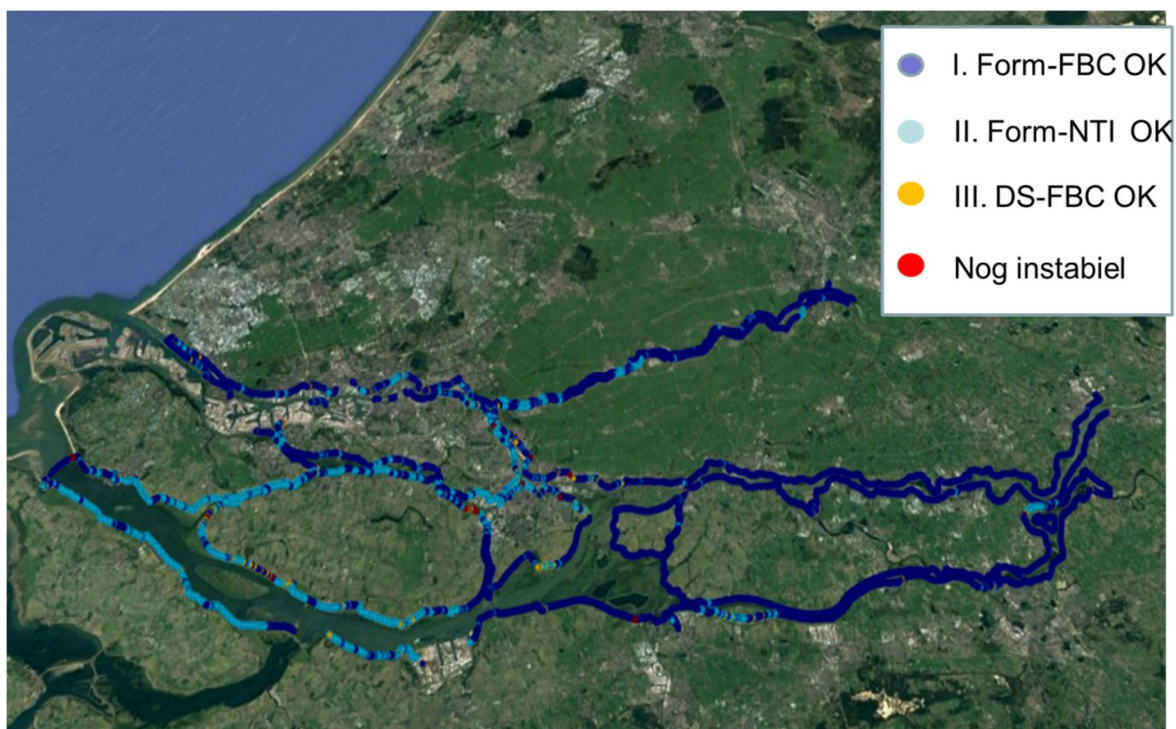
### 4.3 Keuze rekentechniek

Alvorens een gedetailleerde analyse van de resultaten op locatieniveau uit te voeren is allereerst een visuele controle van geselecteerde rekentechniek volgens het stappenplan in paragraaf 2.7 uitgevoerd. Figuur 4.1 en Figuur 4.2 laten zien dat er rekentechniek I voor 24% en 43.4% van de berekeningsresultaten van lokale waterstand respectievelijk HBN (met onzekerheden) instabiliteit vertoont. Deze locaties liggen voornamelijk in het overgangsgebied en in het wind/zeegedomineerde deel. Wanneer rekentechniek II wordt toegepast, dan lost dit de instabiliteitsproblemen voornamelijk op het overgangsgebied, het Hollandsch Diep en het Haringvliet. Dit is ook naar verwachting aangezien trage en langzame stochasten hier samenkomen en de tijdsintegratiemethode NTI hier beter mee om kan gaan dan FBC. Rekentechniek III is vooral effectief in het wind/zeegedomineerde deel, dit heeft er mee te maken dat FORM (welke is toegepast in rekentechniek I en II) niet goed om kan gaan met niet monotoon oplopende belastingfuncties. Na toepassing van rekentechniek III blijft nog 0,7% van de locaties en 5,5% van de locaties over voor respectievelijk waterstand en HBN. In het bijgeleverde Excel bestand is per locatie aangegeven welke rekentechniek gebruikt is.

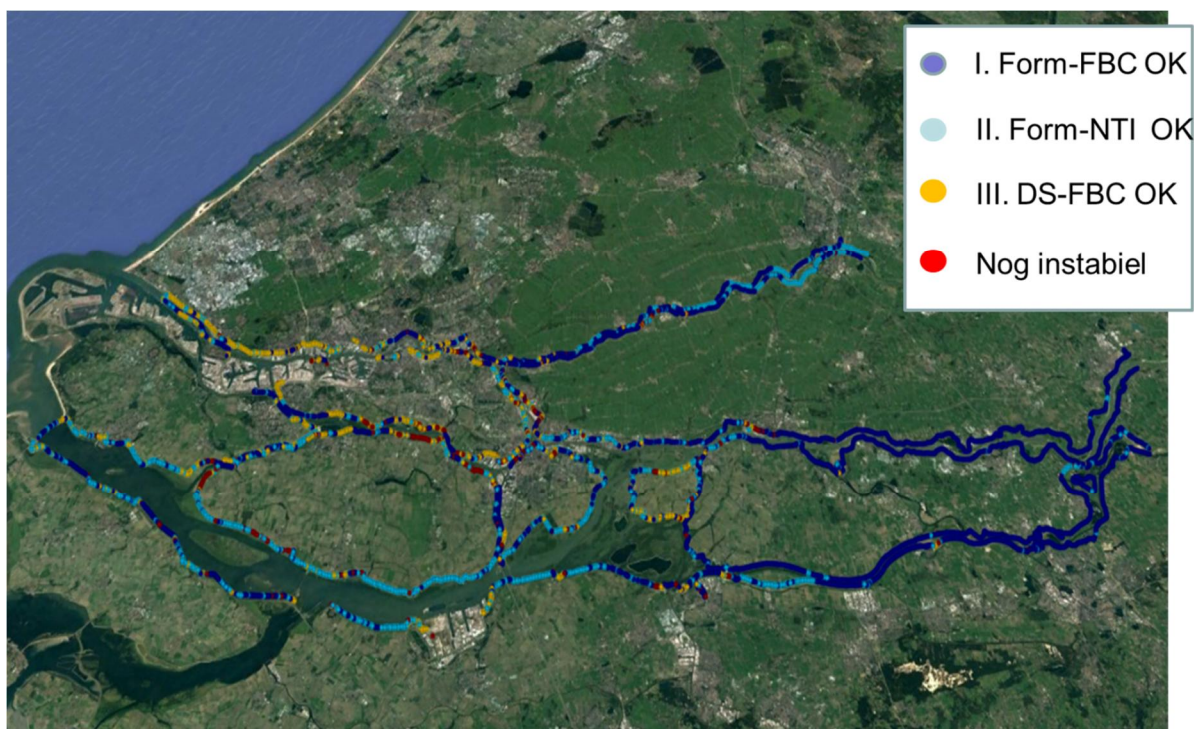
	I Form-FBC %	II Form-NTI %	III DS-FBC %
BER MHW	24.0	2.3	0.7
BER HBN	43.4	18.9	5.5

Tabel 4.1 Percentage van de MHW en HBN berekeningen met instabiliteit na toepassen van rekenrekentechniek I, II en III.





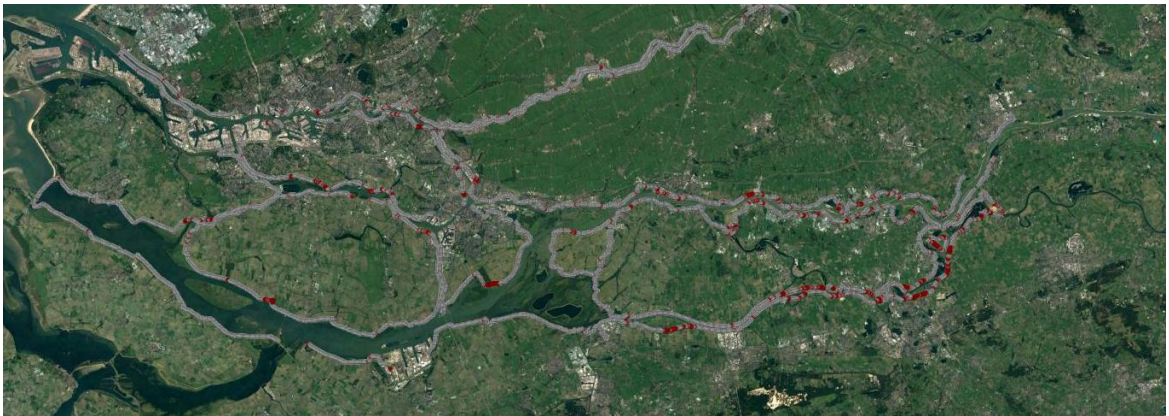
Figuur 4.1 Locaties (rode punten) waarbij sprake is van instabiel gedrag in overschrijdingscurve lokale waterstand van Hydra-Ring met onzekerheden.



Figuur 4.2 Locaties (rode punten) waarbij sprake is van instabiel gedrag in overschrijdingscurve HBN van Hydra-Ring met onzekerheden.



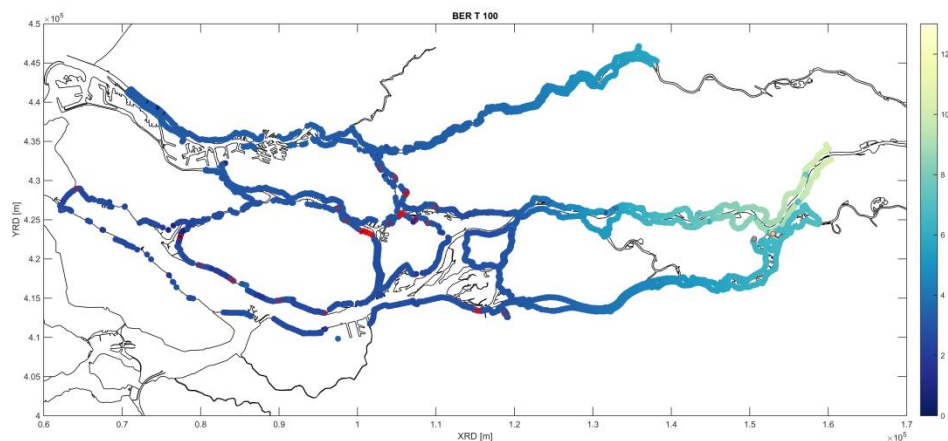
Net als voor de lokale waterstand en HBN berekeningen is als eerste naar het globale verloop van de overschrijdingsfrequentielijnen van de golfhoogte gekeken. Hierbij is nagegaan of er in de overschrijdingsfrequentielijn sprake is van een afnemende golfhoogte bij toenemende herhalingsstijd. De locaties waarvoor geldt dat sprake is van een dergelijk verloop van de overschrijdingsfrequentielijn van de golfhoogte zijn met rode punten weergegeven in Figuur 4.3. Te zien is dat er verspreid over het hele gebied locaties zijn waarvoor sprake is van dit gedrag.

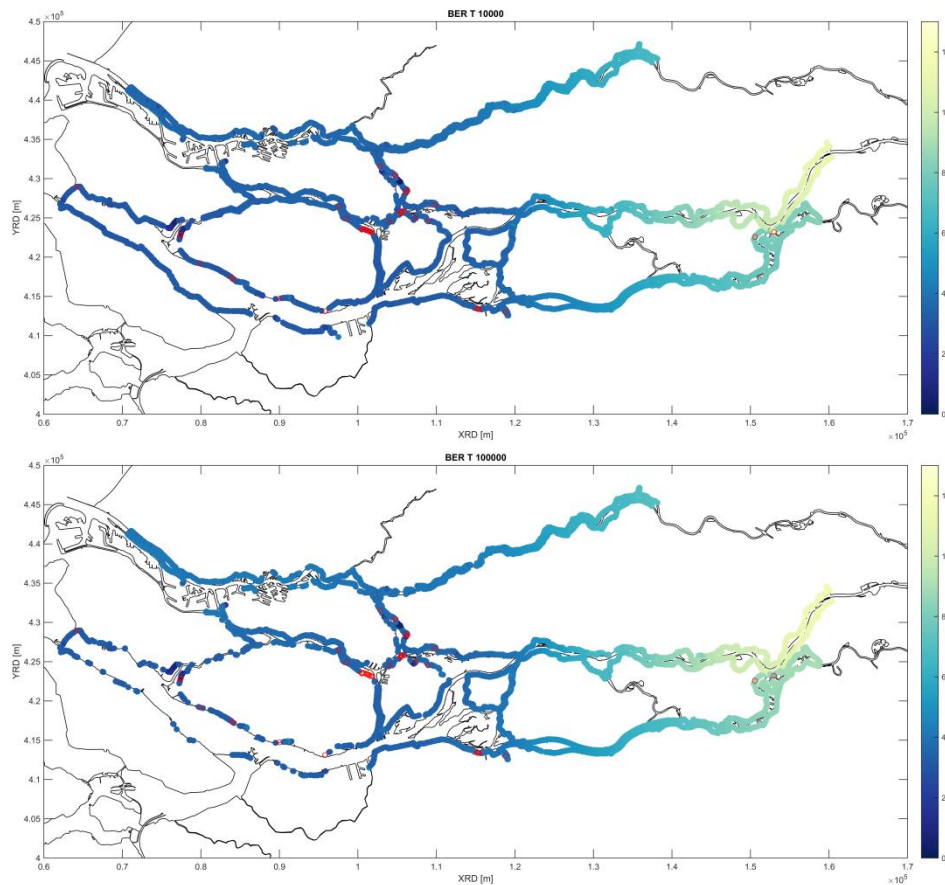


Figuur 4.3 Locaties (rode punten) waarbij sprake is van instabiel gedrag in overschrijdingscurve golfhoogte

#### 4.4 Rekenresultaten lokale waterstand bij de normfrequentie

In Figuur 4.4 wordt voor verschillende herhalingsstijden een ruimtelijk beeld gegeven van de lokale waterstand (MHW). Op het oog lijken de resultaten een realistisch en consistent beeld te geven. In bovenstroomse richting nemen de waterstanden toe.

