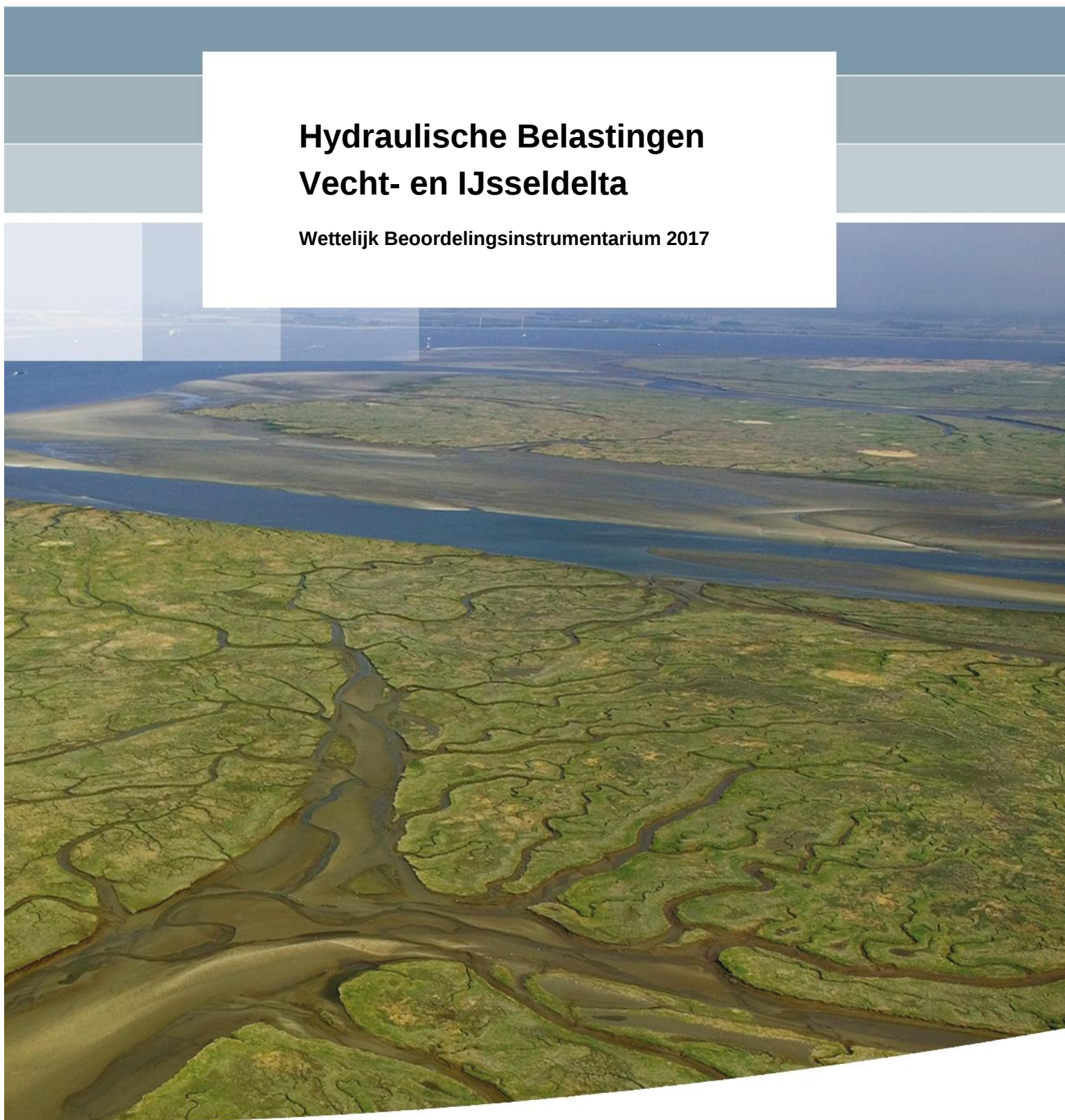


Hydraulische Belastingen Vecht- en IJsseldelta

Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017



Hydraulische Belastingen Vecht- en IJsseldelta

Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017

Ton Botterhuis
Joost den Bieman
Houcine Chbab

1230087-005

Titel

Hydraulische Belastingen Vecht- en IJsseldelta

Opdrachtgever

RWS - WV

Project

1230087-005

Kenmerk

1230087-005-HYE-0002

Pagina's

86

Trefwoorden

Hydraulische Belastingen, Vechtdelta, IJsseldelta, 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 WTI2011 is: de overstap naar de overstromingskansbenadering, nieuwe normering en het expliciet 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 harde keringen in de (Vecht-IJsseldelta (VIJD)). De resultaten zijn beoordeeld door middel van vershilanalyses met WTI-2011 en analyse van de ruimtelijke variatie.

De conclusies hieruit zijn dat de overgang op de nieuwe rekentechniek (van Hydra-Zoet (WTI-2011) naar Hydra-Ring) en modelschematisatie (actualisatie WAQUA modellen) leidt tot beperkte verschillen (circa 10 tot 15 cm) en de implementatie van de nieuwe afvoerstatistiek leidt tot kleine verschillen (circa 5 tot 10 cm) voor een groot deel van de locaties langs de Vecht, het Zwarte Water en het Zwarte Meer. Voor locaties langs de IJssel zijn geen goede referentieberekeningen beschikbaar, waardoor het effect van de nieuwe statistiek en rekenmethode niet kon worden bepaald.

Als gevolg van het meenemen van kennisonzekerheid neemt de lokale waterstand langs de Vecht, het Zwarte Water en de IJssel toe met ruim een halve meter. Deze toename is het grootst bij lange herhalingstijden. In het overgangsgebied tussen IJssel en Ketelmeer is het effect beperkt tot 0,3 m. Langs het Zwarte Meer is het effect van de onzekerheid meer dan een meter. De golfhoogte neemt toe met 0,1 tot bijna 0,4 m langs de IJssel, de Vecht en het Zwarte Water. Het hydraulisch belastingniveau neemt langs de IJssel toe met maximaal 0,8 m; langs de Vecht en het Zwarte Water is dit iets kleiner.

Het gebiedsdekkende overzicht van de marginale statistiek van de waterstanden geeft een ruimtelijk logisch en consistent beeld voor locaties met betrouwbare resultaten. Het gebiedsdekkende overzicht van de HBN's laat eveneens een logisch en consistent beeld zien. De ruimtelijke verdelingen van de golfhoogte lijken een realistisch beeld te geven.

Bij dit rapport worden spreadsheets geleverd met lokale waterstanden, HBN's en golfhoogtes voor de harde keringen in de Vecht- en IJsseldelta voor een zevental beschouwde herhalingstijden.

