Deltares

Enabling Delta Life

Hydraulische Belastingen Meren

Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017



Deltares

Hydraulische Belastingen Meren

Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017

Nienke Kramer
Alfons Smale
Joost den Bieman
Jacco Groeneweg

1230087-001

© Deltares, 2017, B

Deltares

Titel
Hydraulische Belastingen Meren

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
RWS - WVL	1230087-001	1230087-001-HYE-0001	82

Trefwoorden
Hydraulische Belastingen, IJsselmeer, Markermeer, 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, hydraulisch belastingniveau (HBN) voor golfoverslag en randvoorwaarden voor andere faalmechanismen, zoals falen van bekledingen. 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 merengebied. De resultaten zijn beoordeeld door middel verschilanalyses met WTI-2011 en door analyse van de ruimtelijke variatie. Daarnaast, vormen de resultaten de basis voor de uiteindelijke keuze van de te hanteren rekentechniek.
De verschilanalyse laat zien dat voor de meeste locaties Hydra-Ring de lokale waterstanden en HBN's zoals berekend met de Hydra-Zoet (WTI-2011) benadert. In de meeste gevallen zijn de verschillen tussen beide Hydra's als gevolg van verschillen in het probabilistische model in de orde van 0.1 m. Er zijn slechts enkele locaties waar de verschillen groter zijn. De nauwkeurigheid van de resultaten kan voor deze locaties verder verbeterd worden door gebruik te maken van de tijdsintegratiemethode NTI in plaats van FBC.

De implementatie van de nieuwe windstatistiek zorgt voor de meeste locaties voor een klein verschil in de lokale waterstand (0.1 – 0.2 m). Bij het HBN is er voor de meeste locaties ook sprake van een steiler worden van de overschrijdingsfrequentielijn. Bij een herhalingstijd van 10.000 jaar kan het verschil hierdoor oplopen tot 0.9 m. Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat de grote HBN-verschillen deels te wijten zijn aan het gebruik van ongunstige uitgangspunten voor het overslagdebiet en dijkprofiel.

Het meenemen van onzekerheden zorgt voor een verhoging van de lokale waterstanden en HBN's. Voor de meeste locaties en bij een herhalingstijd van 10.000 jaar ligt de verhoging van de lokale waterstand tussen de 0.2 en 0.3 m. Bij de HBN's kan de verhoging oplopen tot meerdere meters. Dit wordt deels veroorzaakt door de keuze voor het profiel en overslagdebiet.

Uit de ruimtelijke analyse trekken we de conclusie dat de afgeleide lokale waterstanden, HBN's en golfhoogtes een logisch en consequent beeld geven. Slechts enkele locaties laten afwijkende waarden zien doordat de berekening niet convergeert.

De in dit rapport gevonden verschillen kunnen allen verklaard worden door aanpassingen in de statistiek, het in rekening brengen van kennisonzekerheden en verschillen in de gehanteerde rekenmethoden (technieken, correlaties, etc.).

Voor de definitieve berekeningen wordt geadviseerd om het correlatiemodel dat wordt gebruikt om de afhankelijkheid tussen de modelonzekerheden in golfhoogte en –periode te

Deltares

Titel
Hydraulische Belastingen Meren

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
RWS - WVL	1230087-001	1230087-001-HYE-0001	82

herzien en om een aangepaste winddrag coëfficiënt te gaan hanteren. Deze aanpassing is sinds begin 2017 ook geïmplementeerd in WBI2017.

Bij dit rapport worden spreadsheets geleverd met Hydraulische Belastingen (waterstand, HBN en golfhoogte) voor alle locaties en voor zeven herhalingstijden.

Referenties
Plan van Aanpak WTI KPP 2016, maart 2016

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	juni 2016	N. Kramer		H. de Waal		M.R.A. van Gent	
		A. Smale					
		J. den Bieman					
		J. Groeneweg					
2	Juli 2016	N. Kramer et al.		J. Beckers		M.R.A. van Gent	
4	Dec 2016	N. Kramer et al.		J. Beckers		M.R.A. van Gent	
5	Apr 2017	N. Kramer et al.		J. Beckers		M.R.A. van Gent	

Status
definitief

Inhoud

1 Inleiding **1**
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

2 Algemene beschrijving probabilistische omgeving meren **11**
2.1 Inleiding 11
2.2 Belastingmodel van het merengebied 11
2.3 Database 12
2.4 Statistiek 13
2.4.1 Windstatistiek 13
2.4.2 Meerpeilstatistiek IJsselmeer 15
2.4.3 Meerpeilstatistiek Markermeer 15
2.5 Extra stochasten t.b.v. het meenemen van kennis onzekerheden: 15
2.5.1 Model onzekerheden 15
2.5.2 Statistische onzekerheden 16
2.6 Probabilistische rekentechniek 16
2.7 Probabilistisch model 16
2.7.1 Rekentechniek 16
2.7.2 Verschil FORM en DS 17
2.7.3 Verschil NTI en FBC 17

3 Verschilanalyses Meren **19**
3.1 Inleiding 19
3.2 Werkwijze analyse resultaten 19
3.3 Uitgangspunten berekening 19
3.3.1 Algemeen 19
3.3.2 Hydra instellingen 20
3.4 Resultaten lokale waterstand en HBN 23
3.4.1 Vergelijking tussen Hydra-Zoet en Hydra-Ring 23
3.4.2 Vergelijking met Hydra-Zoet nieuwe en oude windstatistiek 30
3.4.3 Effect onzekerheden 32
3.4.4 Vergelijking Hydra-Zoet met oude norm versus Hydra-Ring met nieuwe norm. 39
3.5 Marginale statistiek van de golfhoogte 42
3.5.1 Vergelijking tussen Hydra-Zoet (nieuwe statistiek) en Hydra-Ring 42
3.5.2 Effect onzekerheden 44

4 Resultaten HB Meren **45**
4.1 Inleiding 45
4.2 Uitgangspunten productieberekeningen 45
4.3 Rekenresultaten lokale waterstand bij de normfrequentie 45

4.4 Rekenresultaten HBN 48
4.5 Rekenresultaten golfhoogte 51
4.6 Rekentijden 54
4.7 Revisie rekentechnieken 55

5 Aansluiting op IJssel-Vechtdelta 59
5.1 Inleiding 59
5.2 Ketelmeer/Vossemeer – IJsseldelta 59

6 Conclusies en aanbevelingen 63
6.1 Conclusies 63
6.2 Aanbevelingen 64

7 Referenties 65

Bijlage(n)

A Vergelijking Hydra-Ring zonder onzekerheden en Hydra-Zoet A-1
A.1 Lokale waterstand A-1
A.2 HBN A-2

B Vergelijking Hydra-zoet nieuwe en oude windstatistiek B-1
B.1 Lokale waterstand B-1
B.2 HBN B-3

C Effect onzekerheden C-1
C.1 Lokale waterstand C-2
C.2 HBN C-6

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 large inland lakes (IJsselmeer, Markermeer and adjacent lakes). 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.

The difference analysis shows that the transition in statistics leads to explainable differences in Hydraulic Loads, which are generally small (0.1 - 0.2 m). Exception is the impact of new wind statistics on hydraulic load level for overtopping (up to 0.9 m), although this is mostly due to unfavourable choices in the reference geometry (critical discharge, slope angle, etc.).

The transition from Hydra-Zoet to Hydra-Ring has minor impact on the results, with differences in general in the order of 0.1 metres. Some specific locations show larger differences, which is mainly caused by the integration technique for the time-domain (FBC).

Inclusion of statistical and model uncertainties leads to an increase in water level statistics of 0.2 to 0.3 m for a return period of 10,000 years. For the hydraulic load for overtopping the addition of the uncertainties leads to a significant increase of a few meters. This is partly due to the choice of performing the calculations with standard (steep) profiles. Other causes are the large model uncertainties in wave height and wave.

From the spatial analysis we draw the conclusion that the derived local water levels, HBNs and wave heights show a consistent pattern. There are a few exceptions to this rule with unrealistic results: for these locations the computation has not converged.

All differences in this report can be explained as a result of changes in the statistics, the changing of knowledge uncertainties and differences in calculation methods (techniques, correlations, etc.). For the final calculations it is recommended to revise the correlation model used for uncertainties in wave height and period.

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.

1 Inleiding

1.1 Positionering rapportage in WBI-2017 structuur

De Waterwet schrijft voor dat de primaire waterkeringen getoetst moeten worden aan de gestelde veiligheidsnormen. In deze wet is voor de beheerder van een primaire waterkering de verplichting neergelegd 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.

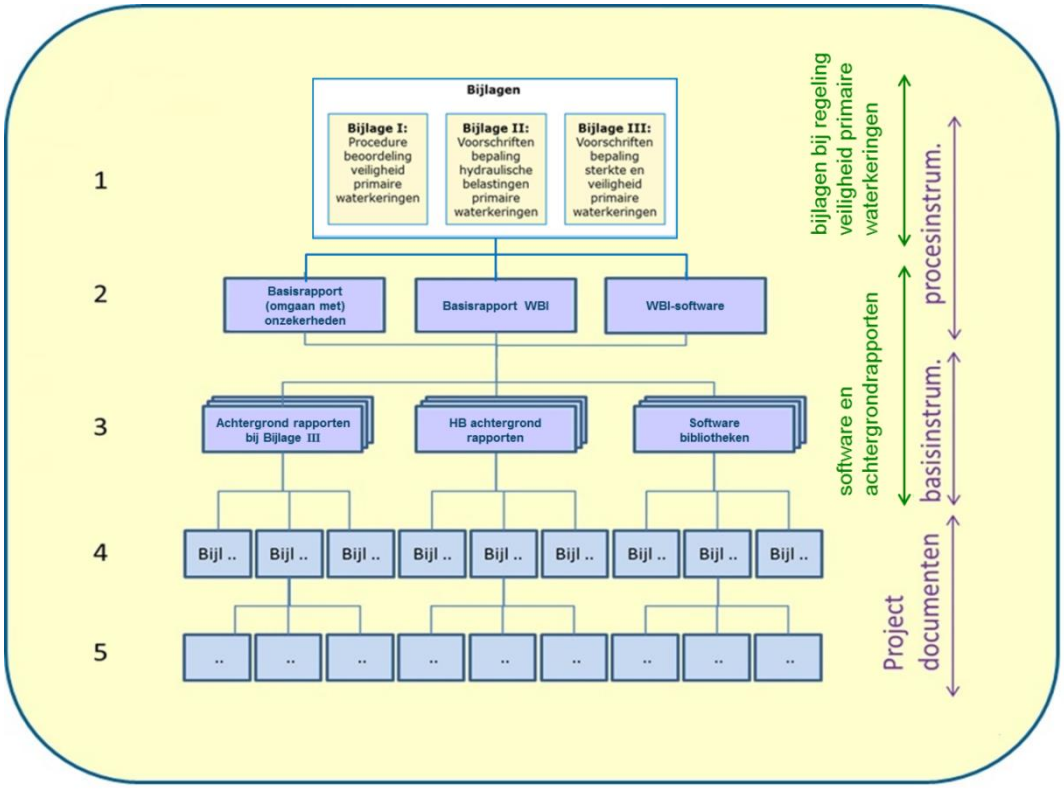
De beoordeling wordt met ingang van 2017 uitgevoerd aan de hand van het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI). Het WBI is vastgelegd in een ministeriële regeling (Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017) met de volgende bijlagen:

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 Merengebied zijn verkregen, hoe de resultaten er uit zien en hoe ze zich verhouden tot WTI-2011. Naast het Merengebied zijn soortgelijke rapportages voor het Kustgebied, Bovenrivierengebied, Vecht-IJsseldelta en Benedenrivierengebied geschreven. 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 1.4), 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 wettelijk 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 hydraulische randvoorwaarden (HR) die met WTI-2011 zijn berekend geen formele status gekregen. De destijds nieuw afgeleide HR voor IJsselmeer, Ketelmeer en Vossemeer staan bekend onder de naam CR2011, concept randvoorwaarden. Voor het Markermeer en overige randmeren zijn de HR uit 2006 overgenomen. 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 dijkring 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[1].

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.

[1] *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, 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 toetser 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:	Reken-methode:	Faal-mechanisme:	Faalkanseis:	Instrumen-tarium toetser:	Resultaat deze studie:
Eenvoudig	vak	eenvoudig	selectie	Norm	Ringtoets	Productiesommen die direct worden getoond in Ringtoets (= marginale statistiek waterstand en golfhoogte)
Gedetailleerd	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 het merengebied. Aan de hand van een groot aantal

berekeningen zijn Hydraulische Belastingen (HB) voor de waterkeringen in het IJsselmeer en de randmeren 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

De doelstelling van dit rapport is drieledig:

1. Beschrijving van de rekenmethodes 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 worden de volgende uitgangspunten gehanteerd.

- Tot het merengebied behoren het IJsselmeer, Ketelmeer, Vossemeer, Markermeer, IJmeer, IJburg, Gouwzee, Gooimeer, Eemmeer, Nijkerkernauw en Eemvallei, zie Figuur 1.3 en regio 7 en 8 in Figuur 1.4. De exacte overgangslocaties worden geschreven 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 worden afgeleid uit de normfrequenties die zijn weergegeven in Figuur 1.2. Dit zijn de volgende zeven frequenties: 1:100, 1:300, 1:1.000, 1:3.000, 1:10.000, 1:30.000, 1:100.000 per jaar.

- De Hydraulische Belastingen volgens WBI-2017 worden vergeleken met de resultaten van 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.

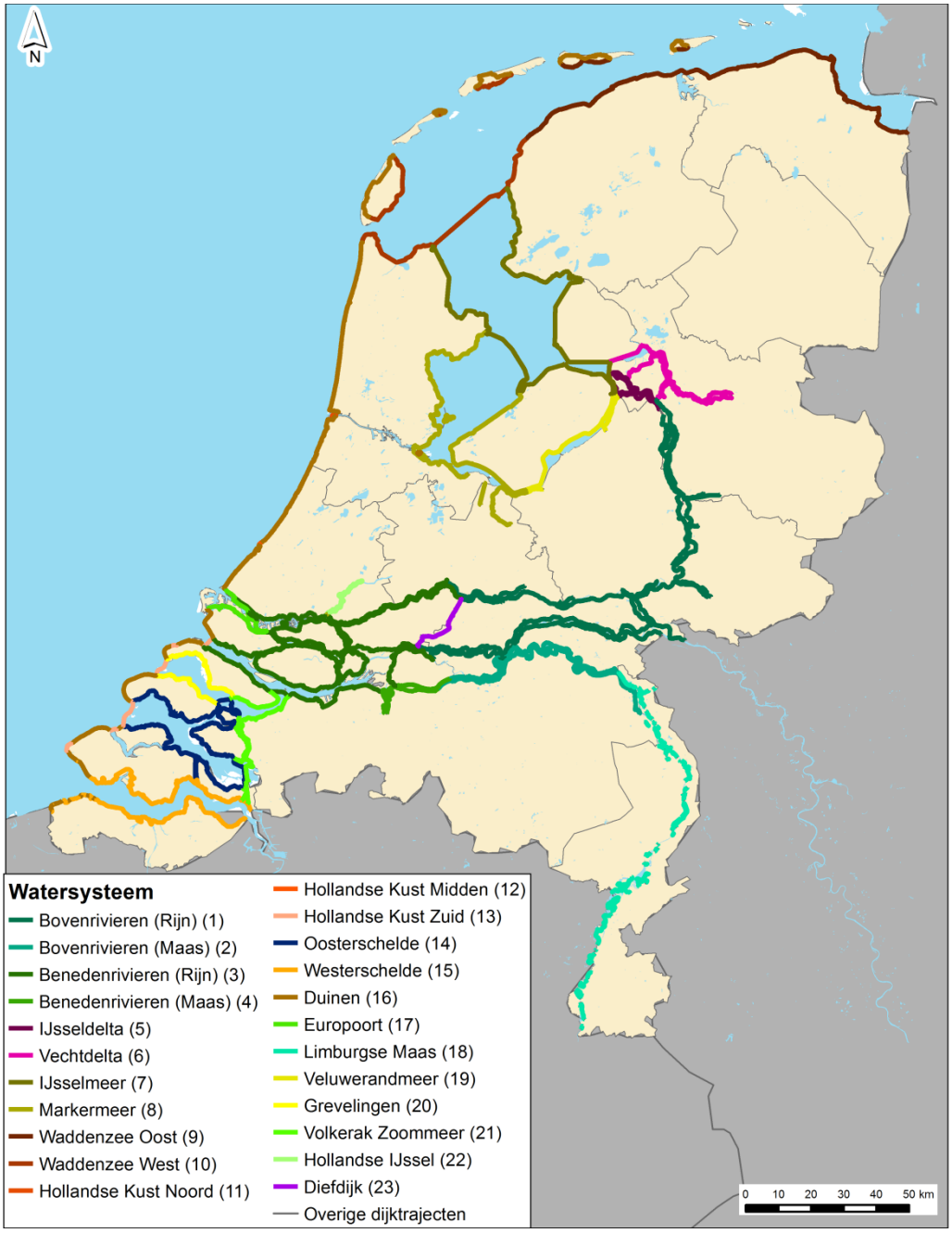
- Aangezien de referentieberekeningen van de semi-probabilistische toets op vakniveau zijn bedoeld om de verschillen met WTI-2011 te duiden is het slechts noodzakelijk deze referentiewaarden te bepalen voor een selectie van locaties (doch voldoende).

- De betrouwbaarheid van de resultaten wordt mede bepaald door de keuze van de probabilistische rekentechniek. De meest geschikte rekentechniek is voor alle gebieden in overleg met Hydra-Ring ontwikkelaars vastgesteld. Toch kunnen we niet uitsluiten dat op sommige locaties HB worden berekend die minder betrouwbaar zijn. Waar dit

optreedt zal het in dit rapport zoveel mogelijk worden geduid. In een vervolganalyse (Deltares, 2017) zijn de gehanteerde rekentechnieken nader beschouwd in relatie tot de betrouwbaarheid van de resulterende HB.



Figuur 1.3 Overzicht van het merengebied.



Figuur 1.4 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 staan beschreven 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.

1.6 Leeswijzer

In de hoofdstukken van dit rapport is het volgende te lezen:

1 Beschrijven van het gebruikte belastingmodel voor de keringen in het merengebied (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, 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 merengebied (regio 7 en 8) met de IJsseldelta (regio 5), in het bijzonder het Ketelmeer en Vossemeer.
1. .

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[2]) t.b.v. semi-probabilistische toets op vakniveau.

[2] *Ook vaak 'benodigde kruinhoogte' genoemd.*

Bij dit rapport behoren de volgende gegevens en applicaties opgeleverd:
- Excel files met Hydraulische Belastingen (per locatie, herhalingstijd en type hydraulische belasting)
- Aansturingsscripts en pre- en postprocessingscripts

1.8 Totstandkoming

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
- 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.

2 Algemene beschrijving probabilistische omgeving meren

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een beschrijving gegeven van het belastingmodel voor keringen in het merengebied. Daarnaast wordt ingegaan op de verschillen tussen de belastingmodellen in WTI-2006, WTI-2011 en WBI-2017.

2.2 Belastingmodel van het merengebied

In Figuur 2.1 is een schematische weergave gegeven van het belastingmodel van het merengebied, geldend voor het faalmechanisme overslag. De stochasten meerpeil, windrichting en windsnelheid worden respectievelijk aangeduid met M, R en U. De golfparameters H_s, $T_{m-1,0}$, T_p en β staan voor significante golfhoogte, gemiddelde (spectrale) golfperiode, piekperiode en gemiddelde golfrichting. Merk op dat de significante golfhoogte berekend met het spectrale golfmodel SWAN normaliter met H_{m0} wordt aangeduid. Golfhoogtes berekend met de empirische formulering van Bretschneider wordt aangeduid met H_s. In dit rapport is overal voor 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:

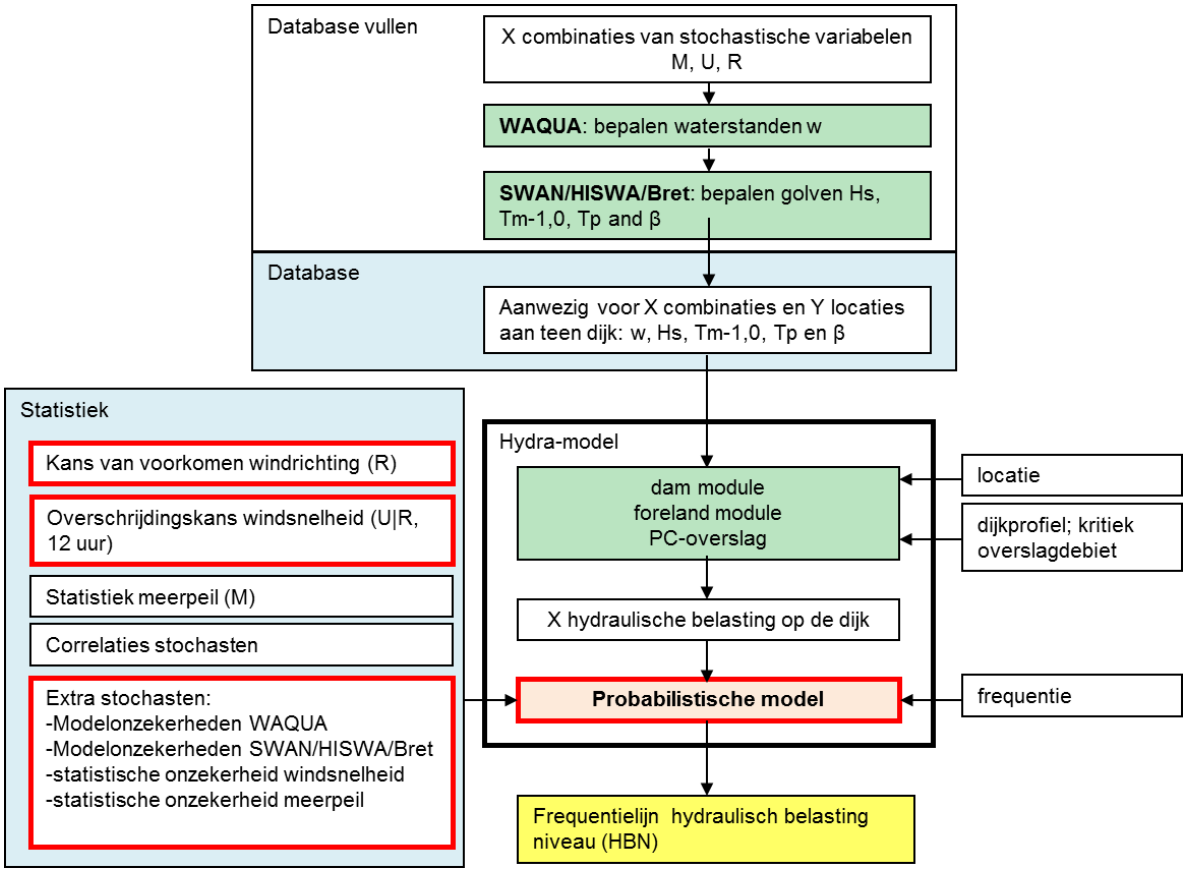
1. Statistiek: dit is de statistiek van de basisstochasten en hun onderlinge correlaties die de belangrijkste variabiliteit van het watersysteem beschrijven.
2. Database: de database geeft de vertaling van een representatieve set stochastcombinaties naar bijbehorende hydraulische belasting nabij de waterkering.
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 PC-Overslag, 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 2.1 zijn de onderdelen die zijn gewijzigd in WBI-2017 rood omlijnd. De belangrijkste aanpassingen ten opzichte van WTI2011 voor het merengebied zijn:

- Nieuw probabilistisch model Hydra-Ring i.p.v. Hydra-Zoet;
- Update van de windstatistiek.
- Introductie van kennisonzekerheden (statistische en modelonzekerheden).



Figuur 2.1 Schematische weergave belastingmodel meren. Hierin worden de componenten genoemd die nodig zijn bij het bepalen van de frequentielijn van het hydraulisch belasting niveau voor overslag-gerelateerde 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).

2.3 Database

De database geeft per locatie de vertaling van een representatieve set stochastcombinaties naar bijbehorende hydraulische belasting nabij de waterkering. Voor het vullen van de database liggen productieberekeningen ten grondslag met hydrodynamische en golfmodellen. In het merengebied wordt gebruik gemaakt van drie onafhankelijke stochasten, windrichting, windsnelheid en meerpeil. Voor meer informatie wordt verwezen naar (Deltares, 2011).

De fysische database met rekenresultaten zijn voor zowel IJsselmeer als Markermeer gelijk aan de databases zoals gebruikt in de WTI-2011. De gehanteerde databases zijn opgebouwd op basis van de volgende waterstands- en golfberekeningen:

- Waterstanden:
  - IJsselmeer, Ketelmeer en Vossemeer: WAQUA - CR2011;
  - Markermeer, IJburg, Gouwzee, IJmeer, Gooimeer, Eemmeer, Eemvallei en Nijkerkernauw: WAQUA – HR2001.

- Golven:
  - IJsselmeer, Ketelmeer en Vossemeer: SWAN - CR2011;
  - IJburg, Gouwzee: SWAN - HR2006;
  - Eemvallei: Bretschneider - HR2006;
  - Markermeer, IJmeer, Gooimeer, Eemmeer en Nijkerkernauw: HISWA - HR2001.

Zoals hierboven aangegeven worden in deze studie de CR2011 databases gebruikt voor het Ketelmeer en Vossemeer. Hierbij dient opgemerkt te worden dat er binnen WBI-2017 nieuwe productiesommen voor deze twee wateren zijn gemaakt, dit vanwege de aanleg van het Reevediep – fase1. Indien blijkt dat deze bypass tussen de IJssel en het Drontermeer effect heeft op de Hydraulische Belastingen in het Ketelmeer en/of Vossemeer, dan zal waarschijnlijk deze nieuwe database gebruikt gaan worden bij het bepalen van de Hydraulische randvoorwaarden. Dit betekent ook dat Ketelmeer en/of Vossemeer dan opgenomen worden het WBI voor de Vecht- en IJsseldelta en dan geen onderdeel meer uitmaken van het WBI voor het merengebied. Vaststelling van het al dan niet opnemen van Ketel en/of Vossemeer vindt plaats na vaststelling van de Hydraulische Belastingen voor zowel het meren gebied als de IJsseldelta.

2.4 Statistiek

De basisstochasten in het merengebied betreffen windsnelheid, windrichting en meerpeil. De statistiek van deze stochasten, alsmede hun onderlinge correlatie worden hieronder nader toegelicht.

2.4.1 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 meren wordt de windstatistiek van het station Schiphol gebruikt.

Windsnelheid

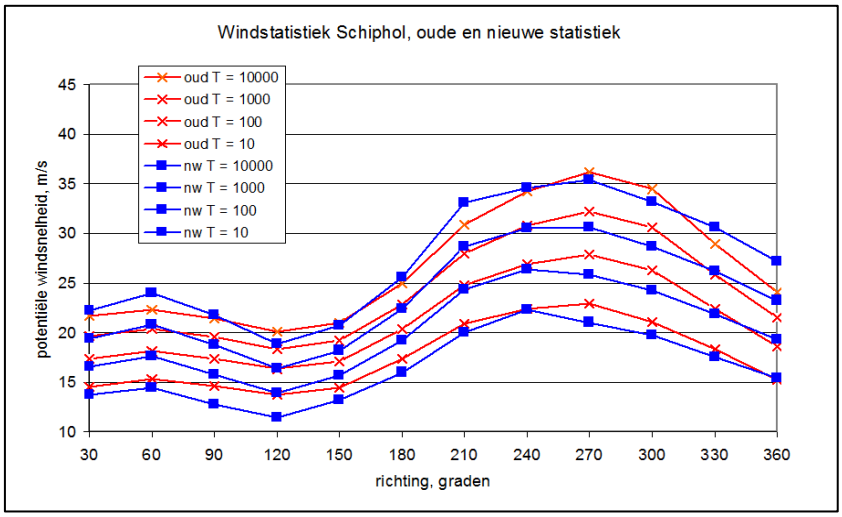
In het kader van WTI-SBW is recentelijk in opdracht van Rijkswaterstaat onderzoek gedaan naar de windstatistiek waarbij o.a. windmetingen uit de periode vanaf 1970 zijn gebruikt. Op basis van deze langere en betrouwbaardere meetreeksen is door Deltares in samenwerking met het KNMI nieuwe windstatistiek 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 Markermeer gebruik wordt gemaakt van richtingsafhankelijke statistiek verdeeld over 12 windsectoren, terwijl voor het IJsselmeer gebruik wordt gemaakt van richtingsafhankelijke statistiek verdeeld over 16 sectoren. De oorsprong van de statistiek is in beide gevallen hetzelfde, te weten 12 sectoren. Er heeft enkel 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 Rijkoort-Weibull model) en de nieuwe windstatistiek voor het windstation Schiphol is weergegeven in Figuur 2.2. 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.

Verder geldt dat de voor herhalingstijden van 100 jaar en kleiner de wind alleen maar milder wordt, maar tijdens extreme wind (T=1000 jaar) is er wel sprake van een toename voor de windrichtingen Noord, Noordnoordwest, Noordoost en Zuidzuidwest.