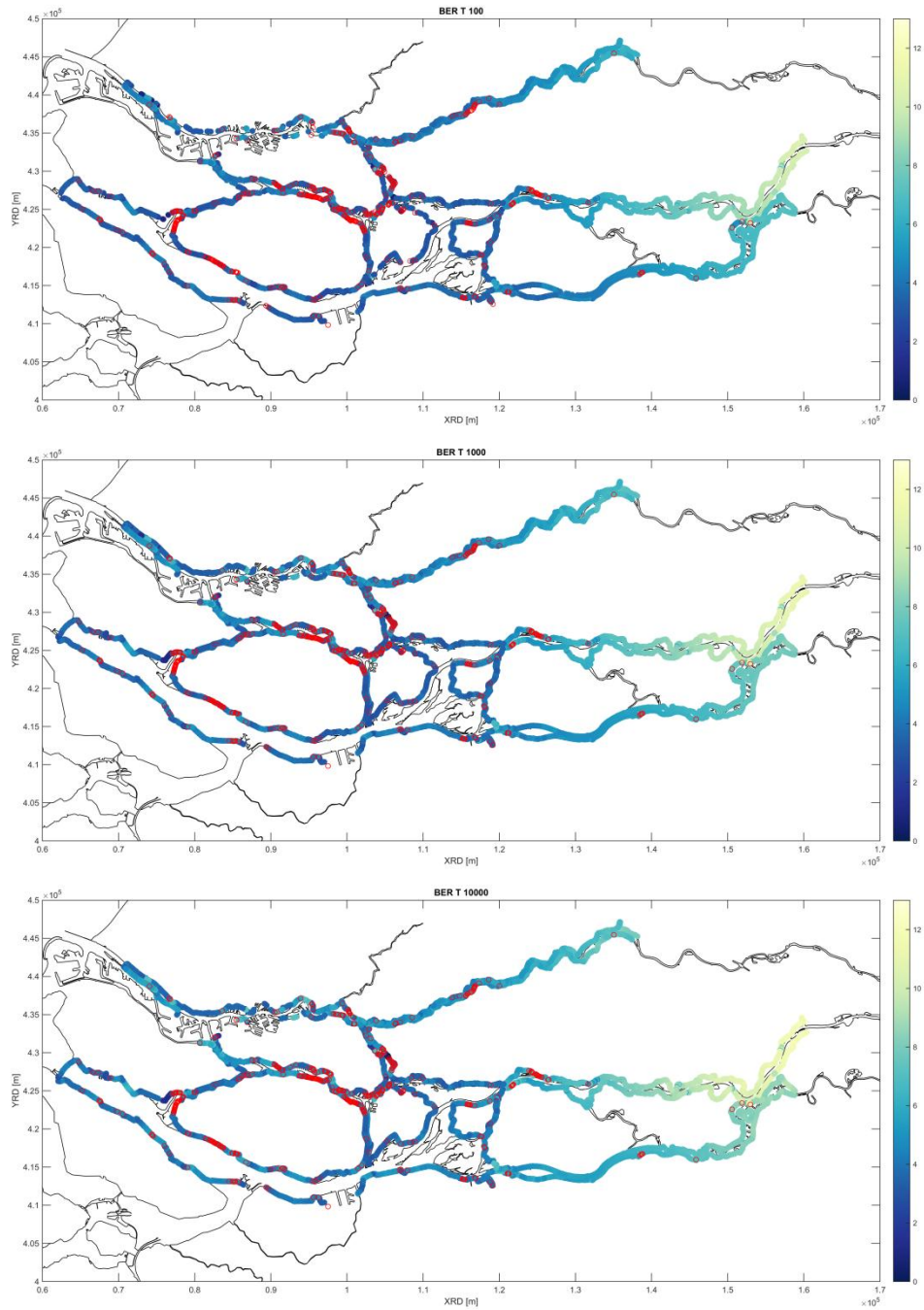


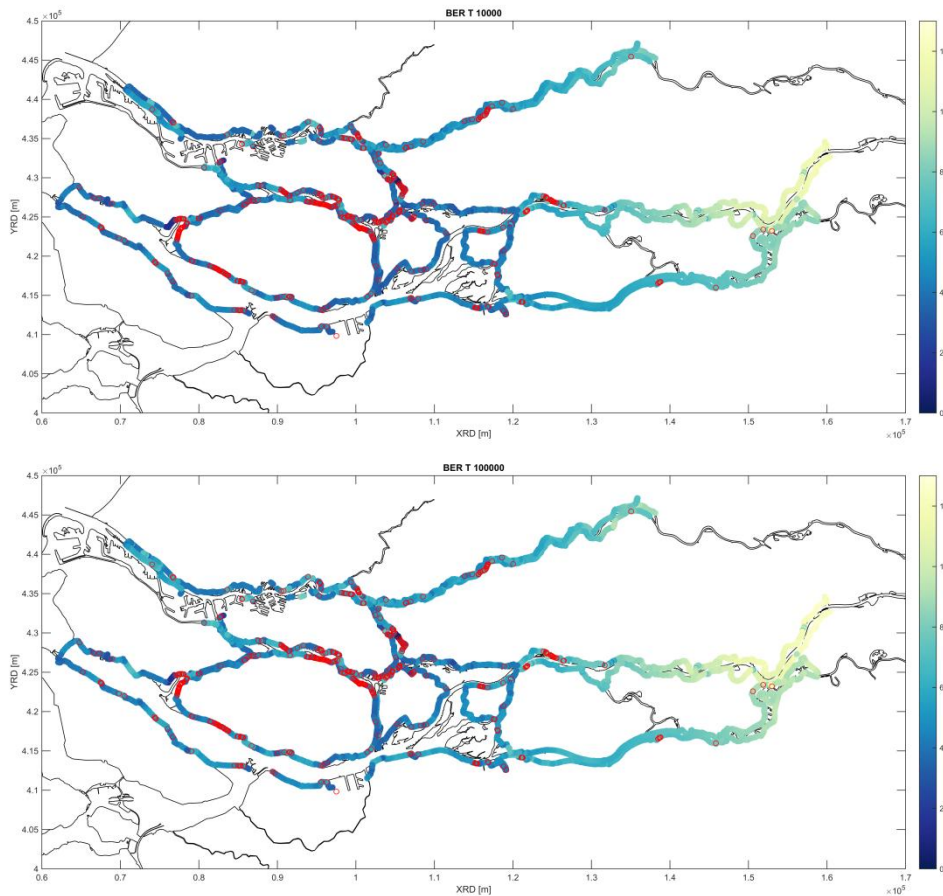


*Figuur 4.4 Lokale waterstand (m+NAP) per locatie behorende bij verschillende herhalingstijden (100, 10.000 en 100.000 jaar). Bij de selectie van de rekentechniek is het stappenplan uit paragraaf 2.7 toegepast. Een rode cirkel geeft aan dat voor alle drie de rekentechnieken instabiliteiten optreden. Er zijn ook meerdere locaties zonder gegevens, hierbij is het bereik verkeerd gekozen of er is sprake van droogval.*

## 4.5 Rekenresultaten HBN

In Figuur 4.5 wordt voor verschillende herhalingstijden een ruimtelijk beeld gegeven van de HBN waarden. Net als bij de waterstanden geven de resultaten een realistisch en consistent beeld, in bovenstroomse richting nemen de HBN's toe omdat de waterstanden hier toenemen. Verder is bijvoorbeeld in het Haringvliet te zien dat de HBN's toenemen bij de locaties met grote strijklengtes en met een dijknormaal gelegen op de dominante windrichtingen. Voor het benedenriviereengebied is de dominante windrichting west tot noordwest omdat bij deze windrichtingen zorgen voor de hoogste waterstanden.



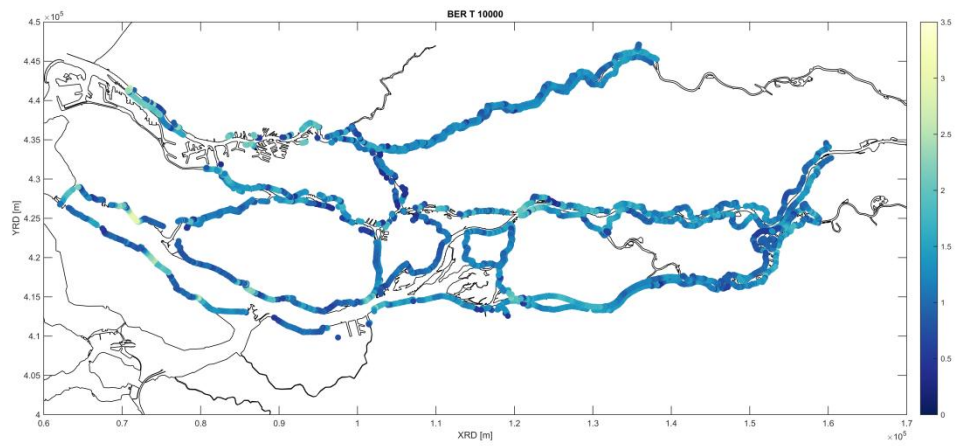
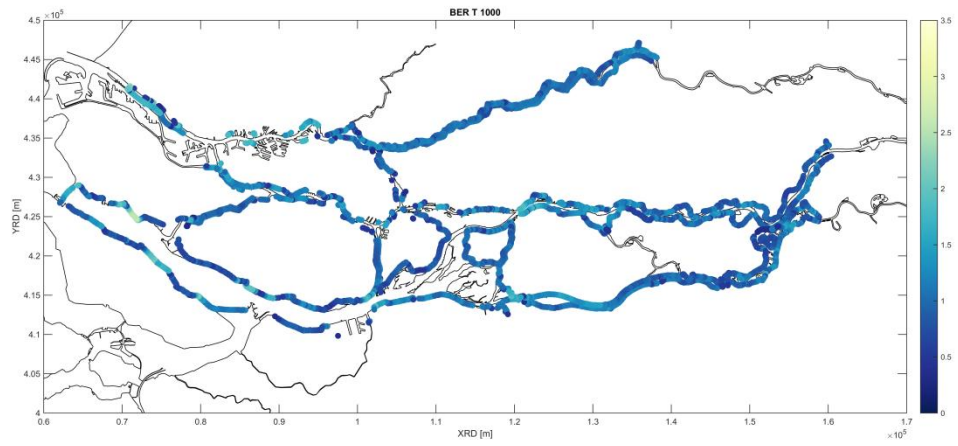
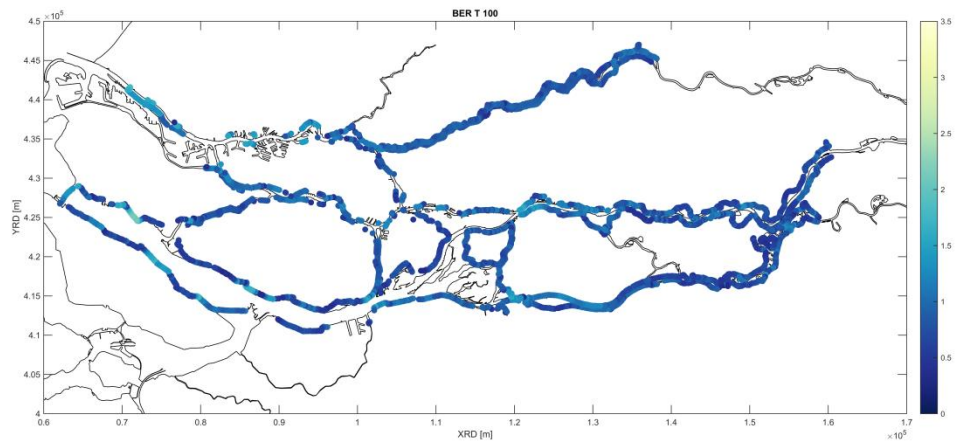