Titel

Hydraulische Belastingen Vecht- en IJsseldelta

Opdrachtgever

RWS - WVL

Project

1230087-005

Kenmerk

1230087-005-HYE-0002

Pagina's

86

Referenties

Plan van Aanpak WTI KPP 2016, maart 2016

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	Juni 2016	T. Botterhuis et al.		F. Diermanse		M. van Gent	
2	Aug 2016	T. Botterhuis et al.		J. Beckers		M. van Gent	
4	Dec 2016	T. Botterhuis et al.		J. Beckers		M. van Gent	
5	Apr 2017	T. Botterhuis		J. Beckers		M. van Gent	
		J. den Bieman					
		H. Chbab					

Status

Definitief

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Positionering rapportage in WBI-2017 structuur	1
1.2	Overgang naar WBI-2017	2
1.3	Doelstelling	6
1.4	Algemene uitgangspunten berekeningen	6
1.5	Aanpak	8
1.6	Producten	8
1.7	Totstandkoming	9
2	Belastingmodel HB Vecht- en IJsseldelta	11
2.1	Inleiding	11
2.2	Systeembeschrijving en dijktrajecten	11
2.2.1	Systeembeschrijving	11
2.2.2	Dijktrajecten en veiligheidsnormen	11
2.3	Belastingmodel Vecht- en IJsseldelta HR-2006/WTI-2011	13
2.4	Belastingmodel Hydra-Ring	13
2.5	Statistiek basisstochasten	16
2.5.1	Afvoerstatistiek van de IJssel bij Olst	16
2.5.2	Afvoerstatistiek van de Overijsselse Vecht bij Dalfsen	17
2.5.3	Statistiek IJsselmeerpeil	18
2.5.4	Windstatistiek	19
2.5.5	Beheersituatie Ramspolkering	21
2.6	Modellering tijdsverlopen basisstochasten	21
2.7	Extra stochasten kennisonzekerheid	23
2.7.1	Modellering kennisonzekerheid	23
2.7.2	Modelonzekerheid waterstand	23
2.7.3	Modelonzekerheid golfcondities	24
2.7.4	Statistische onzekerheid basisstochasten	25
2.8	Probabilistische rekentechniek	30
3	Verschilanalyse HB Vecht- en IJsseldelta	33
3.1	Inleiding	33
3.2	Werkwijze analyse resultaten HR berekening	33
3.3	Uitgangspunten berekening	33
3.3.1	Algemeen	33
3.3.2	Instellingen Hydra's	34
3.4	Vergelijking tussen nieuwe en oude statistiek	37
3.4.1	Inleiding	37
3.4.2	Resultaten lokale waterstand	39
3.4.3	Resultaten hydraulisch belastingniveau	40
3.5	Vergelijking tussen Hydra-Zoet en Hydra-Ring	42
3.5.1	Inleiding	42
3.5.2	Resultaten lokale waterstand	43
3.5.3	Resultaten hydraulisch belastingniveau	48
3.6	Effect onzekerheden	51
3.6.1	Inleiding	51
3.6.2	Resultaten lokale waterstand	51

3.6.3	Resultaten golfhoogte	52
3.6.4	Resultaten hydraulisch belastingniveau	53
3.7	Totale verschil WTI-2017 en WBI-2017	54
3.7.1	Inleiding	54
3.7.2	Effect op lokale waterstand	55
3.7.3	Effect op hydraulisch belastingniveau	56
4	Resultaten HB Vecht- en IJsseldelta	59
4.1	Inleiding	59
4.2	Uitgangspunten probabilistische productieberekeningen	59
4.3	Keuze rekentechniek	59
4.4	Rekenresultaten lokale waterstand	63
4.5	Rekenresultaten golfhoogte	65
4.6	Rekenresultaten hydraulisch belastingniveau	67
4.7	Rekentijden	71
4.8	Aansluiting watersystemen	72
4.8.1	Ketelmeer/Vossemeer – IJsseldelta	72
4.8.2	IJssel en IJsseldelta	75
5	Conclusies en aanbevelingen	81
5.1	Inleiding	81
5.2	Conclusies	81
5.3	Aanbevelingen	83
6	Referenties	85

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 step 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 in the Vecht- en IJsseldelta. The results were assessed by analysing the probability exceedance curves and differences with WTI-2011, as well as by analysing the spatial contours of the Hydraulic Loads.

The conclusions from this analysis are that the transition to a new probabilistic model (from Hydra-Zoet to Hydra-Ring) and a new model schematization (new WAQUA models) leads to small differences of up to 15 cm. The implementation of the new discharge statistics leads to small differences in hydraulic loads (approximately 5 to 10 cm) for a large part of the locations along the Vecht, the Zwarte Water and the Zwarte Meer. For locations along the IJssel delta no reference results are available so the effect of updated statistics and calculation methods could not be analyzed.

Due to the incorporation of statistical and model uncertainties the local water level increases with more than 0,5 m along the Vecht, Zwarte Water and the IJssel. The increase is largest for large return periods. In the region between Ketelmeer and IJssel the effect is not more than 0,3 m. Along Zwarte Meer it is more than 1 m. The wave height increases with 0,1 – 0,4 m along the IJssel, Vecht and Zwarte Water. HBN increases with at most 0,8 m along the IJssel. Along the Vecht and Zwarte Meer the effect of uncertainties on HBN is a bit smaller.

The marginal statistics of the local water level give spatially coherent and consistent values for sites with results. The area-wide overview of the HBN allows give logical and consistent results. The spatial distributions of wave heights seem to give realistic results.

Excel files with the Hydraulic Loads (water levels, HBN's, significant wave heights) for all locations and each of the seven frequencies have been produced at all locations in the Vecht- en IJssel delta and will be attached to this report.

1 Inleiding

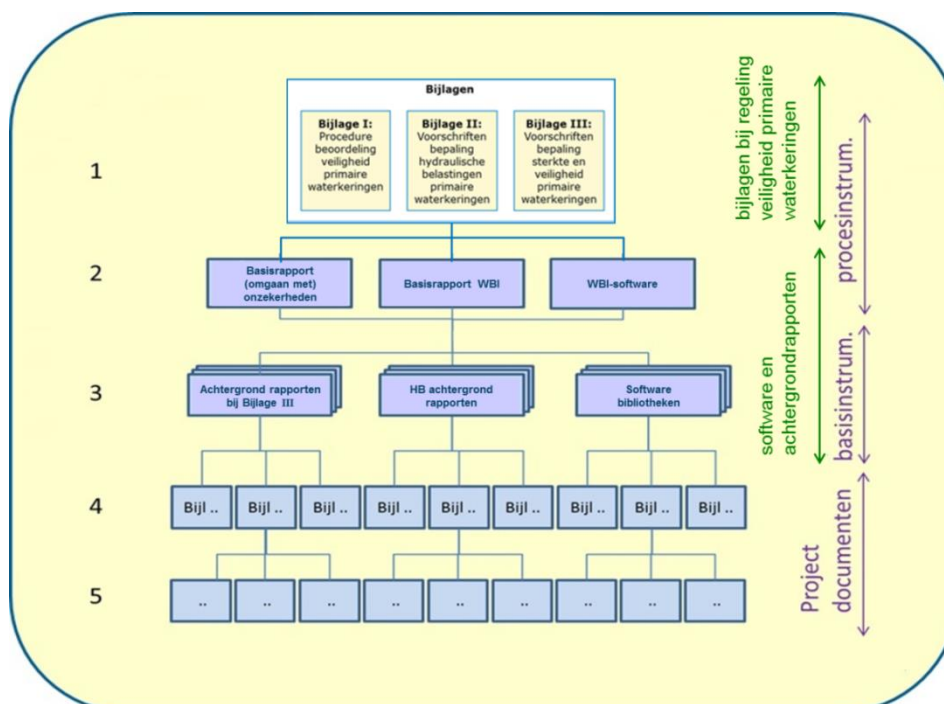
1.1 Positionering rapportage in WBI-2017 structuur

De Waterwet schrijft voor dat de primaire waterkeringen beoordeeld 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 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 de wijze waarop de primaire waterkering moet worden beoordeeld om te komen tot een oordeel over de veiligheid van de gehele kering.