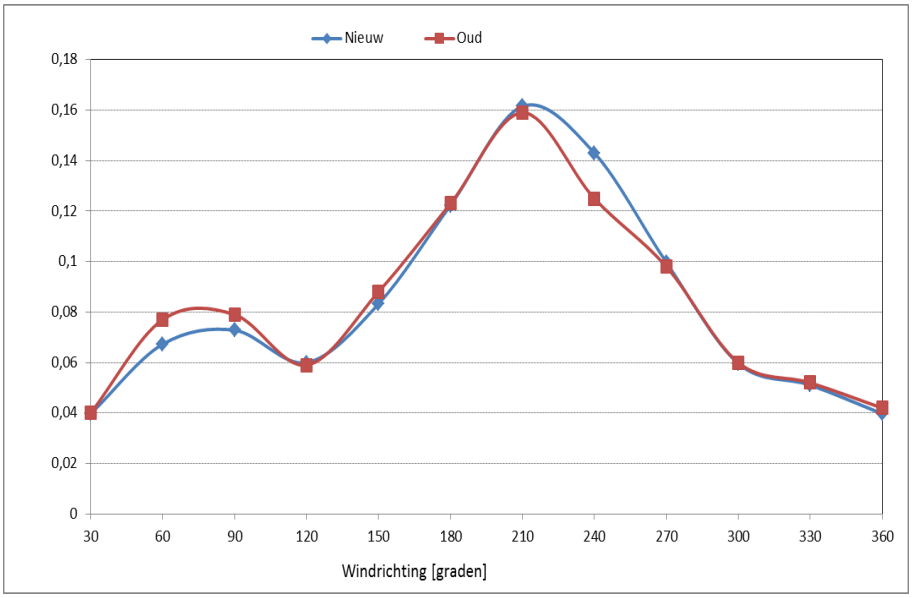
Figuur 2.2 Vergelijking oude (Rijkoort Weibull) en nieuwe (Exponentieel) windstatistiek voor relevante windstations en herhalingstijden. Bron: Deltares, 2016a

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 2.3 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 2.3 Vergelijking van de kansverdeling op windrichting (30 graden) voor Schiphol. Bron: Deltares, 2016a

2.4.2 Meerpeilstatistiek IJsselmeer

Voor WBI-2017 is besloten om de meerpeilstatistiek zoals toegepast in WTI2011, te handhaven, (zie Deltares, 2016a).

2.4.3 Meerpeilstatistiek Markermeer

Voor WBI-2017 is besloten om de meerpeilstatistiek voor het Markermeer van WTI2006 te handhaven, (zie Deltares, 2016a). De stochasten meerpeil en wind worden onafhankelijk verondersteld (geen correlatie). Dit blijft onveranderd in WBI-2017.

2.5 Extra stochasten t.b.v. het meenemen van kennis onzekerheden:

Nieuw binnen WBI-2017 is het meenemen van kennisonzekerheid bij het bepalen van de Hydraulische Belasting. Kennisonzekerheden in de belastingen zijn onder te verdelen in statistische- en modelonzekerheden.
Hydra-Ring is dusdanig ontworpen dat het toevoegen van extra stochasten zonder veel moeite kan plaatsvinden. Zowel model- als statistische onzekerheden zijn als optionele extra stochasten toegevoegd aan Hydra-Ring. De wijze van implementatie in Hydra-Ring is globaal beschreven in de Scientific Documentation van Hydra-Ring (Diermanse et al, 2013).

2.5.1 Model onzekerheden

De modelonzekerheden binnen het WBI zijn: mogelijke onnauwkeurigheden in de parameterinstellingen (kalibratie), de modelschematisaties en modelinvoer van de modellen waarmee waarden van de basisstochasten worden vertaald naar lokale belastingen op de waterkering. Voor de meren heeft modelonzekerheid effect op de onzekerheid in de uitkomsten van de productieberekeningen met WAQUA voor de waterstanden en SWAN, HISWA en Bretschneider voor de golfcondities. Onzekerheden aan de sterktekant, zoals modelonzekerheden in de overslagmodule, worden in deze studie buiten beschouwing gelaten.

Tabel 2.1 geeft de model-uitvoer weer waaraan een onzekerheid kan worden toegekend en die dan in Hydra-Ring als extra stochasten worden gemodelleerd. De kansverdelingen van deze stochasten worden nader toegelicht in Deltares (2015a).

Tabel 2.1 Uitvoerparameters in Hydra-Ring waarop modelonzekerheden worden toegepast.

Model	parameter
WAQUA	Waterstand h
SWAN, HISWA en Bretschneider	Golfhoogte H_s golfperiode $T_{m-1,0}$ piekperiode T_p

2.5.2 Statistische onzekerheden

De statistische onzekerheden zijn gerelateerd aan onzekere coëfficiënten en parameters in de kansverdelingen van de basisstochasten, meestal vanwege het beperkte[3] aantal meetgegevens. Voor de meren is de statistische onzekerheid bepaald voor:

- Windsnelheid
- IJsselmeerpeil
- Markermeerpeil

Voor alle drie geldt dat eerst de 95%-betrouwbaarheidsintervallen zijn afgeleid. Op basis hiervan is vervolgens een geparametriseerde schatting gemaakt van de statistische onzekerheid. Deze kan als extra stochast in Hydra-Ring worden meegenomen in de probabilistische berekening. Meer informatie wordt gegeven in Deltares (2016).

2.6 Probabilistische rekentechniek

Daar waar in WTI-2011 gebruik wordt gemaakt van Hydra-Zoet, wordt in WBI-2017 gebruik gemaakt van het nieuwe probabilistische instrumentarium Hydra-Ring. Hierbij zijn keuzes gemaakt ten aanzien van de implementatie van de functionaliteit in de belastingmodellen, zoals beschreven in de “Scientific Documentation Hydra-Ring” (Diermanse et al, 2013).

Het grootste verschil tussen Hydra-Ring en Hydra-Zoet is de probabilistische rekenmethode. Hydra-Zoet maakt gebruik van numerieke integratie. In Hydra-Ring kunnen veel verschillende rekentechnieken gekozen worden, waaronder als FORM, Numerieke Integratie en Directional Sampling. Het meenemen van onzekerheden leidt tot zes extra stochasten, dit maakt dat de rekentijden sterk zullen oplopen bij het gebruik van numerieke integratie. Voor het merengebied wordt om deze reden FDIR gehanteerd. Dit is een combinatie van FORM en Directional Sampling. Indien een FORM berekening niet convergeert wordt overgestapt op de meer robuuste rekentechniek Directional Sampling. Voor meer details aangaande rekentechnieken zie paragrafen 3.3.2 en 4.7.

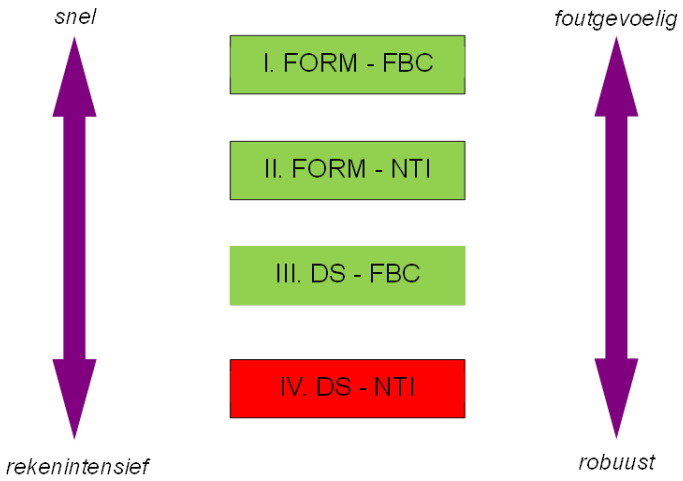
2.7 Probabilistisch model

2.7.1 Rekentechniek

De HR-2006 zijn bepaald met Hydra-VIJ. 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).

[3] *De lengte van de meetperiodes is beperkt in vergelijking met de geldende normen. De metingen worden geëxtrapoleerd naar extreme situaties.*

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 de meren zijn om deze reden andere rekentechnieken gehanteerd: FORM-FBC[4]. Dit is een FORM berekening in combinatie met de tijdsintegratiemethode FBC. Indien een FORM-FBC berekening instabiliteiten vertoont, kan overgestapt op FORM in combinatie met NTI. Bij blijvende instabiliteiten kan ook nog overgestapt worden 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 2.4 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 meerpeil als trage stochast is in Hydra-Ring gemodelleerd door middel van trapezia van 30 dagen in de basis. De topduren van de trapezia hangen af van het meerpeilniveau; voor meerpeilen hoger dan 0.22 m+NAP is de topduur constant en bedraagt 96 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:

[4] *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.*

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?

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).

3 Verschilanalyses Meren

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 Vergelijken van Hydra-Ring (zonder onzekerheden, nieuwe windstatistiek) resultaten met Hydra-Zoet (nieuwe windstatistiek) referentieberekeningen: Hiermee wordt het verschil als gevolg van overgang op een nieuwe rekentechniek (Hydra-Ring met FDIR en Hydra-Zoet met Numerieke Integratie) geduid.
2 Vergelijken van Hydra-Ring (zonder onzekerheden, nieuwe windstatistiek) resultaten met Hydra-Zoet (oude windstatistiek) referentieberekeningen: Hiermee wordt het verschil als gevolg van nieuwe statistiek (belastingmodel) geduid.
3 Vergelijking Hydra-Ring resultaten met onzekerheden en zonder onzekerheden. Hiermee wordt het effect van het meenemen van onzekerheden geduid.

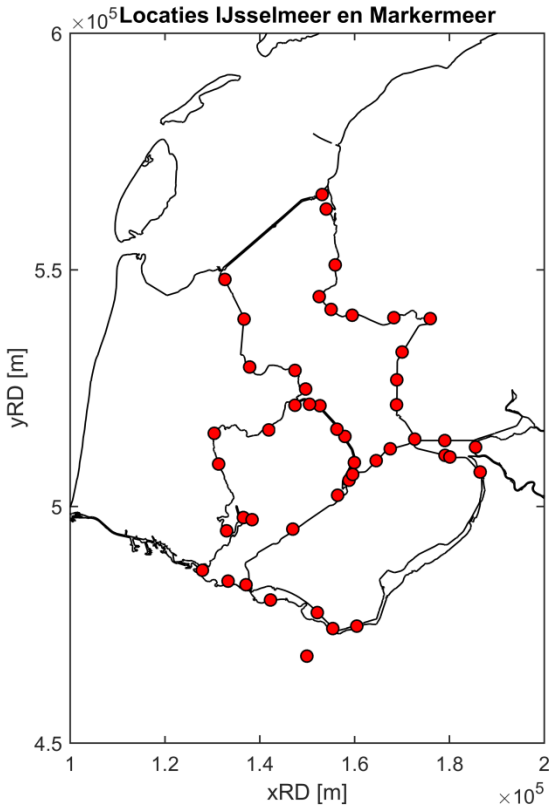
Alle berekeningen worden voor het gehele frequentiebereik uitgevoerd.

De marginale statistiek van de golfhoogte wordt in WBI-2017 voor het eerst als belastingparameter afgeleid. Om deze reden is de vergelijking van tussen de oude en nieuwe windstatistiek (stap 2) niet gemaakt. Stap 1 en 3 worden wel uitgevoerd.

3.3 Uitgangspunten berekening

3.3.1 Algemeen

In de verschilanalyse zijn de resultaten op een subset van alle beschikbare locaties beschouwd. De selectie (zie Figuur 3.1) zorgt voor een goede ruimtelijke dekking, met 28 locaties in het IJsselmeer en 21 locaties in het Markermeer.



Figuur 3.1 Geselecteerde locaties voor verschilanalyse langs IJssel- en Markermeer. De meest zuidelijke locatie is gelegen aan de rivier de Eem, Vanwege de open verbinding met het Markermeer is deze locatie in de deelregio Markermeer opgenomen.

3.3.2 Hydra instellingen

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

1 Hydra-Ring zonder onzekerheden en nieuwe windstatistiek
2 Hydra-Ring met onzekerheden en nieuwe windstatistiek
3 Hydra-Zoet zonder onzekerheden en nieuwe windstatistiek
4 Hydra-Zoet zonder onzekerheden en oude windstatistiek

De instellingen van bovengenoemde berekeningen worden hieronder besproken. Doordat het proces van het komen tot aanbevolen instellingen meerdere stappen kent (zie paragraaf 1.5), wordt in deze paragraaf beschreven welke instellingen er in dit rapport zijn gebruikt. In paragraaf 4.7 staat welke instellingen er worden aanbevolen door Deltares (2017).

1. Berekening Hydra-Ring zonder onzekerheden en nieuwe wind statistiek		
Onderdeel	Naam	Bestand & bron
Instrument	Hydra-Ring versie 2 oktober 2015	-
Databases	IJsselmeer en Markermeer WTI2017	HRD ijsselmeer.sqlite HRD markermeer.sqlite
Statistiek	Meerpeil IJsselmeer Meerpeil Markermeer	WTI 2011 WTI 2011
	Windsnelheid per richting	WBI 2017, zie Deltares (2016a)

	Schiphol	
	Kans op windrichting Schiphol	WBI 2017, zie Deltares (2016a)
Profiel (tbv HBN en bekledingen)	Dijknormaal	MetaInfo_ijsselmeer.xlsx MetaInfo_markermeer.xlsx
	ruwheidsparameter	1.0
	Helling	Standaard 1 op 3
Criteria HBN	overslagdebiet	1 l/s/m
Instellingen	TijdsInt.	FBC
	Methode	FDIR
	Startmethode	8
	Rel.Fact.	0.15
	ε_{β}	0.005
	ε_{HOH}	0.005
	ε_{Z}	0.005
	Nr. Iter.	150
Uitvoer	belastingparameter	Lokale waterstand (MHW), HBN, golfhoogte
	Type 3	Type 3: voor een interval van de belastingparameter berekent Hydra de bijbehorende frequentie.
	oeverlocaties	49 (=28 IJsselmeer +21 Markermeer)

In onderstaande tabel zijn de onderdelen weergegeven die zijn aangepast t.o.v. de Hydra-Ring berekening met onzekerheden.

2. Berekening Hydra-Ring met onzekerheden en nieuwe wind statistiek		
Onderdeel	Naam	Bestand & bron
Statistiek	Statistische onzekerheden meerpeil	WBI 2017, zie Deltares (2016a)
	Statistische onzekerheden windsnelheid	WBI 2017, zie Deltares (2016a)
	Modelonzekerheden waterstanden	WBI 2017, zie Deltares (2015a)
	Modelonzekerheden golven	WBI 2017, zie Deltares (2015a)
uitvoer	belastingparameter	Lokale waterstand, HBN, golfhoogte
	Type 2 en 3	Type 2: Bij 7 herhalingstijden berekent Hydra-Ring de bijbehorende belastingparameter. Type 3: voor een reeks van vooraf gespecificeerde waarden van een belastingparameter berekent Hydra-Ring de bijbehorende frequentie.
	oeverlocaties	alle

3. Berekening Hydra-Zoet zonder onzekerheden en met nieuwe windstatistiek		
Onderdeel	Naam	Bestand & bron
Instrument	Hydra-Zoet versie 1.6.3	Morris, 2016
Databases	IJsselmeer CR2011 Markermeer HR2006	CR2011_Meer_IJsselmeer_oever_a_06_v01.mdb CR2011_Meer_IJsselmeer_oever_a_07_v01.mdb CR2011_Meer_IJsselmeer_oever_a_08_v01.mdb CR2011_Meer_IJsselmeer_oever_a_12_v01.mdb CR2011_Meer_IJsselmeer_oever_a_13_v01.mdb CR2011_Meer_IJsselmeer_oever_b_04_v01.mdb CR2011_Meer_IJsselmeer_oever_b_25_v01.mdb HR2006_Meer_Markermeer_oever_a_08_v01.mdb HR2006_Meer_Markermeer_oever_a_13_v01.mdb HR2006_Meer_Markermeer_oever_a_13A_v01.mdb HR2006_Meer_Markermeer_oever_a_13B_v01.mdb HR2006_Meer_Markermeer_oever_a_44_v01.mdb HR2006_Meer_Markermeer_oever_a_45_v01.mdb HR2006_Meer_Markermeer_oever_b_04-05_v01.mdb
Statistiek	Meerpeil IJsselmeer Meerpeil Markermeer	WTI 2011, zie Deltares (2016a) WTI 2011, zie Deltares (2016a)
	Windsnelheid per richting Schiphol	WBI 2017, zie Deltares (2016a)
	Kans op windrichting Schiphol	WBI 2017, zie Deltares (2016a)
Profiel (tbv HBN)	Dijknormaal	MetaInfo_ijsselmeer.xlsx MetaInfo_markermeer.xlsx
	ruwheidsparameter	1
	Helling	Standaard 1 op 3
Criteria HBN	overslagdebiet	1 l/s/m
uitvoer	belastingparameter	Lokale waterstand (MHW), HBN, golfhoogte
		Bij 10 herhalingstijden berekent Hydra de bijbehorende belastingparameter
	oeverlocaties	49 (=28 IJsselmeer +21 Markermeer)

In onderstaande tabel zijn de alleen de onderdelen weergegeven die zijn aangepast tov de Hydra-Zoet berekening met nieuwe statistiek.

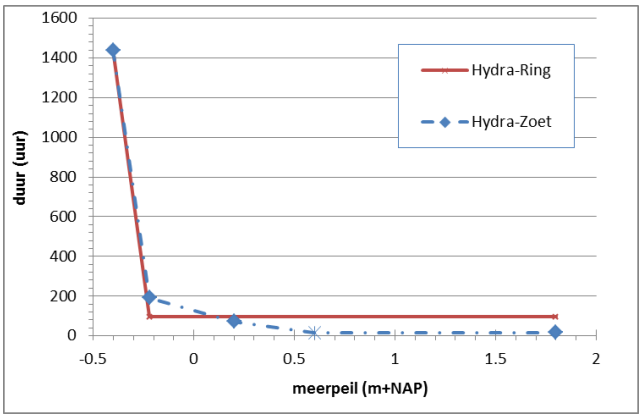
4. Berekening Hydra-Zoet zonder onzekerheden en met oude statistiek		
Onderdeel	Naam	Bestand & bron
Statistiek	Meerpeil IJsselmeer Meerpeil Markermeer	Deltares (2015a)
	Windsnelheid per richting Schiphol	Wojciechowska (2016) op basis van brondata Deltares (2015a)
	Kans op windrichting Schiphol	Wojciechowska (2016) op basis van brondata Deltares (2015a)

3.4 Resultaten lokale waterstand en HBN

3.4.1 Vergelijking tussen Hydra-Zoet en Hydra-Ring

In deze paragraaf worden de Hydra-Ring resultaten zonder onzekerheden vergeleken met Hydra-Zoet referentieberekeningen, waarbij beide Hydra's gebruik maken van de nieuwe windstatistiek. Hiermee wordt vooral het verschil als gevolg van overgang op een nieuwe rekentechniek (Hydra-Ring met FDIR en Hydra-Zoet met Numerieke Integratie) geduid. Andere verschillen tussen beide modellen zijn:

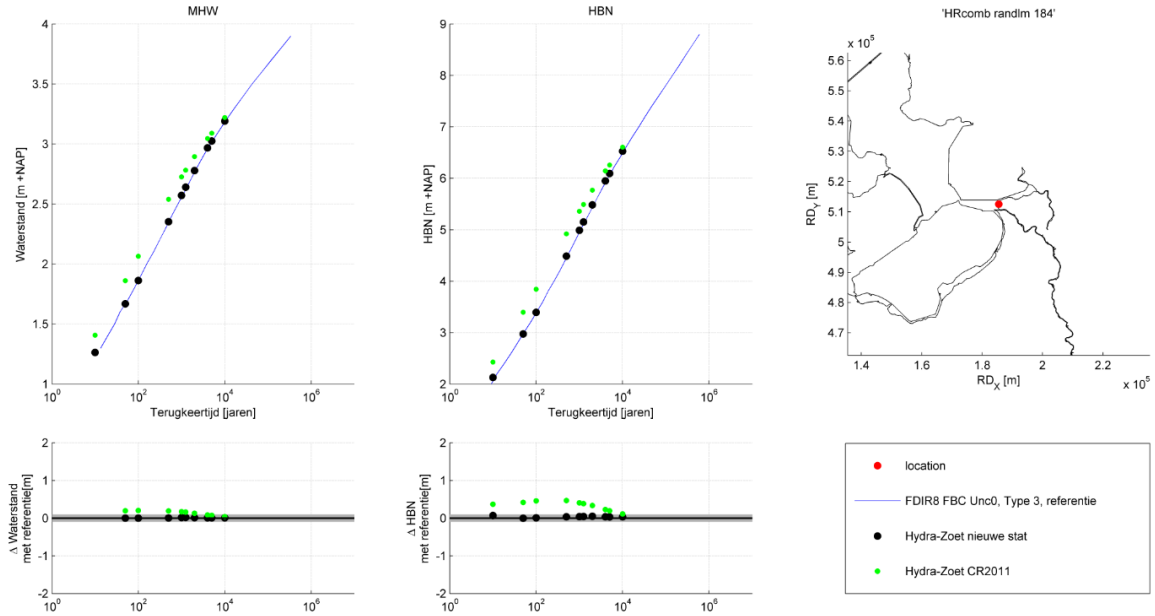
- In Hydra-Zoet worden in de "reparaties" toegepast indien de belastingfunctie daalt bij een stijgende windsnelheid (U_{10}). Hierdoor wordt o.a. afwaaiing niet meegenomen. Deze "reparaties" worden niet toegepast in Hydra-Ring.
- Hydra-Ring en Hydra-Zoet werken voor het Markermeer met dezelfde database met 12 windsectoren, alleen in Hydra-Zoet is deze database getransformeerd naar 16 windsectoren.
- Statistiek van de topduren in het Markermeer. In de Hydra-Zoet berekeningen is ten onrechte het oude Hydra-M-bestand gebruikt ipv het Hydra-zoet bestand. Hierbij is de duur van pieken in de meerpeilen boven de 0,20 m+NAP te laag genomen (16 uur ipv 96 uur), zie Figuur 3.2 (Deltares, 2015b).



Figuur 3.2 Statistiek van de topduren Markermeer

Resultaten lokale waterstand

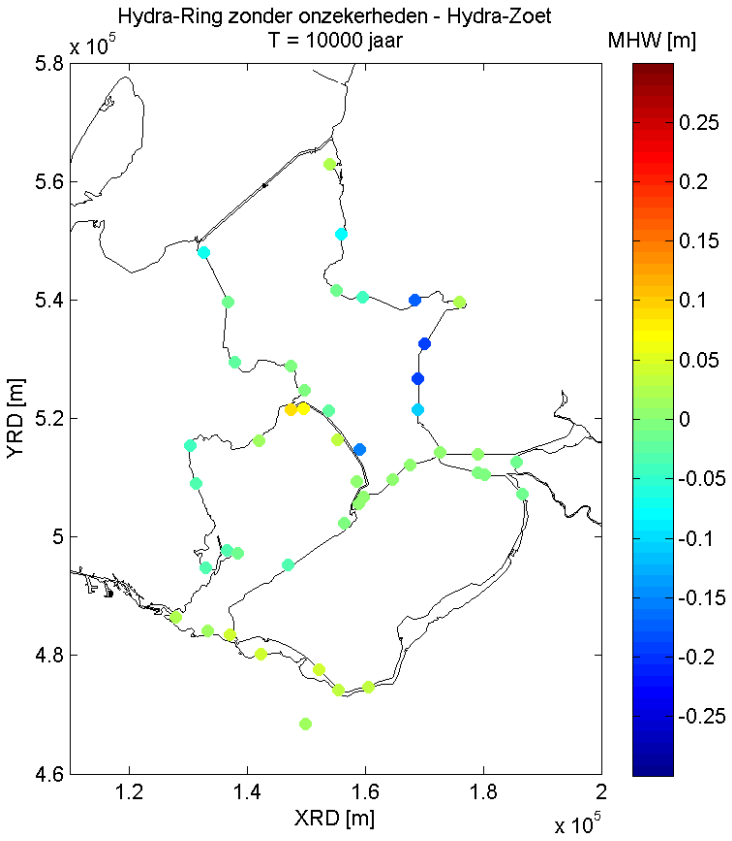
Figuur 3.3 geeft de overschrijdingsfrequentielijnen van de lokale waterstand en HBN voor Locatie700181. De zwarte punten zijn de resultaten van de Hydra-Zoet berekening en de blauwe lijn is de Hydra-Ring overschrijdingskromme. De groene punten worden in paragraaf 3.4.2 gebruikt en toegelicht. Voor alle 49 oeverlocaties zijn figuren conform Figuur 3.3 gemaakt.



Figuur 3.3 Overschrijdingsfrequentielijnen lokale waterstand en HBN, Locatie700181 (HRcomb randlm 184).

Wanneer we naar de resultaten van de lokale waterstand van alle 49 oeverlocaties kijken dan zien we dat voor het merendeel van de locaties de Hydra-Ring resultaten sterk overeenkomen met de Hydra-Zoet resultaten. Dit wordt geïllustreerd aan de hand van Figuur 3.4, waarin de ruimtelijke verdeling van het verschil is weergegeven tussen de lokale waterstand zoals berekend met Hydra-Ring (zonder onzekerheden) en met Hydra-Zoet bij een herhalingstijd van 10.000 jaar. De verschillen variëren tussen de +10 cm (bij Enkhuizen) en -18 cm (langs de Noordoostpolder). De verschilplaatjes voor de herhalingstijden 100, 300, 1000 en 3000 jaar zijn te vinden in bijlage A.1.

Tabel 3.1 geeft de minimale, maximale en gemiddelde verschillen over alle (test)locaties tussen de lokale waterstanden zoals berekend met Hydra-Zoet en met Hydra-Ring (zonder onzekerheden) voor vier herhalingstijden. Voor de IJsselmeerlocaties zijn de resultaten van Hydra-Ring gemiddeld genomen zo'n 4 tot 8 cm lager dan de Hydra-Zoet resultaten. Voor het Markermeer is er soms sprake is van een daling en soms van een stijging. Het gemiddelde absolute verschil in het Markermeer ligt rond de 3 cm.



Figuur 3.4 Ruimtelijke verdeling van het verschil tussen waterstand bij een herhalingstijd van 10.000 jaar berekend door Hydra-Ring (zonder onzekerheden) en die berekend door Hydra-Zoet.

Tabel 3.1 Minimum, maximum en gemiddelde verschil over alle locaties in lokale waterstand tussen Hydra-Ring en Hydra-Zoet (Hydra-Ring - Hydra-Zoet). Voor beide Hydra's berekeningen is gebruik gemaakt van nieuwe statistiek en zonder onzekerheden.

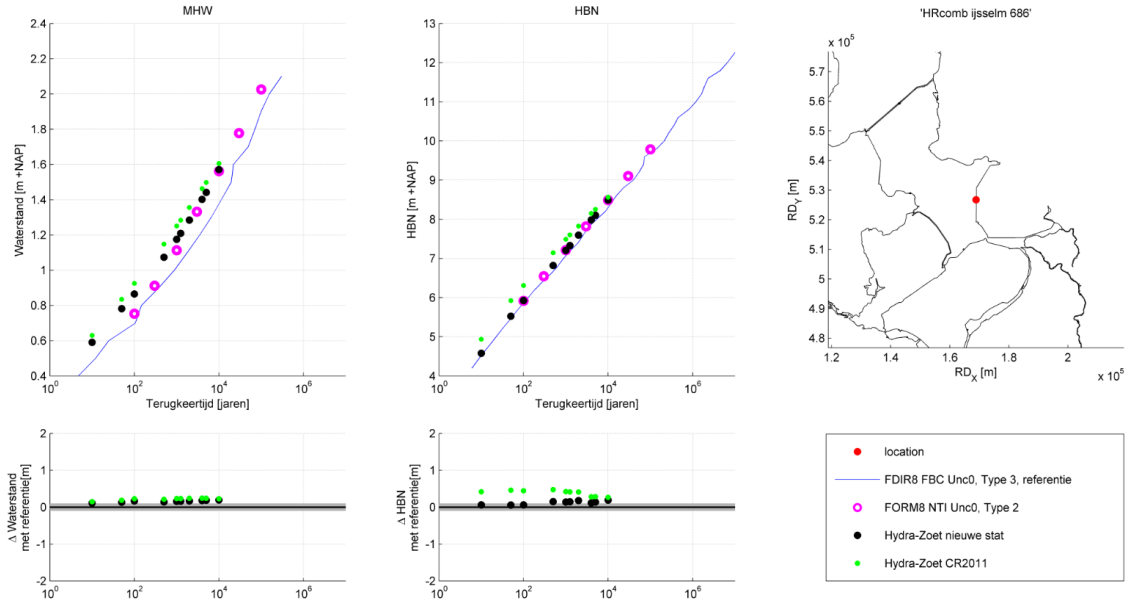
Herha-lingstijd (jaar)	Verschil in **MHW**(m)							
	IJM				MM			
	min	max	gemiddeld	gemiddeld (absoluut)	min	max	gemiddeld	gemiddeld (absoluut)
100	-0.184	0.000	-0.082	0.082	-0.059	0.033	-0.005	0.024
1000	-0.186	0.019	-0.039	0.043	-0.052	0.059	0.006	0.027
2000	-0.182	0.031	-0.041	0.045	-0.048	0.069	0.009	0.026
10000	-0.195	0.021	-0.042	0.046	-0.046	0.089	0.013	0.032

Ondanks de overeenkomsten zien wel degelijk een aantal verschillen. Zo zijn er bij tien van de 49 locaties verschillen van zo'n 10 tot 20 cm te waar te nemen. In de helft van de gevallen is er alleen een verschil bij de kortere herhalingstijden (<T=100 jaar). Bij de andere helft zijn er verschillen over het gehele bereik. Een voorbeeld is de windgedomineerde locatie Rotterdamse Hoek. Een verklaring hiervoor is dat er voor de locatie Rotterdamse Hoek gebruik is gemaakt van de tijdsintegratie-methode FBC. Figuur 3.5 laat zien dat de methode NTI (paarse punten) voor de locatie Rotterdamse Hoek betere resultaten geeft dan de FBC-methode (blauwe lijn). Dezelfde conclusie is te trekken voor een locatie in het Ketelmeer, zie Figuur 3.6. Dat NTI het hier beter doet dan FBC heeft er mee te maken dat Rotterdamse

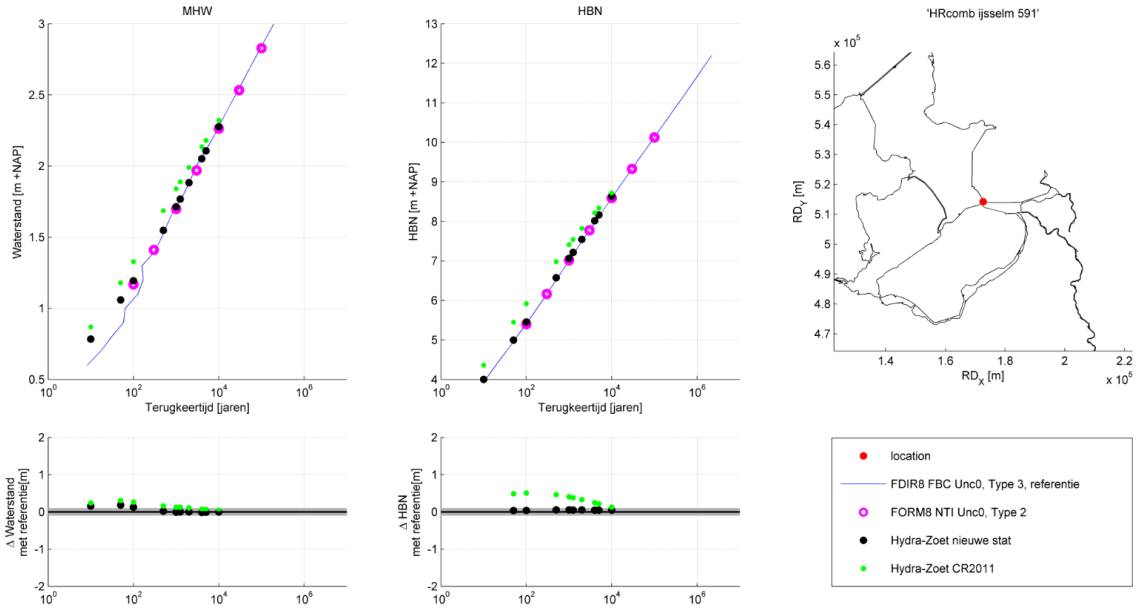
Hoek een locatie is waarbij zowel langzame stochasten (meerpeil) als snelle stochasten (wind) van belang zijn. FBC is minder nauwkeurig qua tijdsintegratie. FBC rekent namelijk slechts 1 tijdstap door, terwijl in Hydra-Zoet en NTI gewerkt wordt met trapezia waarbij de maximale waterstand op meerdere tijdstappen wordt bepaald.