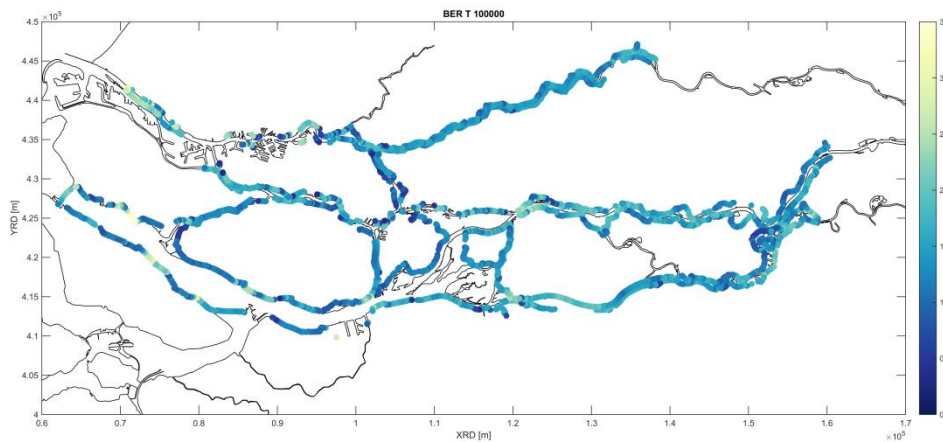
Figuur 4.5 HBN (m+NAP) per locatie behorende bij verschillende herhalingstijden (100, 1,000, 10.000 en 100.000 jaar). Bij de selectie van de rekentechniek is het stappenplan uit paragraaf 2.7 toegepast. Een rode cirkel geeft aan dat voor alle drie de rekentechnieken instabiliteiten optreden. Er zijn ook meerdere locaties zonder gegevens, hierbij is het bereik verkeerd gekozen of er is sprake van droogval

## 4.6 Rekenresultaten golfhoogte

In Figuur 4.6 wordt voor verschillende herhalingstijden een ruimtelijk beeld gegeven van de golfhoogtes. In het afvoergedomineerde deel zijn de verschillen in de orde van enkele decimeters. De verschillen worden veroorzaakt door verschillen in geometrie, d.w.z. strijklengte en representatieve bodemhoogte. In de brede wateren zijn de strijklengtes aanmerkelijk groter en daarmee ook de verschillen in golfhoogte. De hoogste waarden worden verkregen op locaties voor dijken met een westelijke oriëntatie. Dit is de windrichting met de grootste kans van voorkomen. Verder valt op dat de golfhoogte op de Nieuwe Waterweg en de Nieuwe Maas (stad Rotterdam) hoger zijn dan de golven op het diepe en veel bredere Haringvliet. De hoge waarden op de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas worden veroorzaakt doordat in de achterliggende Bretschneiderberekeningen alleen gerekend is met een open Maeslantkering. Bij een West tot Noordwestelijke windrichting zijn de strijklengtes hier aanzienlijk.







Figuur 4.6 Golfhoogte (m) per locatie behorende bij verschillende herhalingstijden (100, 1,000, 10,000 en 100.000 jaar). Er is gebruik gemaakt van de rekentechniek FORM-FBC.

## 4.7 Revisie rekentechnieken

Na het afronden van de watersysteem-rapportages (zoals onderhavig rapport) is er in Deltares (2017) integraal gekeken naar de optimale rekentechnieken voor alle watersystemen, onder andere door de resultaten van Hydra-Ring te vergelijken met die van Hydra-NL. Hieruit volgt dat voor een aantal watersystemen andere instellingen worden aanbevolen dan dat in de watersysteem-rapportage zijn gebruikt. Dat is ook het geval voor de Benedenrivieren. In Tabel 4.2 worden de in WBI2017 ingebouwde instellingen (gelijk aan dit uit Deltares (2017)) voor de Benedenrivieren weergegeven. Daarnaast is de ruimtelijke verdeling van deze instellingen weergegeven in Figuur 4.7. Merk op dat de resultaten in dit rapport dus niet met deze instellingen zijn berekend, maar met de instellingen zoals beschreven in paragraaf 4.3.

Tabel 4.2 Overzicht aanbevolen Hydra-Ring instellingen voor de Benedenrivieren (Deltares, 2017).

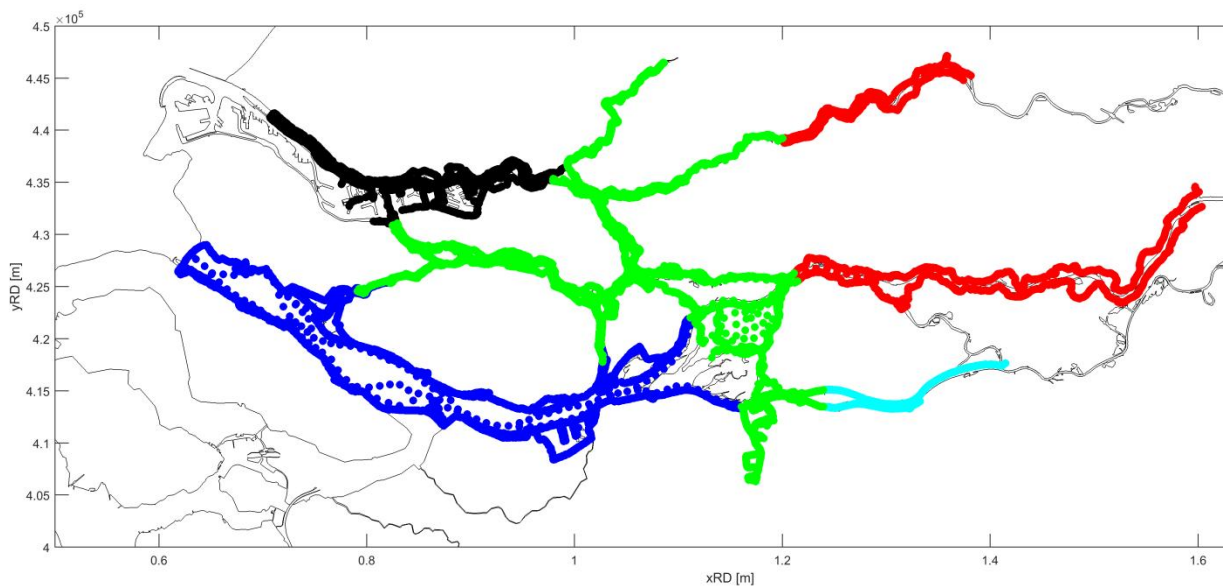
Systeem	Deel van systeem	Waterstand	HBN	Golfhoogte
BER (3, 4)	Afvoer gedomineerd (Lek, Waal)	FDIR-NTI	FDIR-NTI	FDIR-NTI
	Afvoergedomineerd (Bergsche Maas)	DSFI-NTI	DSFI-NTI	DSFI-NTI
	Faalkansgedomineerd	DSFI-FBC	DSFI-FBC	DSFI-FBC
BER (3, 4)	Bergingsgebied	FDIR-NTI	FDIR-NTI	FDIR-NTI
	Overgangsgebied	FDIR-NTI	FDIR-NTI	FDIR-NTI

Deltares (2017) concludeert als volgt over de keuze en differentiatie van de rekentechnieken:

*Op grond van bovenstaande constatering adviseer we voor de berekening van waterstanden in het afvoer-gedomineerde deel van de Benedenrivieren voor de Waal en de Lek FDIR-NTI en voor de Bergsche Maas DSFI-NTI te gebruiken. In verband met droogval adviseer we in het faalkansgebied de zwaardere techniek DSFI-FBC te gebruiken. In zowel het bergingsgebied als het overgangsgebied wordt FDIR-NTI aanbevolen.*

De aangepaste Hydra-Ring instellingen leveren resultaten op die enigszins verschillen met de resultaten zoals hier gerapporteerd. Er is echter geen algemene trend waar te nemen. In Deltares (2017) wordt in een deelgebied steeds dezelfde rekentechniek toegepast. De in

hoofdstuk 3 geïntroduceerde methodiek voor het bepalen van rekentechnieken zorgt ervoor dat de techniek van locatie tot locatie kan verschillen. Dit betekent dat het effect van het overnemen van de rekentechnieken zoals aanbevolen door Deltares (2017) ook van locatie tot locatie zal verschillen.



*Figuur 4.7 Ruimtelijk overzicht van verschillende instellingen uit Tabel 4.2 in het Bergingsgebied (blauw), Overgangsgebied (groen), Faalkansgedomineerd (zwart), Afvoergedomineerde deel van de Bergsche Maas (lichtblauw) en Afvoergedomineerde delen van de Waal en Lek (rood). In de figuur is ook de overlap tussen de watersystemen meegenomen, in de praktijk ligt een deel van de weergegeven punten in de Bovenrijn.*





## 5 Aansluiting watersystemen

### 5.1 Inleiding

Hydra-Ring onderscheidt 18 regio's (zie Figuur 1.3, waarin ook de vijf voormalige C-keringen zijn opgenomen en Tabel 2.2). Per regio geldt in principe een apart belastingmodel (basisstochasten, modelschematisatie, e.d.). De belastingmodellen inclusief resulterende berekeningsresultaten dienen goed op elkaar aan te sluiten. Daarbij dient de begrenzing duidelijk aangegeven te worden. In het Benedenrivierengebied (regio 3 en 4) betreft het de begrenzing tussen:

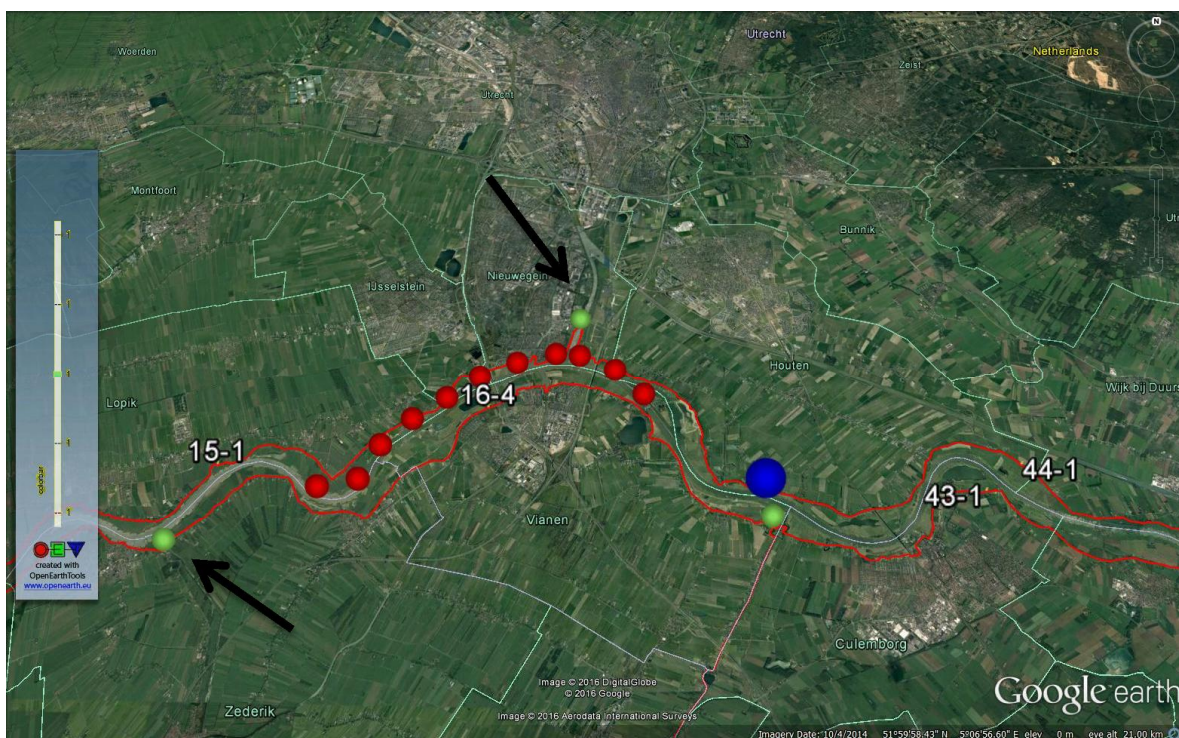
- Europoortgebied (regio 17) en Benedenrijn (regio 3)
- Hollandse IJssel (regio 22) en Benedenrijn (regio 3)
- Lek (regio 1) en Benedenrijn (regio 3)
- Waal (regio 1) en Benedenrijn (regio 3)
- Maas (regio 2) en Benedenmaas (regio 4)
- Benedenrijn (regio 3) en Benedenmaas (regio 4).

De begrenzingen met het Europoortgebied en de Hollandse IJssel worden bij de hoogwaterkeringen (respectievelijk Maeslantkering en Algerakering)gelegd. De overige overgangen zijn meer geleidelijk en worden in dit hoofdstuk besproken.