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



Figuur 1.1 Boomstructuur documentatie WBI 2017

De tweede laag wordt gevormd door een aantal basisrapporten en applicatiesoftware. De basisrapporten bevatten uitgebreide beschrijvingen van de Hydraulische Belastingen (afgekort HB) en het Voorschrift Toetsen op Veiligheid (VTV) en hun onderlinge samenhang. Het ‘achtergrondrapport HB’ beschrijft voor alle watersystemen het instrumentarium, de gehanteerde uitgangspunten, het belastingmodel (inclusief gehanteerde verdelingen van basisstochasten en kennisonzekerheden), evenals de resultaten van 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 de IJssel- en Vechtdelta zijn verkregen, hoe de resultaten er uit zien en hoe ze zich verhouden tot WTI-2011. Naast de IJssel- en Vechtdelta zijn soortgelijke rapportages voor het Merengebied, Bovenrivierengebied, kustgebieden en Benedenrivierengebied geschreven. Dit zijn dus allemaal specialistische achtergrondrapporten. Een aggregatie van deze rapporten vindt plaats in het ‘achtergrondrapport HB’.

Alvorens de doelstelling van voorliggende rapportage te noemen (Paragraaf 1.3), gaan we in Paragraaf 1.2 in op de belangrijkste verschillen op het gebied van HB bij de overgang naar WBI-2017. Dit is een algemene beschrijving die ook terug te vinden is in “Bijlage II Voorschriften bepaling hydraulische belasting primaire waterkeringen” en het basisrapport WBI (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 vigerend 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 de Vechtdelta staan bekend onder de naam CR2011, concept randvoorwaarden. Voor de IJsseldelta zijn destijds geen nieuwe HR afgeleid. 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 tevoren gekozen waterkeringssectie. In 2017 wordt een overstap gemaakt naar een overstromingskansbenadering. Dit houdt in dat gekeken wordt naar de kans op falen (rekening houdend met meerdere faalmechanismen) van een dijkkring of dijkkringtraject, 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 in combinatie met een beschouwing van de slachtofferrisico's (zie samenvatting in Deltares, 2011) en op 4 juli 2016 aangenomen door de tweede kamer¹.

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 staan beschreven in de Scientific Documentation Hydra-Ring (Diermanse et al, 2016). Hierin staan daarnaast beschreven 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 volgens het VTV vormt een gelaagd proces. Er zijn drie lagen: van eenvoudig via gedetailleerd naar een toets op maat. Voor de gedetailleerde toets wordt onderscheid gemaakt in een toets op dijkvakniveau en een toets op trajectniveau. Bij de toets op vakniveau wordt onderscheid gemaakt tussen een semi-probabilistische en volledig probabilistische toets. Voor de eenvoudige toets en de semi-probabilistische toets op vakniveau zijn Hydraulische Belastingen (HB) nodig om de toets uit te voeren (eenvoudige toets) of worden rekenwaarden voor de belasting bepaald die met de rekenwaarde voor de sterkte wordt vergeleken (semi-probabilistische toets op vakniveau). De rekenwaarde van de belasting is gedefinieerd als een waarde met een overschrijdingskans die getalsmatig gelijk is aan de norm.

Bovenstaande uitleg is in Tabel 1.1 schematisch weergegeven. In deze studie wordt ingegaan op de rechterkolom van de tabel. Voor de eenvoudige toets worden de HB berekend en opgeleverd als product. Voor de semi-probabilistische toets op vakniveau worden de rekenwaarden voor de belasting door Ringtoets (met als rekenhart Hydra-Ring) bepaald, wanneer de toetsers de toetsing uitvoert. 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 of om een verschilanalyse uit te voeren.

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 waterstanden, HBN's 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 Vecht- en IJsseldelta, Meren, Bovenrivieren, Benedenrivieren en Kust. In deze rapportage beschouwen we de Vecht-IJsseldelta. Aan de hand van een groot aantal berekeningen zijn Hydraulische Belastingen (HB) voor de keringen in de Vecht- en IJsseldelta afgeleid. Deze bestaan uit:

- marginale statistiek voor lokale waterstand en significante golfhoogte. Deze worden afgeleid voor de eenvoudige toets en vormt 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 HB die de toetser uiteindelijk zelf met Ringtoets afleidt voor de diverse toetssporen.

De maatgevende golfcondities per waterstandsniveau ten behoeve van de toetsing van bekledingen zijn niet opgenomen in deze rapportage. De werking van de module om deze belastingen te genereren en resultaten op een aantal representatieve locaties worden in een separaat rapport besproken.

1.3 Doelstelling

De doelstelling van dit rapport is driedelig:

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 zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd.

- Tot het gebied van de Vecht- en IJsseldelta behoren alle riviertakken en meren van de Overijsselse Vecht, Zwarte Water, Zwarte Meer en IJssel (regio's 5 en 6 in Figuur 1.3). De bovengrenzen² van de Vecht- en IJsseldelta liggen bij:
 - Kmr 36 langs de Overijsselse Vecht en
 - Kmr 957 langs de IJssel.
- 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 herhalingsstijden. De relevante herhalingsstijden worden afgeleid van de wettelijke 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).

² Dit is een indicatie van grenzen, deze kunnen aangepast worden in verband met goede aansluitingen van de Vecht- en IJsseldelta met enerzijds de Bovenrivieren en anderzijds het IJsselmeer. Hier wordt in paragraaf 4.8 nader op ingegaan.

- De betrouwbaarheid van de resultaten wordt mede bepaald door de keuze van de probabilistische rekentechniek. Deze is voor alle gebieden in overleg met Hydra-Ring ontwikkelaars vastgesteld. Hiermee 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 Overzichtskartaal 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 opgeleverde producten die beschreven staan in Paragraaf 1.7 zijn gebaseerd op de fases 1 en 2. Dat betekent dat de geleverde Hydraulische Belastingen niet zijn afgeleid met de optimale rekeninstellingen, welke in Fase 3 zijn bepaald. Dit betekent dat voor de wettelijke toetsing van een dijkvak of dijkkring de HB voor de betreffende locaties dus opnieuw met WBI-2017 berekend zullen moeten worden. De verwachting is dat deze HB slechts op enkele uitzonderingen na overeen zullen komen met resultaten in dit rapport.

1.6 Leeswijzer

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

- 1 Beschrijving van het belastingmodel van WBI-2017 voor de keringen in de Vecht- en IJsseldelta (statistiek van basisstochasten, onzekerheden en onderlinge correlaties en de database voor 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.