Figuur 3.5 laat zien dat er voor de kortere herhalingstijden een klein verschil zit tussen de NTI en Hydra-Zoet resultaten. Naast verschillen in de probabilistische rekentechniek kunnen resterende verschil verklaard worden door de in paragraaf 3.4.1 genoemde verschillen tussen de Hydra-Zoet en Hydra-Ring berekening (reparaties en voor het Markermeer ook nog het aantal windrichtingen en de topduur).

Op basis van bovenstaande resultaten wordt er geadviseerd om bij het bepalen van de lokale waterstanden voor de locaties waar zowel wind en meerpeil van belang zijn te reken met de NTI-tijdsintegratie methode. Grofweg zijn dit de locaties langs de Noordoostpolder en de westkust van het Markermeer.De locaties langs de Wieringermeer en de zuidkust van Friesland zijn echt meerpeil gedomineerd, waardoor hier FBC hier ook goede resultaten geeft.



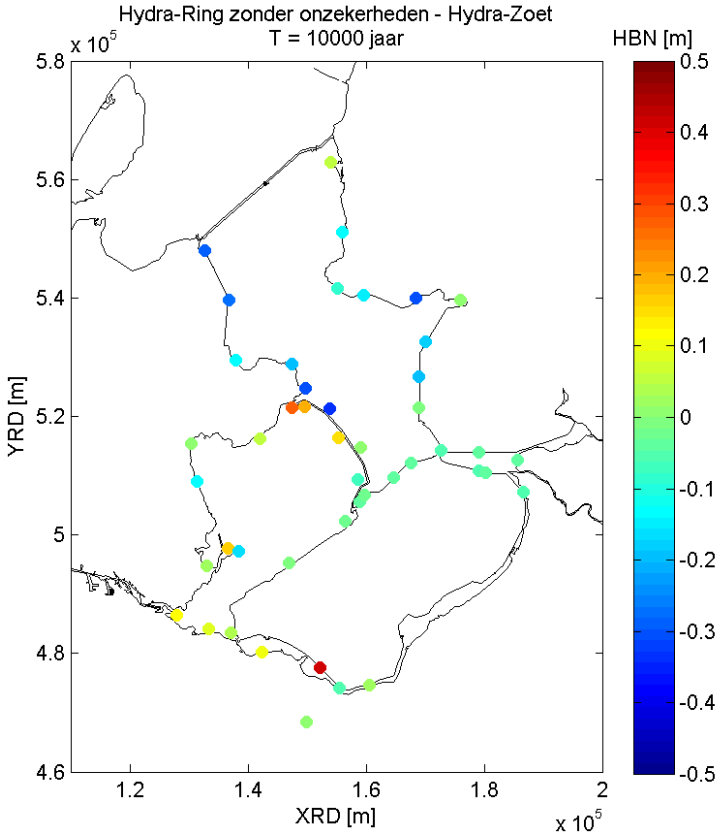
Figuur 3.5 Overschrijdingsfrequentielijnen lokale waterstand en HBN verkregen met Hydra-Ring, vergeleken met Hydra-Zoet resultaten (oude en nieuwe statistiek), Locatie 700056 Rotterdamse Hoek (HR-comb IJsselm 686).Unc0= zonder onzekerheden, Unc1= met onzekerheden, Type 2= Hydra-Ring bij een herhalingstijd de bijbehorende belastingparameter. Type 3= per belastingparameter berekent Hydra-Ring de bijbehorende herhalingstijd.



Figuur 3.6 Overschrijdingsfrequentielijnen lokale waterstand en HBN verkregen met Hydra-Ring, vergeleken met Hydra-Zoet resultaten (oude en nieuwe statistiek), Locatie 'HR-comb IJsselm 591'.

HBN-resultaten

In Figuur 3.7 is de ruimtelijke verdeling weergegeven van het verschil tussen HBN zoals berekend met Hydra-Ring (zonder onzekerheden) en met Hydra-Zoet bij een herhalingstijd van 10.000 jaar. De verschilplaatjes voor de herhalingstijden 100, 300, 1000 en 3000 jaar zijn te vinden in bijlage A.1. Tabel 3.2 geeft per herhalingstijd de minimale, maximale en gemiddelde verschillen weer over alle (test)locaties. Uit de figuren en de tabel komt naar voren dat gemiddeld genomen het HBN in het IJsselmeer volgens Hydra-Ring zo'n 10 cm lager dan bij Hydra-Zoet. Voor het Markermeer ligt het gemiddelde Hydra-Ring resultaat juist hoger.



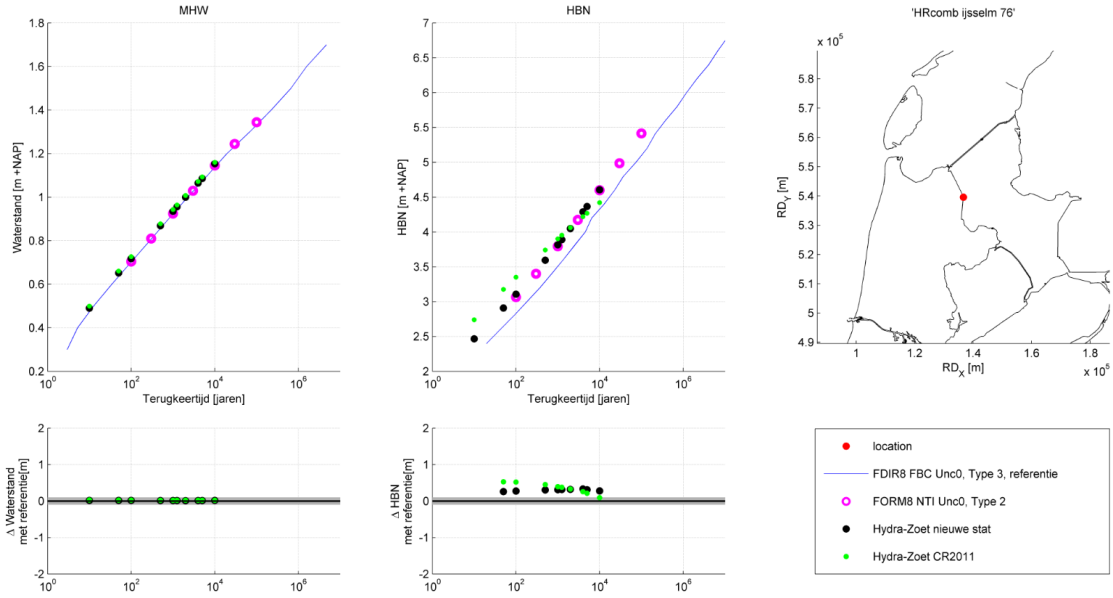
Figuur 3.7 Ruimtelijke verdeling van het verschil tussen HBN bij een herhalingstijd van 10.000 jaar berekend door Hydra-Ring (zonder onzekerheden) en die berekend door Hydra-Zoet.

Tabel 3.2 Minimum, maximum en gemiddelde verschil over alle locaties in HBN tussen Hydra-Ring (zonder onzekerheden) en Hydra-Zoet (Hydra-Ring - Hydra-Zoet). Voor beide Hydra berekeningen is gebruik gemaakt van nieuwe statistiek en zonder onzekerheden.

Herha-lingstijd (jaar)	Verschil in **HBN**(m)							
	IJM				MM			
	min	max	gemiddeld	gemiddeld (absoluut)	min	max	gemiddeld	gemiddeld (absoluut)
100	-0.384	0.038	-0.090	0.095	-0.164	0.180	0.008	0.061
1000	-0.311	0.041	-0.094	0.100	-0.233	0.280	0.026	0.083
2000	-0.318	0.069	-0.102	0.110	-0.225	0.326	0.033	0.090
10000	-0.331	0.051	-0.113	0.118	-0.160	0.410	0.060	0.105

Bij een herhalingstijd van 10.000 jaar zijn er 10 locaties waarbij de Hydra-Ring resultaten meer dan 10 cm lager liggen dan de Hydra-Zoet resultaten. De betreffende locaties liggen aan weerszijden rond het IJsselmeer (zie blauwe punten in Figuur 3.7). De onderschatting door Hydra-Ring wordt toegeschreven aan het gebruik van de tijdsintegratie-methode FBC.

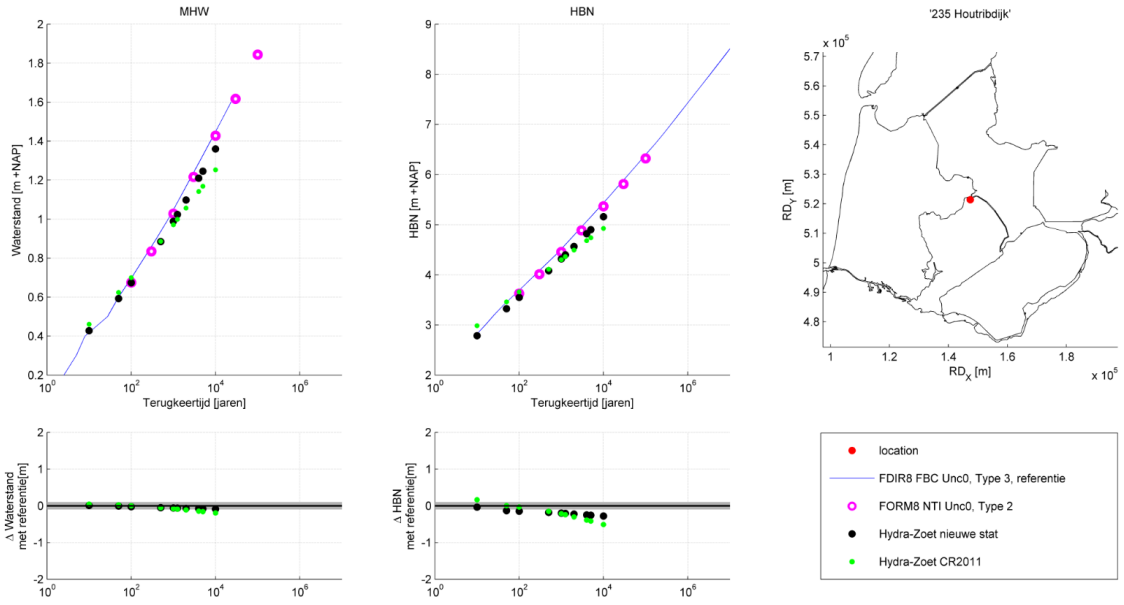
Bij gebruik van NTI in Hydra-Ring liggen de resultaten veel dichter bij die van Hydra-Zoet. Als voorbeeld worden in Figuur 3.8 de verschillen in FBC (blauwe lijn) en NTI (paarse punten) gegeven.



Figuur 3.8 Overschrijdingsfrequentielijnen lokale waterstand en HBN verkregen met Hydra-Ring, vergeleken met Hydra-Zoet resultaten (oude en nieuwe statistiek), Locatie 'HRcomb ijsselm 76.'

Voor zeven andere locaties zijn de Hydra-Ring resultaten juist hoger dan de Hydra-Zoet resultaten. Het merendeel van deze locaties ligt in het Markermeer (zie geel/rode punten in Figuur 3.7). Voor locatie Eemmeerdijk is er voor een herhalingstijd van 10.000 jaar zelfs sprake van een overschatting van 41 cm. Figuur 3.9 laat voor de locatie '235-Houtribdijk' zien dat de NTI methode beter met de Hydra-zoet resultaten overeenkomt. Echter, bij een herhalingstijd van 10.000 jaar is er nog een resterend verschil van zo'n 10 cm. Dit verschil kan verklaard worden door de in paragraaf 3.4.1 genoemde verschillen tussen de Hydra-Zoet en Hydra-Ring berekening (reparaties, aantal windrichtingen en topduur).

Op basis van bovenstaande resultaten wordt er geadviseerd om bij het bepalen van de lokale HBN's voor de locaties waar zowel wind als meerpeil van belang zijn te reken met de NTI-methode. Grofweg zijn dit de locaties langs de kust van Noord-Hollandse (Markermeer en IJsselmeer), de punt van Friesland. De locaties rond het Ketelmeer of de meeste locaties langs de kust van Flevoland zijn sterk wind-gedomineerd, hier kan FBC goed toegepast worden.



Figuur 3.9 Overschrijdingsfrequentielijnen lokale waterstand en HBN verkregen met Hydra-Ring, vergeleken met Hydra-Zoet resultaten (oude en nieuwe statistiek), Locatie '235-Houtribdijk' (Markermeer-zijde).

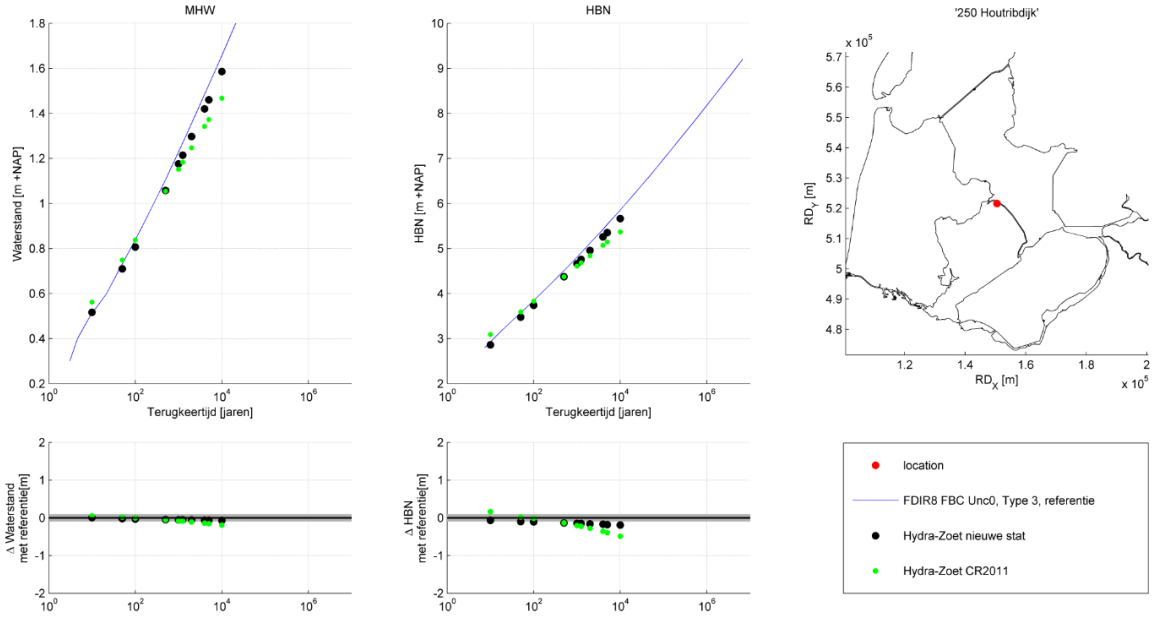
3.4.2 Vergelijking met Hydra-Zoet nieuwe en oude windstatistiek

In de figuren uit de vorige paragraaf zijn door middel van de groene punten ook de resultaten van Hydra-Zoet met de oude windstatistiek weergegeven. Het verschil tussen de groene en zwarte punten geeft dus het effect van het meenemen van de nieuwe windstatistiek.

Resultaten lokale waterstand

Voor het bepalen van het effect van de nieuwe windstatistiek op de lokale waterstanden, zijn er naast de figuren met overschrijdingsfrequentielijnen (Figuur 3.3, 3.5, 3.6, 3.8 en 3.9) ook ruimtelijke plots (bijlage B.1) en een verschil tabel (Tabel 3.3) gemaakt. Wanneer we deze figuren en de tabel bekijken dan zien we het volgende beeld:

- Over het algemeen zijn de verschillen beperkt, de gemiddelde verschillen over alle locaties liggen tussen de 3 en 6 cm.
- Voor de meeste locaties langs de IJsselmeerkust van Noord-Holland en van Friesland heeft het aanpassen van de windstatistiek een minimaal effect (< 5 cm).
- Daar waar de scheefstand een belangrijke bijdrage heeft (IJsselmeerdijken van de Noordoostpolder en Flevoland), treedt er bij lage herhalingstijden (T=100 jaar) een verlaging tot 0.2 m op. Bij toenemende herhalingstijden neemt dit verschil af tot maximaal 0.05 m.
- Er zijn zes locaties die te maken hebben met een kanteling van de overschrijdingsfrequentielijn, waardoor vooral de langere herhalingstijden te maken hebben met een stijging van de lokale waterstand. Deze locaties zijn gelegen bij het IJ- en Gooimeer, de Markermeerzijde van de Houtribdijk en bij Kornwerderzand. Een voorbeeld hiervan is weergegeven in Figuur 3.10. Bij een herhalingstijd van 10.000 jaar kan dit verschil oplopen tot 0.2 m.



Figuur 3.10 Overschrijdingsfrequentielijnen lokale waterstand en HBN verkregen met Hydra-Ring en vergeleken met Hydra-Zoet resultaten (oude en nieuwe statistiek), locatie 800135 (250-Houtribdijk, IJM-zijde)

Tabel 3.3 Per herhalingstijd het minimum, maximum en gemiddelde verschil over alle locaties in lokale waterstand tussen Hydra-Zoet met de nieuwe en oude windstatistiek (nieuwe windstatistiek – oude windstatistiek).

Herha-lingstijd (jaar)	Verschil in **MHW**(m)							
	IJM				MM			
	min	max	gemiddeld	gemiddeld (absoluut)	min	max	gemiddeld	gemiddeld (absoluut)
100	-0.213	-0.003	-0.072	0.072	-0.112	0.005	-0.027	0.028
1000	-0.174	0.015	-0.061	0.062	-0.097	0.069	-0.004	0.032
2000	-0.138	0.046	-0.048	0.052	-0.080	0.101	0.009	0.037
10000	-0.046	0.148	-0.004	0.029	-0.015	0.203	0.055	0.058

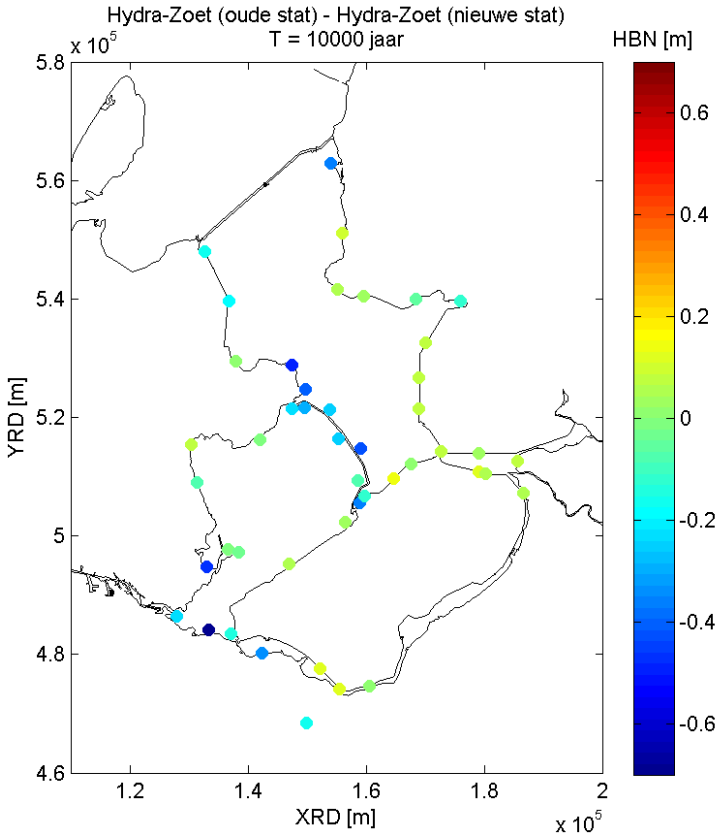
HBN-resultaten

Bij het bepalen van het effect op van de nieuwe windstatistiek op de HBN's is gebruik gemaakt van de figuren met overschrijdingsfrequentielijnen, de ruimtelijke plots in bijlage B.2 en Tabel 3.4 met minimale, maximale en gemiddelde verschillen.

De HBN resultaten geven een zelfde beeld als we ook gevonden hebben bij de waterstanden:

- Bij de windgedomineerde locaties treedt er bij lage herhalingstijden (T=100 jaar) een verlaging tot bijna 0.5 m op. De verlaging neemt af bij een toenemende herhalingstijd. Dit komt overeen met de aanpassingen in de windstatistiek in paragraaf 2.4.1.
- Langs de kust van Friesland zijn een aantal locaties waar geen kanteling te zien is, hier ligt het HBN op basis van de nieuwe windstatistiek over het gehele bereik zo'n 5 tot 10 cm lager dan van de oude windstatistiek.
- Bij de meeste overige locaties is er sprake van een kanteling van de overschrijdingsfrequentielijn. Bij een herhalingstijd van 10.000 jaar kan dit verschil oplopen tot 0.92 m (zie blauwe locaties in Figuur 3.11). Hierbij dient wel opgemerkt te

worden dat de grote HBN-verschillen deels te wijten zijn aan het gebruik van ongunstige uitgangspunten bij de overslagberekening (m.n. overslagdebiet en dijkprofiel).



Figuur 3.11 Ruimtelijke verdeling van het verschil tussen HBN bij een herhalingstijd van 10.000 jaar berekend door Hydra-Zoet met de oude windstatistiek en die berekend door Hydra-Zoet met de nieuwe windstatistiek.

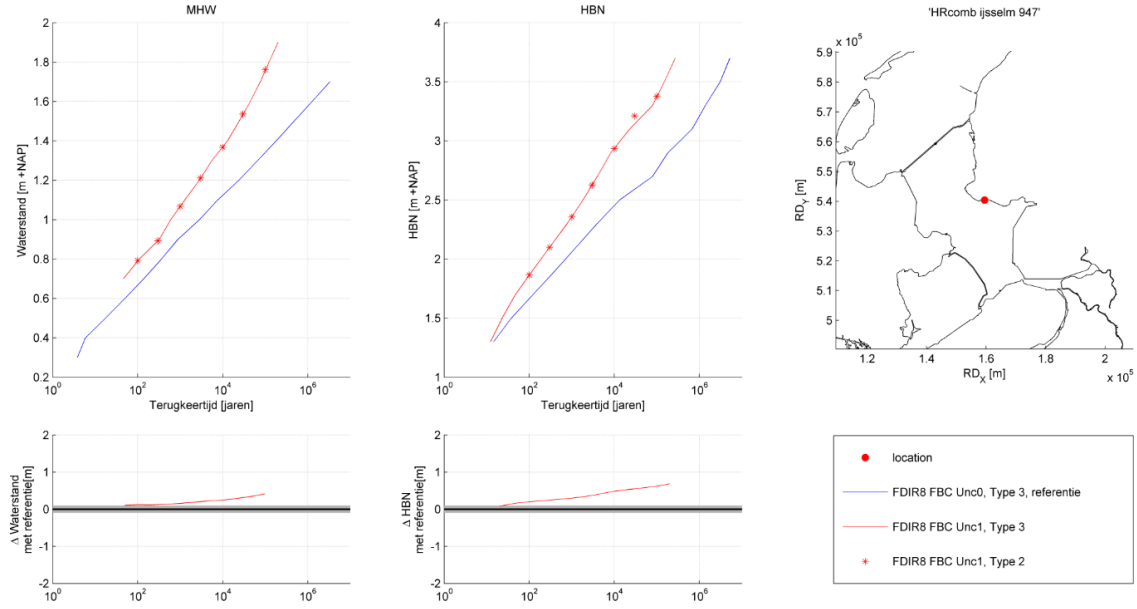
Tabel 3.4 Per herhalingstijd het minimum, maximum en gemiddelde verschil over alle locaties in HBN tussen Hydra-Zoet met de nieuwe en oude windstatistiek (verschil = nieuwe windstatistiek – oude windstatistiek).

Herha-lingstijd (jaar)	Verschil in **HBN** (m)							
	IJM				MM			
	min	max	gemiddeld	gemiddeld (absoluut)	min	max	gemiddeld	gemiddeld (absoluut)
100	-0.464	0.034	-0.212	0.215	-0.255	0.169	-0.091	0.122
1000	-0.368	0.243	-0.124	0.180	-0.224	0.477	-0.010	0.123
2000	-0.305	0.310	-0.074	0.161	-0.199	0.598	0.028	0.134
10000	-0.142	0.493	0.074	0.149	-0.125	0.923	0.142	0.184

3.4.3 Effect 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. Figuur 3.12 laat voor voorbeeldlocatie ‘IJsselm 974’ zien dat het meenemen van onzekerheden sterke invloed

heeft op zowel de lokale waterstanden als op de HBN's Voor alle 49 oeverlocaties vergelijkende figuren conform Figuur 3.12 gemaakt. Deze geven hetzelfde beeld.



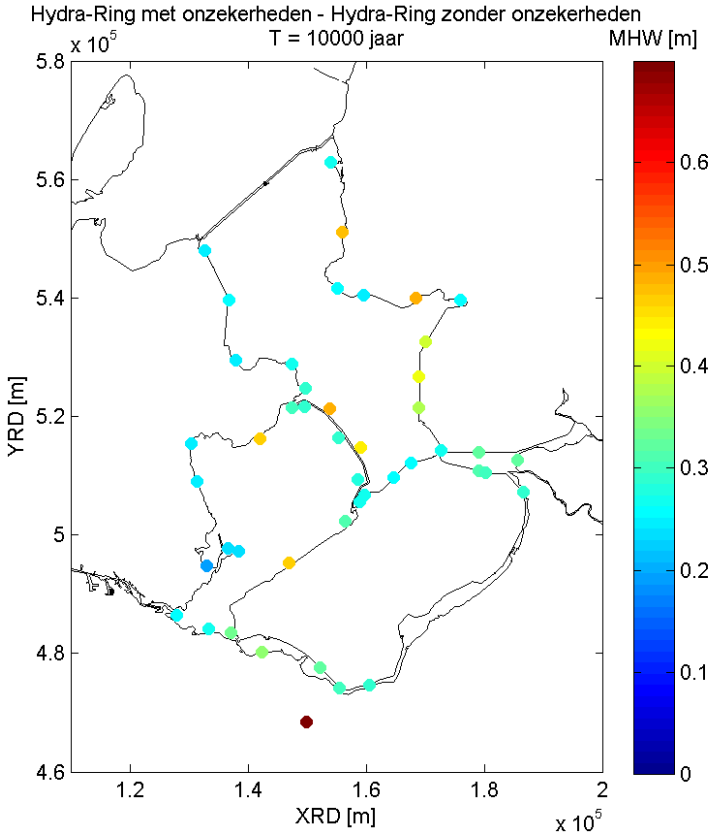
Figuur 3.12 Overschrijdingsfrequentielijnen lokale waterstand en HBN verkregen met Hydra-Ring, met en zonder verdisconteren van onzekerheden, locatie 700031 (HRcomb IJsselm 974).

Resultaten lokale waterstand

Voor het bepalen van het effect van het verdisconteren van de onzekerheden op de lokale waterstanden, zijn er naast de figuren met overschrijdingsfrequentielijnen ook ruimtelijke plots (Figuur 3.13 en bijlage C.1) en een verschiltabel (Tabel 3.5) gemaakt.

Te zien is dat bij een herhalingstijd van 10.000 jaar voor bijna alle locaties het effect van het meenemen van onzekerheden zo'n 20 tot 30 cm bedraagt. Een uitschieter is de locatie in de Eem met verschillen tot 1 meter. Figuur 3.14 links-boven geeft voor deze locatie de frequentielijn van de lokale waterstand met onzekerheden (rode lijn) en zonder onzekerheden (blauwe lijn). De bijdrage van onzekerheden is hier zo groot omdat de frequentielijn heel vlak loopt. Hierdoor is de frequent voorkomende waterstand nagenoeg gelijk aan de "extreme" waterstand. Het illustratiepunt zal in dit geval bestaan uit een frequent voorkomende waterstand en een grote toeslag voor onzekerheid. Bijna alle kansruimte gaat dus naar de modelonzekerheid. De convolutie van de kansverdelingen van waterstand en onzekerheid komt daardoor veel hoger uit. Bij steiler lopende frequentielijnen is dat niet het geval. Een tweede reden is het gebruik van de tijdsintegratiemethode FBC. Het gebruik van NTI (paarse en turquoise stippen) zorgt voor een lichte afname van de waterstand en HBN.