Verder dient opgemerkt te worden dat de begrenzing tussen regio 3 en 4 betrekking heeft op de scheiding tussen het gebied dat gedomineerd wordt door de afvoer van de Rijn bij Lobith en het gebied dat gedomineerd wordt door de afvoer van de Maas bij Lith. Merk op dat beide gebieden gebruik maken van dezelfde fysische database (uit de productieberekeningen) maar verschillende afvoerstatistiek. Voor de Benedenrijn dient namelijk de statistiek van de Rijn bij Lobith te worden toegepast en voor de Benedenmaas die van de Maas bij Lith.

#### 5.1.1 Lek en Benedenrijn

Bij het vaststellen van de overgangslocaties zijn er berekeningen gemaakt met het belastingmodel en de database van de Bovenrijn en die van de Benedenrijn; hierbij zijn 11 aslocaties beschouwd. Deze locaties (rood) zijn samen met de knip tussen Bovenrijn en Benedenrijn uit WTI-2011 (blauw) weergegeven in Figuur 5.1.

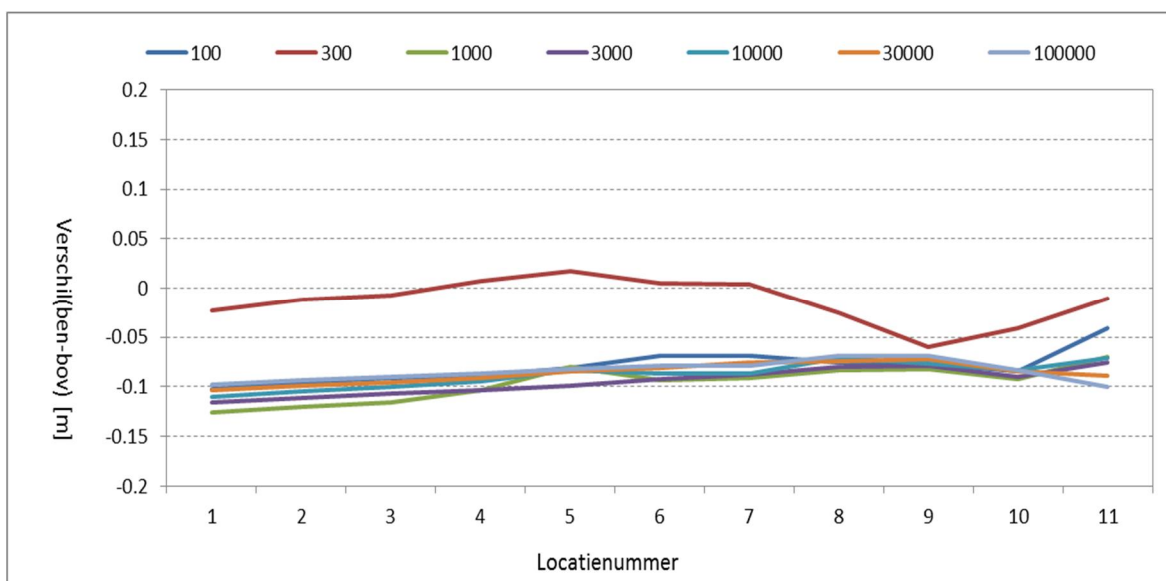


Figuur 5.1 Locaties op de Lek waarvoor berekeningen zijn gemaakt met beide databases (rood) en grens tussen Bovenrivieren en Benedenrivieren volgens WTI-2011 (blauw).

Het verschil in de berekende waterstanden met onzekerheden voor de 11 beschouwde locaties en 7 herhalingstijden is weergegeven in Tabel 5.1. Figuur 5.2 toont het verschil in grafische vorm. Het verschil is beperkt en ligt rond de 10 cm en loopt enigszins af in bovenstroomse richting. Met uitzondering van loc 11 en herhalingstijd 300 jaar vertoont het verschil een stabiel verloop. Het diffuse verloop van het verschil voor loc 11 wordt vermoedelijk veroorzaakt door de modelrand. De betreffende locatie ligt namelijk dicht bij de stuw.

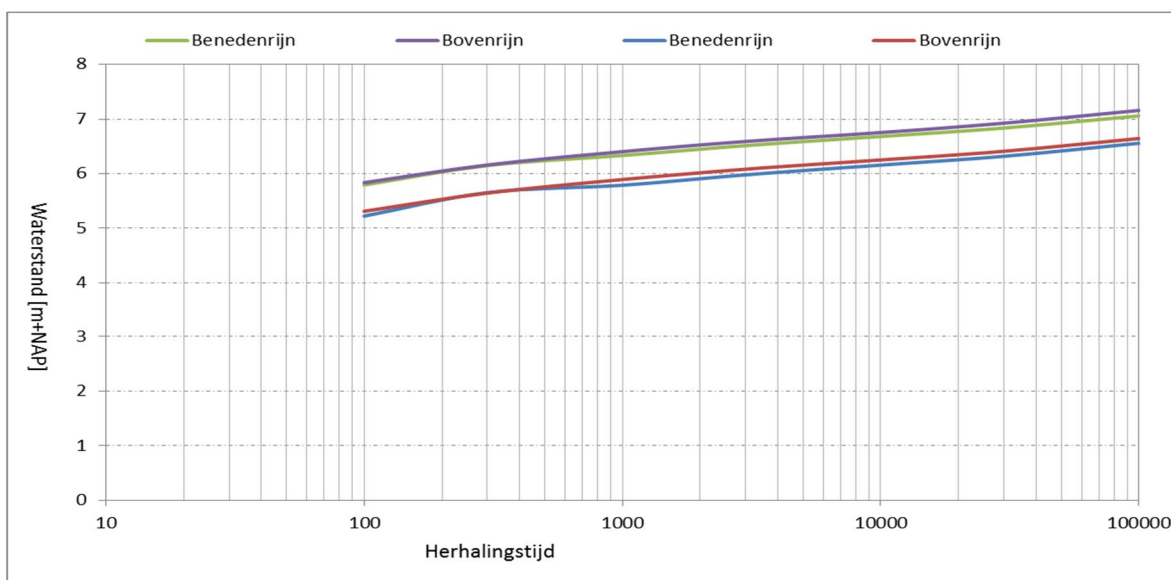
Tabel 5.1 Verschil (in m) in waterstanden verkregen met databases voor Benedenrijn en Bovenrijn op de 11 beschouwde locaties op de Lek.

Locatie	Herhalingstijd [jaar]						
	100	300	1000	3000	10000	30000	100000
loc 1	-0.10248	-0.02334	-0.1261	-0.11617	-0.10999	-0.10334	-0.09787
loc 2	-0.09591	-0.01213	-0.1197	-0.11104	-0.10493	-0.09897	-0.09357
loc 3	-0.09094	-0.00673	-0.1156	-0.1071	-0.0996	-0.09585	-0.08977
loc 4	-0.08845	0.0077	-0.10385	-0.10311	-0.09419	-0.0916	-0.08617
loc 5	-0.08071	0.01716	-0.0798	-0.09878	-0.08325	-0.08443	-0.08213
loc 6	-0.06899	0.00469	-0.09379	-0.09227	-0.08629	-0.08052	-0.07871
loc 7	-0.06894	0.0044	-0.09085	-0.08739	-0.08635	-0.07538	-0.07869
loc 8	-0.07568	-0.02554	-0.08368	-0.08004	-0.07138	-0.07461	-0.06889
loc 9	-0.07679	-0.05973	-0.08166	-0.07845	-0.0762	-0.07176	-0.06851
loc 10	-0.08386	-0.04104	-0.09211	-0.09005	-0.08296	-0.08464	-0.08335
loc 11	-0.04103	-0.01014	-0.07012	-0.07566	-0.07125	-0.08833	-0.09981



Figuur 5.2 Verschil (in m) in berekende waterstanden langs de Lek met de databases Beneden- en Bovenrijn

Figuur 5.3 toont de frequentielijnen van locatie 1 en locatie 8<sup>11</sup>. Het blijkt dat de frequentielijnen een consistent en logisch verloop vertonen; de verschillen tussen de frequentielijnen zijn voor gebruikte databases zeer beperkt.



Figuur 5.3 Frequentielijnen voor 2 locaties: locatie meest benedenstrooms (loc 1) en loc 8.

De bovengrens van het WAQUA-RMM model dat ten grondslag ligt aan de productieberekeningen voor het benedenriviereengebied ligt bij de stuwen bij Hagestein. Het is dus niet mogelijk om de huidige grens (blauwe punt) aan te houden omdat het model niet tot

<sup>11</sup> Een knip opleggen bovenstrooms van deze locatie lijkt niet handig omdat de afstand tot de stuwen (modelrand WAQUA-RMM) te klein wordt.



daar doorloopt. Het is bovendien af te raden om de grens rondom de modelrand te leggen. Op basis van het bovenstaande wordt voorgesteld om de grens te definiëren tussen de dijktrajecten:

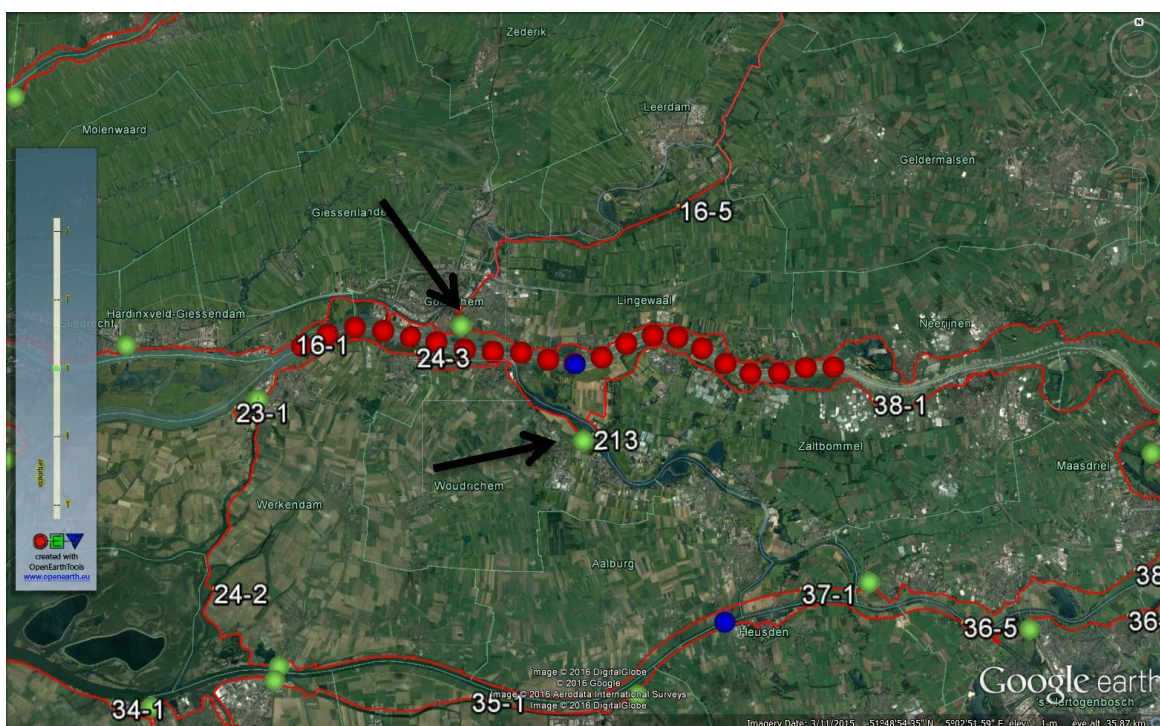
- 15-1 en 44-1 voor de noordoever
- 16-3 en 16-4 voor de zuidoever

Deze grenzen zijn in Figuur 5.1 met zwarte pijlen aangegeven in

## 5.1.2 Waal en Benedenrijn

De overgang langs de Waal tussen de Bovenrijn en de Benedenrijn is onderzocht aan de hand van een set aslocaties zoals weergegeven in Figuur 5.4. Met Hydra-Ring zijn berekeningen gemaakt voor de gekozen locaties met zowel het belastingmodel en de database van de Bovenrijn als die van de Benedenrijn. De verschillen in berekende waterstanden met de 2 databases zijn weergegeven in Tabel 5.2 en Figuur 5.5. Figuur 5.6 toont frequentielijnen van de waterstand voor de locaties 1, 10 en 15.