1.7 Producten

In dit rapport zijn de volgende Hydraulische Belastingen bepaald:

- Lokale waterstanden (in figuren aangeduid met MHW) t.b.v. eenvoudige toets en semi-probabilistische toets op vakniveau,
- Golfhoogte t.b.v. eenvoudige toets,
- Hydraulisch Belastingniveau (HBN) t.b.v. semi-probabilistische toets op vakniveau,
- Golfcondities per waterstandsniveau voor toetsing bekledingen t.b.v. semi-probabilistische toets op vakniveau.

Bij dit rapport zijn de volgende producten opgeleverd:

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

1.8 Totstandkoming

Bijdragen aan dit document en onderliggende rekenresultaten zijn geleverd door:

- Ton Botterhuis (HKV Lijn in Water)
- Houcine Chbab
- Joost den Bieman
- Jamie Morris
- Alfons Smale
- 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 Ferdinand Diermanse 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 Belastingmodel HB Vecht- en IJsseldelta

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk staat een beschrijving van het belastingmodel voor de keringen in de Vecht- en IJsseldelta (VIJD) in WBI-2017. We beginnen met een korte beschrijving van het belastingmodel dat ten grondslag ligt aan de hydraulische randvoorwaarden uit HR2006/WTI-2011. Daarna komen de verschillen en veranderingen aan bod die doorgevoerd zijn in WBI-2017.

2.2 Systeembeschrijving en dijktrajecten

2.2.1 Systeembeschrijving

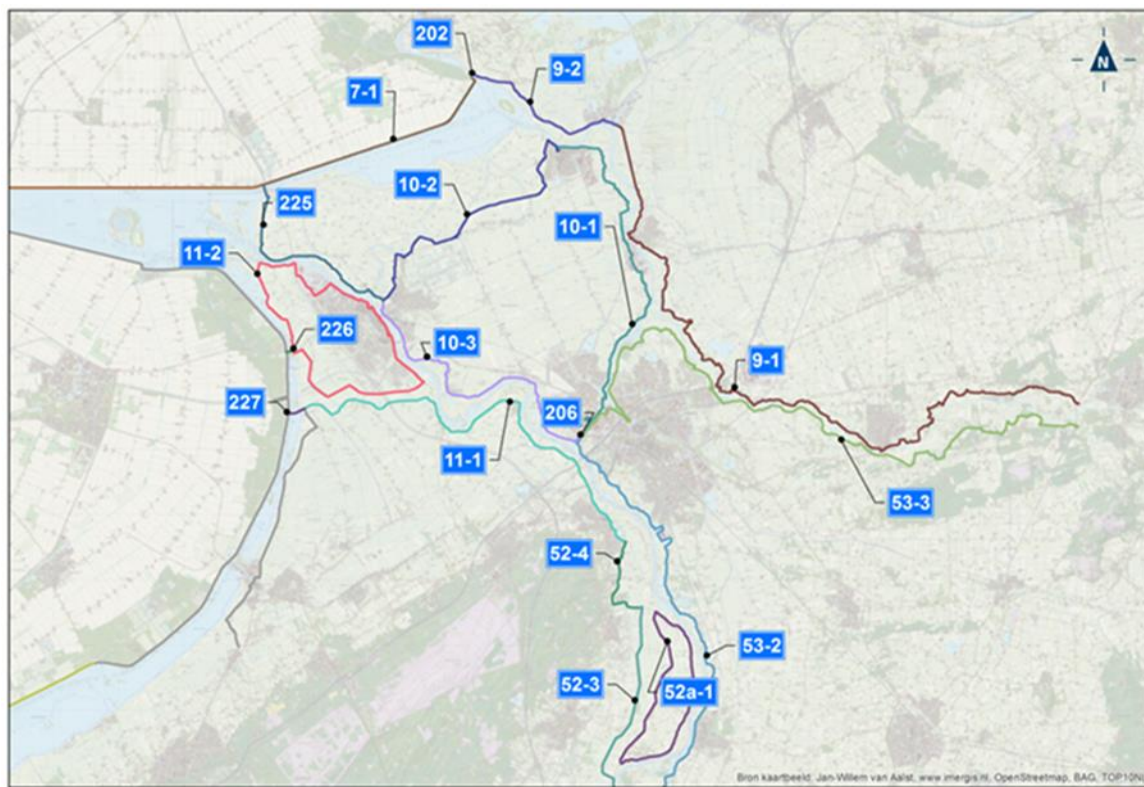
De Vechtdelta bestaat uit het gebied van de Overijsselse Vecht vanaf km 36 tot de Ramspolkering in het Zwarte Meer, inclusief het Zwarte Water tot de Keersluis Zwolle en het Zwolle-IJsselkanaal. De buitendijkse polders langs het Zwarte Meer (bv. Kampereiland) en de waterlopen die deze polders doorsnijden, maken ook deel uit van de Vechtdelta.

In de Vechtdelta bevindt zich een aantal keersluizen. De belangrijkste is de Ramspolkering, welke bij een stormsituatie uit westelijke richting hoge waterstanden op het Zwarte Meer moet voorkomen, die veroorzaakt worden door opstuwung vanuit het IJsselmeer/Ketelmeer. Wanneer het waterpeil boven 0,5 m+NAP komt en de stromingsrichting oostelijk is (van het Ketelmeer richting Zwarte Meer), gaat de Ramspolkering dicht. Voor de Overijsselse Vecht bovenstrooms van de delta is voornamelijk de afvoer bepalend voor hoge waterstanden. De wind heeft bovenstrooms op de Vecht (nabij Dalfsen) een geringe invloed op de waterstand. Dit verandert echter verder benedenstrooms op het Zwarte Water. Hier gaat het systeem geleidelijk over van afvoer-gedomineerd naar wind-gedomineerd. Het Zwarte Meer is bij geopende Ramspolkering voornamelijk een wind-gedomineerd systeem. Echter, wanneer de Ramspolkering gesloten is, wordt de invloed van de wind beperkt en speelt ook de afvoer een rol in de hoogte van de optredende waterstanden. Het Kampereiland vormt een bijzonder gebied in de Vechtdelta. Dit is het buitendijkse gebied tussen het Zwarte Meer en de Kamperzeedijk. De regionale kering die het Kampereiland beschermt tegen hoge waterstanden op het Zwarte Meer heeft een gemiddelde hoogte van 1,70 m+NAP met variaties van $\pm 0,20$ m.

De IJsseldelta omvat het gebied van de IJssel benedenstrooms van km 974 tot de IJsselmonding ($\pm$ km 1000) inclusief het Reevediep. Door de inzet van het Reevediep (afvoeren van een deel van de IJsselafoer op de randmeren) kan de invloed van de IJsselafoer verder verschoven worden richting Vossemeer en Ketelmeer. Hoge waterstanden in de IJsseldelta worden voornamelijk veroorzaakt door hoge afvoeren op de IJssel, hoge meerpeilen al dan niet in combinatie met stormen uit de noordwestelijke richting of combinaties van beide. Afvoeren spelen voor de meeste locaties in de IJsseldelta een rol. Alleen bij de meest benedenstroomse locaties is de rol van de afvoer beperkt tot klein. De wind is bij deze locaties bepalend voor hoge waterstanden. In het overgangsgedebiet (tussen Kampen en Zwolle), speelt de wind ook een belangrijke rol.