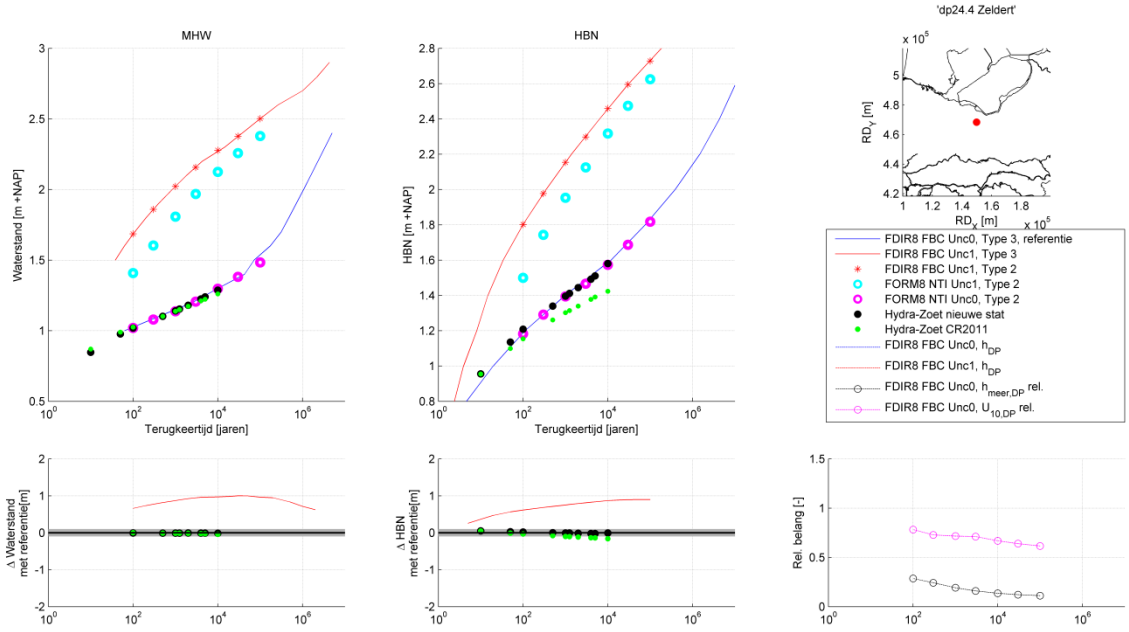
Tabel 3.5 laat zien dat het maximale verschil in lokale waterstand toeneemt voor toenemende herhalingstijd. Bij 2000 jaar is het maximale verschil in de lokale waterstand rond het IJsselmeer min of meer gelijk aan de waarde bij 1000 jaar. Het effect van het meenemen van onzekerheid kan bij toenemende herhalingstijden gelijk blijven/afnemen als de steilheid van de overschrijdingsfrequentiecurve toeneemt. Een voorbeeld hiervan is gegeven in het linker plot in Figuur 3.16. Zoals in paragraaf 3.4.1 te zien is, zal het de overstap naar NTI zorgen voor gladdere lijnen, waardoor dit niet meer voor zal komen.



Figuur 3.13 Ruimtelijke verdeling van het verschil tussen waterstanden bij een herhalingstijd van 10.000 jaar berekend door Hydra-Ring met en zonder onzekerheden.

Tabel 3.5 Per herhalingstijd het minimum, maximum en gemiddelde verschil over alle locaties in lokale waterstand tussen Hydra-Zoet met en zonder onzekerheden (met onzekerheden - zonder onzekerheden).

Herha-lingstijd (jaar)	Verschil in **MHW** (m)					
	IJM			MM		
	min	max	gemiddeld	min	max	gemiddeld
100	0.113	0.426	0.270	0.050	0.659	0.273
1000	0.149	0.465	0.274	0.141	0.873	0.313
2000	0.168	0.463	0.286	0.160	0.923	0.322
10000	0.236	0.486	0.316	0.195	0.970	0.333



Figuur 3.14 Overschrijdingsfrequentielijnen lokale waterstand en HBN, Locatie 'dp24.4 Zeldert' (Eem). De blauwe doorgetrokken lijn geeft de resultaten gebruik makend van de rekentechniek met FBC zonder onzekerheden, de rode lijn, de resultaten van FBC met onzekerheden. De paarse punten zijn de resultaten van NTI zonder onzekerheden, de turquoise punten, de resultaten van NTI. De zwarte en groene stippen geven de Hydra-Zoet resultaten.

HBN-resultaten

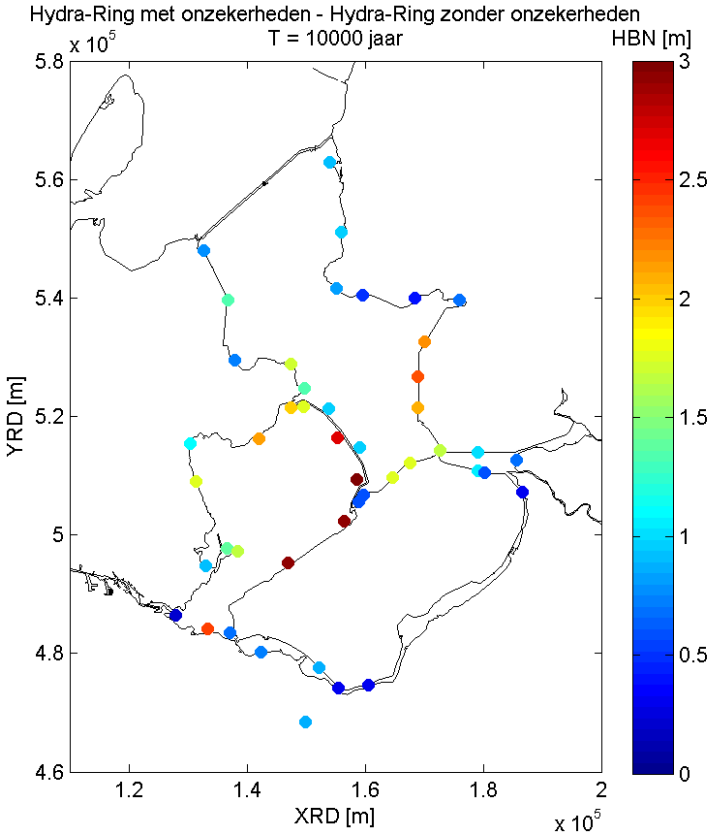
Voor het bepalen van het effect van het meenemen van de onzekerheden op de HBN's, zijn er naast de figuren met overschrijdingsfrequentielijnen ook ruimtelijke plots (Figuur 3.15 en bijlage C.2) en een verschiltabel (

Tabel 3.6) gemaakt. Te zien is dat het effect van de onzekerheid overal toeneemt bij grotere herhalingstijden. Verder zijn lopen de verschillen voor een herhalingstijd van 10.000 jaar erg uiteen, ze liggen tussen de 0.2 en 3.2m.

De modelonzekerheden voor de golfhoogte in het IJsselmeer zijn met een (relatieve) standaardafwijking van 19% (Deltares, 2015a) fors te noemen. Dit maakt dat bij hoge golven, die met name voor de kust van de Noordoostpolder en Flevoland voorkomen, de doorwerking op de HBN enorm is. De modelonzekerheid in de golfhoogte op het Markermeer is (op IJburg na) zelfs 20%, daarnaast heeft het Markermeer ook nog eens te maken met een bias van 16% op de golfperiode. Dit is een verklaring waarom de gemiddelde toename van de HBN in het Markermeer groter is dan in het IJsselmeer. Dit is ook te zien in Figuur 3.15,.

De grote effecten van het meenemen van de modelonzekerheden in de golfcondities in het IJsselmeer en Markermeer kunnen als volgt verklaard worden:

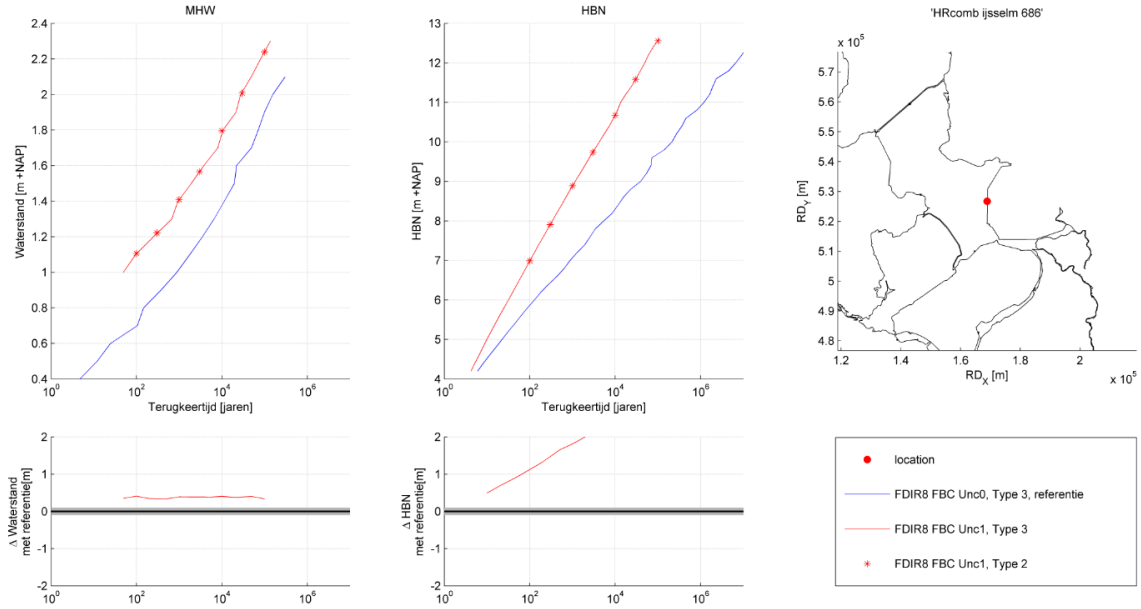
- Het effect van een grotere golfhoogte en langere periode heeft een meer dan evenredig effect op de golfoploophoogte en daarmee op de HBN.
- In Hydra-Ring worden modelonzekerheden in de golfhoogte en golfperiode toegepast op een manier die leidt tot een dubbeltelling van onzekerheid in de golfperiode (zie ook Beckers, 2016). Eerst wordt een onzekerheidsfactor op de golfhoogte toegepast. Vervolgens wordt de golfperiode aangepast zodanig dat de golfsteilheid gelijk is aan de oorspronkelijke waarde. Tenslotte wordt een onzekerheidsfactor op de golfperiode toegepast. De tweede stap leidt tot een doorwerking van golfhoogte-onzekerheid naar een golfperiode-onzekerheid. De totale onzekerheid in de golfperiode wordt te groot door de combinatie van onzekerheden in de tweede en derde stap. Dit euvel is in de uitlevering naar eindgebruikers van begin 2017 opgelost.
- Een tweede verklaring voor de grote verschillen is het gebruik van ongunstige uitgangspunten voor de overslagberekening. Zo zijn de HBN berekeningen uitgevoerd met een 1:3 profiel en een kritiek overslagdebiet van 1 l/s/m. Een vergelijking met een studie van HKV (2016a, b) laat zien dat deze keuze de resultaten sterk beïnvloedt. In HKV (2016a, b) wordt gerekend met het werkelijke profiel en een debiet van 5 l/s/m. In Figuur 3.12 en Figuur 3.16 kunnen de resultaten van beide studies voor de locatie Rotterdamse Hoek met elkaar vergeleken worden. De berekeningen met 1:3 profiel en een overslagdebiet van 1 l/s/m geven bij een herhalingstijd van 10,000 jaar een toename 2.5m, terwijl HKV voor dezelfde locatie een slechts een toename van 1 meter vindt (verschil rood gestippelde lijn en turquoise gestippelde lijn).
- Tenslotte geldt dat ook door het gebruik van de tijdsintegratiemethode NTI ipv FBC de verschillen iets kleiner worden. Dit effect is echter niet significant.



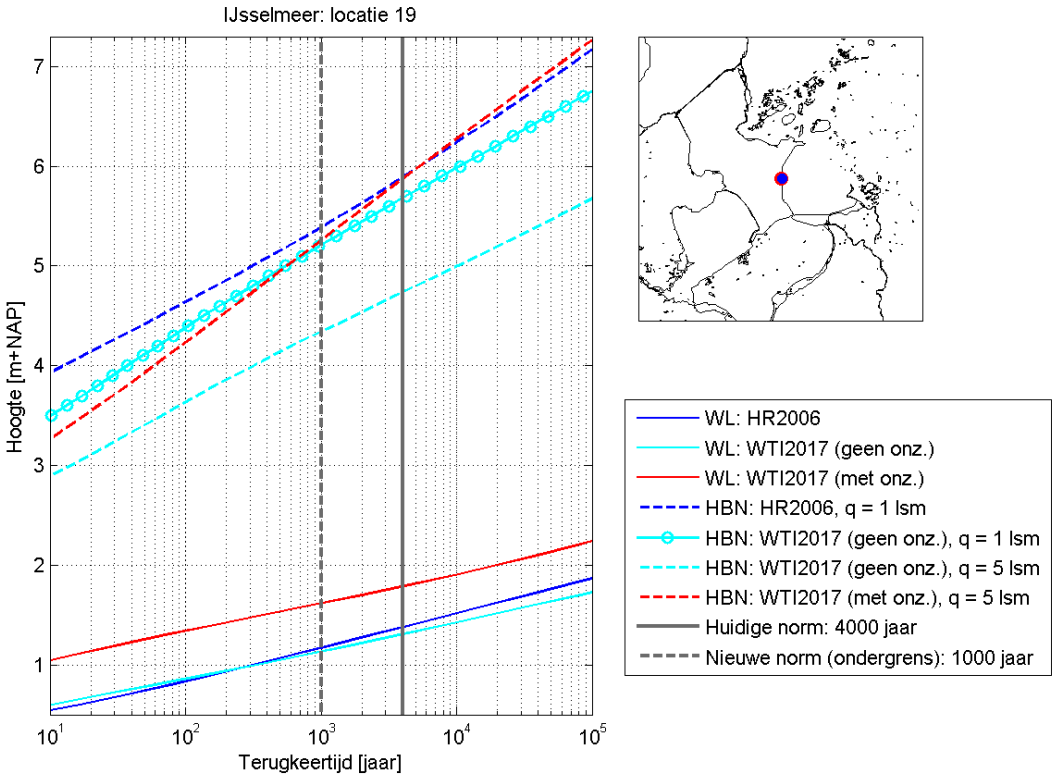
Figuur 3.15 Ruimtelijke verdeling van het verschil tussen HBN bij een herhalingstijd van 10.000 jaar berekend door Hydra-Ring met en zonder onzekerheden.

Tabel 3.6 Per herhalingstijd het minimum, maximum en gemiddelde verschil over alle locaties in HBN tussen Hydra-Zoet met en zonder onzekerheden (met onzekerheden- zonder onzekerheden).

Herha-lingstijd (jaar)	Verschil in **HBN**(m)					
	IJM			MM		
	min	max	gemiddeld	min	max	gemiddeld
100	0.199	1.124	0.540	0.186	1.926	0.939
1000	0.242	1.815	0.817	0.228	2.595	1.232
2000	0.262	2.006	0.897	0.223	2.817	1.320
10000	0.312	2.387	1.103	0.231	3.262	1.522



Figuur 3.16 Overschrijdingsfrequentielijnen lokale waterstand en HBN verkregen met Hydra-Ring, met en zonder onzekerheden, locatie 700056 (HRcomb IJsselm 686).



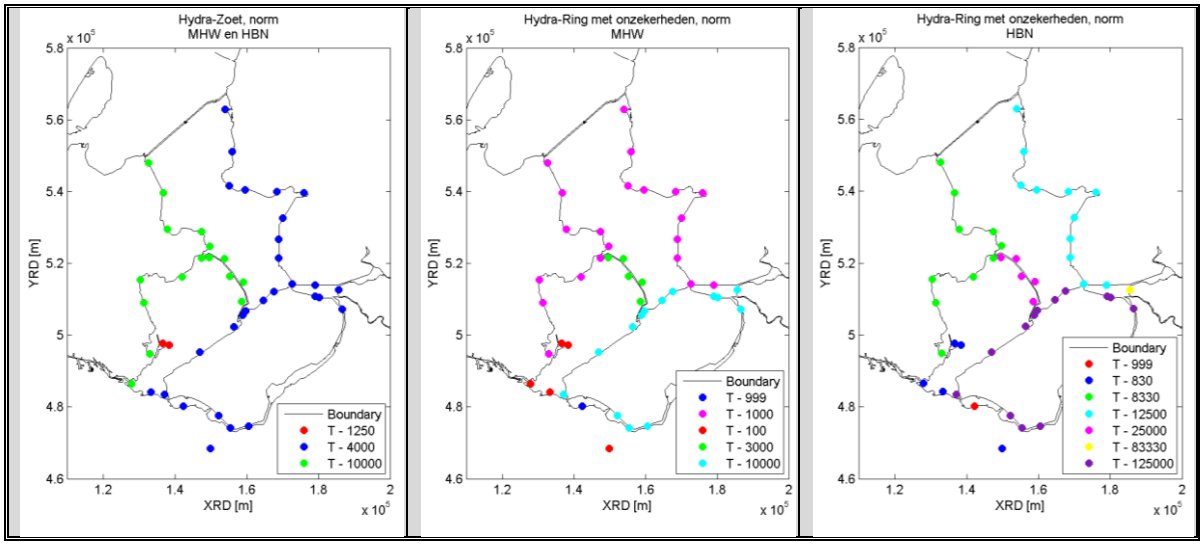
Figuur 3.17 Overschrijdingsfrequentielijnen lokale waterstand (=WL) en HBN verkregen met Hydra-Zoet volgens HKV (2016b), locatie 19.

3.4.4 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 en de verdiscontering van onzekerheden is er in WBI2017 de overstap op een nieuwe norm.

Voor HBN is de faalkanseis beschouwd door de trajectnorm te vermenigvuldigen met het faalkansbudget (0.24) en de lengte-effect-factor. Merk op dat we voor de trajectnorm uit gaan van de ondergrens (maximaal toelaatbare faalkans) zoals weergegeven in Figuur 3.18.

Voor alle testlocaties zijn de oude normen, zoals gehanteerd in de Hydra-Zoet berekeningen, en de nieuwe normen (ondergrens), weergegeven in Figuur 3.18. 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).

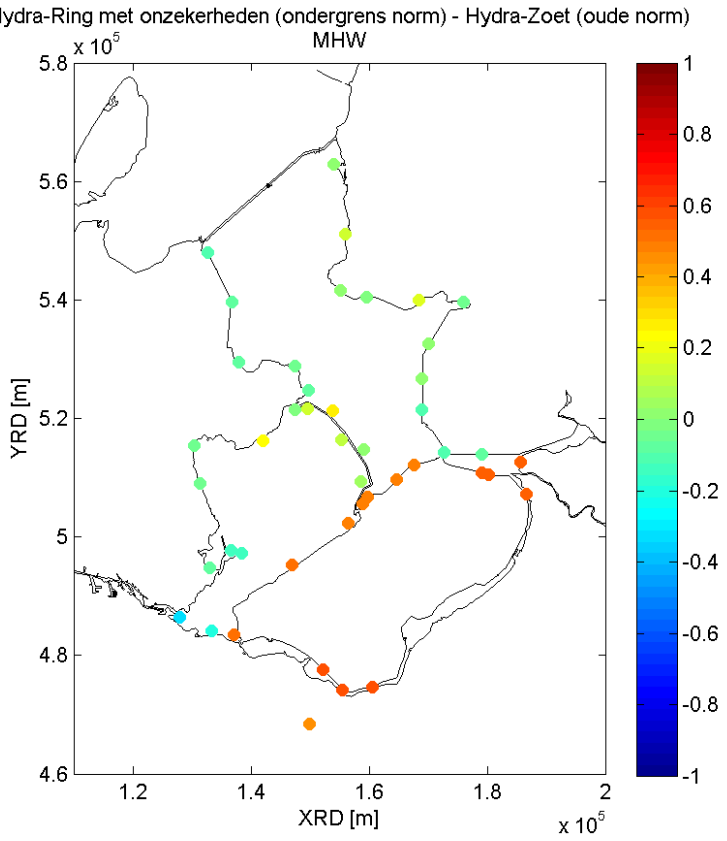


Figuur 3.18 Gehanteerde normen op testlocaties: Oude normen (links), nieuwe normen bij trajectnorm, ondergrens (midden) en faalkanseis voor HBN berekeningen (rechts). Een terugkeertijd van 999 duidt op een locatie die buiten een traject valt omdat deze gelegen is op een hoge grond. In de oude normering 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 wordt (factor 3 tot 40), met uitzondering van de locaties langs de kust van Flevoland. De norm van de HBN's wordt voor de meeste locaties juist strenger. Voor Flevoland is dit zelfs een factor 31,25. Alleen voor de locaties langs de kust van Noord-Holland en Utrecht worden de HBN-norm minder streng.

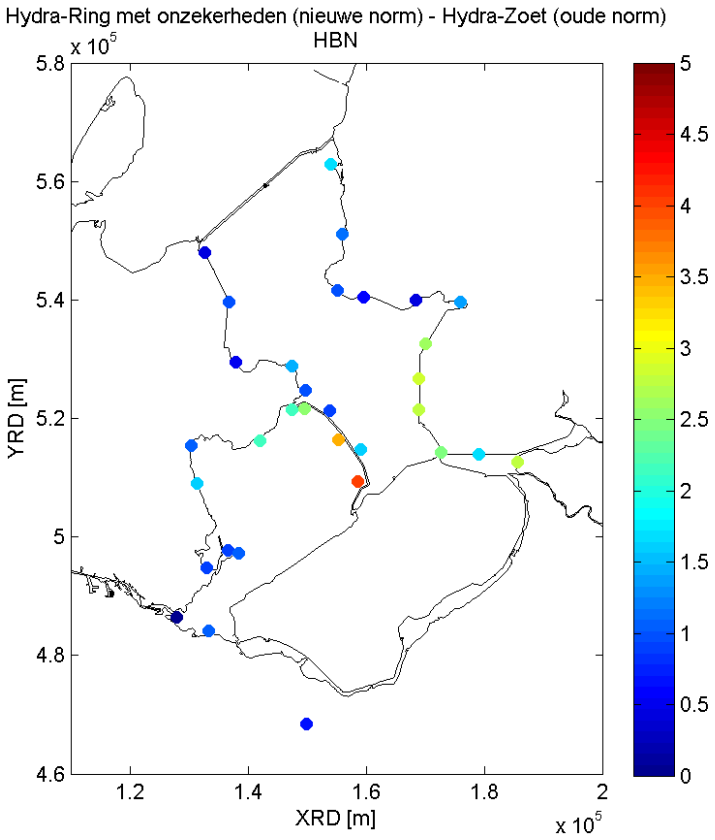
De verschillen in lokale waterstand en HBN als gevolg van de nieuwe normering, nieuwe windstatistiek en het meenemen van onzekerheden en een ander belastingmodel zijn weergegeven in Figuur 3.19 respectievelijk Figuur 3.20.

Figuur 3.19 laat zien dat, op de locaties Flevoland na, de lokale waterstanden nauwelijks veranderen. Voor de betreffende locaties kan de verlaging van de norm kan worden weggestreept tegen de overgang van Hydra-Ring naar Hydra-zoet, de introductie van de nieuwe windstatistiek en de bijdrage van onzekerheden. Voor de locaties rondom Flevoland neemt de waterstand tot bijna een meter toe. Dit is vooral te wijten aan de verhoogde norm en aan het meenemen van onzekerheden.



Figuur 3.19 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 3.20 naar de HBN's kijken dan zien we voor alle locaties een stijging van het HBN. Voor een locatie op de Houtribdijk neemt het HBN zelfs toe met meer dan 4 meter. Ook hier geldt dat een groot deel van deze toename bij windgedomineerde locaties veroorzaakt wordt door de grootte van de modelonzekerheden van de golven, de keuze van een ongunstig profiel, laag toelaatbaar en overslagdebiet.Bij deze windgedomineerde locaties heeft de nieuwe windstatstistiek bij de hogere herhalingstijden nauwelijks effect (zie paragraaf 3.4.2). Deze is dus niet voor het verschil van de 4 meter.



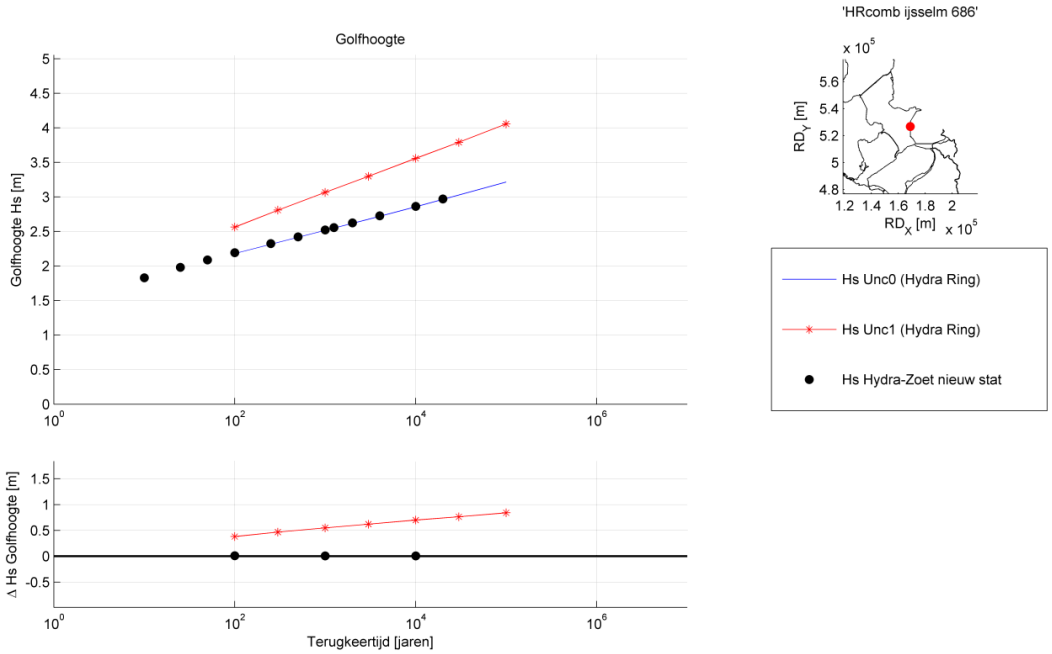
Figuur 3.20 Ruimtelijke verdeling van het verschil tussen HBN zoals berekend met Hydra-Ring (met onzekerheden) bij de nieuwe norm en door Hydra-Zoet bij de oude norm. De locaties bij Flevoland ontbreken aangezien er in de testberekening van zowel Hydra-Ring als Hydra-Zoet geen waarden zijn berekend voor een herhalingstijd groter dan 100.000 jaar.

3.5 Marginale statistiek van de golfhoogte

3.5.1 Vergelijking tussen Hydra-Zoet (nieuwe statistiek) en Hydra-Ring

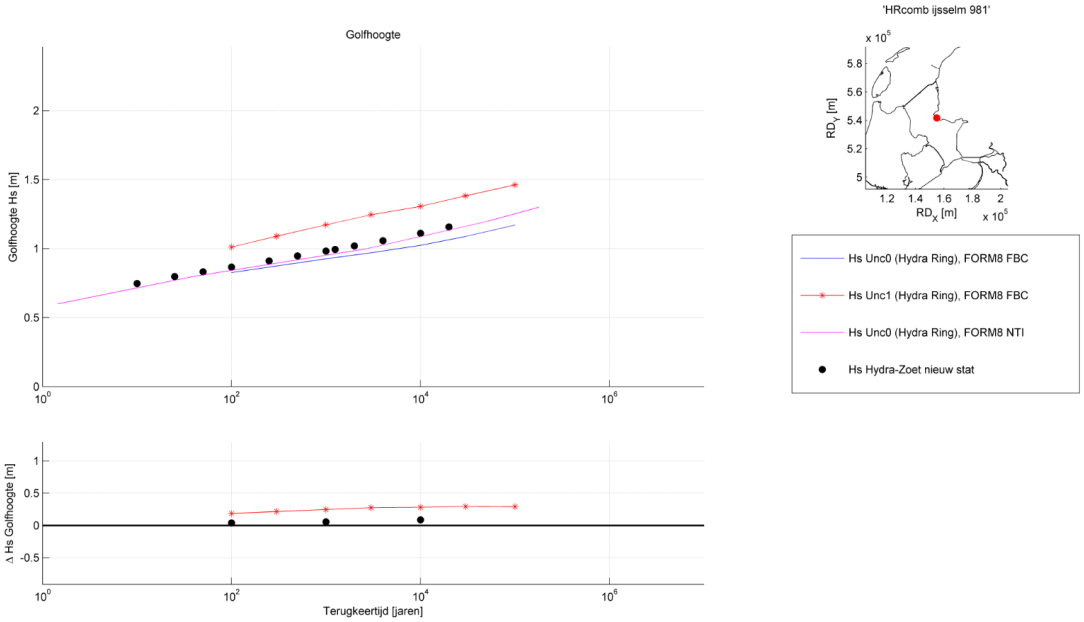
In deze paragraaf wordt de golfhoogtestatistiek zoals bepaald met Hydra-Zoet (nieuwe statistiek) vergeleken met Hydra-Ring. Hiervoor is het rekenhart Hydra-NL versie 1.1 gebruikt omdat Hydra-Zoet versie 1.6.3 deze functionaliteit niet bevat. De resultaten zijn vergeleken met Hydra-Ring resultaten middels afbeeldingen conform Figuur 3.21.

In Figuur 3.20 wordt in de bovenste plot het Hydra-Zoet resultaat voor de locatie “HRcomb ijssselm 686” weergegeven middels de zwarte bolletjes. De Hydra-Ring resultaten zonder en met onzekerheden worden weergegeven middels respectievelijk een blauwe en rode lijn. Het verschil tussen Hydra-Zoet en Hydra-Ring wordt in de onderste plot weergegeven met de zwarte bolletjes. De rode lijn in deze plot geeft het verschil tussen de resultaten van de berekening zonder en met meenemen van onzekerheden weer (wordt besproken in de hiernavolgende paragraaf).