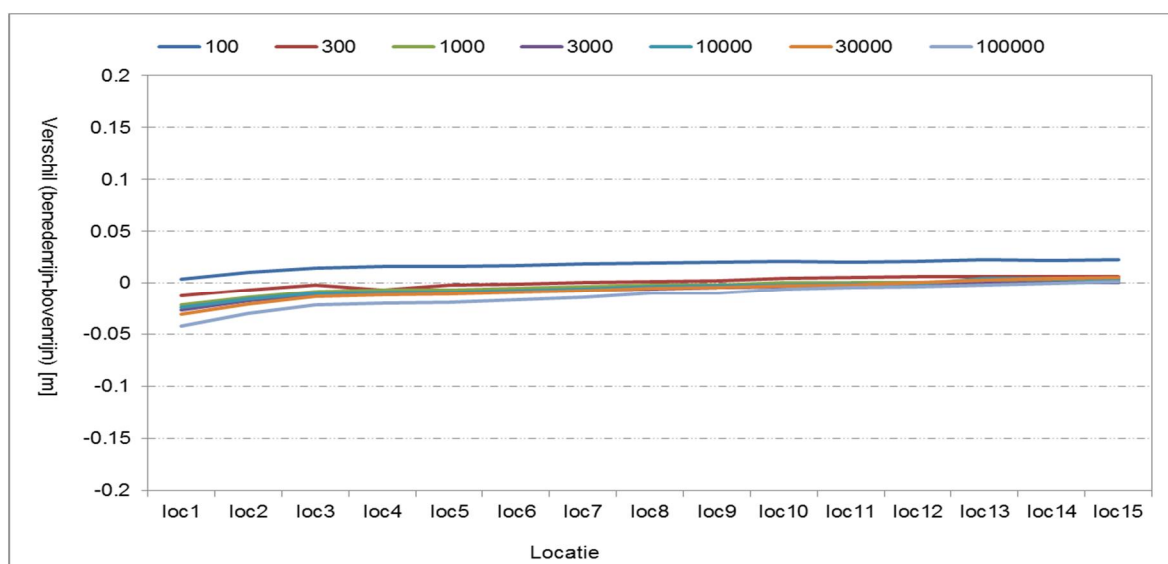
De verschillen in waterstand zijn voor alle beschouwde locaties marginaal (maximaal 0,04 m); het verschil wordt nog kleiner in bovenstroomse richting. De frequentielijnen van de waterstand liggen goed op elkaar en vertonen een consistent beeld.



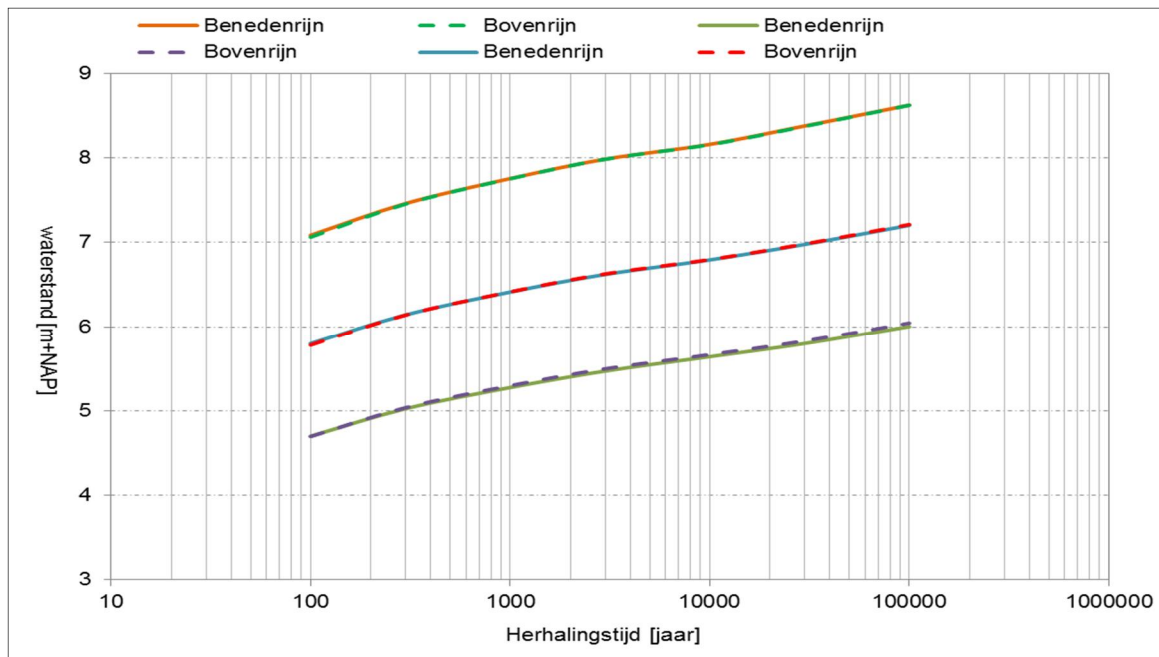
Figuur 5.4 Gekozen locaties langs de Waal (rood) waarvoor berekeningen zijn gemaakt met de twee belastingmodellen: Bovenrivieren en Benedenrivieren. Blauw punt geeft begrenzing aan langs de Waal in WTI-2011 (blauw).

Tabel 5.2 Verschil (in m) tussen de berekende waterstanden met de 2 databases van de Beneden- respectievelijk Bovenrijn.

Locatie	Herhalingsjijd [jaar]						
	100	300	1000	3000	10000	30000	100000
loc1	0.00437	-0.01205	-0.02154	-0.02596	-0.02413	-0.03074	-0.04198
loc2	0.01042	-0.00637	-0.01432	-0.01750	-0.01601	-0.02085	-0.02944
loc3	0.01459	-0.00144	-0.00864	-0.01162	-0.01007	-0.01337	-0.02160
loc4	0.01658	-0.00699	-0.00706	-0.01050	-0.00899	-0.01178	-0.02006
loc5	0.01618	-0.00149	-0.00700	-0.00983	-0.00928	-0.01068	-0.01927
loc6	0.01668	-0.00073	-0.00526	-0.00865	-0.00716	-0.00922	-0.01670
loc7	0.01842	0.0004	-0.00368	-0.00703	-0.00627	-0.00712	-0.01429
loc8	0.01954	0.0015	-0.00201	-0.00562	-0.00347	-0.00527	-0.01020
loc9	0.02017	0.00196	-0.00161	-0.00422	-0.00290	-0.00416	-0.00962
loc10	0.02120	0.00480	0.00034	-0.00307	-0.00192	-0.00245	-0.00615
loc11	0.02035	0.00571	0.00088	-0.00220	-0.00135	-0.00144	-0.00443
loc12	0.02112	0.00621	0.00110	-0.00117	-0.00089	0.00048	-0.00369
loc13	0.02323	0.00602	0.00165	-0.00021	0.00474	0.00302	-0.00178
loc14	0.02190	0.00635	0.00167	0.00030	0.00462	0.00438	-0.00018
loc15	0.02242	0.00627	0.00230	0.00105	0.00399	0.00527	0.00114



Figuur 5.5 Verschil (in m) in berekende waterstanden langs de Waal met het belastingmodel van Beneden- respectievelijk Bovenrijn.



Figuur 5.6 Frequentielijnen waterstand voor loc 1, loc 10 en loc 15.

Omdat de verschillen in berekende waterstanden met beide databases voor alle beschouwde locaties klein is en omdat het gebied van de Benedenrijn zo klein mogelijk moet zijn vanwege de zware rekentechniek die in dit gebied nodig is, is besloten om de grens tussen Waal en Benedenrijn te leggen op de grens tussen de:

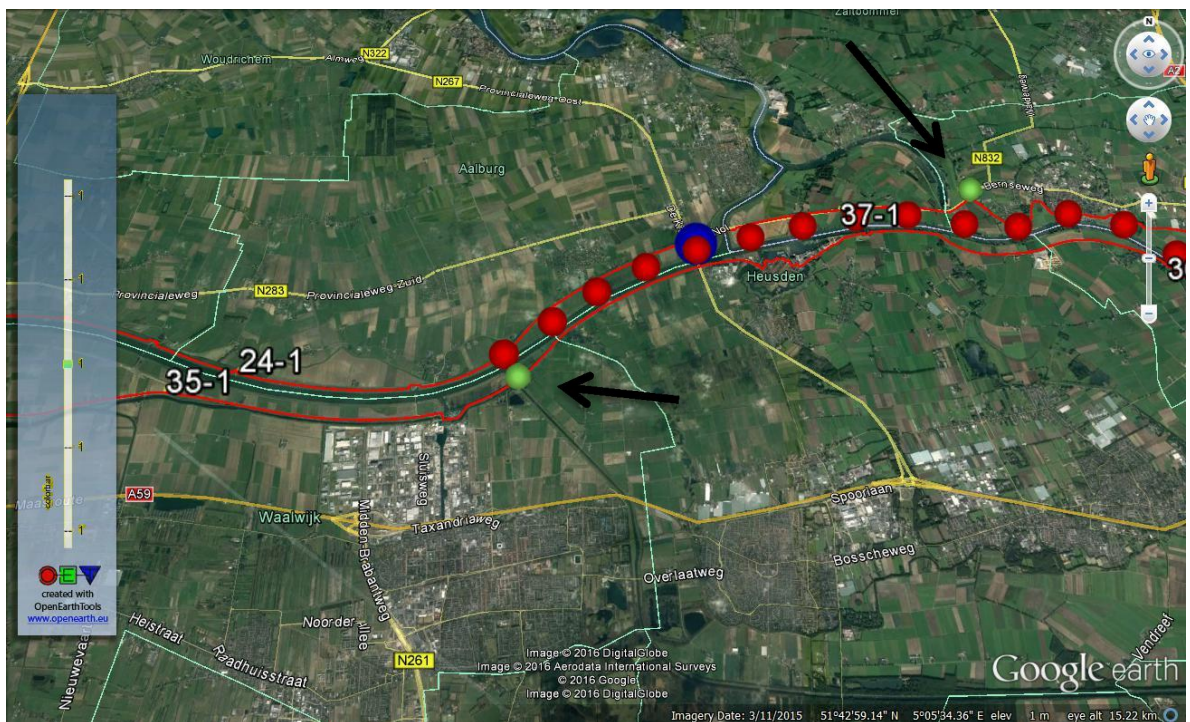
- grens tussen de dijktrajecten 24-3 en 213
- grens tussen de dijktrajecten tussen 16-1 en 43-6

Deze grenzen zijn met zwarte pijlen aangegeven in Figuur 5.4.

### 5.1.3 Maas en Benedenmaas

Op analoge wijze zijn ten behoeve van de knip op de Maas berekeningen gemaakt met Hydra-Ring; hiertoe is zowel het belastingmodel en de database van de Bovenmaas als die van de Benedenmaas gebruikt. Er zijn berekeningen gemaakt voor 16 locaties: loc 1 t/m loc 16. Deze locaties (rood) zijn weergegeven in Figuur 5.7. Het blauwe punt geeft de knip aan tussen de Bovenmaas en Benedenmaas in WTI-2011.





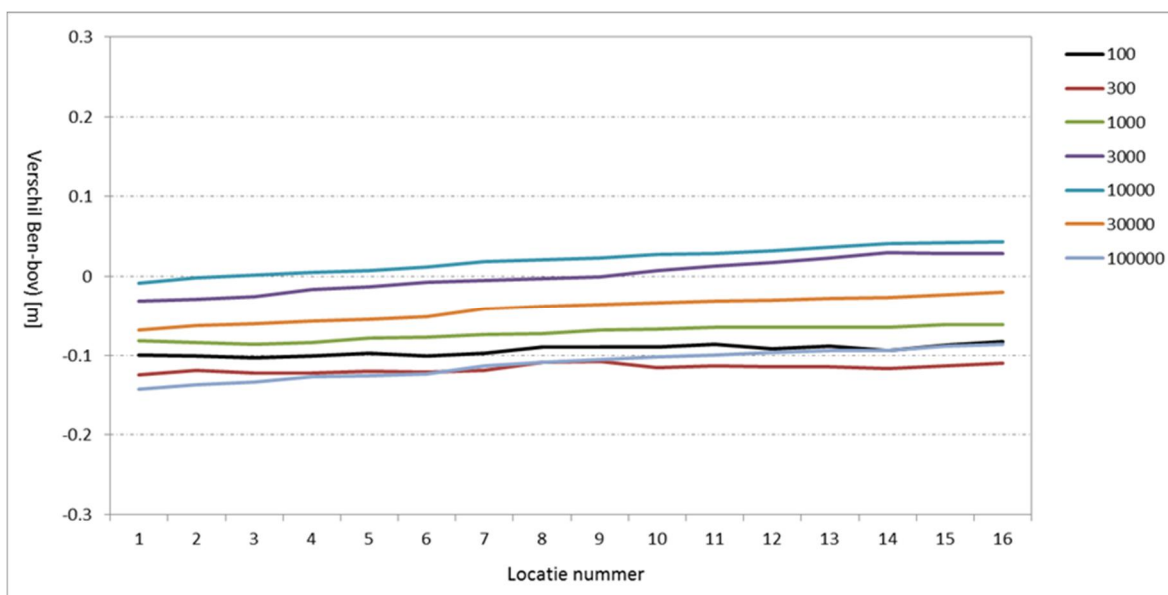
Figuur 5.7 Locaties langs de Lek waarvoor berekeningen zijn gemaakt met beide belastingmodellen (rood) en de grens tussen bovenrivieren en benedenrivieren volgens WTI-2011 (blauw).