2.2.2 Dijktrajecten en veiligheidsnormen

Het systeem van de VIJD omvat de dijktrajecten uit Figuur 2.1 en Tabel 2.1 (daarin ook de indeling in dijkkringgebieden en bijbehorende normen). De (buiten)wateren van de VIJD zijn: Zwarte Meer, Zwarte Water, IJssel en Overijsselse Vecht. N.B. het Vossemeer grenst aan de IJsseldelta maar maakt volgens de normering geen onderdeel uit van de buitenwateren van de IJsseldelta maar van het IJsselmeer.



Figuur 2.1 Dijktrajecten Vecht- en IJsseldelta.

Tabel 2.1 Dijktrajecten langs de Vecht- en IJsseldelta met de normen tot en vanaf 1-1-2017

Dijk- traject	Dijk- ring	Norm tot 1-1-2017	Norm vanaf 1-1-2017		Naam dijkkring	Riviertak/meer
			ondergrens	signaalwaarde		
7-1	7	1:4.000	1:1.000	1:3.000	Noordoostpolder	Zwarte Meer
9-1	9	1:1.250	1:300	1:1.000	Vollenhove	Zwarte Water/Vecht
9-2	9	1:1.250	1:1.000	1:3.000	Vollenhove	Zwarte Meer
10-1	10	1:2.000	1:1.000	1:3.000	Mastenbroek	Zwarte Water
10-2	10	1:2.000	1:1.000	1:3.000	Mastenbroek	Zwarte Meer
10-3	10	1:2.000	1:3.000	1:10.000	Mastenbroek	IJssel
11-1	11	1:2.000	1:1.000	1:3.000	IJsseldelta	IJssel/Vossemeer
11-2	11	1:2.000	1:1.000	1:3.000	IJsseldelta	IJssel/Vossemeer
52a-1	-	1:1.250	1:1.000	1:3.000	Oost-Veluwe	IJssel
52-3	52	1:1.250	1:1.000	1:3.000	Oost-Veluwe	IJssel
52-4	52	1:1.250	1:1.000	1:3.000	Oost-Veluwe	IJssel
53-2	53	1:1.250	1:3.000	1:10.000	Salland	Zwarte Water/Vecht
53-3	53	1:1.250	1:3.000	1:10.000	Salland	IJssel
202	-	1:4.000	1:3.000	1:10.000	Kadoelersluis	-
206	-	1:2.000	1:3.000	1:10.000	Spoldersluis	-
225	-	1:2000	1:10.000	1:30.000	Ramspolkering	-
226	-	1:4.000	1:1.000	1:3.000	Roggebotsluis	-
227	-	-	1:1.000	1:3.000	Reevedam (gepland)	-

In WBI-2017 wordt uitgegaan van de nieuwe normen zoals afgebeeld in Tabel 2.1. Deze zijn gebaseerd op overstromingsrisico's in plaats van overschrijdingskansen. In de nieuwe normering is het gebied van de VIJD, evenals de rest van de primaire keringen in Nederland, ingedeeld in verschillende dijktrajecten (in plaats van dijkringen). Elk dijktraject heeft een eigen veiligheidsnorm. Deze variëren van 1:300 tot 1:10.000 per jaar. Een grafische weergave van de dijktrajecten³ in de IJssel- en Vechtdelta is gegeven in Figuur 2.1. N.B. de dijktrajecten 226, 227, 11-1, 11-2 en 11-3 hebben betrekking op het Reevediep en zijn ten opzichte van de dikringindeling tot 2017 nieuwe trajecten. Ook dijktraject 52a-1 is nieuw en heeft betrekking op de nieuwe dijkkring langs de watergeul Veessen-Wapenveld en de IJssel. De verbindende Ramspolkering heeft nummer 225 in het nieuwe normenstelsel.

2.3 Belastingmodel Vecht- en IJsseldelta HR-2006/WTI-2011

De vigerende Hydraulische Randvoorwaarden voor de Vechtdelta zijn bepaald met het probabilistische model Hydra-VIJ (Geerse, 2003). De vigerende Hydraulische Randvoorwaarden voor de IJsseldelta zijn bepaald met de zogenoemde verhanglijnenmethode. Bij deze methode worden de waterstanden berekend met twee combinaties van bedreigingen (de belastinggevallen). Deze belastinggevallen zijn:

- een extreem hoge windsnelheid (overschrijdingskans 1/2.000 per jaar) in combinatie met de rivierafvoer die 1x per jaar wordt overschreden.
- een extreem hoge rivierafvoer (overschrijdingskans 1/2.000 per jaar) in combinatie met een benedenstroomse waterstand van NAP + 1,00 m.

Het verloop van de waterstanden langs de rivier behorende bij een bepaald belastinggeval wordt een verhanglijn genoemd. In het overgangsgebied kruisen beide verhanglijnen. Uitgaande van deze beide verhanglijnen is het gecombineerde verloop van de waterstand onder maatgevende omstandigheden geconstrueerd. Meer details over de verhanglijnmethode voor de IJsseldelta zijn beschreven in (Hartman, 2005).

In WTI-2011 zijn de randvoorwaarden voor alleen de Vechtdelta geactualiseerd. Hierbij is gebruik gemaakt van Hydra-zoet. Hoewel Hydra-Zoet ook in staat is om de randvoorwaarden voor de IJsseldelta te berekenen, is hier in WTI-2011 uiteindelijk van afgezien, daarom zijn Hydra-Zoet berekeningen van de IJsseldelta van WTI-2011 niet beschikbaar. Het belastingmodel van Hydra-zoet geldt als uitgangspunt voor het belastingmodel in Hydra-Ring, zie paragraaf 2.4.

2.4 Belastingmodel Hydra-Ring

Hydra-Ring kent 18 regio's; de gebieden van de Vecht en IJsseldelta zijn in Hydra-Ring gedefinieerd als regio 5 en regio 6, Tabel 2.2 (zie ook Figuur 1.3).

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

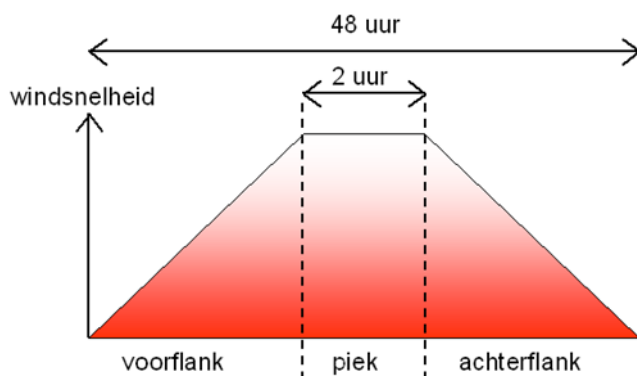
1. Bovenrivieren (Rijn)	7. IJsselmeer	13. Hollandse Kust Zuid
2. Bovenrivieren (Maas)	8. Markermeer	14. Oosterschelde
3. Benedenrivieren (Rijn)	9. Waddenzee Oost	15. Westerschelde
4. Benedenrivieren (Maas)	10. Waddenzee West	16. Duinen
5. IJsseldelta	11. Hollandse Kust Noord	17. Europoort
6. Vechtdelta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

³ De figuur bevat alleen de dijktrajecten van de VIJD volgens de oude normen. Delen van Vossemeer en Ketelmeer kunnen mogelijk onderdeel worden van de IJsseldelta. Door de inzet van het Reevediep kan de invloed van de IJsselafoer verder verschoven worden richting Vossemeer en Ketelmeer (omdat een deel van de IJsselafoer op deze randmeren wordt afgevoerd). De dijktrajecten langs het Ketelmeer/Vossemeer ontbreken echter in Figuur 2.1.