Figuur 3.21 Vergelijking marginale statistiek golfhoogte voor locatie "HRcomb ijssselm 686"

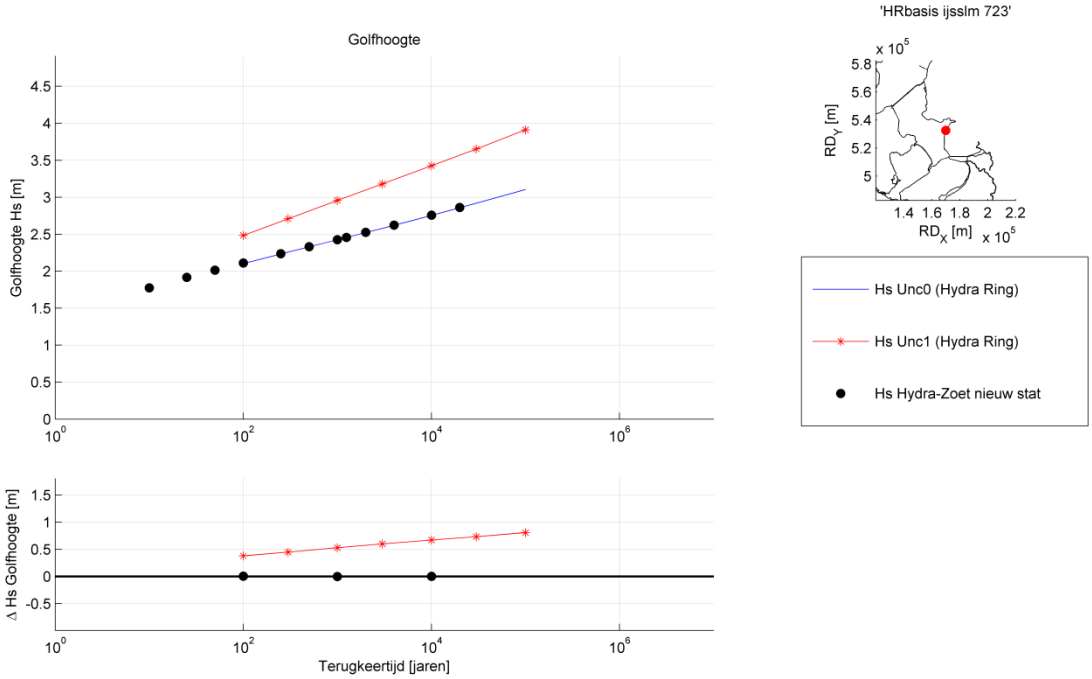
Op de meeste locaties liggen komen de resultaten van Hydra-Ring overeen met die van Hydra-Zoet. Voor slechts 5 locaties zijn er verschillen kleiner dan 5 cm waar te nemen. Verder zijn er drie locaties aan de zuidoever van Friesland waar de verschillen groter zijn (max. 10 cm). Alle locaties waar verschillen zijn waar te nemen zijn meerpeilgedomineerde locaties. Voor deze locaties is het aannemelijk dat de waterstand invloed heeft op de golhoogte, waardoor zowel de trage stochast (=meerpeil) als de snelle stochast (=wind) hier van belang is. In Figuur 3.22 is dan ook te zien dat de tijdsintegratiemethode NTI voor deze locaties betere resultaten geeft dan FBC.



Figuur 3.22 Vergelijking marginale statistiek golfhoogte voor locatie "HRcomb ijssselm 947"/

3.5.2 Effect onzekerheden

In deze paragraaf worden de resultaten van Hydra-Ring zonder en met onzekerheden met elkaar vergeleken). De voorbeeldlocaties (Figuur 3.20 en 3.22) laten zien dat relatieve toename ongeveer 20-25% is. Deze toename wordt vooral toegeschreven aan de modelonzekerheid van de golven (orde 20%).



Figuur 3.23 Vergelijking marginale statistiek golfhoogte voor locatie "HRbasis ijsslm 723"

In Tabel 3.7 zijn de verschillen in marginale statistiek van de golfhoogte samengevat voor locaties in het IJsselmeer (IJM) en Markermeer (MM). Te zien is dat het effect van het meenemen van onzekerheden orde 0,20 (herhalingstijd orde 100 jaar) tot 0,40 meter (herhalingstijd 10.000 jaar) bedraagt. Dit is conform verwachting, gegeven een gemiddelde golfhoogte van 1 tot 2 meter voor locaties gelegen in het IJsselmeer en Markermeer.

Tabel 3.7 Per herhalingstijd het minimum, maximum en gemiddelde verschil over alle locaties in golfhoogte tussen Hydra-Ring met en zonder onzekerheden (met onzekerheden- zonder onzekerheden).

Herha-lingstijd (jaar)	Verschil in **Golfhoogte** (m)					
	IJM			MM		
	min	max	gemiddeld	min	max	gemiddeld
100	0.02	0.39	0.20	0.08	0.38	0.21
1000	0.04	0.51	0.27	0.12	0.55	0.31
10000	0.05	0.63	0.34	0.16	0.70	0.42

4 Resultaten HB Meren

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 IJsselmeer en Markermeer. Daarnaast worden de HBN's voor dezelfde locaties besproken, hoewel dit geen invoer is voor de eenvoudige toets.

4.2 Uitgangspunten productieberekeningen

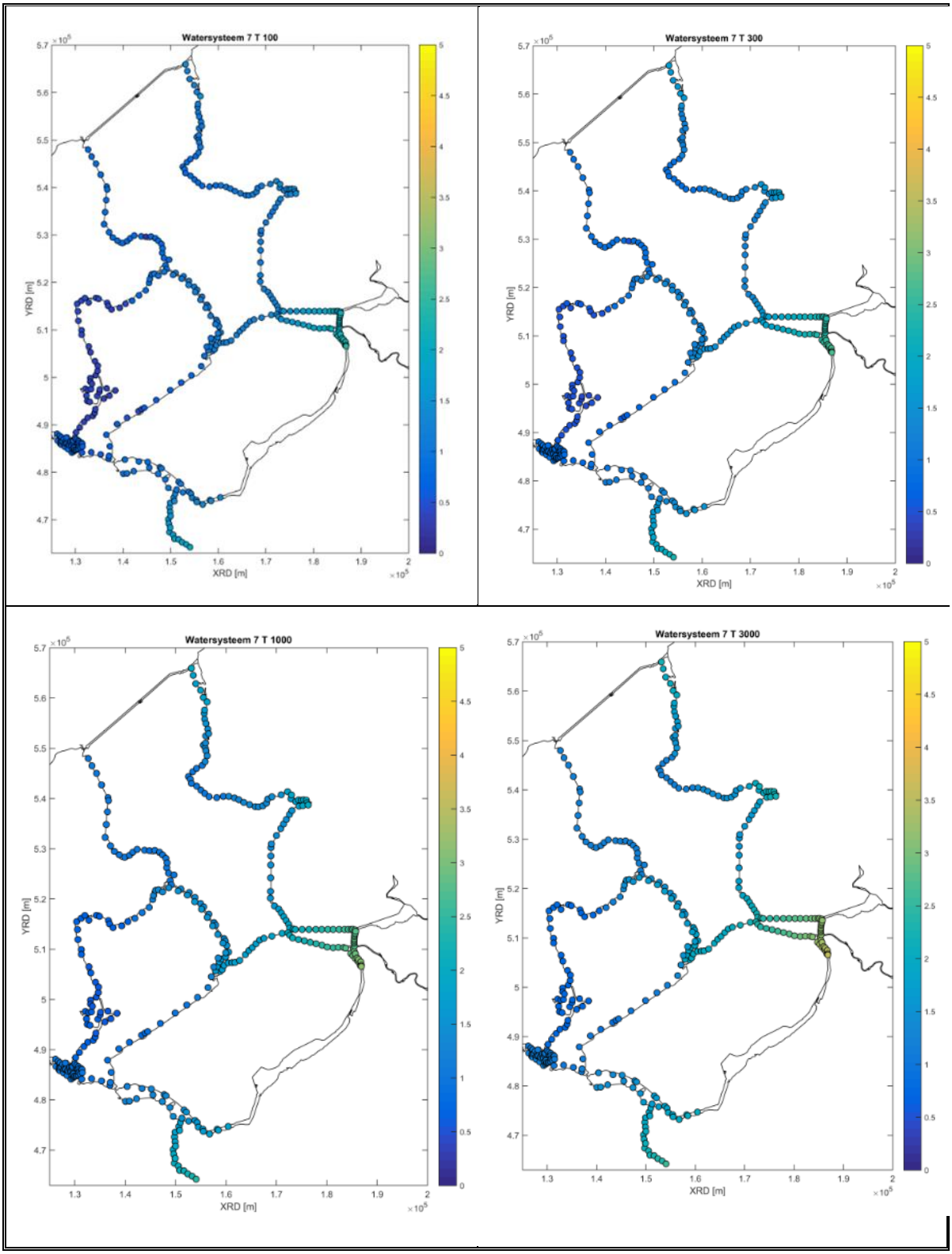
De modelinstellingen van de productieberekeningen staan genoemd in paragraaf 3.3.2 in de tabel "Berekening Hydra-Ring met onzekerheden en nieuwe windstatistiek". Zoals in de tabel staat zijn de berekeningen uitgevoerd met de rekentechniek FORM/FDIR4-FBC. Voor de HBN berekeningen is gewerkt met een standaard dijkprofiel van 1:3 en voor een kritiek overslagdebiet van 1 l/s/m.

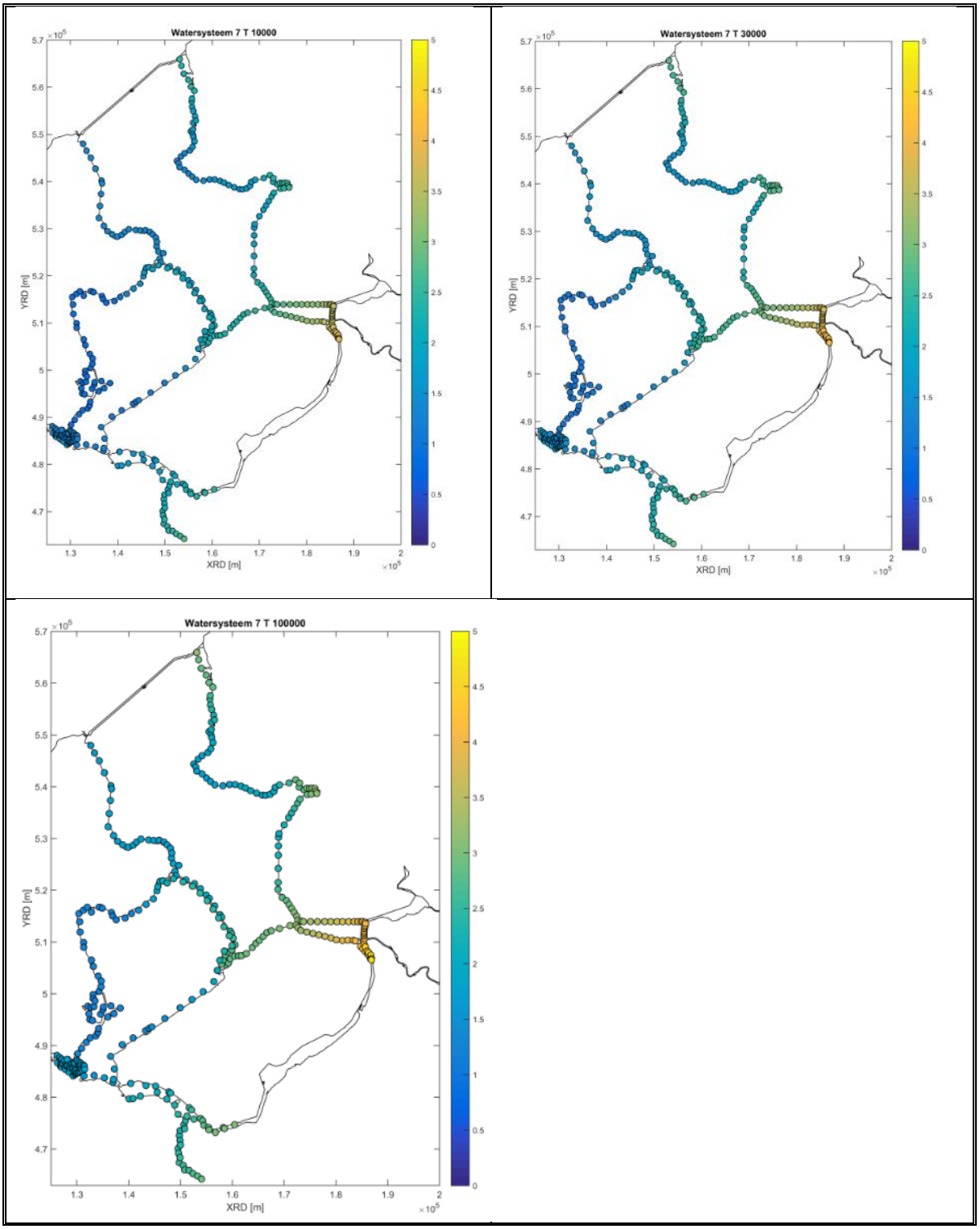
De resultaten worden getoond voor alle uitvoerlocaties voor de volgende herhalingstijden: 100, 300, 1.000, 3.000, 10.000, 30.000, 100.000 jaar. Aangezien het hier gaat om de belastingparameter per herhalingstijd worden de resultaten van de type-2 berekening weergegeven.

4.3 Rekenresultaten lokale waterstand bij de normfrequentie

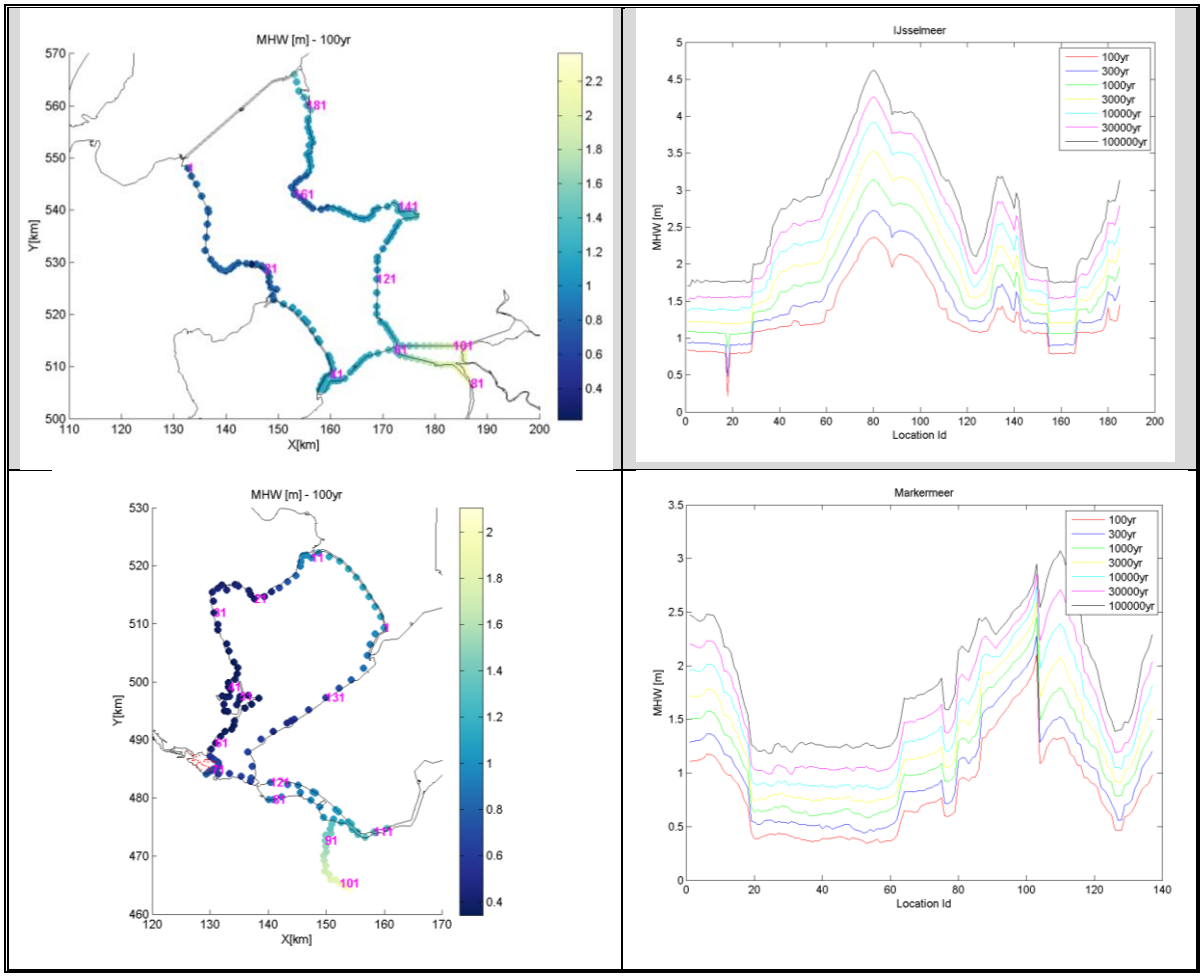
In Figuur 4.1 wordt voor verschillende herhalingstijden een ruimtelijk beeld gegeven van de lokale waterstand (MHW). Op het oog lijken de resultaten een realistisch en consistent beeld te geven. Zoals verwacht nemen de lokale waterstanden toe bij een langere herhalingstijd. Verder zijn de lokale waterstanden het hoogst op de windgedomineerde locaties van het Ketelmeer en Vossemeer. Deze hoge waarden worden vooral veroorzaakt door scheefstand van het wateroppervlak. Bij Noordwesten wind wordt het water over een grote strijklengte opgestuwd in de richting van het Ketelmeer.

Aanvullend op de ruimtelijke verdelingen zijn langsverlopen van de waterstand gemaakt in Figuur 4.2. De verlopen vertonen een logische toename van de waterstand met toenemende herhalingstijd. De variatie in langsrichting is beperkt.


Watersysteem 7 T 100
Watersysteem 7 T 300
Watersysteem 7 T 1000
Watersysteem 7 T 3000
YRD [m]
XRD [m]



Figuur 4.1 Lokale waterstand in m+NAP per locatie en herhalingstijd (100, 300, 1,000, 3,000, 10.000, 30.000 en 100.000 jaar).



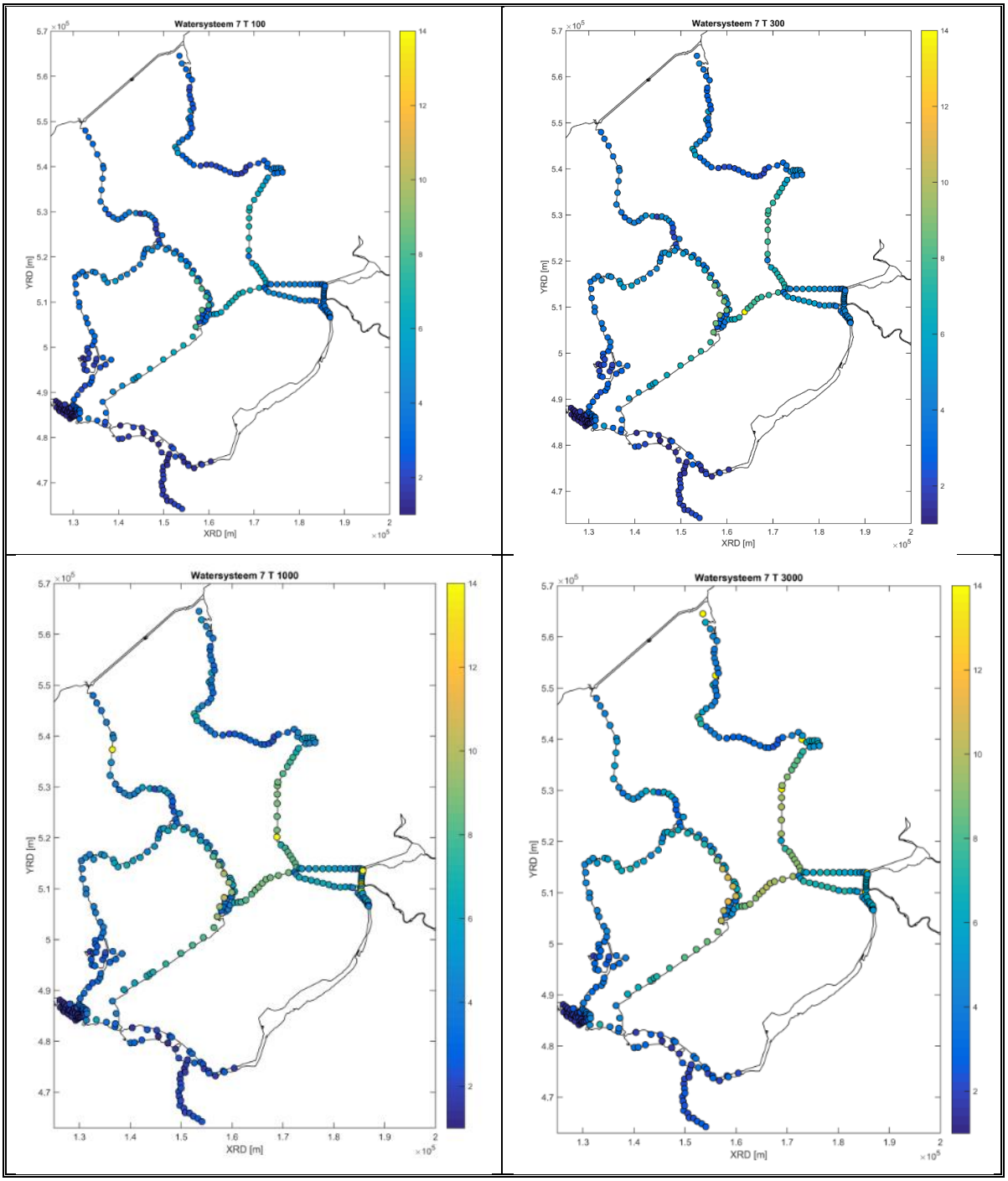
Figuur 4.2 Langsverlopen van waterstand (in m+NAP) in de het IJsselmeer (boven) en Markermeer (onder). De langsverlopen zijn weergeven als functie van de locatie index. Deze zijn in de linkerfiguren aangegeven.

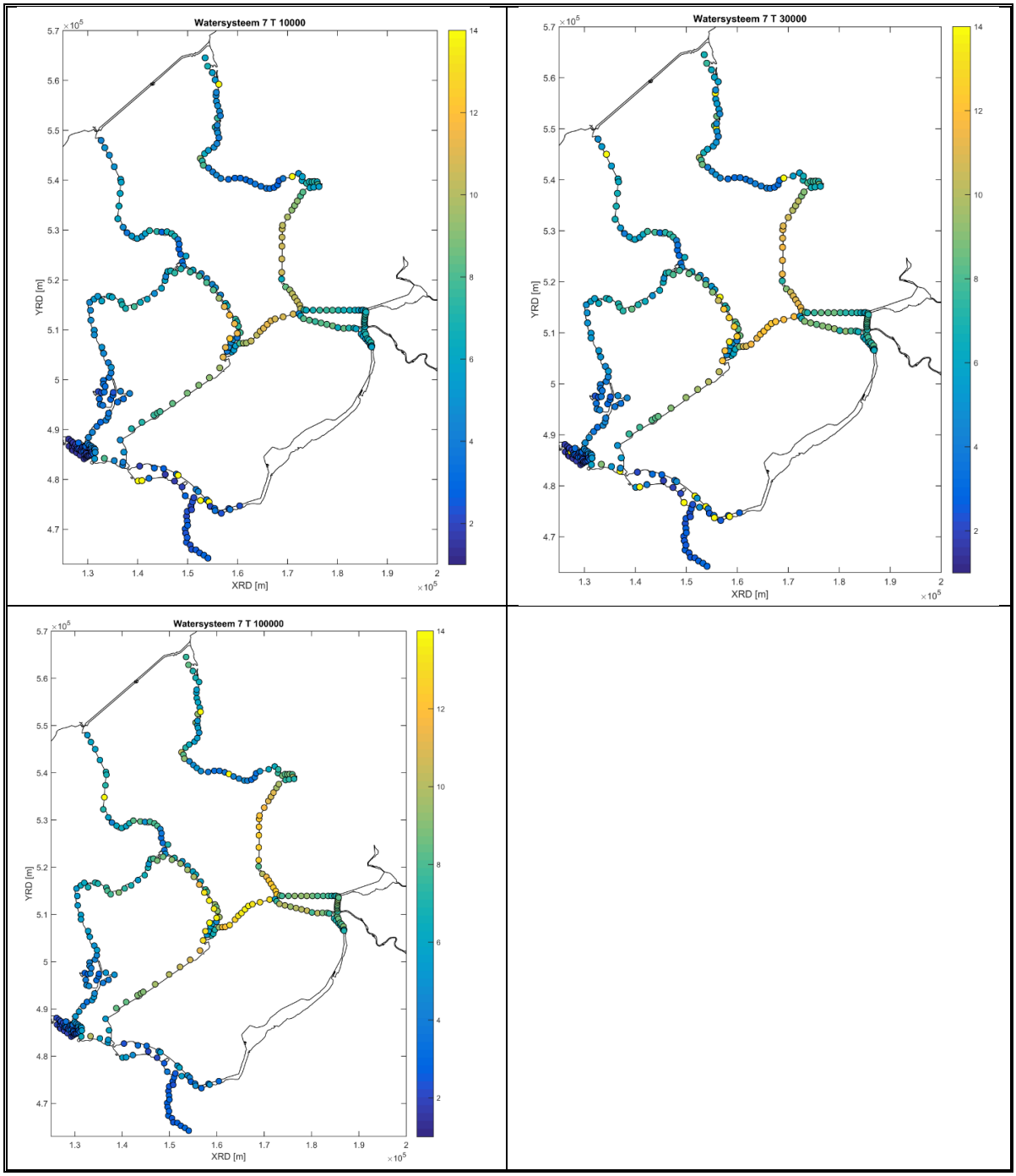
4.4 Rekenresultaten HBN

In Figuur 4.3 wordt voor verschillende herhalingstijden een ruimtelijk beeld gegeven van de HBN waarden. Op enkele locaties na, geven de resultaten een realistisch beeld. Zoals verwacht liggen de HBN's hoger dan de lokale waterstanden. Daarnaast is te zien dat voor de HBN's de dijknormaal van belang is: wanneer een dijk van oriëntatie verandert, dan verandert het HBN mee. Dit verklaart ook de ruimtelijke variatie in de langsverlopen in Figuur 4.4. Duidelijk is wel te zien dat de HBN's op logische wijze toenemen met toenemende herhalingstijd.

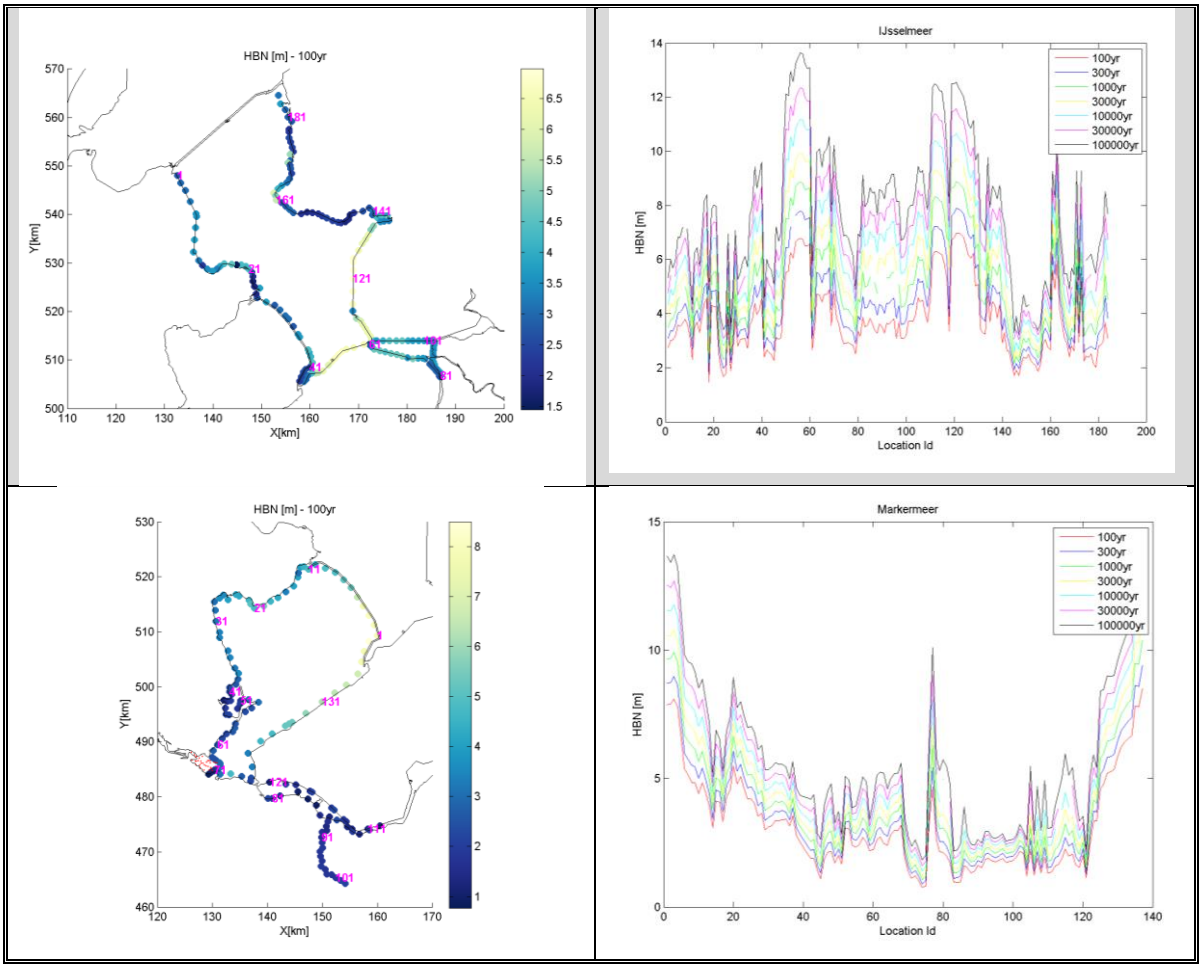
Voor de uitschieters (uitzonderingen op een realistisch beeld) geldt dat de Hydra-Ring berekening is niet geconvergeerd, dat wil zeggen dat de iteraties die onderdeel zijn van de FORM en Directional Sampling geen oplossing hebben kunnen vinden. In totaal gaat het om 13 geïsoleerde locaties in het Markermeer en 23 locaties in het IJsselmeer. In alle gevallen op 1 na gaat het per locatie om slechts één herhalingstijd. Voorbeelden hiervan zijn de gele locaties in Figuur 4.3. In het bijgeleverde Excel bestand is dit aangegeven met de uitzonderingswaarde -99. Hydra-Ring geeft een waarschuwing wanneer een berekening niet is geconvergeerd en de resultaten moeten dan als onbetrouwbaar worden beschouwd.