De belangrijkste verschillen tussen beide belastingmodellen hebben betrekking op de basisstochasten, de modelranden en de bovenrand afvoer (stationair vs permanent), zie ook paragraaf 2.4 en 2.5.

De verschillen tussen de berekende waterstanden zijn weergegeven in Tabel 5.3. Figuur 5.8 toont de verschillen in grafische vorm. Van de locaties loc 1, loc 5, loc 10 en loc 16 zijn (op basis van de 7 beschouwde herhalingstijden) frequentielijnen samengesteld; deze zijn weergegeven in Figuur 5.9 en Figuur 5.10.

Tabel 5.3 Verschil (in m) tussen de berekeningen met de databases Benedenmaas en Bovenmaas.

Locatie	Herhalingstijd [jaar]						
	100	300	1000	3000	10000	30000	100000
Loc 1	-0.10035	-0.12446	-0.08153	-0.03129	-0.0081	-0.06805	-0.14307
Loc 2	-0.10087	-0.11884	-0.08399	-0.02905	-0.00181	-0.06268	-0.1375
Loc 3	-0.1034	-0.12252	-0.08614	-0.02529	0.00122	-0.0601	-0.13364
Loc 4	-0.10148	-0.1228	-0.08348	-0.01643	0.00523	-0.05643	-0.12705
Loc 5	-0.09727	-0.12031	-0.07801	-0.01287	0.00784	-0.05517	-0.12552
Loc 6	-0.10049	-0.12087	-0.07703	-0.00783	0.01167	-0.05167	-0.12302
Loc 7	-0.09708	-0.11934	-0.07354	-0.00497	0.01865	-0.04147	-0.11375
Loc 8	-0.08999	-0.10889	-0.07307	-0.0023	0.02102	-0.03817	-0.10826
Loc 9	-0.09007	-0.10763	-0.06862	-0.00063	0.02333	-0.03542	-0.10504
Loc 10	-0.08988	-0.11597	-0.06757	0.00685	0.02711	-0.03297	-0.10209
Loc 11	-0.08583	-0.11303	-0.06505	0.01322	0.02901	-0.03118	-0.09937
Loc 12	-0.09181	-0.11441	-0.06466	0.01735	0.03264	-0.02945	-0.09605
Loc 13	-0.08906	-0.11444	-0.06455	0.02295	0.03635	-0.02762	-0.09457
Loc 14	-0.09383	-0.11655	-0.06442	0.03023	0.04155	-0.02675	-0.09419
Loc 15	-0.08779	-0.11378	-0.06125	0.02838	0.04178	-0.02259	-0.08893
Loc 16	-0.08345	-0.1101	-0.06202	0.02919	0.04282	-0.0193	-0.08627

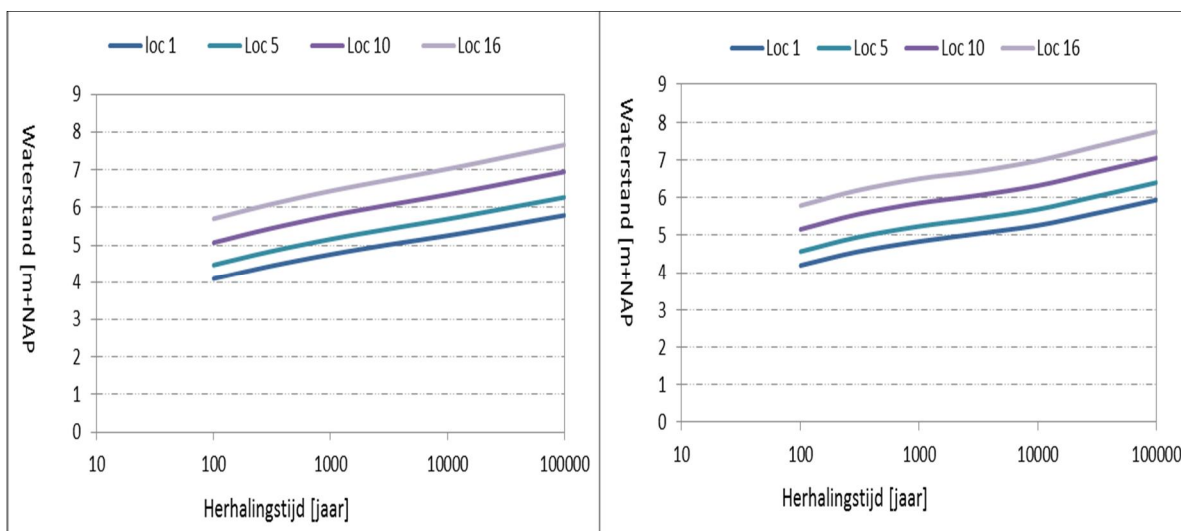


Figuur 5.8 Verschil (in m) in berekende waterstanden langs de Maas met de belastingmodellen voor de Benedenmaas en de Bovenmaas.

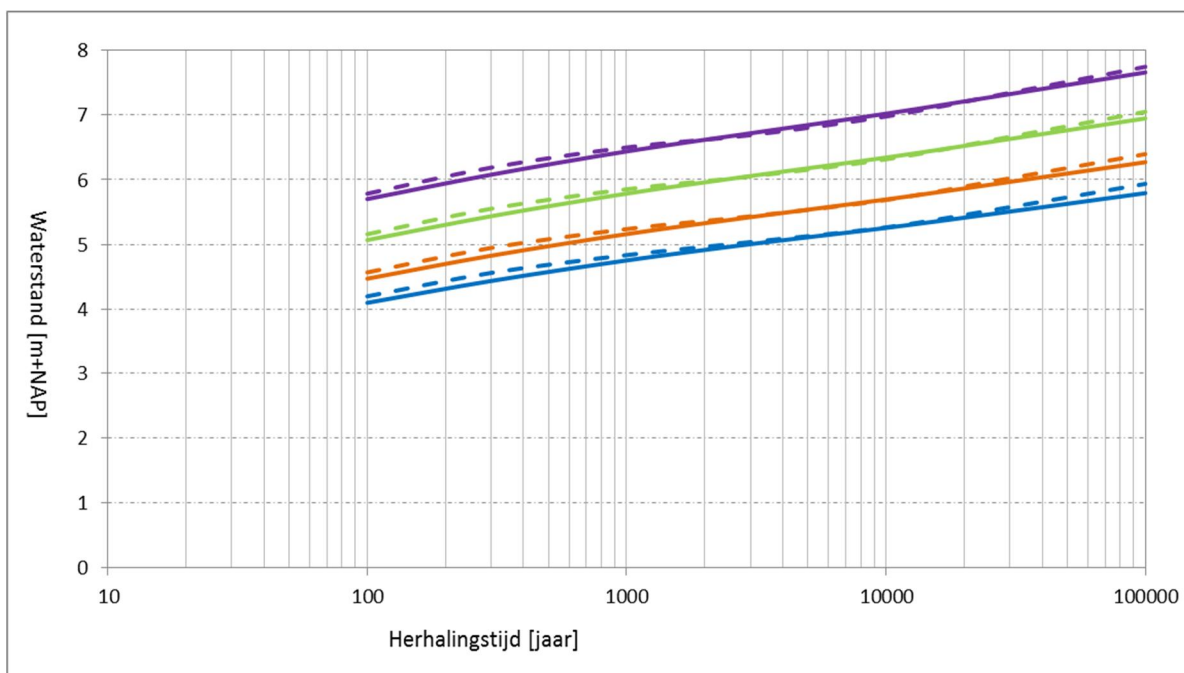
Zoals Tabel 5.3 en Figuur 5.8 blijkt, zijn de verschillen tussen de resultaten verkregen met beide belastingmodellen beperkt en bedragen minder dan 10 cm. een uitzondering hierop vormen de 6 meest benedenstroomse locaties voor de herhalingstijd van 10000 jaar. Het belastingmodel van de Benedenrivieren resulteert over het algemeen in enigszins lagere waterstanden, het verschil wordt steeds lager in bovenstroomse richting, zie Figuur 5.8.



Figuur 5.9 en Figuur 5.10 illustreren de verschillen in verlopen van de frequentielijnen. Het verschil is het kleinst voor herhalingsjeden tussen 1000 en 10000 jaar.



Figuur 5.9 Frequentielijnen loc 1, loc 2, loc 10 en loc 16. Database Benedenrivieren (links) en Bovenrivieren (rechts)



Figuur 5.10 Frequentielijnen loc 1, loc 5, loc 10 en loc 16. Belastingmodel Benedenmaas (doorgetrokken lijnen) en belastingmodel Bovenmaas (gestippelde lijnen)

De verschillen tussen de resultaten van beide belastingmodellenvan de Boven- en Benedenmaas zijn over het hele beschouwde bereik beperkt. Voor de relevante herhalingsjeden tussen 1.000 en 30.000 jaar zijn ze zeer beperkt, zie ook Figuur 5.10.

Omdat de verschillen tussen belastingmodellengebepkt zijn en de wens bestaat om het gebied met een zware rekentechniek (het Benedenrivierengebied) zo klein mogelijk te

houden, ligt het voor de hand om de grens tussen Bovenmaas en Benedenmaas te leggen op de:

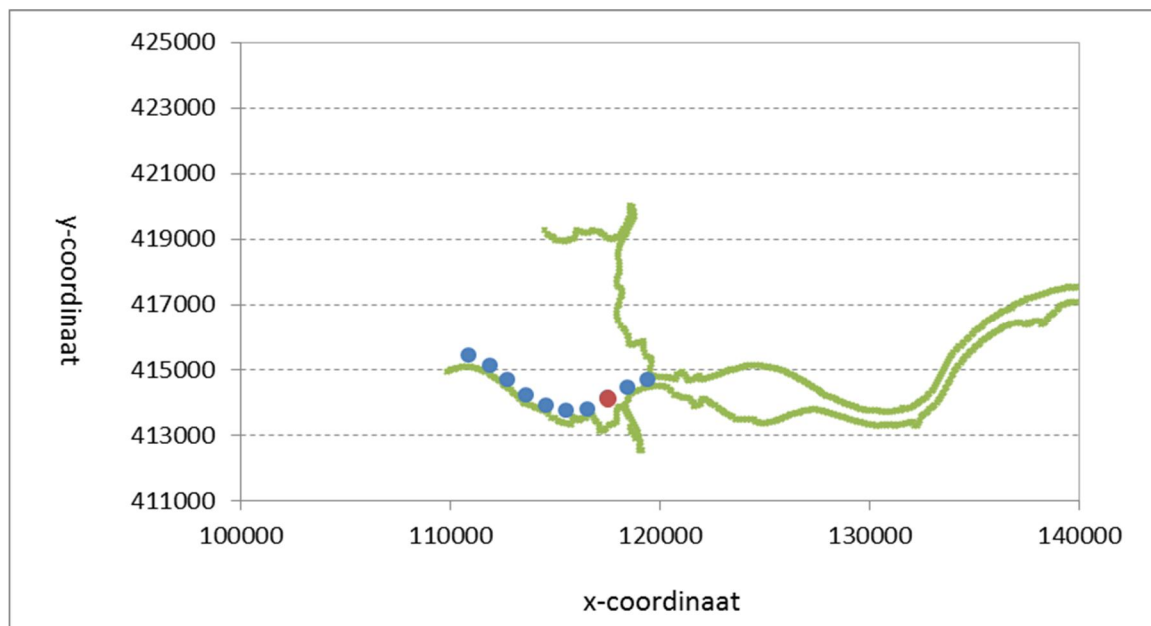
- grens tussen de dijktrajecten 37-1 en 38-2 voor de noordoever
- grens tussen de dijktrajecten 35-1 en 36-5 voor de zuidoever

#### 5.1.4 Benedenrijn en Benedenmaas

Conform het advies uit (Geerse, 2013) zijn de productieberekeningen voor het benedenrivierengebied uitgevoerd met de 1-1 relatie tussen Rijn- en Maasafvoer. Het grootste voordeel hiervan is dat het aantal WAQUA berekeningen gereduceerd wordt.

Het blijkt o.a. uit (Geerse, 2013) dat indien gerekend wordt met de 1-1 lijn, dat er slechts geringe verschillen in de hydraulische belasting kunnen ontstaan in de waterstanden bij de normfrequenties. Voorwaarde is dat er met de juiste afvoerstatistiek wordt gerekend in Hydra-Ring.

Voor 10 locaties rondom de grens tussen Rijndominant en Maasdominant gebied uit WTI-2011 zijn berekeningen gemaakt met Hydra-Ring. De berekeningen zijn uitgevoerd met zowel de Rijnstatistiek bij Lobith als de Maasstatistiek bij Lith. De geselecteerde locaties, inclusief de huidige grens uit WTI-2011, zijn weergegeven in Figuur 5.11.



Figuur 5.11 Geselecteerde locaties in Rijn/Maas gebied (blauw); inclusief grens tussen Rijndominant en Maasdominant gebied (rood). De nummering van de locaties is van west naar oost van 1 tot 10.