De belastingmodellen voor de regio's 5 en 6 zijn identiek met dien verstaande dat voor regio 5 de statistiek van de IJssel bij Olst geldt en voor regio 6 die van de Overijsselse Vecht bij Dalfsen. De afvoer van de IJssel bij Olst is gecorreleerd met die van de Overijsselse Vecht bij Dalfsen. In dit rapport spreken we daarom van het belastingmodel voor de VIJD. Dit belastingmodel gaat uit van de volgende basisstochasten:

- Afvoer van de IJssel bij Olst,
- Afvoer van de Overijsselse Vecht bij Dalfsen,
- Meerpeil van het IJsselmeer
- Windsnelheid bij Schiphol
- Windrichting bij Schiphol
- Beheersituatie Ramspolkering

De stormduur/vorm geldt niet als basisstochast. De duur van de storm heeft een trapeziumverloop met 48 uur in de basis en 2 uur in de top en is afgebeeld in Figuur 2.2 (Geerse, 2003). De stormduur is onveranderd ten opzichte van WTI-2011.



Figuur 2.2 Schematische weergave van het tijdsverloop van de storm (windsnelheid).

De windrichting bij Schiphol geldt als een discrete stochast. Er worden 16 windsectoren van 22,5 graden beschouwd. In de productieberekeningen zijn echter enkel de westelijke windrichtingen, ZW t/m N, doorgerekend. De waterstanden berekend bij windsnelheid nul zijn representatief voor alle combinaties met oostelijke windrichtingen. Het belastingmodel voor de VIJD houdt rekening met winddraaiing tijdens de storm. Deze is onveranderd ten opzichte van WTI-2011, zie voor een beschrijving (Deltares, 2012).

De vorm van de afvoergolf bij Olst respectievelijk Dalfsen geldt ook niet als basisstochast; het belastingmodel gaat uit van een gemiddelde vorm van de afvoergolf, de zogenoemde standaard golfvorm bij Olst en Dalfsen. Dit verloop van de rivierafvoer geldt in principe als bovenrand voor de productieberekeningen. Echter, de productieberekeningen voor de VIJD worden met uitzondering van de hoogste afvoergolven ($Q > 2.300 \text{ m}^3/\text{s}$) stationair uitgevoerd. Dit wil zeggen dat rivierafvoer en IJsselmeerpeil niet variëren in de tijd. In de probabilistische berekeningen wordt wel rekening gehouden met het tijdsverloop van de basisstochasten IJsselaflow, Vechtaflow en IJsselmeerpeil (dit wordt in paragraaf 2.6 toegelicht).

Zowel de IJssel- als de Vechtafvoer is gecorreleerd met het IJsselmeerpeil. De correlaties tussen het IJsselmeerpeil en de afvoer van de IJssel bij Olst respectievelijk de Vechtafvoer bij Dalfsen zijn niet veranderd ten opzichte van HR-2006 en WTI-2011. In HR-2006/WTI-2011 is het correlatiemodel dat bekend staat als model CS (Constante Spreiding) gebruikt. Dit model is uitgebreid beschreven in (Beijk en Geerse, 2004) en (Geerse, 2006). In WBI-2017 wordt gebruikt gemaakt van het PCR model (correlatie model van PC-Ring). Dit model is uitgebreid beschreven in Diermanse et al (2016). In Diermanse et al. (2016) is ook aangegeven dat voor zowel de Vecht- als de IJsseldelta het gebruik van het PCR model in plaats van het CS model geen invloed heeft op de resultaten. Daarnaast is de IJsselaafvoer bij Olst gecorreleerd met de Vechtafvoer bij Dalfsen. Deze correlatie is ten opzichte van HR-2006/WTI-2011 niet veranderd, zie voor details (Geerse, 2006). De afvoer en het meerpeil zijn statistisch onafhankelijk van de wind verondersteld.

Tabel 2.3 geeft een overzicht van de stochastcombinaties die voor de VIJD zijn doorgerekend.

Tabel 2.3 Stochastcombinaties Vecht- en IJsseldelta

Vecht [m ³ /s]	IJssel [m ³ /s]	IJsselmeerpeil [m+NAP]	Windsnelheid [m/s]	Windrichting [-]	Ramspol kering
10	100	-0,4	(0)	(O)	sluitregime
100	500	-0,1	10	ZW	altijd open
250	950	0,4	16	WZW	
400	1.400	0,9	22	W	
550	1.850	1,3	27	WNW	
700	2.300	1,5	32	NW	
850	2.750		37	NNW	
925	2.975		42	N	
1.000	3.200				
1.067	3.400				
1.133	3.600				
1.200	3.800				
1.267	4.000				
13	13	6	7+1	7+1	2
Totaal					7800

Het belastingmodel WBI-2017 houdt rekening met kennisonzekerheden (statistische en modelonzekerheid) die door middel van extra stochasten zijn gemodelleerd. Daarom kent het belastingmodel de volgende 'extra' stochasten:

- Statistische onzekerheid IJsselaafvoer bij Olst
- Statistische onzekerheid Vechtafvoer bij Dalfsen
- Statistische onzekerheid IJsselmeerpeil
- Statistische onzekerheid windsnelheid bij Schiphol
- Modelonzekerheid lokale waterstand
- Modelonzekerheid golfcondities (H_{m0} en T_p)