Omdat het om geïsoleerde locaties en een enkele herhalingstijd gaat, is dit acceptabel.





Figuur 4.3 HBN in m+NAP per locaties en herhalingstijd (100, 300, 1,000, 3.000, 10.000, 30.000 en 100.000 jaar). Er is hier gebruik gemaakt van een standaard 1:3 profiel en overslagdebiet van 1 l/s/m.

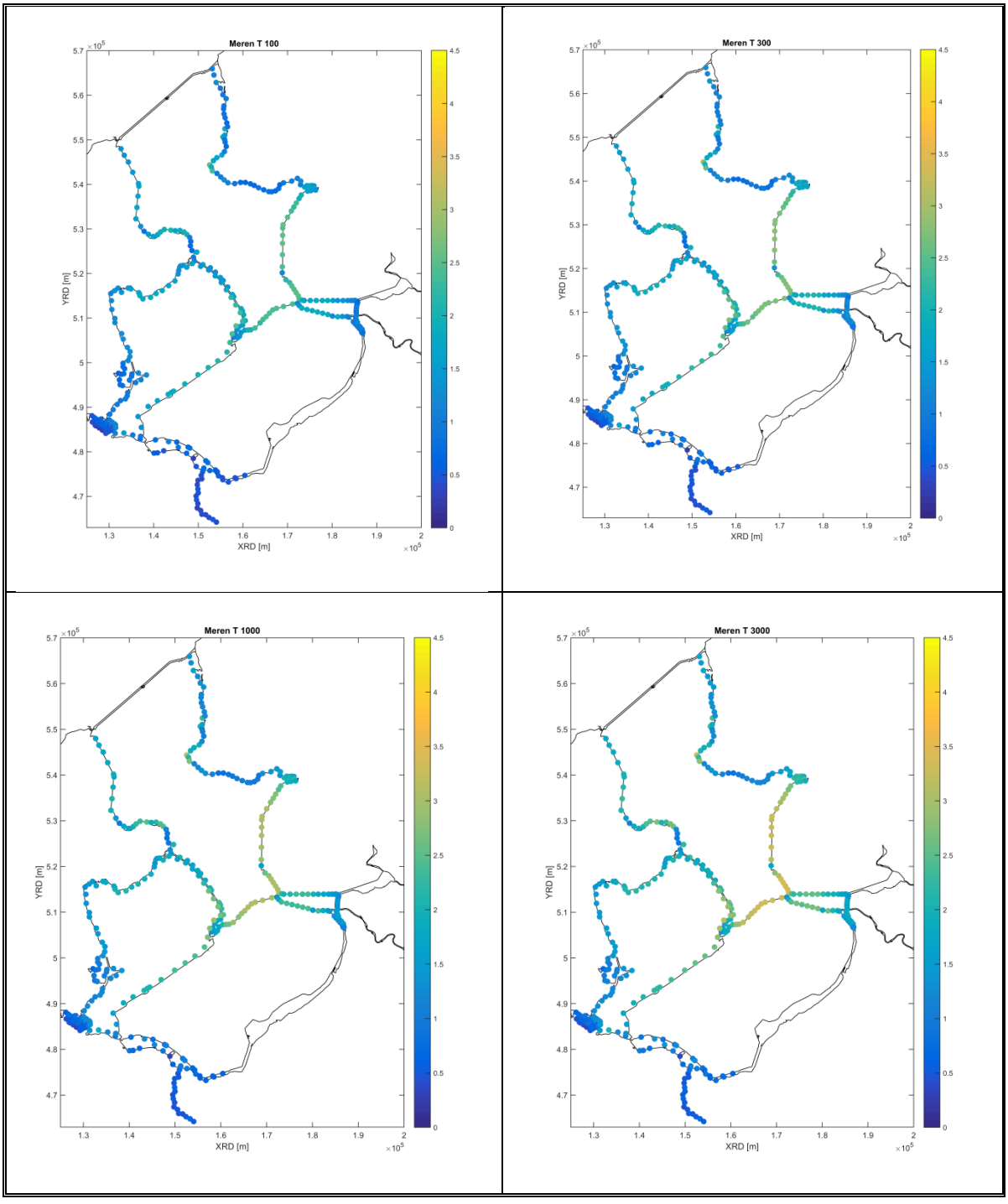


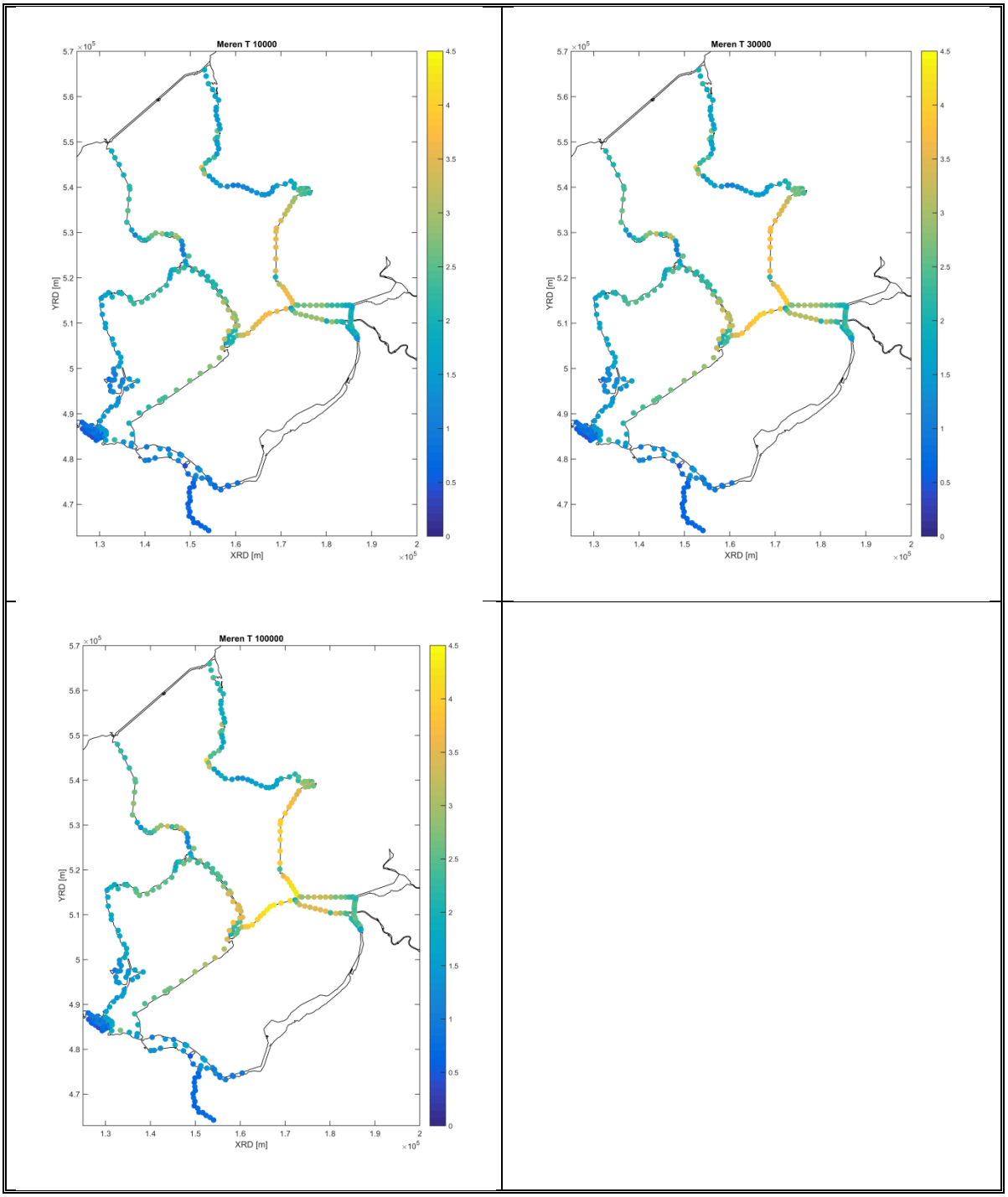
Figuur 4.4 Langsverlopen van HBN (in m+NAP) in de het IJsselmeer (boven) en Markermeer (onder). De langsverlopen zijn weergeven als functie van de locatie index. Deze zijn in de linkerfiguren aangegeven.

4.5 Rekenresultaten golfhoogte

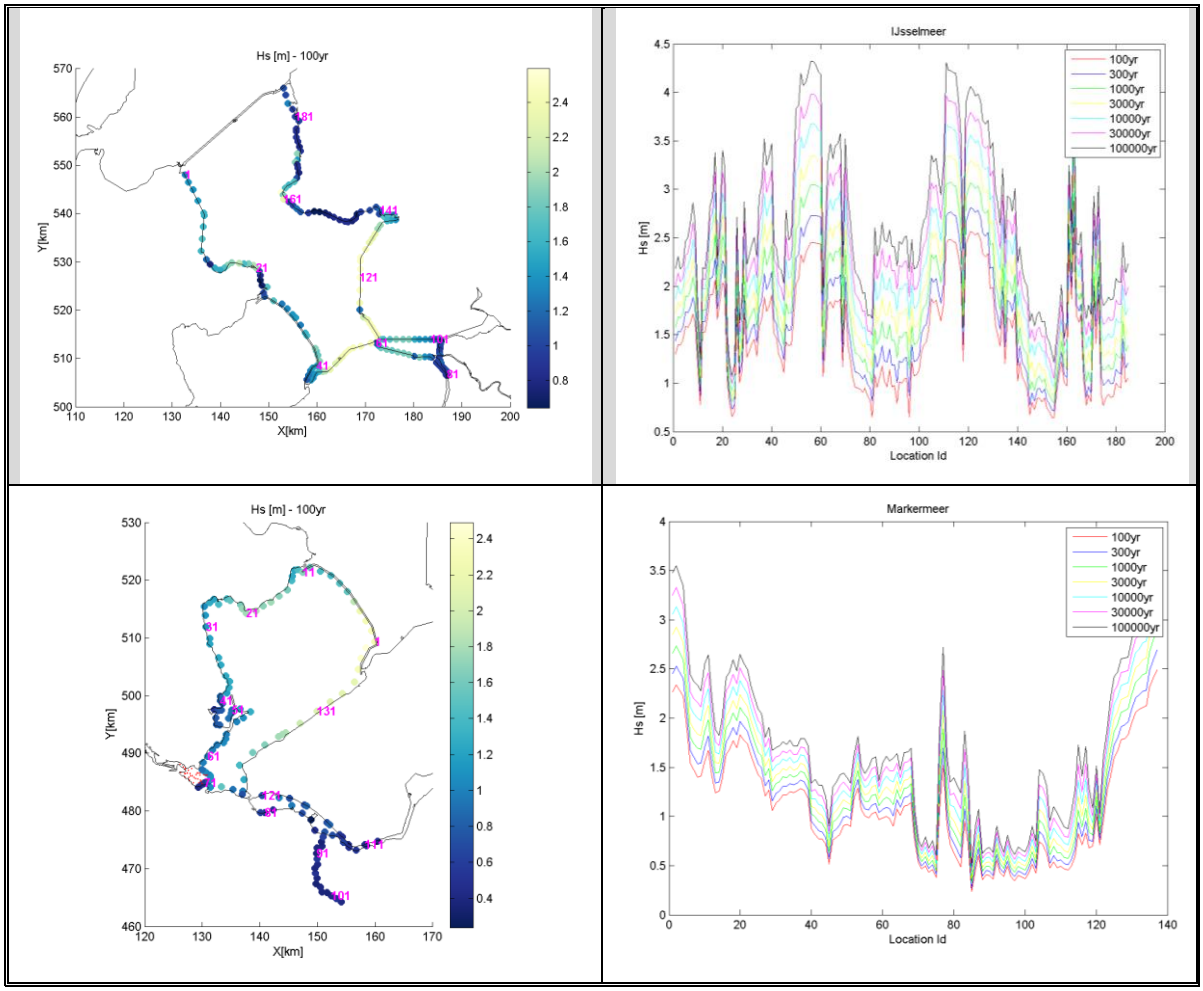
In Figuur 4.5 wordt voor verschillende herhalingstijden een ruimtelijk beeld gegeven van de golfhoogtes. De resultaten geven een realistisch beeld. Wind-gedomineerde locaties geven duidelijk hogere golfhoogtes.

Langsverlopen van de golfhoogte zijn weergegeven in Figuur 4.5. Hier is duidelijk te zien dat de ruimtelijke variatie aanmerkelijk groter is dan voor de waterstand. Als voor HBN is de geometrie hier grotendeels verantwoordelijk voor. Ook hier is duidelijk dat de golfhoogte toeneemt met toenemende herhalingstijd. Deze toename ziet er realistisch uit.


Meren T 100
Meren T 300
Meren T 1000
Meren T 3000
YRD [m]
XRD [m]



Figuur 4.5 Golfhoogte in meters per locaties en herhalingstijd (100, 300, 1,000, 3,000, 10,000, 30.000 en 100.000 jaar).



Figuur 4.6 Langsverlopen van de golfhoogte (in m) in de het IJsselmeer (boven) en Markermeer (onder). De langsverlopen zijn weergeven als functie van de locatie index. Deze zijn in de linkerfiguren aangegeven.

4.6 Rekentijden

In Tabel 4.1 is per type HB aangegeven wat de minimale en maximale rekentijd is per herhalingstijd en wat de mediaan is, bezien over alle locaties. Gemiddeld gezien vergt de berekening van lokale waterstand en golfhoogte een rekentijd van orde 30 seconden en voor, HBN enkele uren. De rekentijden van alle uitgevoerde berekeningen variëren enorm. Dit heeft te maken de gehanteerde rekentechniek FDIR. Wanneer een FORM berekening niet convergeert, wordt immers overgestapt op de duurdere rekentechniek Directional Sampling.

Tabel 4.1 Minimale en maximale rekentijden voor FORM/ FDIR4-FBC per terugkeertijd van lokale waterstand, HBN en golfhoogte berekening over alle locaties

Type Hydraulische Belasting	rekentechiek	min	max	mediaan
Locale waterstand	FORM8-FBC	16 s	10 min	29 s
HBN	FDIR8-FBC	1.5 uur	17.4 uur	4.6 uur
Golfhoogte	FORM8-FBC	2 s	22 min	1 min

Tabel 4.2 geeft de rekentijden behorende bij de rekenmethode FORM8-NTI.

Tabel 4.2 Minimale en maximale rekentijden voor FORM8-NTI per terugkeertijd van lokale waterstand, HBN en golfhoogte berekening over alle locaties

Type Hydraulische Belasting	Rekentechniek	**min**	**max**	**mediaan**
Locale waterstand	FORM8-NTI	17,5 s	37,5 min	2,1 min
HBN	FORM8-NTI	2,0 min	18,8 min	6,7 min
Golfhoogte	FDIR8-NTI	2,0 s	22,2 min	1,0 min

Deze rekentijden hebben betrekking op het rekenen op het Amazon cluster. Op andere platforms zullen deze getallen anders zijn. Dat betekent dat, voor zover mogelijk, genoemde rekentijden zuiver als indicatie gebruikt moeten worden.

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 Vecht- en IJsseldelta. In Tabel 4.3 worden de in WBI2017 ingebouwde instellingen (gelijk aan dit uit Deltares (2017)) voor het Merengebied 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 4.3 Overzicht aanbevolen Hydra-Ring instellingen voor het Merengebied (Deltares, 2017).

Systeem	**Deel van systeem**	**Waterstand**	**HBN**	**Golfhoogte**
Meren (7, 8)	Wind-gedomineerd	FORM8-NTI	FDIR8-FBC	FDIR8-FBC
	Meerpeil-gedomineerd	FDIR4-FBC	FORM4-NTI	FDIR4-FBC

Onderstaand een citaat uit Deltares (2017) over de argumenten achter de keuze en differentiatie van de rekentechnieken:

Voor het merengebied blijkt de keuze van de startmethode voor de FORM of FDIR rekentechniek van belang. Bij een dominante trage stochast hanteren we startmethode 4; is de snelle stochast dominant dan hanteren we startmethode 8. Als voor de bepaling van de belasting zowel een trage als een snelle stochast relevant zijn, dan moet daar in de tijdintegratie rekening mee worden gehouden en moet niet FBC maar NTI worden gekozen.

Dat leidt tot het volgende advies:

- *Waterstand*
  - *Voor meerpeil-gedomineerde locaties: FDIR4 – FBC (wind speelt geen rol)*
  - *Voor wind-gedomineerde locaties: FORM8 – NTI (naast wind speelt ook meerpeil nog een belangrijke rol)*
- *HBN:*
  - *Voor meerpeil-gedomineerde locaties: FORM4 – NTI (ook wind nodig om golven te krijgen)*
  - *Voor wind-gedomineerde locatie: FDIR8 – FBC (meerpeil speelt geen rol)*
- *Golfhoogte: FDIR8 – FBC*

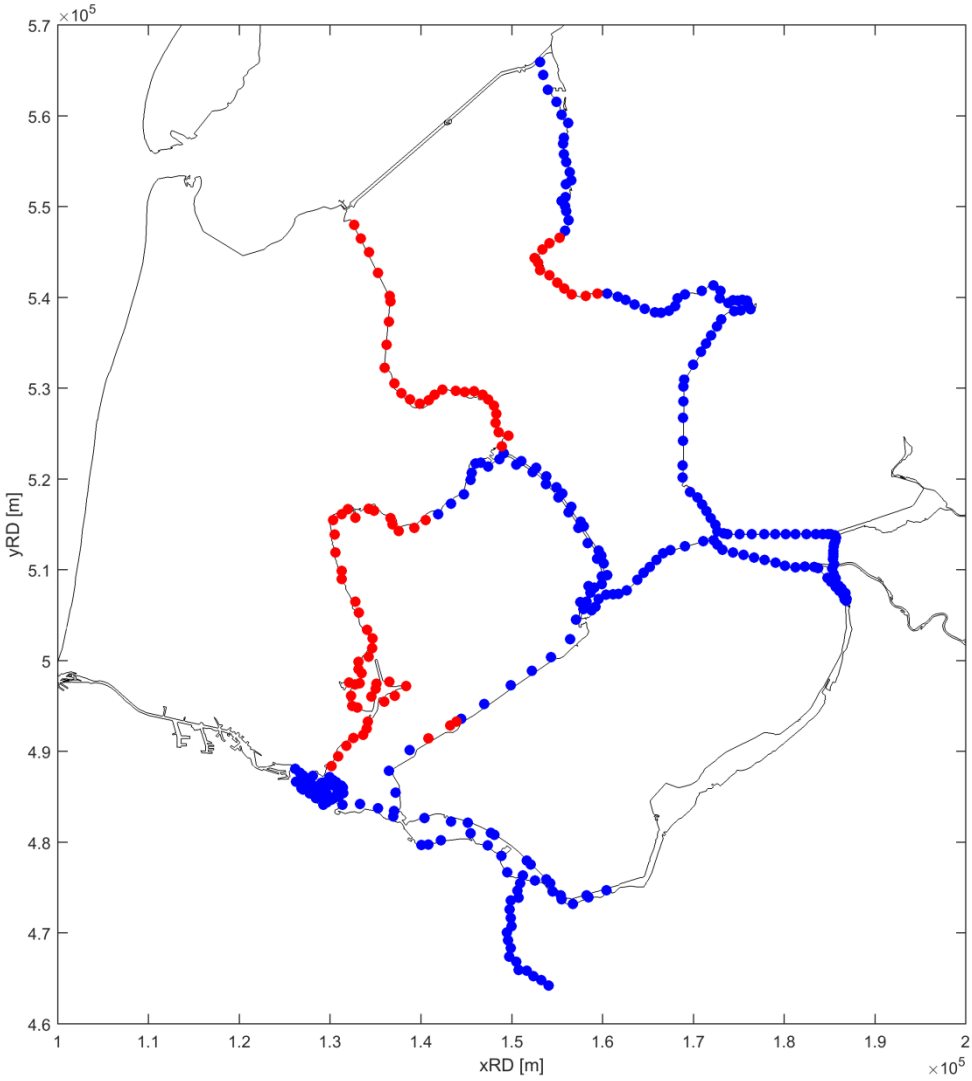
Voor zowel het Markermeer als het IJsselmeer convergeert de Hydra-Ring berekening van HBN met FORM-NTI niet voor alle locaties voor alle herhalingstijden. Het gebruik van NTI is hier noodzakelijk, maar in combinatie met Directional Sampling leidt dit tot zeer lange rekentijden. Voor de meerpeil-gedomineerde locaties zijn er voor de HBN berekening drie opties:

- *Accepteren van "geen resultaat" (Hydra-Ring geeft melding) bij toepassing van FORM-NTI*
- *Accepteren van een onnauwkeurig resultaat (fout kan oplopen tot enkele dm's), bij toepassing FDIR-FBC*
- *Geen HBN berekeningen uitvoeren*

Wij adviseren hier te accepteren dat op een aantal locaties geen convergentie optreedt en raden aan in die gevallen de HB van een naastgelegen locatie te gebruiken.

Deze gereviseerde Hydra-Ring instellingen leveren betrouwbare resultaten op met kleine dan wel verklaarbare verschillen met Hydra-NL uitkomsten.

In de hierboven beschreven revisie wordt in hele deelgebieden dezelfde rekentechniek toepast. De in hoofdstuk 3 geïntroduceerde methodiek voor het bepalen van rekenmethodes zorgt ervoor dat de rekenmethode van locatie tot locatie kan verschillen. Dit betekent dat de impact van de revisie van de rekentechnieken ook van locatie tot locatie zal verschillen en dat er niet een algemene trend is waar te nemen.



Figuur 4.7 Ruimtelijk overzicht van verschillende instellingen uit Tabel 4.3 voor wind-gedomineerde (blauw) en meerpeil-gedomineerde (rood) locaties.

5 Aansluiting op IJssel-Vechtdelta

5.1 Inleiding

Hydra-Ring onderscheidt 18 regio's (zie Figuur 1.4). Per regio geldt in principe een apart belastingmodel (basisstochasten, modelschematisatie, e.d.). De belastingmodellen inclusief berekeningsresultaten dienen goed op elkaar aan te sluiten. Daarnaast dient de begrenzing tussen de regio's duidelijk aangegeven te worden. Bij het Markermeer (regio 7) zijn er duidelijke grenzen aan te wijzen. Dit is ook het geval voor de begrenzing van het IJsselmeer (regio 7) met de Vechtdelta (regio 6). Echter, bij de begrenzing van het IJsselmeer (regio 7) met de IJsseldelta (regio 5) is de overgang meer geleidelijk. In dit hoofdstuk wordt deze begrenzing tussen regio 5 en 7 onderzocht.

5.2 Ketelmeer/Vossemeer – IJsseldelta

Voor een zevental locaties in het gebied Ketelmeer/Vossemeer-IJsseldelta zijn berekeningen gemaakt met Hydra-Ring. De berekeningen zijn uitgevoerd voor zeven herhalingstijden, variërend tussen 100 en 100.000 jaar, met zowel de database (en het belastingmodel[5]) van het IJsselmeer als met de database van de IJsseldelta. De gekozen locaties zijn beschreven in Figuur 5.1. De berekeningen zijn uitgevoerd met en zonder onzekerheden.

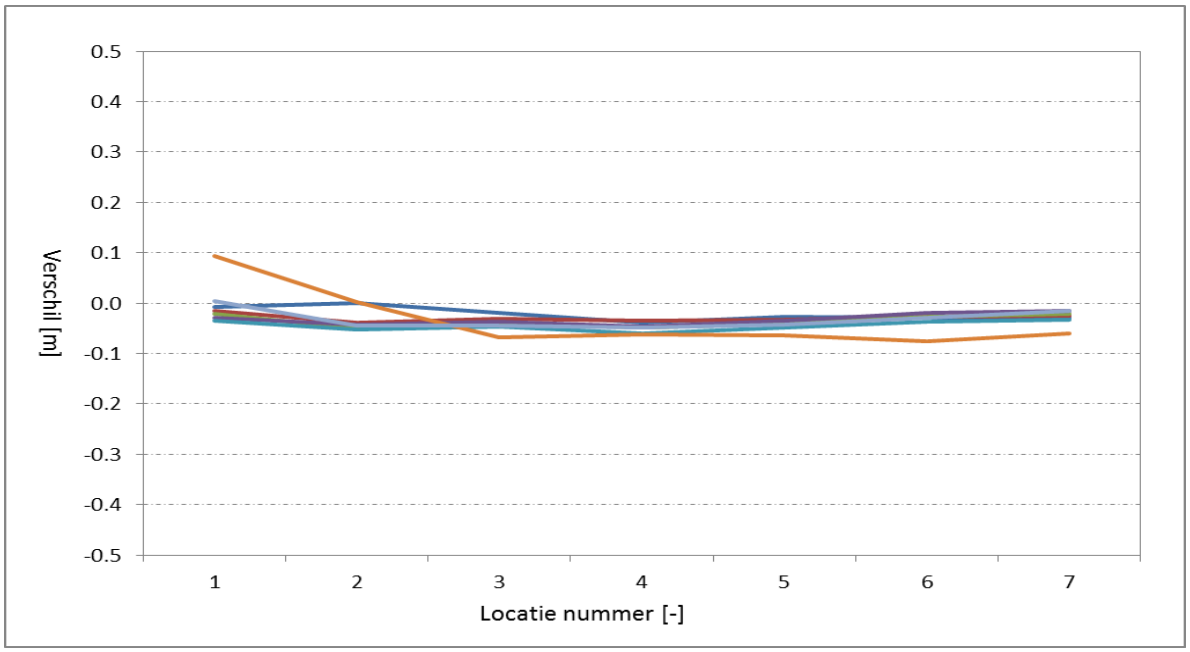
Tabel 5.1 toont het verschil tussen de berekeningsresultaten met onzekerheden met de database van het IJsselmeer en die van de IJsseldelta. Figuur 5.2 toont het verschil in grafische vorm. Voor de 1ste, 4de en 7de locatie zijn frequentielijnen geplot en weergegeven in Figuur 5.3.

Met uitzondering van de locatie in de IJsselmonding zijn de verschillen klein en bedragen slechts enkele centimeters. Voor de locatie in de IJsselmonding is het effect van de IJsselafvoer maximaal en daardoor verwachten we grotere verschillen tussen de resultaten van het IJsselmeer-belastingmodel (zonder stochast IJsselafvoer) en het belastingmodel van de IJsseldelta (met stochast IJsselafvoer). Zelfs op deze locatie is het verschil kleiner dan 9 cm. Ook de frequentielijnen beschreven in Figuur 5.3 laten een consistent beeld zien. Op basis van dit resultaat is er geen aanleiding om de huidige begrenzing tussen Ketelmeer/ Vossemeer en IJsseldelta aan te passen. De beide meren worden dus in principe betrokken bij de regio IJsselmeer.

[5] *Het belastingmodel voor het IJsselmeer bestaat uit 3 basisstochasten, te weten meerpeil, windsnelheid en windrichting. Afvoer en Ramspolkering gelden in dit model niet als basisstochast. In het belastingmodel voor de IJsseldelta worden deze wel als basistochasten beschouwd.*



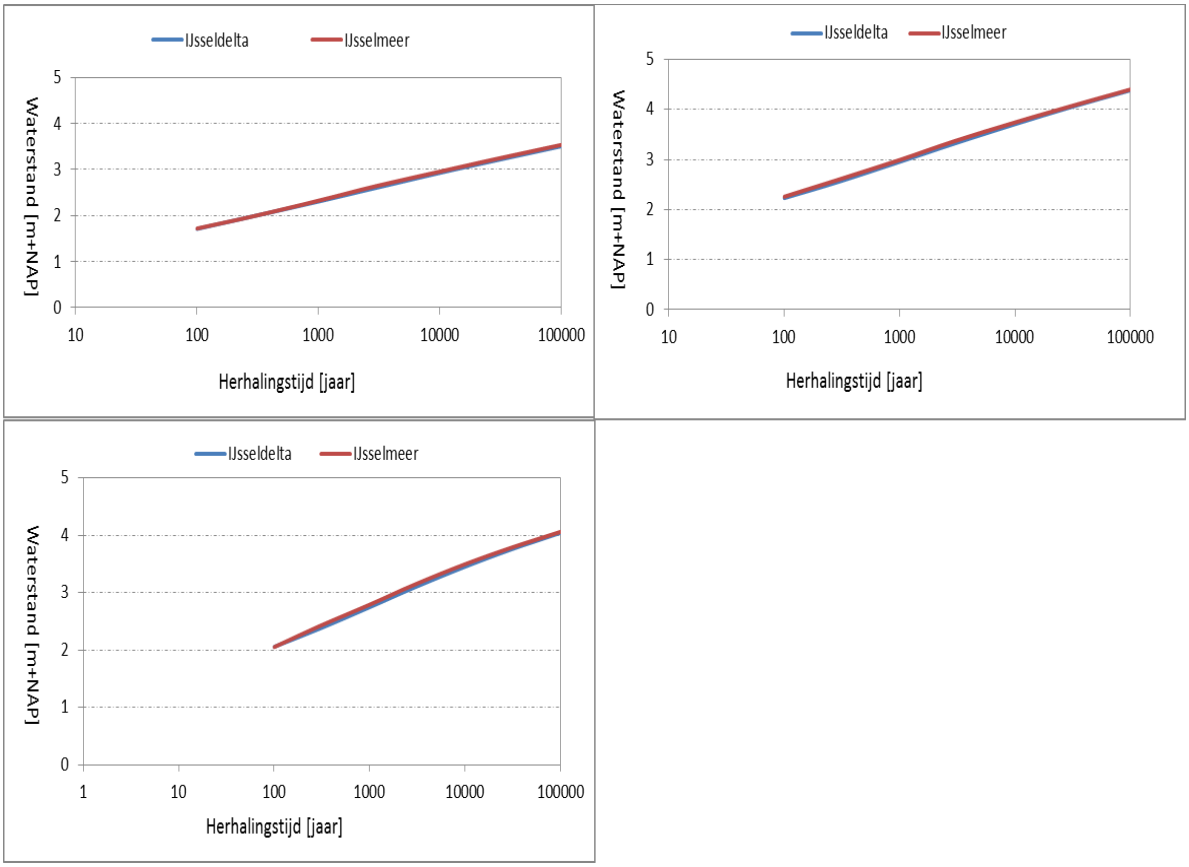
Figuur 5.1 Ligging van de gekozen zeven locaties (rood) in Ketelmeer/Vossemeer. Groene punten geven grenzen tussen dijktrajecten aan.