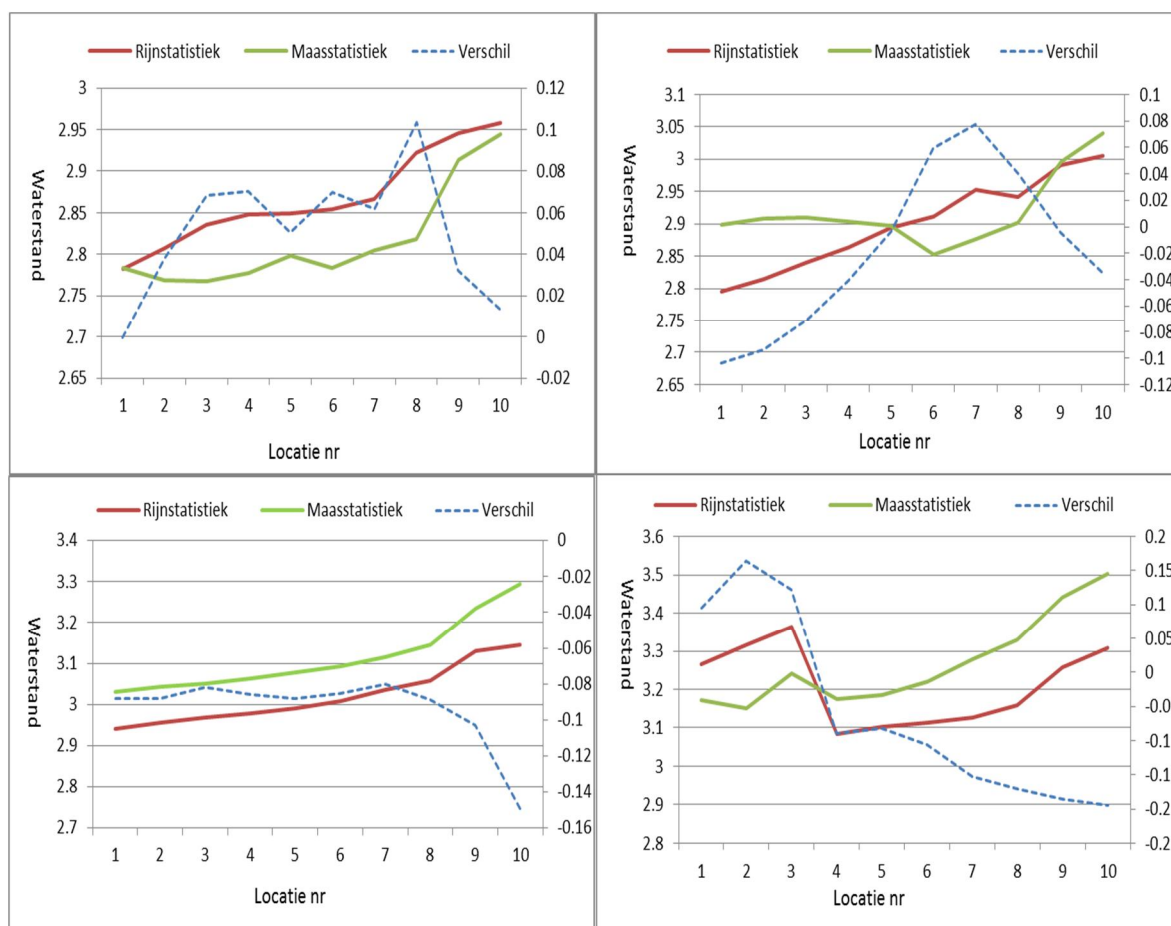
De resultaten van de berekeningen zijn weergegeven in Tabel 5.4. Figuur 5.12 toont de resultaten inclusief verschillen tussen het gebruik van Rijn- en Maasstatistiek in grafische vorm. De berekende waterstanden, en daarmee ook de verschillen, laten een afwisselend beeld zien.

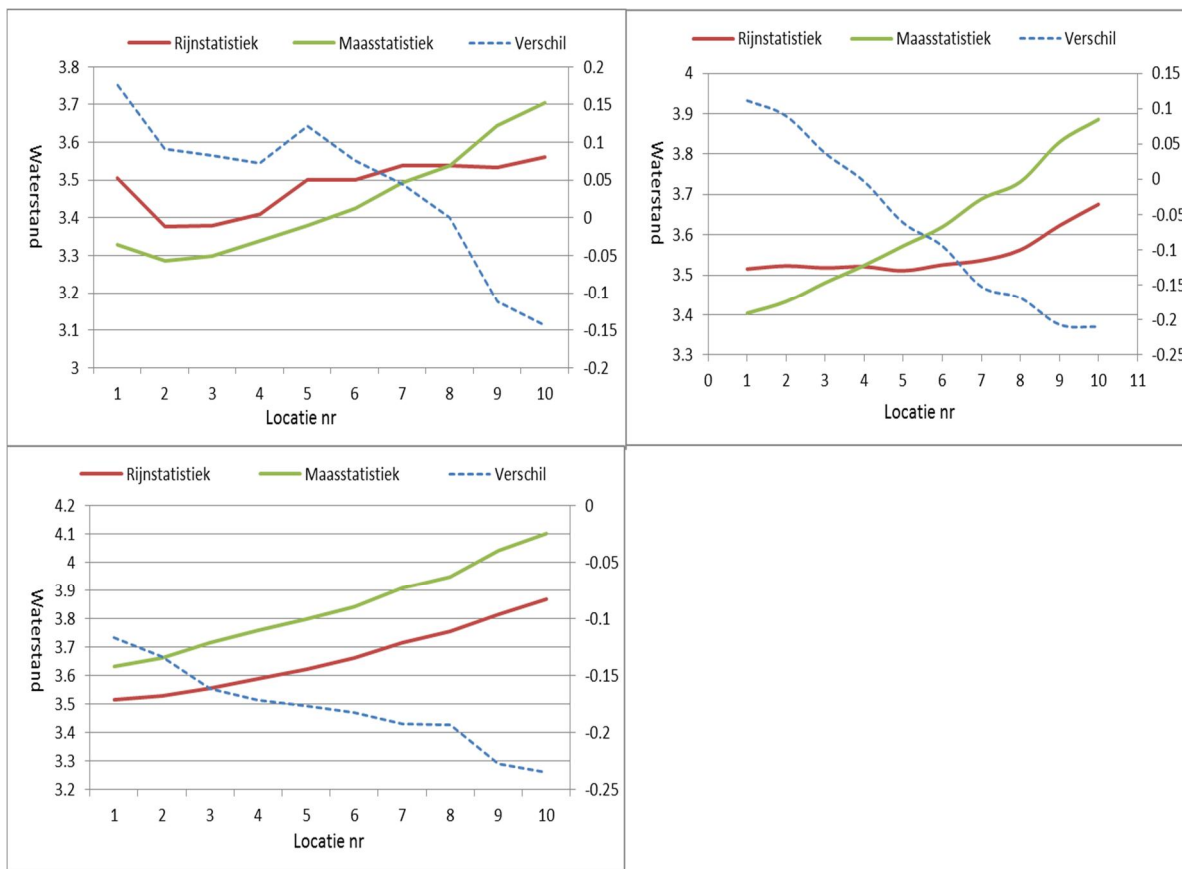
Voor de twee bovenstroomse locaties nr 9 en 10 resulteert de Maasstatistiek in hogere waterstanden. Het verschil loopt op voor  $T = 100.000$  jaar tot ruim 0.23 m. Figuur 5.13 toont de frequentielijnen van de drie meest bovenstroomse locaties. De figuur laat zien dat de

frequentielijnen volgend uit de Rijnstatistiek een grillig verloop hebben. De frequentielijnen met de Maasstatistiek laten echter een consistent en logisch verloop/beeld zien. Voor deze locaties past de statistiek van de Maas beter dan de Rijnstatistiek.

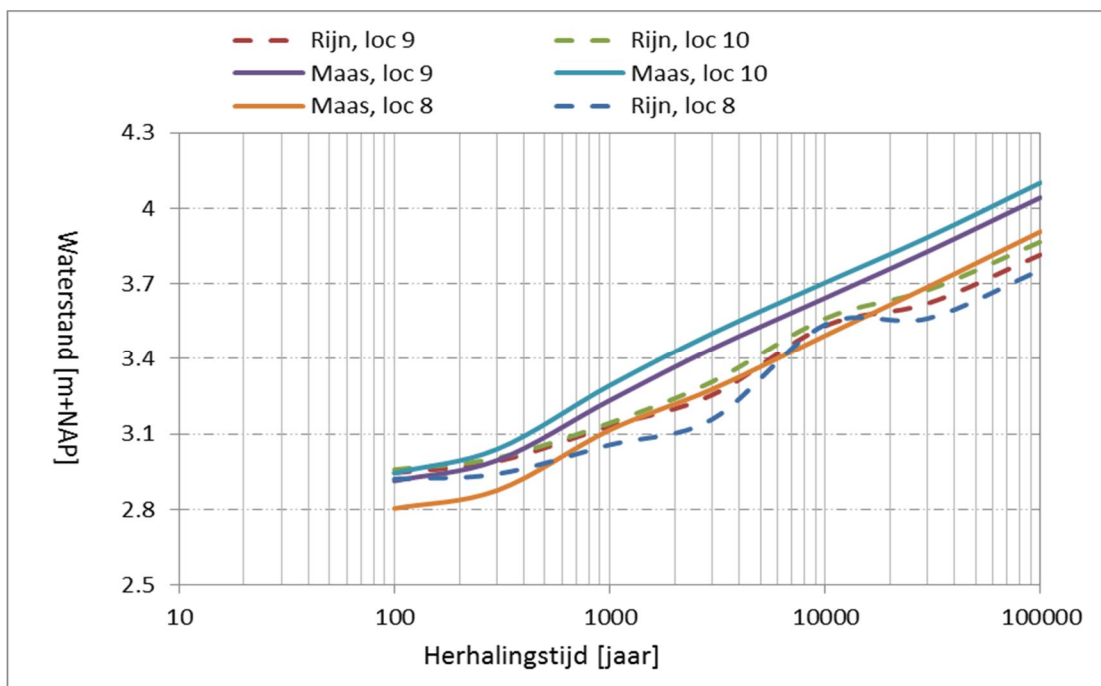
Tabel 5.4 Verschil tussen resultaat met Rijnstatistiek en Maasstatistiek voor 10 locaties.

Loc	T = 100	T = 300	T = 1000	T = 3000	T = 10000	T = 30000	T = 100000
1	-0.0005	-0.10347	-0.08799	0.09513	0.17603	0.11139	-0.11655
2	0.0382	-0.09345	-0.08793	0.16403	0.09155	0.0895	-0.13294
3	0.06842	-0.07099	-0.08188	0.12198	0.08263	0.03691	-0.16202
4	0.0702	-0.04109	-0.08567	-0.08923	0.07251	-0.00314	-0.17154
5	0.05073	-0.00353	-0.0882	-0.08247	0.12167	-0.06162	-0.17695
6	0.06975	0.05922	-0.08543	-0.10574	0.07565	-0.09429	-0.18276
7	0.06209	0.07699	-0.08003	-0.15215	0.04457	-0.15214	-0.19232
8	0.10352	0.04009	-0.08865	-0.17016	2E-05	-0.1686	-0.19375
9	0.03206	-0.00432	-0.10298	-0.18557	-0.11149	-0.20666	-0.22734
10	0.01364	-0.03503	-0.1496	-0.19404	-0.14285	-0.20992	-0.23481

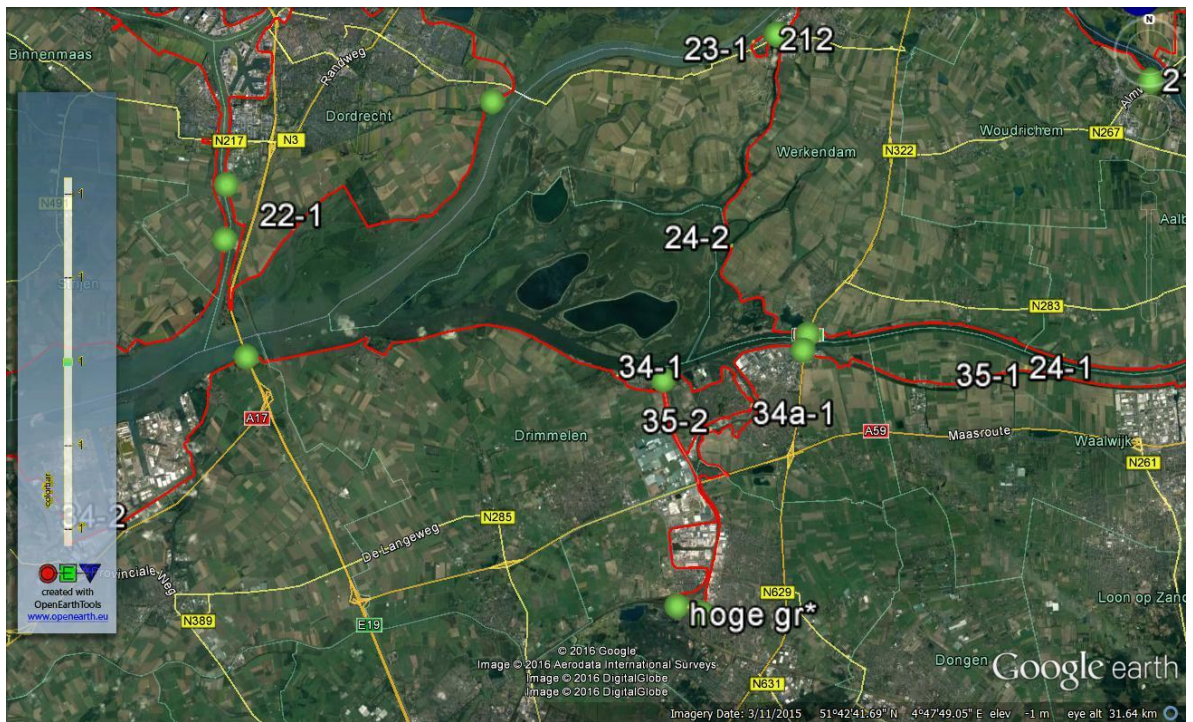




Figuur 5.12 Resultaat Hydra-Ring berekeningen voor zeven herhalingstijden, inclusief verschil tussen berekeningen met Rijnstatistiek en Maasstatistiek.