2.5 Statistiek basisstochasten

2.5.1 Afvoerstatistiek van de IJssel bij Olst

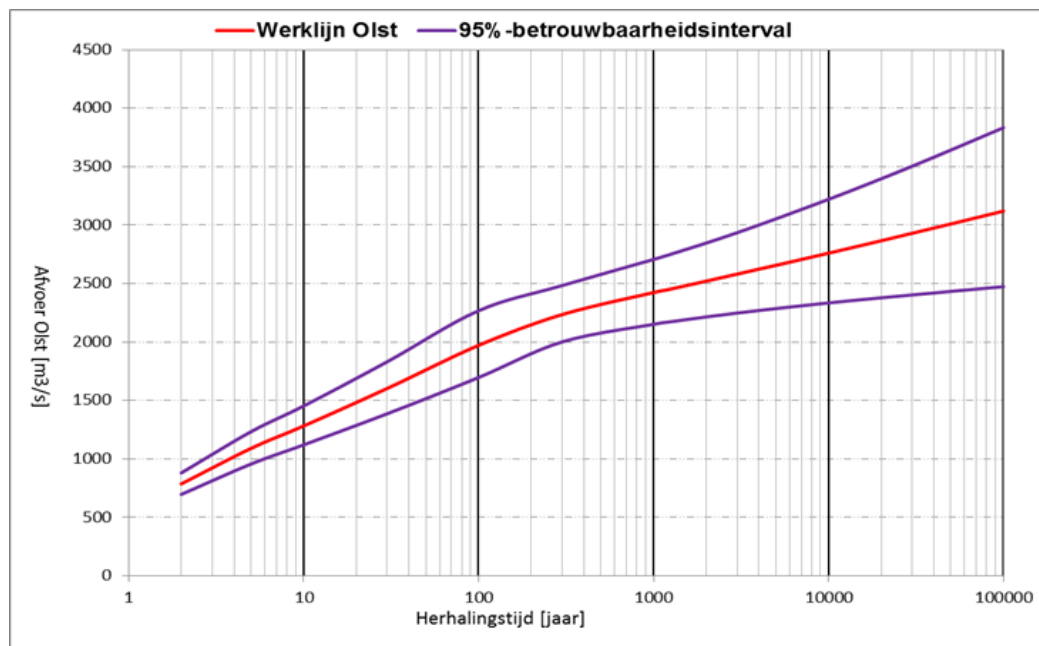
De HR2006/WTI2011 statistiek van de IJssel bij Olst is gebaseerd op metingen bij Olst en de resultaten van WAQUA sommen waarbij zes afvoergolven bij Lobith vertaald zijn naar corresponderende afvoergolven bij Olst. De HR2006 werklijn bij Olst bestaat uit twee trajecten: een traject voor afvoeren die kleiner dan of gelijk zijn aan $800 \text{ m}^3/\text{s}$ (de afvoer met een gemiddelde herhalingsstijd van 1 jaar) en een traject voor afvoeren die hoger zijn dan $800 \text{ m}^3/\text{s}$. Voor dit tweede traject geldt de volgende relatie tussen afvoer Q en herhalingsstijd T : $Q = 269,2 * \ln(T) + 800$. Een uitvoerige beschrijving van deze statistiek van de IJssel bij Olst is te vinden in (Geerse, 2006).

De statistiek van de IJssel bij Olst is in WBI-2017 aangepast. Deze volgt uit de statistiek van de Rijn bij Lobith, die op haar beurt uit GRADE (Deltares, 2016a) volgt. Op basis van de werklijn van de Rijn bij Lobith en de resultaten van WAQUA berekeningen ten behoeve van de Rijntakken (Deltares, 2016b), is de werklijn voor de IJssel bij Olst geconstrueerd, inclusief het 95%-betrouwbaarheidsinterval. Tabel 2.4 toont voor enkele relevante herhalingsstijden de bijbehorende afvoeren bij Olst, inclusief hun bijbehorende 95%-betrouwbaarheidsgrenzen. Een grafische weergave van de werklijn inclusief het 95%-betrouwbaarheidsinterval is afgebeeld in Figuur 2.3.

Tabel 2.4 Werklijn IJssel bij Olst inclusief het 95%-betrouwbaarheidsinterval

Herhalingsstijd [jaar]	Afvoer Lobith [m ³ /s]	Afvoer Olst [m ³ /s]	95%-ondergrens [m ³ /s]	95%-bovengrens [m ³ /s]
2	5.940	787	697	881
5	7.970	1.090	956	1.233
10	9.130	1.282	1.121	1.453
30	10.910	1.603	1.387	1.831
100	12.770	1.972	1.697	2.268
300	14.000	2.235	2.001	2.483
1.000	14.840	2.423	2.152	2.707
1.250	14.970	2.453	2.174	2.750
3.000	15.520	2.581	2.248	2.935
10.000	16.270	2.760	2.335	3.221
30.000	16.960	2.930	2.403	3.503
100.000	17.710	3.120	2.474	3.834

Ten opzichte van de HR2006/WTI2011 werklijn van de IJssel bij Olst resulteert de werklijn van GRADE (gegeven in Figuur 2.3) in lagere afvoeren. Voor een gemiddelde herhalingsstijd van 1250 jaar geldt volgens Tabel 2.4 een afvoer van (afgerond) $2.450 \text{ m}^3/\text{s}$; dit is bijna $300 \text{ m}^3/\text{s}$ lager dan de maatgevende afvoer bij Olst volgens HR2006/WTI2011. N.B. deze maatgevende afvoer bij Olst bedraagt $2.720 \text{ m}^3/\text{s}$. De werklijnen en het 95%-betrouwbaarheidsinterval van de IJssel bij Olst laten *qua vorm* verder veel overeenkomsten zien met die van Lobith.



Figuur 2.3 Werklijn IJssel bij Olst volgend uit GRADE werklijn van de Rijn bij Lobith (Deltares, 2016a).

Een vergelijking van de HR2006/WTI2011 werklijn en de werklijn verkregen uit WAQUA berekeningen op basis van de resultaten van GRADE bij Lobith is weergegeven in Figuur 2.9. Het verschil tussen beide werklijnen is voor herhalingstijden van ca. 100 jaar klein: het varieert tussen 200 m³/s voor $T = 2$ jaar en ca. 70 m³/s voor $T = 100$ jaar. Het verschil in afvoer voor $T > 500$ jaar loopt gestaag op en bedraagt 780 m³/s voor $T = 100.000$ jaar.

2.5.2 Afvoerstatistiek van de Overijsselse Vecht bij Dalfsen

De afvoerstatistiek van de Overijsselse Vecht bij Dalfsen is ten opzichte van WTI-2011 niet veranderd. De afvoerstatistiek bij Dalfsen en bijbehorende onzekerheidsbanden volgen uit extrapolatie van afvoermetingen. Verlenging van de meetreeks met de laatste meetjaren resulteert in een afvoer met een gemiddelde herhalingstijd van 1250 jaar van 536 m³/s. Dit komt redelijk goed overeen met de maatgevende⁴ afvoer van 550 m³/s volgens HR2006/WTI2011 (Klerk, 2014). Deze afvoerstatistiek van de Vecht bij Dalfsen is daarom aangehouden. Een uitvoerige beschrijving van de afvoerstatistiek van de Vecht bij Dalfsen is gegeven in (Geerse, 2006). Tabel 2.5 toont de resultaten. In deze tabel zijn afvoeren > 800 m³/s gemarkeerd, omdat het beeld bestaat dat de Vecht een maximale afvoercapaciteit heeft van 800 m³/s. In de probabilistische berekeningen is dit fysische maximum op de Vecht echter niet opgelegd.

⁴ De maatgevende afvoer uit HR2006 van 550 m³/s is een afgerond getal dat gebaseerd is op enerzijds de resultaten van statistische analyses van verschillende (combinaties van) kansverdelingen en anderzijds beleidsmatige overwegingen.

Tabel 2.5 Afvoeren van de vecht bij Dalfsen behorende bij verschillende herhalingstijden, inclusief 95%-betrouwbaarheidsintervallen.