Figuur 5.2 Verschil in berekende waterstand (m) voor de zeven beschouwde locaties in het Ketelmeer/Vossemeer (model IJsseldelta – model Ketelmeer/Vossemeer).

Tabel 5.1 Verschil (m) tussen de berekeningsresultaten met databases IJsselmeer en IJsseldelta (IJsseldelta – IJsselmeer)

Locatie	Herhalingstijd [jaar]						
	100	300	1000	3000	10000	30000	100000
loc 1	-0.00798	0.000411	-0.01936	-0.03875	-0.02725	-0.03005	-0.02976
loc 2	-0.01594	-0.03865	-0.03187	-0.03552	-0.03253	-0.02646	-0.02461
loc 3	-0.02176	-0.04969	-0.03967	-0.04854	-0.04079	-0.02703	-0.02151
loc 4	-0.02874	-0.04358	-0.03698	-0.0465	-0.03535	-0.01991	-0.01631
loc 5	-0.03554	-0.05305	-0.04746	-0.06045	-0.04924	-0.03661	-0.03362
loc 6	0.092959	0.002057	-0.06853	-0.06159	-0.06494	-0.07485	-0.06066
loc 7	0.00406	-0.04506	-0.04398	-0.04895	-0.04331	-0.02908	-0.01632



Figuur 5.3 Frequentielijnen (gebaseerd op 7 herhalingstijden) voor 3 locaties: locatie 1, locatie 4 en locatie 7.

Het Ketelmeer en Vossemeer grenzen aan verschillende trajecten. Het is niet wenselijk om resultaten uit verschillende databases toe te kennen aan 1 traject. Daarom gaan we hieronder welk belastingmodel voor welk traject moet worden toegepast. In de gebieden van het Ketelmeer/Vossemeer en het benedenstroomse deel van de IJsseldelta bevinden zich de volgende dijktrajecten: 8-4 (Flevoland), 226 (Roggebotsluis), 11-2 (IJsseldelta), 225 (Ramspolkering) en 7-2 (Noordoostpolder), zie ook Figuur 5.1. Dijktraject 8-4 ligt volledig in het gebied van Ketelmeer en Vossemeer; afvoer speelt in dit gebied nauwelijks een rol.

Hetzelfde geldt voor locatie Roggebotsluis (verbindende kering 226) en dijktraject 7-2. Het ligt dan ook voor de hand om voor deze 3 dijktrajecten de database van IJsselmeer te gebruiken. Het dijktraject 11-2 ligt grotendeels in de IJsseldelta waar de overgang tussen winddominantie en afvoerdominantie plaatsvindt. Daarnaast speelt de Ramspolkering een rol in dit gebied. Aan de westelijke kant grenst het dijktraject 11-2 aan het Vossemeer. Uit bovenstaande figuren en tabellen blijkt echter dat er nauwelijks verschillen zijn tussen de rekenresultaten met de twee verschillende belastingmodellen. We geven er daarom de voorkeur aan dit traject geheel bij de IJsseldelta te trekken. Hetzelfde geldt voor de verbindende waterkering Ramspolkering die deels in de IJsseldelta ligt en deels in het Ketelmeer.

Samengevat wordt voorgesteld om voor de 5 vermelde dijktrajecten de belastingmodellen en databases zoals weergegeven in Figuur 5.2 te gebruiken.

Tabel 5.2 Te gebruiken databases voor 5 dijktrajecten grenzend aan het Ketelmeer/Vossemeer en IJsseldelta.

Dijktraject	Te gebruiken database
8-4	IJsselmeer
226	IJsselmeer
11-2	IJsseldelta/Vechtdelta
225	IJsseldelta/Vechtdelta
7-2	IJsselmeer

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

In deze studie zijn de Hydraulische Belastingen (HB) voor de waterkeringen in het merengebied afgeleid met Hydra-Ring. De HB bestaat 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), Hydraulisch belasting niveaus (golfoverslag-gerelateerde toetssporen) en maatgevende golfcondities per waterstandsniveau (bekledingen). Dit zijn referentiewaarden voor de Hydraulische Belastingen die de toetser zelf met Ringtoets afleidt. De HBN's en golfcondities zijn bepaald met standaardinstellingen voor het dijkprofiel.

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:

- Voor de meeste locaties benadert Hydra-Ring de lokale waterstanden en HBN's berekend met de Hydra-Zoet goed. Gemiddeld genomen zijn de verschillen tussen beide Hydra's zo'n 10 cm. Er zijn slechts enkele locaties waar de verschillen groter zijn (max 41 cm). Voor deze locaties kunnen de verschillen sterk verkleind worden door gebruik te maken van de tijdsintegratiemethode NTI in plaats van FBC.

- De nieuwe windstatistiek in Hydra-Ring zorgt op de meeste locaties voor een minimaal verschil in de lokale waterstand (<0.1 m). Daar waar de scheefstand een belangrijke bijdrage heeft aan de kans op hoge waterstanden, treedt er bij korte herhalingstijden (T=100 jaar) een verlaging op tot 0.2 m. Bij slechts enkele locaties kantelt de overschrijdingskromme, waardoor er bij de grotere herhalingstijden (T=10.000 jaar) toenames tot 0.2 m zijn waar te nemen.
  De HBN resultaten is te zien dat bij de windgedomineerde locaties er bij korte herhalingstijden een verlaging optreedt tot 0.5 m. Bij de meeste overige locaties is er sprake van een kanteling van de overschrijdingsfrequentielijn. Bij een herhalingstijd van 10.000 jaar kan de nieuwe windstatistiek zorgen voor een toename van maximaal 0.9 m. Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat de grote HBN-verschillen deels te wijten zijn aan het gebruik van ongunstige uitgangspunten voor de overslagberekening (het kritieke overslagdebiet en dijkprofiel).

- Het meenemen van onzekerheden als extra stochasten in Hydra-Ring zorgt voor een verhoging van de lokale waterstanden en HBN's. Bij een herhalingstijd van 10.000 jaar ligt de verhoging van de lokale waterstand voor de meeste locaties tussen de 0.2 en 0.3 m. Voor enkele locaties zoals in de Eem is het effect groter. Dit heeft te maken met een vlak verloop van de frequentielijn. Bij de HBN's kan de verhoging oplopen tot meerdere meters. De locaties met een stijging van meer dan een meter in HBN zijn voornamelijk terug te leiden tot de locaties waar de golven een belangrijke rol spelen. Hierbij is het in het Markermeer vooral de modelonzekerheid in de golfperiode die sterk doorwerkt. Dit is gedeeltelijk terug te voeren op het correlatiemodel dat gebruikt wordt om de

afhankelijkheid tussen golfhoogte en golfperiode in rekening te brengen. Dit correlatiemodel leidt tot een dubbeltelling van onzekerheid in de golfperiode. Deze dubbeltelling is in de Ringtoets uitlevering van begin 2017 echter al verholpen. Een andere verklaring voor de grote verschillen is het gebruik van ongunstige uitgangspunten (steile dijkprofielen) in de overslagberekening.

- Het gebiedsdekkende overzicht van de marginale statistiek van de waterstanden waarin alle oeverlocaties zijn meegenomen geeft een ruimtelijk logisch en consequent beeld.

- Het gebiedsdekkende overzicht van de HBN's en golfhoogtes laten een ruimtelijk logisch en consequent beeld zien. Slechts enkele locaties laten afwijkende waarden zijn. Hier is de berekening niet geconvergeerd.

Hydra-Ring en Hydra-Zoet resultaten zijn met elkaar vergeleken. Veranderingen als gevolg van aanpassingen in de statistiek, het in rekening brengen van kennisonzekerheden en verschillen in de gehanteerde rekenmethoden (technieken, correlaties, etc.) zijn geduid.
In deze studie is gekeken van naar de aansluiting van het merengebied met de omliggende watersystemen. Bij het Markermeer (regio 8) zijn er duidelijke grenzen aan te wijzen. Dit is ook het geval voor de begrenzing van het IJsselmeer (regio 7) met de Vechtdelta (regio 6). Echter, bij de begrenzing van het IJsselmeer (regio 7) met de IJsseldelta (regio 5) is de overgang meer geleidelijk. Op basis van de resultaten van deze studie wordt voorgesteld om de dijktrajecten 8-4, 226 en 7-2 op te nemen in in het IJsselmeer en dijktraject 11-2 en 225 in bij de Vecht- en IJsseldelta.

Voor de wettelijke toetsing/beoordeling wordt aanbevolen om HB af te leiden met de laatste versie van het WBI-2017, inclusief de aangepaste rekeninstellingen. De resultaten hiervan zullen op details afwijken van de in dit rapport beschreven resultaten.

6.2 Aanbevelingen

Uit deze studie komen een aantal aanbevelingen naar voren:

- In deze studie zijn voor de testlocaties berekeningen met tijdintegratie-methode NTI gemaakt. Voor een aantal locaties is de berekening niet convergeert binnen de gestelde maximale rekentijd, aanbevolen wordt om hier nader naar te kijken.

7 Referenties

Beckers, J.V.L. (2016) Modelonzekerheden golven. Deltares memo tbv WBI 2017.

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 (2011). Achtergrondrapport WTI-2011 voor IJsselmeer, Concept hydraulische randvoorwaarden HR2011 voor het IJsselmeer, Ketelmeer en Vossemeer, Deltares rapport 1204143-003, december 2011 (A. Kieftenburg en H. Chbab).

Deltares (2015a). Modelonzekerheid belastingen, Wettelijk Toetsinstrumentarium WBI-2017, Deltares rapport 1209433-008, juli 2015 (H. Chbab en J. Groeneweg).

Deltares (2015b), Memo Afleiding duurlijnen meerpeilen IJssel- en Markermeer t.b.v. de FBC-methode in Hydra-Ring, 5 maart 2015, (W.J. Klerk)

Deltares (2016a). Basisstochasten WBI-2017, Statistiek en statistische onzekerheid, Deltares rapport 1209433-012-HYE-0007, januari 2016 (H. Chbab).

Deltares (2017). Vaststelling van rekeninstellingen voor Hydra-Ring berekeningen van Hydraulische Belastingen (concept). Rapport Deltares 1230087-011-HYE-0001 (J. Groeneweg en J. den Bieman)

Diermanse et al. (2013). Hydra-Ring Scientific Documentation. Deltares & TNO-Bouw.

Geerse, C.P.M. en Verkaik, J.W (2010). Effect nieuwe windstatistiek op toetspeilen en benodigde kruinhoogten. HKV rapport PR1601.10. Lelystad

HKV (2016a). Verschilanalyse WTI2017- Uitgangspunten en de geselecteerde locaties voor het Markermeer, HKV-memo PR3249.10, 1 april 2016 (K. Wojciechowska, T. Botterhuis, C. Geerse, M. Duits en J. Stijnen).

HKV (2016b). Verschilanalyse WTI2017- Uitgangspunten en de geselecteerde locaties voor het IJsselmeer, HKV-memo PR3249.10, 1 april 2016 (K. Wojciechowska, T. Botterhuis, C. Geerse, M. Duits en J. Stijnen).

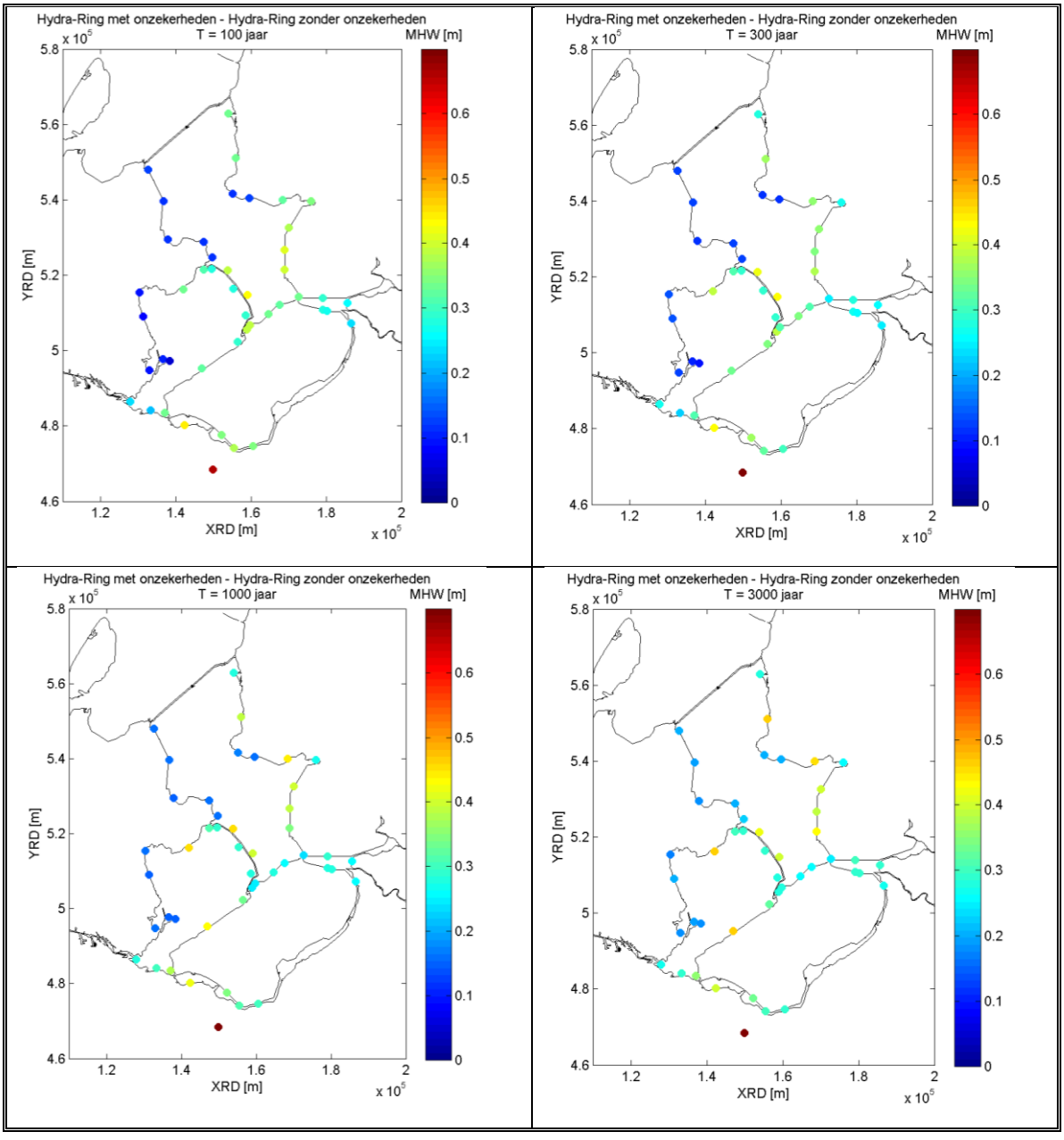
Min. I&M (2016). Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017. Bijlage II Voorschriften bepaling hydraulische belasting primaire waterkeringen. Rapport Ministerie Infrastructuur en Milieu, versie 22 april 2016.

Wojciechowska (2016). Afleiden WTI2017 windstatistiek voor 16 windrichtingen. HKV memo PR3216.10. 29 juni 2016.

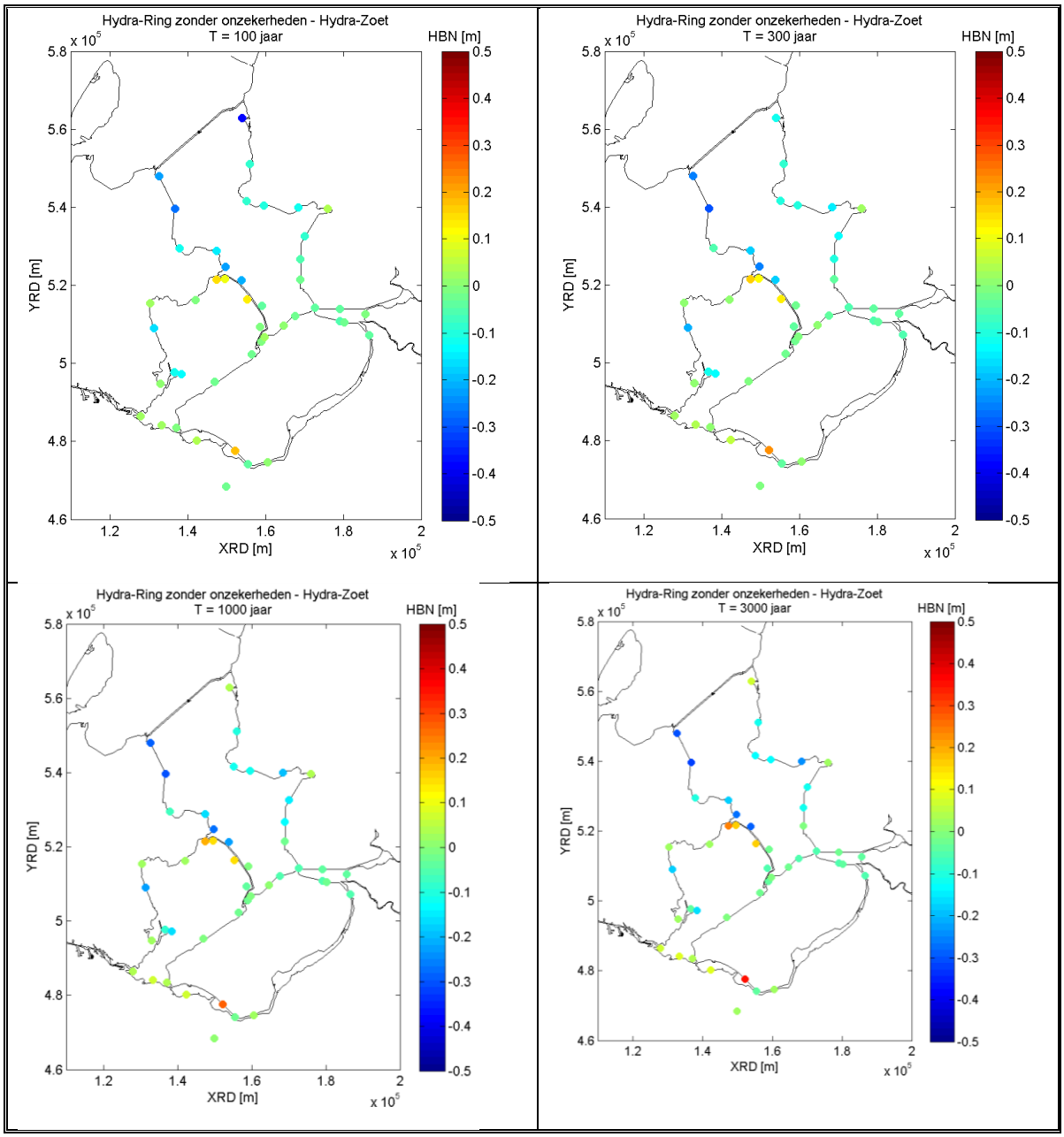
A Vergelijking Hydra-Ring zonder onzekerheden en Hydra-Zoet

Voor vier verschillende herhalingstijden (100, 300, 1000 en 3000 jaar) worden de ruimtelijke verdelingen van de verschillen tussen Hydra-Ring (zonder onzekerheden) en Hydra-Zoet in waterstanden (in de figuren als MHW aangegeven) en HBN gegeven.

A.1 Lokale waterstand



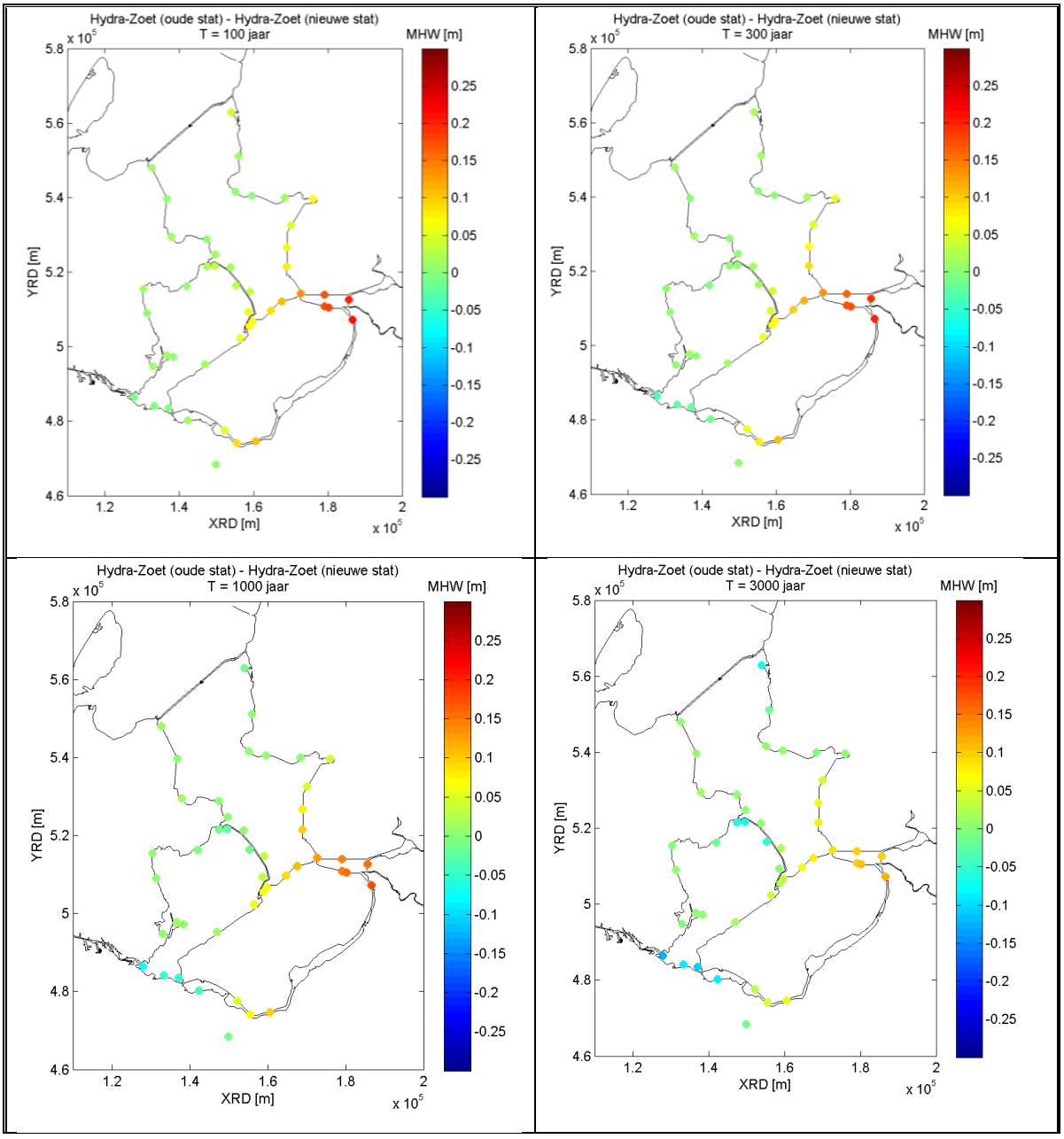
A.2 HBN

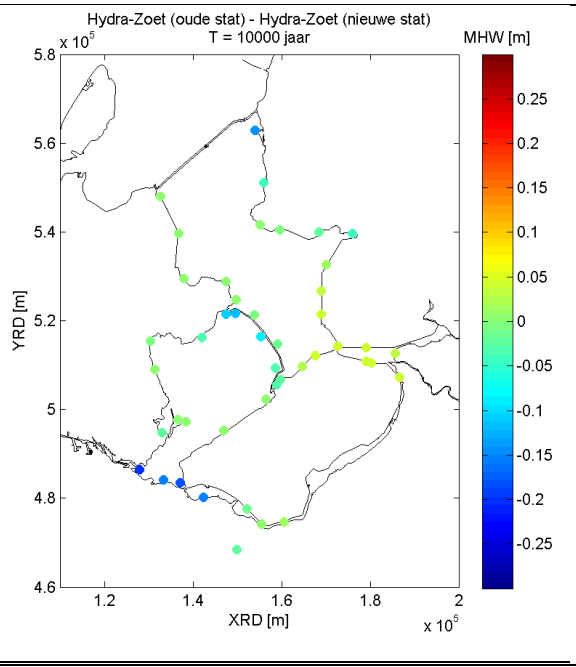

Hydra-Ring zonder onzekerheden - Hydra-Zoet
T = 100 jaar
HBN [m]
YRD [m]
XRD [m]
x 10^5
Hydra-Ring zonder onzekerheden - Hydra-Zoet
T = 300 jaar
HBN [m]
YRD [m]
XRD [m]
x 10^5
Hydra-Ring zonder onzekerheden - Hydra-Zoet
T = 1000 jaar
HBN [m]
YRD [m]
XRD [m]
x 10^5
Hydra-Ring zonder onzekerheden - Hydra-Zoet
T = 3000 jaar
HBN [m]
YRD [m]
XRD [m]
x 10^5

B Vergelijking Hydra-zoet nieuwe en oude windstatistiek

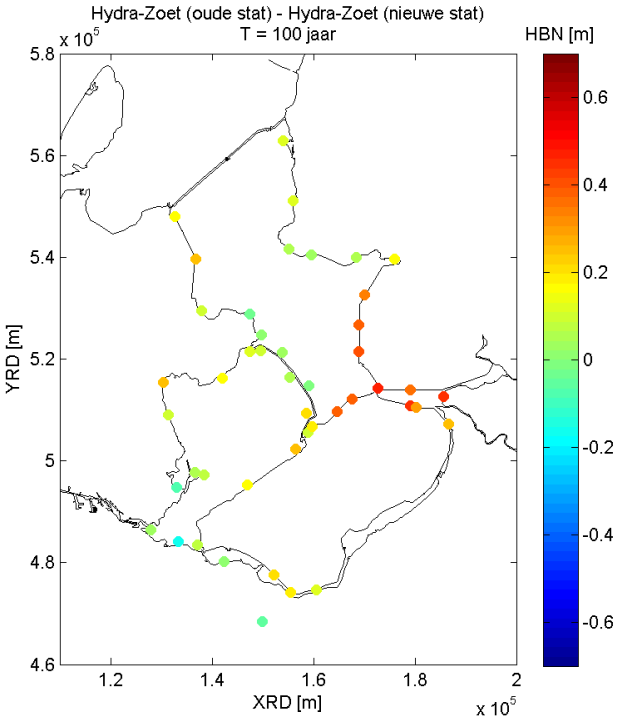
Voor vijf verschillende herhalingstijden (100, 300, 1000, 3000 en 10000 jaar) worden de ruimtelijke verdelingen van de verschillen tussen Hydra-Zoet met de nieuwe en oude windstatistiek op de waterstanden (in de figuren als MHW aangegeven) en HBN gegeven.