Figuur 5.13 Frequentielijnen 3 bovenstroomse locaties (loc 8, loc 9 en loc 10). Maasstatistiek (doorgetrokken lijnen) en Rijnstatistiek (gestippelde lijnen).



Figuur 5.14 Grenzen dijktrajecten (groene bollen).

Op basis van het bovenstaande worden voor de dijktrajecten gegeven in Figuur 5.14 de volgende afvoerstatistiek gebruikt.

- Dijktraject 34-1: Rijnstatistiek
- Dijktraject 35-2: Rijnstatistiek
- Dijktraject 24-2: Rijnstatistiek
- Dijktraject 34a-1: Maasstatistiek
- Dijktraject 24-1: Maasstatistiek
- Dijktraject 35-1: Maasstatistiek





## 6 Conclusies en aanbevelingen

### 6.1 Conclusies

In deze studie zijn de Hydraulische Belastingen (HB) voor de waterkeringen in het Benedenrivierengebied afgeleid met Hydra-Ring. De HB bestaan uit:

- Marginale statistiek van de lokale waterstand en significante golfhoogte bij de normfrequentie. Deze worden gebruikt voor de eenvoudige toets en vormen direct input voor Ringtoets.
- Maatgevende waterstanden (t.b.v. geotechnische toetssporen) en Hydraulisch belasting niveaus (golfoverslag-gerelateerde toetssporen). Dit zijn referentiewaarden voor de Hydraulische Belastingen die de toetsers zelf met Ringtoets afleidt. De HBN's en golfcondities zijn bepaald met standaardinstellingen voor het dijkprofiel.

Het rapport bevat een beschrijving van de gehanteerde aanpak en instellingen van Hydra-Ring. De resultaten zijn gecontroleerd aan de hand van een verschilanalyse met onder andere de vigerende HB en door middel van ruimtelijke visuele beoordeling. De conclusies hieruit zijn als volgt:

- Bij de selectie van rekentechniek is het watersysteem onderverdeeld in verschillende deelgebieden, gebaseerd op de dominantie van stochastische variabelen. De deelgebieden zijn: faalkansgebied, bergingsgebied, overgangsggebied, afvoer gedomineerd (Waal en Lek) en Bergsche Maas. De aanbevolen rekeninstellingen variëren per deelgebied en per faalmechanisme en zijn weergegeven in Tabel 6.1.

Tabel 6.1 Overzicht aanbevolen Hydra-Ring instellingen voor de Benedenrivieren (Deltares, 2017).

System	Deel van systeem	Waterstand	HBN	Golfhoogte
BER (3, 4)	Afvoer gedomineerd (Lek, Waal)	FDIR-NTI	FDIR-NTI	FDIR-NTI
	Afvoergedomineerd (Bergsche Maas)	DSFI-NTI	DSFI-NTI	DSFI-NTI
	Faalkansgedomineerd	DSFI-FBC	DSFI-FBC	DSFI-FBC
BER (3, 4)	Bergingsgebied	FDIR-NTI	FDIR-NTI	FDIR-NTI
	Overgangsggebied	FDIR-NTI	FDIR-NTI	FDIR-NTI

- Uit de Hydra-Zoet berekeningen kan geconcludeerd worden dat de nieuwe wind statistiek weinig effect heeft op de waterstanden en HBN's (<0.15 m). De nieuwe afvoerstatistiek zorgt vooral in het bovenstroomse gedeelte van het benedenrivierengebied tot een afname van de waterstanden en HBN's met maximaal 60 cm voor een herhalingsjijd van 10.000 jaar.
- De verschillen tussen de resultaten van Hydra-Ring zonder onzekerheden en Hydra-Zoet kunnen bij de waterstanden en HBN oplopen tot respectievelijk 1 en 2 meter (daling). De verschillen zijn echter goed te verklaren en komen door het repareren van de informatie uit de database door Hydra-Zoet, de overgang op de nieuwe database (Ruimte voor de Rivier maatregelen, correlatie tussen de Rijn- en Maas en de ligging

van de uitvoerlocaties) en het wel/niet meenemen van obstakels in de golfberekeningen.

- Het meenemen van onzekerheden als extra stochasten in Hydra-Ring zorgt voor een verhoging van de lokale waterstanden en HBN's. Voor de waterstanden is het effect van het grootst op de Bergsche Maas (circa 50 cm bij  $T=10.000$  jaar), gevolgd door het Haringvliet, Hollandsch Diep, Waal en de Lek (orde 30 cm). Wanneer we naar het HBN kijken dan zien we dat voor deze locaties het effect van onzekerheden licht toeneemt. Rond dijkkring 17 (Nieuwe Maas, Oude Maas, Wantij en Nieuwe waterweg) nemen de onzekerheden sterk toe, daar waar de onzekerheid in de waterstand zo'n 10 cm was loopt hij op tot maximaal 2 meter bij het HBN. Dit heeft waarschijnlijk te maken met onzekerheid in de modelonzekerheid van de golven. Verder is in de resultaten goed te zien dat waar het verloop van de frequentielijn van de waterstand of het HBN vlak is, het effect van de onzekerheid veel groter is dan bij een steile frequentielijn.
- De resultaten voor de marginale statistiek van de golfhoogte bepaald met Hydra-Ring (zonder onzekerheden) en Hydra-NL komen overeen ofwel de afwijkingen zijn te verklaren. De voornaamste verklaringen voor verschillen zijn (i) gewijzigde ligging van de uitvoerlocatie, (ii) toevoeging van obstakels in de golfmodellering en (iii) gewijzigde strijklengtes als gevolg van rivier verruimende maatregelen. Ook het effect van het meenemen van onzekerheden is goed te verklaren.
- Het gebiedsdekkende overzicht van de marginale statistiek van de waterstanden, HBN's en golfhoogtes waarin alle oeverlocaties zijn meegenomen geeft een ruimtelijk logisch en consequent beeld.

In deze studie is gekeken van naar de aansluiting van het benedenrivierengebied (regio 3 en 4) met de omliggende watersystemen. De begrenzing met het Europoortgebied en de Hollandse IJssel wordt bij de hoogwaterkeringen (Maeslantkering en Algerakering) gelegd. De overige overgangen zijn meer geleidelijk. Op basis van de resultaten van deze studie wordt voorgesteld om de overgang te leggen bij de volgende dijktrajecten:

- 15-1 en 44-1 voor de noordoever van de Lek;
- 16-3 en 16-4 voor de zuidoever van de Lek;
- 16-1 en 43-6 voor de noordoever van de Waal;
- 24-3 en 213 voor de zuidoever van de Waal;
- 37-1 en 38-2 voor de noordoever van de Maas;
- 35-1 en 36-5 voor de zuidoever van de Maas.
- Bij de overgang van regio 3 en 4 wordt voor de dijktrajecten 24-2 en 34-1 gebruik gemaakt van de Rijnstatistiek en voor 24-1, 34a-1 en 35-2 van Maasstatistiek.



## 7 Referenties

- Caires, S. 2009. Extreme wind statistics for the Hydraulic Boundary Conditions for the Dutch primary water defences. SBW-Belastingen: Phase 2 of subproject "Wind Modelling". Deltares. 1200264-005.
- Deltares (2014a). Uitgangspunten productieberekeningen WTI2017. Aansturing, schematisaties en uitvoerlocaties. Deltares rapport 1207807-009-HYE-0006, Juli 2014 (J.P. de Waal, A. Spruyt en A. Smale).
- Deltares (2014b). Uitgangspunten productieberekeningen WTI2017, aanvulling op uitgangspunten vastgesteld in 2013. Deltares rapport 1209433-001-HYE-0005, Juli 2014 (A. Smale).
- Deltares (2015a). Onzekerheidsanalyse hydraulica in GRADE. Deltares rapport 1220082-010-ZWS-0001, Februari 2015 (G. Prinsen, H. van den Boogaard, M. Hegnauer).
- Deltares (2015b). Modelonzekerheid in lokale waterstand voor het RMM gebied. Deltares memo (H. Chbab).
- Deltares (2015c). Modelonzekerheid Hydra-Ring. Wettelijk toetsinstrumentarium WTI-2017. Deltares rapport 1209433-008-HYE-0007, Juli 2015 (H. Chbab en J. Groeneweg).
- Deltares (2016a). Basisstochasten WTI-2017. Deltares rapport 1209433-012-HYE-0007, Januari 2016 (H. Chbab en D. Eilander).
- Deltares (2016b). Waterstandsverlopen Benedenrivierengebied voor WTI2017. Deltares rapport, 1220082-002-HYE-0004, Februari 2016 (A. Kieftenburg en D. Stuparu).
- Deltares (2016c). Gap Analysis, Deltares Memo, 1230087, 8 August 2016 (J. Morris).
- Deltares (2016d). Hydra-Ring resultaten Europoort, Deltares Memo, 1230087-004-HYE-0002, 30 augustus 2016 (J. van Nieuwkoop).
- Deltares (2016e). Q-Variant - golfbelasting op bekledingen in Hydra-Ring, WBI-2017, Deltares rapport, 1230087-000-HYE-0004, augustus 2016 (J. den Bieman).
- Deltares (2016f). Aanpassing statistiek Hydra-Ring en analyse overgang watersystemen. Deltares Memo, 30, november 2016.
- Deltares (2017). Vaststelling van rekeninstellingen voor Hydra-Ring berekeningen van Hydraulische Belastingen. Rapport Deltares 1230087-011-HYE-0001, augustus 2017 (J. Groeneweg en J. den Bieman)
- Diermanse et al. (2013). Hydra-Ring Scientific Documentation. Deltares & TNO-Bouw. Deltares rapport 1206006-004.
- Geerse, C.P.M. en Verkaik, J.W., 2010. Effect nieuwe windstatistiek op toetspeilen en benodigde kruinhoogten. HKV rapport PR1601.10. Lelystad.

- Geerse (2013). Belastingmodellen WTI2017. Gevoeligheidsanalyses en adviezen voor eventuele aanpassingen aan Hydra-Ring. Rapport HKV Lijn in Water PR2647.40, september 2013.
- Geerse, C.P.M., Wojciechowska, K. (2014). Betrouwbaarheidsintervallen voor kwantielen van de overschrijdingsfrequentie. Toepassing op kuststations en IJsselmeergebied. HKV lijn in water. PR2829.20.
- Geerse, C.P.M., Wojciechowska, K. (2015). Betrouwbaarheidsintervallen voor kwantielen van de overschrijdingsfrequentie. Toepassing op kuststations en IJsselmeergebied. HKV lijn in water. PR2829.20
- HKV (2013). Belastingmodellen WTI2017, Tussenrapport: stormvloedkeringen Europoort/Haringvlietsluizen en onzekerheid afvoerverdeling. HKV Rapport (concept) PR2647.40, C. Geerse. Juli 2013.
- Min. I&M (2016). Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017. Bijlage II Voorschriften bepaling hydraulische belasting primaire waterkeringen. Rapport Ministerie Infrastructuur en Milieu, versie 22 april 2016.
- KNMI (1983). A compound Weibull model for the description of surface wind velocity distributions. De Bilt: KNMI, Scientific Report WR 83-13, 1983.
- RWS (2015). Handreiking ontwerpen met overstromingskansen, Veiligheidsfactoren en belastingen bij nieuwe overstromingskansnormen, Versie OI2014v3, Juli 2015.
- Van den Brink (2015). Extrapolatie van de zeewaterstand in het Waddengebied. KNMI memo, 8 juli 2015