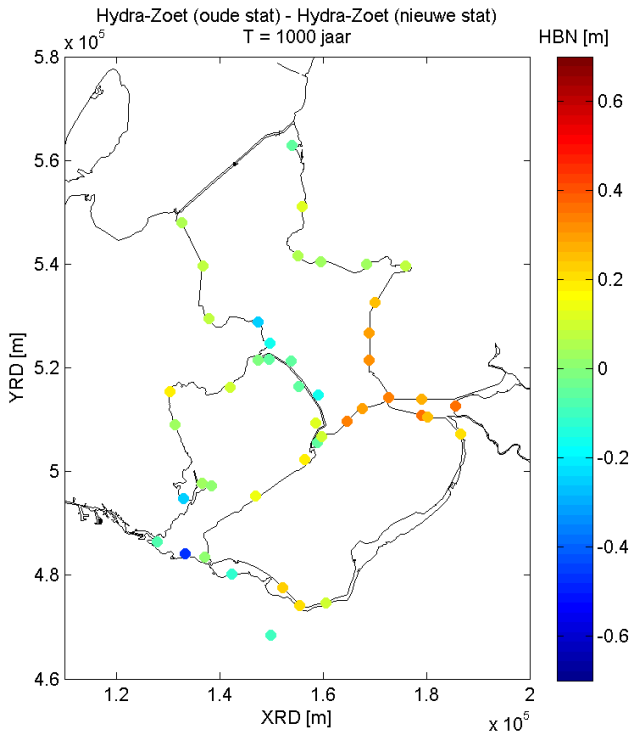
B.1 Lokale waterstand

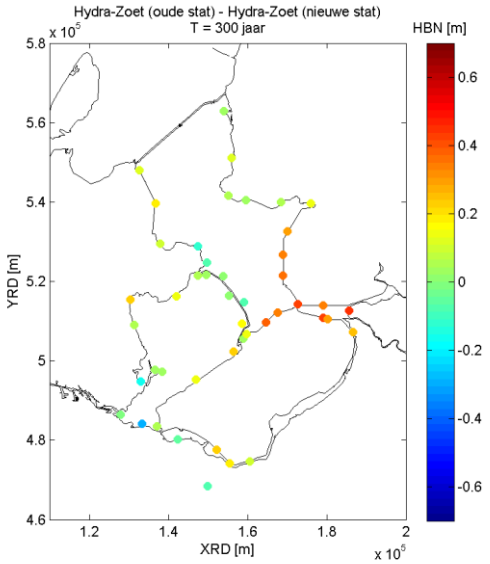


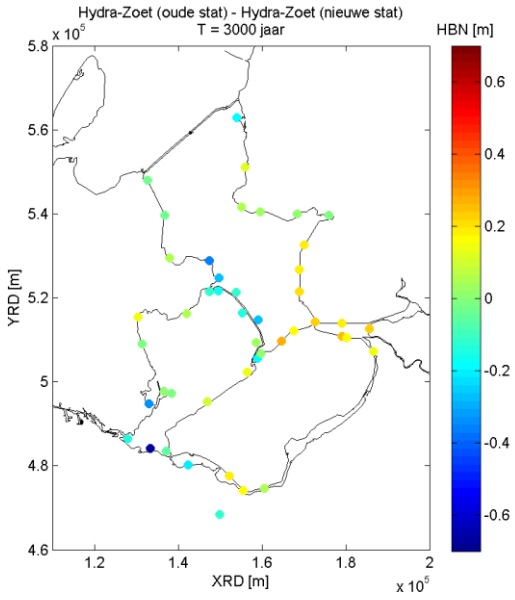

Hydra-Zoet (oude stat) - Hydra-Zoet (nieuwe stat)
T = 10000 jaar
MHW [m]
x 10^5
5.8
5.6
5.4
5.2
5
4.8
4.6
YRD [m]
1.2
1.4
1.6
1.8
2
XRD [m]
x 10^5
0.25
0.2
0.15
0.1
0.05
0
-0.05
-0.1
-0.15
-0.2
-0.25

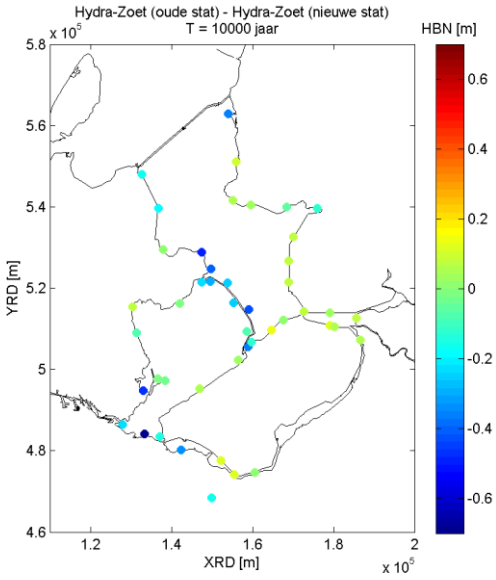
B.2 HBN


Hydra-Zoet (oude stat) - Hydra-Zoet (nieuwe stat)
T = 100 jaar
HBN [m]
x 10^5
5.8
5.6
5.4
5.2
5
4.8
4.6
YRD [m]
1.2
1.4
1.6
1.8
2
XRD [m]
x 10^5
0.6
0.4
0.2
0
-0.2
-0.4
-0.6


Hydra-Zoet (oude stat) - Hydra-Zoet (nieuwe stat)
T = 1000 jaar
HBN [m]
x 10^5
5.8
5.6
5.4
5.2
5
4.8
4.6
YRD [m]
1.2
1.4
1.6
1.8
2
XRD [m]
x 10^5
0.6
0.4
0.2
0
-0.2
-0.4
-0.6


Hydra-Zoet (oude stat) - Hydra-Zoet (nieuwe stat)
T = 300 jaar
HBN [m]
x 10^5
YRD [m]
XRD [m]
x 10^5
5.8
5.6
5.4
5.2
5
4.8
4.6
1.2
1.4
1.6
1.8
2
0.6
0.4
0.2
0
-0.2
-0.4
-0.6

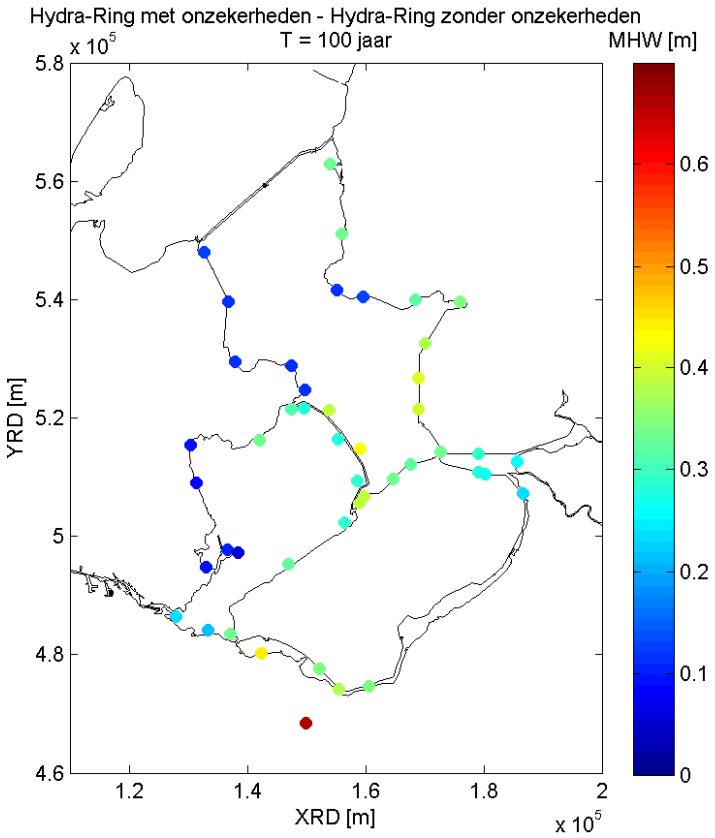

Hydra-Zoet (oude stat) - Hydra-Zoet (nieuwe stat)
T = 3000 jaar
HBN [m]
x 10^5
YRD [m]
XRD [m]
x 10^5
5.8
5.6
5.4
5.2
5
4.8
4.6
1.2
1.4
1.6
1.8
2
0.6
0.4
0.2
0
-0.2
-0.4
-0.6

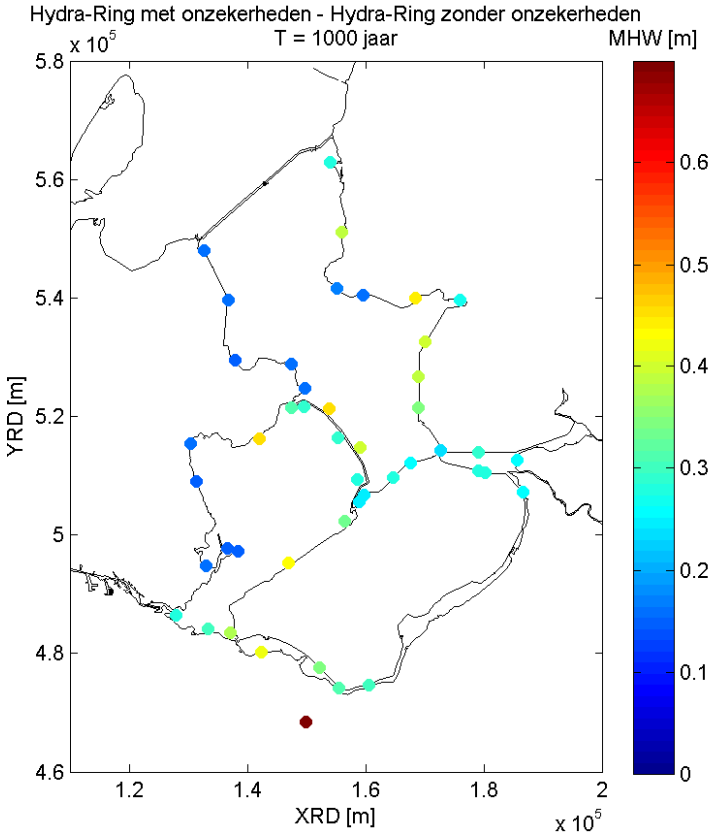

Hydra-Zoet (oude stat) - Hydra-Zoet (nieuwe stat)
T = 10000 jaar
HBN [m]
x 10^5
5.8
5.6
5.4
5.2
5
4.8
4.6
YRD [m]
1.2
1.4
1.6
1.8
2
XRD [m]
x 10^5
0.6
0.4
0.2
0
-0.2
-0.4
-0.6

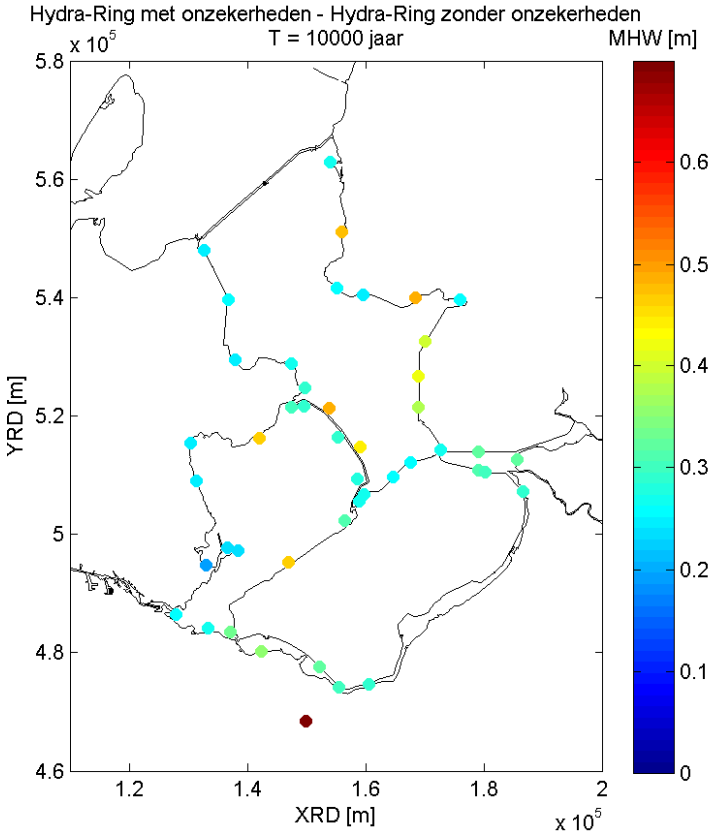
C Effect onzekerheden

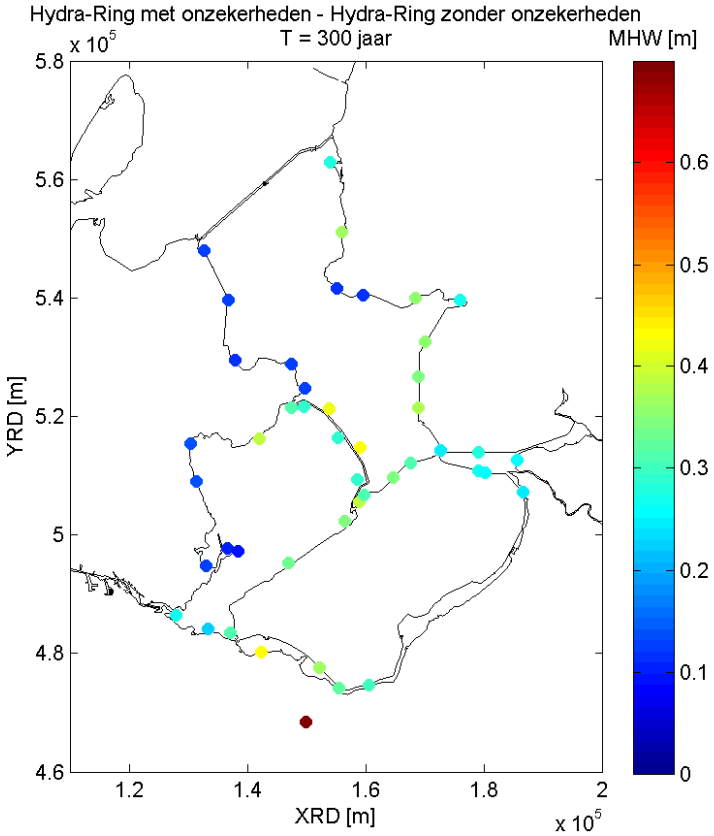
Voor vijf verschillende herhalingstijden (100, 300, 1000, 3000 en 10000 jaar) worden de ruimtelijke verdelingen van de verschillen tussen Hydra-Ring met en zonder onzekerheden op de waterstanden (in de figuren als MHW aangegeven) en HBN gegeven.

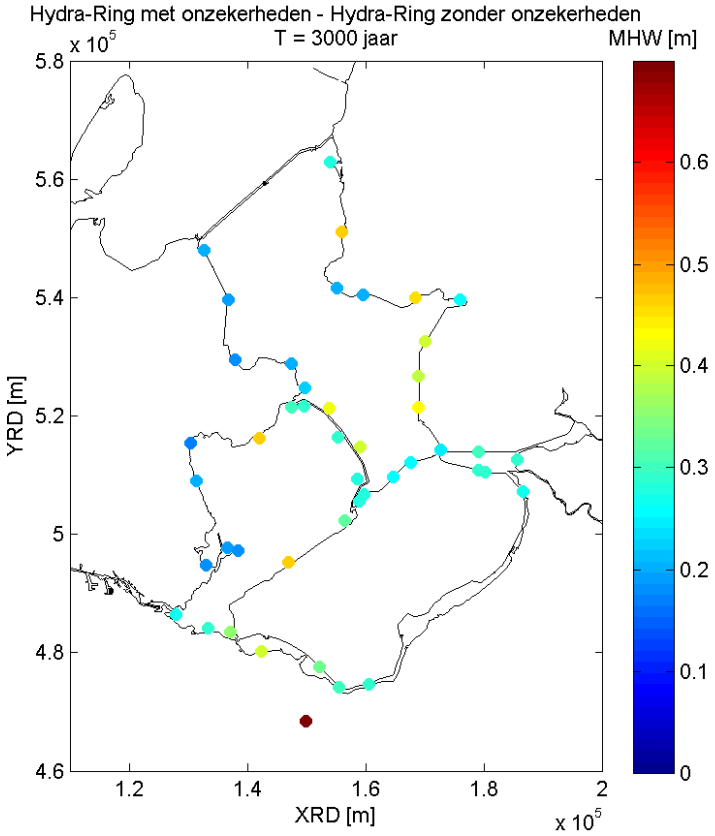
C.1 Lokale waterstand

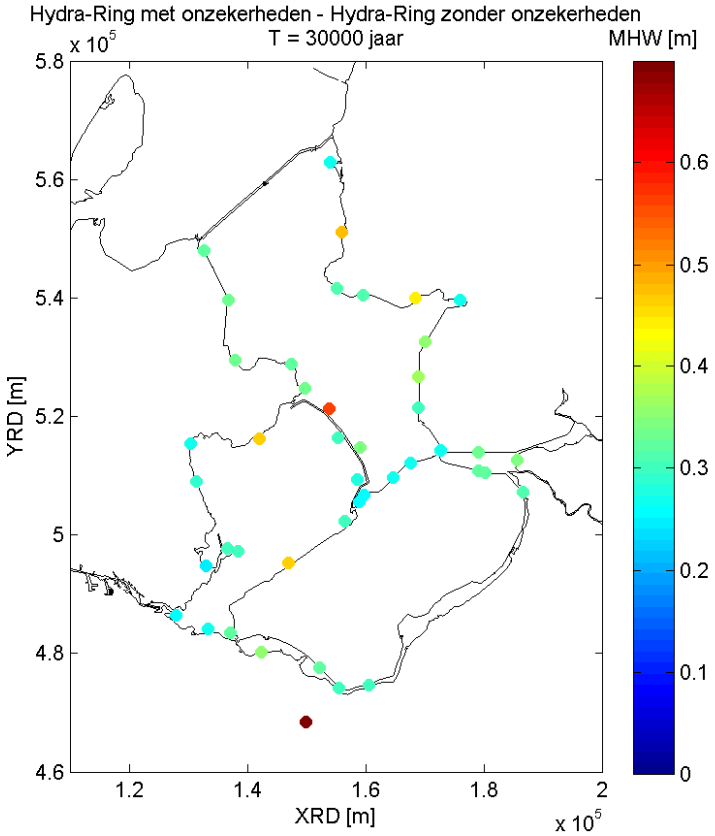

Hydra-Ring met onzekerheden - Hydra-Ring zonder onzekerheden
T = 100 jaar
MHW [m]
x 10^5
YRD [m]
XRD [m]
x 10^5
5.8
5.6
5.4
5.2
5
4.8
4.6
1.2
1.4
1.6
1.8
2
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0


Hydra-Ring met onzekerheden - Hydra-Ring zonder onzekerheden
T = 1000 jaar
MHW [m]
x 10^5
YRD [m]
XRD [m]
x 10^5
5.8
5.6
5.4
5.2
5
4.8
4.6
1.2
1.4
1.6
1.8
2
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0

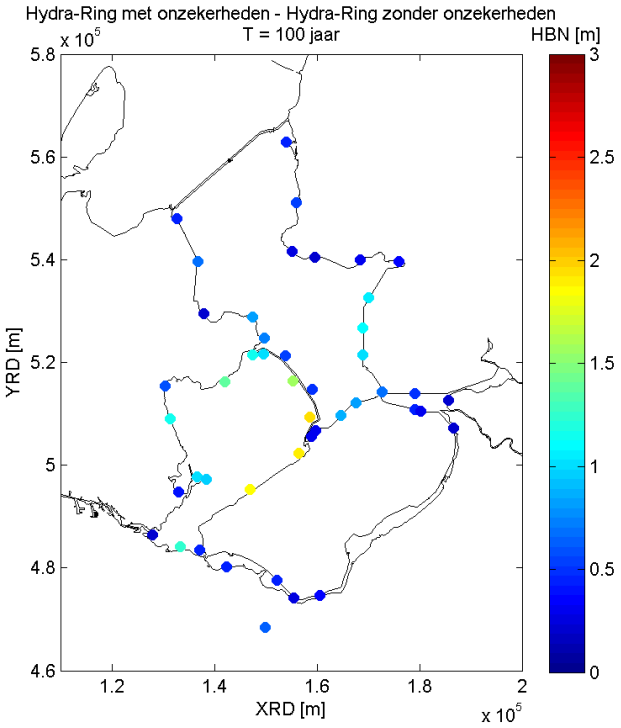

Hydra-Ring met onzekerheden - Hydra-Ring zonder onzekerheden
T = 10000 jaar
MHW [m]
x 10^5
5.8
5.6
5.4
5.2
5
4.8
4.6
YRD [m]
1.2
1.4
1.6
1.8
2
XRD [m]
x 10^5
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0

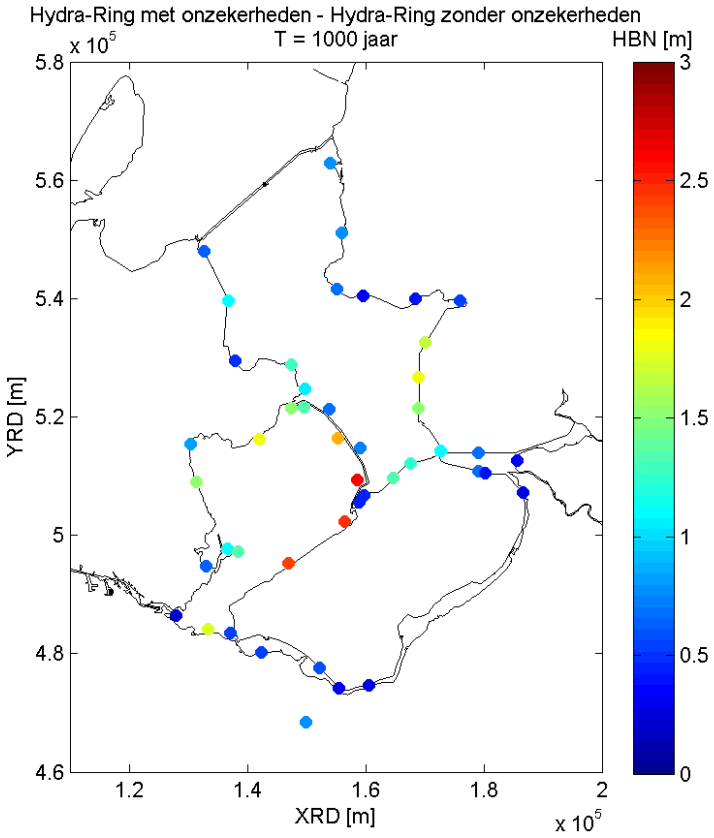

Hydra-Ring met onzekerheden - Hydra-Ring zonder onzekerheden
T = 300 jaar
MHW [m]
x 10^5
5.8
5.6
5.4
5.2
5
4.8
4.6
YRD [m]
1.2
1.4
1.6
1.8
2
XRD [m]
x 10^5
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0

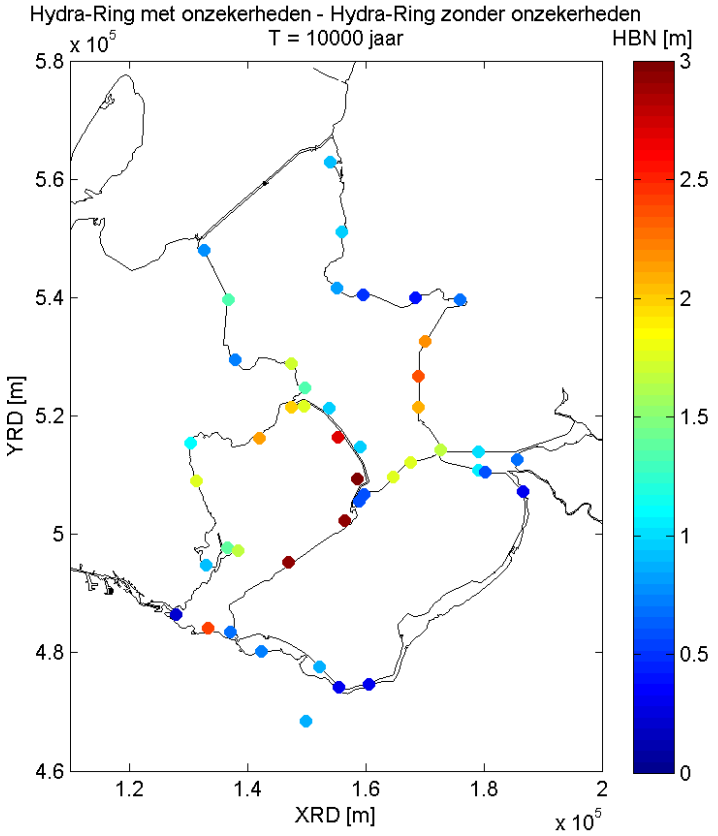

Hydra-Ring met onzekerheden - Hydra-Ring zonder onzekerheden
T = 3000 jaar
MHW [m]
x 10^5
YRD [m]
XRD [m]
x 10^5
5.8
5.6
5.4
5.2
5
4.8
4.6
1.2
1.4
1.6
1.8
2
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0

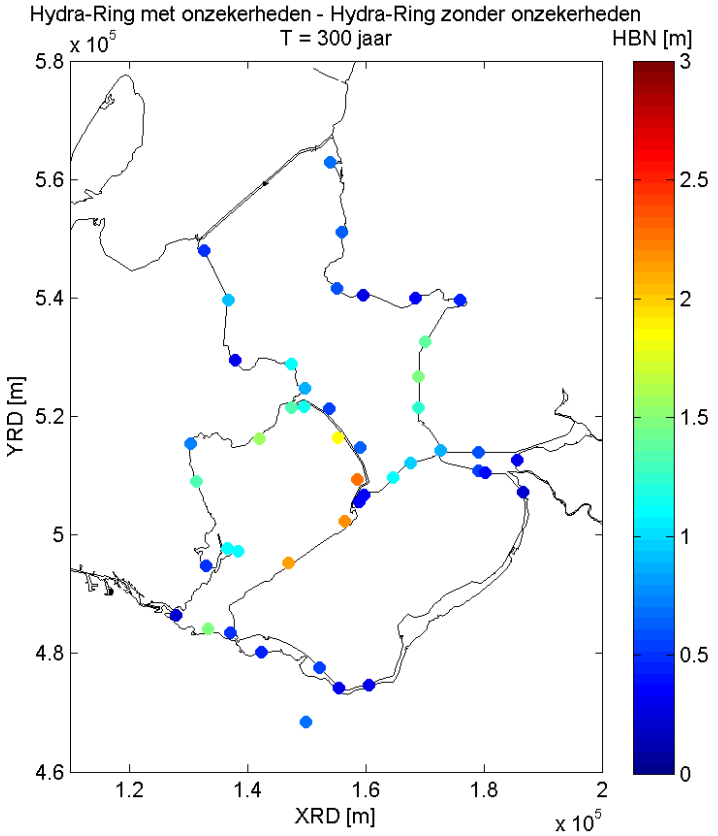

Hydra-Ring met onzekerheden - Hydra-Ring zonder onzekerheden
T = 30000 jaar
MHW [m]
x 10^5
YRD [m]
XRD [m]
x 10^5
5.8
5.6
5.4
5.2
5
4.8
4.6
1.2
1.4
1.6
1.8
2
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0

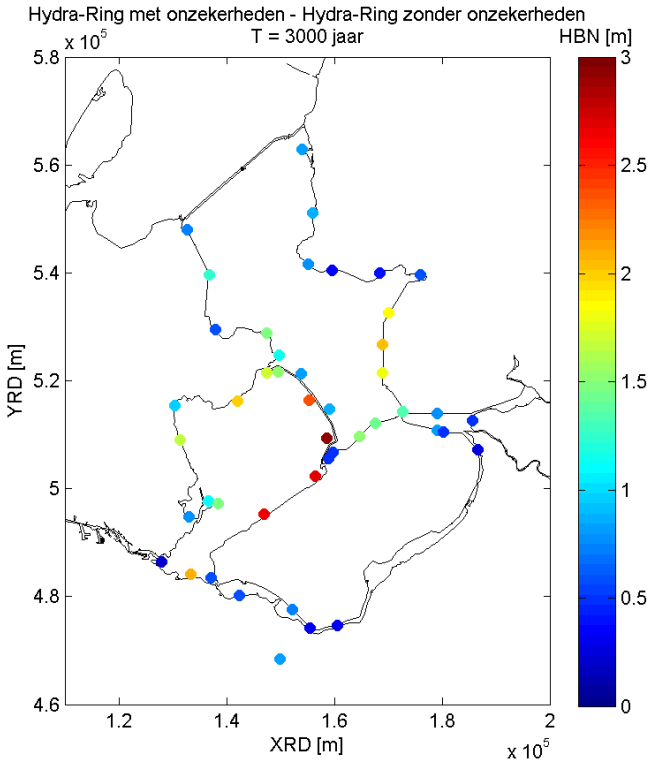
C.2 HBN

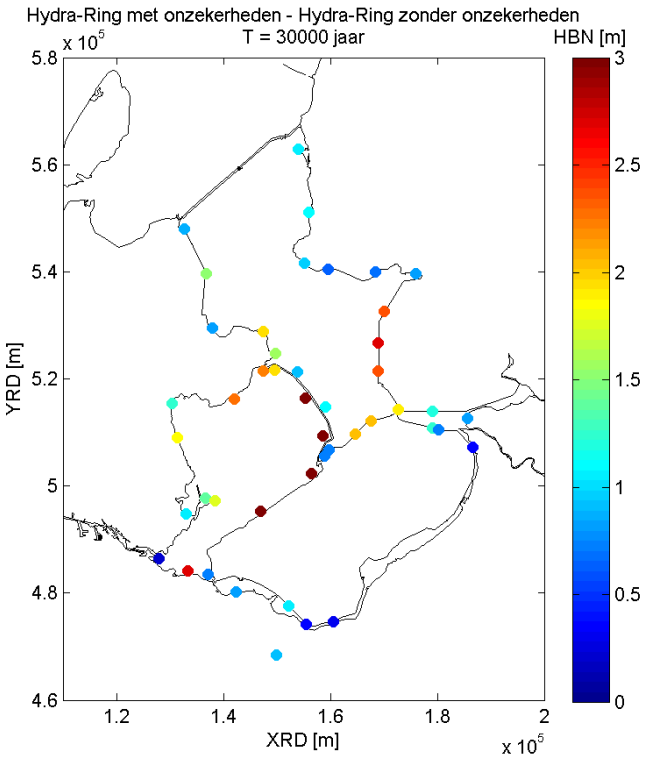

Hydra-Ring met onzekerheden - Hydra-Ring zonder onzekerheden
T = 100 jaar
HBN [m]
x 10^5
YRD [m]
XRD [m]
x 10^5
5.8
5.6
5.4
5.2
5
4.8
4.6
1.2
1.4
1.6
1.8
2
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0


Hydra-Ring met onzekerheden - Hydra-Ring zonder onzekerheden
T = 1000 jaar
HBN [m]
x 10^5
YRD [m]
XRD [m]
x 10^5
5.8
5.6
5.4
5.2
5
4.8
4.6
1.2
1.4
1.6
1.8
2
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0


Hydra-Ring met onzekerheden - Hydra-Ring zonder onzekerheden
T = 10000 jaar
HBN [m]
x 10^5
YRD [m]
XRD [m]
x 10^5
5.8
5.6
5.4
5.2
5
4.8
4.6
1.2
1.4
1.6
1.8
2
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0


Hydra-Ring met onzekerheden - Hydra-Ring zonder onzekerheden
T = 300 jaar
HBN [m]
x 10^5
YRD [m]
XRD [m]
x 10^5
5.8
5.6
5.4
5.2
5
4.8
4.6
1.2
1.4
1.6
1.8
2
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0


Hydra-Ring met onzekerheden - Hydra-Ring zonder onzekerheden
T = 3000 jaar
HBN [m]
x 10^5
5.8
5.6
5.4
5.2
5
4.8
4.6
YRD [m]
1.2
1.4
1.6
1.8
2
XRD [m]
x 10^5
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0


Hydra-Ring met onzekerheden - Hydra-Ring zonder onzekerheden
T = 30000 jaar
HBN [m]
x 10^5
5.8
5.6
5.4
5.2
5
4.8
4.6
YRD [m]
1.2
1.4
1.6
1.8
2
XRD [m]
x 10^5
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0