Herhalingstijd [jaar]	Afvoer Dalfsen [m ³ /s]	95%-ondergrens [m ³ /s]	95%-bovengrens [m ³ /s]
2	216	203	227
5	263	230	284
10	299	250	328
20	335	265	407
50	383	283	478
100	419	303	550
250	466	328	655
500	502	348	744
1.250	550	367	835
2.000	574	374	876
4.000	610	393	987
10.000	658	413	1.090
20.000	694	432	1.145
50.000	741	450	1.235
100.000	777	472	1.302

2.5.3 Statistiek IJsselmeerpeil

Ten behoeve van WBI-2017 is de meerpeilstatistiek van het IJsselmeer zoals gebruikt voor de vorige toetsronde(n) gehandhaafd. De werklijn van het IJsselmeerpeil bestaat uit drie lijnstukken. Deze statistiek is uitvoerig beschreven in (Geerse, 2006), en is gebaseerd op statistische extrapolatie van meet- en modelgegevens. De gehanteerde reeksen omvatten de periode 1932 tot en met 2002. De 95% boven- en ondergrens zijn afgeleid met de bootstraphmethode (Geerse en Wojciechowska, 2014). Tabel 2.6 toont de resultaten van de werklijn en bijbehorende betrouwbaarheidsintervallen.

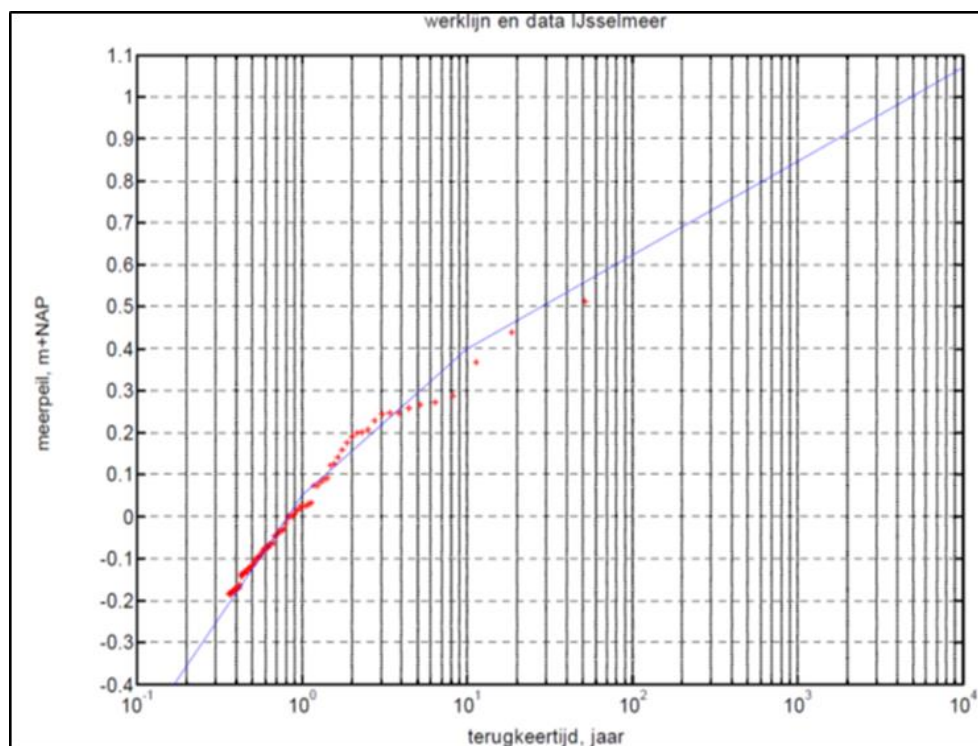
N.B. de relatie tussen meerpeil en herhalingstijd, gegeven in Tabel 2.6, betreft het hoogste lijnstuk van de werklijn (herhalingstijd > 10 jaar). De volledige werklijn is gegeven door de volgende formule:

$$m = \begin{cases} 0,25 * \ln(T) + 0,05 & \text{voor } -0,40 \leq m < 0,05 \\ 0,152 * \ln(T) + 0,05 & \text{voor } 0,05 \leq m < 0,40 \\ 0,097 * \ln(T) + 0,177 & \text{voor } m \geq 0,40 \end{cases}$$

Tabel 2.6 Relatie IJsselmeerpeil en herhalingstijd, inclusief 95% betrouwbaarheidsbanden

Herhalingstijd [jaar]	IJsselmeerpeil [m+NAP]	95% ondergrens [m+NAP]	95% bovengrens [m+NAP]
10	0,40	0,33	0,45
100	0,62	0,50	0,77
1.000	0,85	0,62	1,16
10.000	1,07	0,71	1,63
100.000	1,29	0,78	2,19

Bij het bepalen van de frequentielijn en bijbehorende betrouwbaarheidsintervallen zijn geen fysische beperkingen betrokken.



Figuur 2.4 Werklijn IJsselmeerpeil (Geerse, 2006).

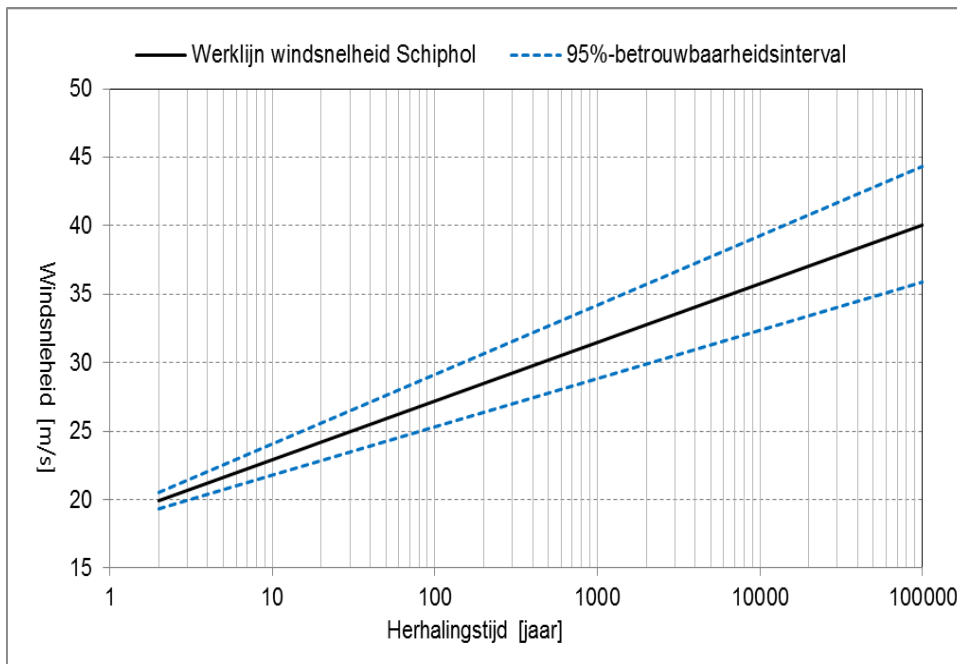
2.5.4 Windstatistiek

2.5.4.1 Windsnelheid

Het belastingmodel voor de VIJD gaat uit van station Schiphol. De oude windstatistiek bij Schiphol uit het Rijkooort-Weibull model (KNMI,1983) is vervangen door een nieuwe windstatistiek, die in het kader van SBW-WTI is afgeleid (Caires, 2009). Figuur 2.5 toont voor enkele relevante herhalingstijden de bijbehorende windsnelheid te Schiphol. Het verschil tussen de oude en nieuwe windstatistiek is klein. De effecten van de nieuwe windstatistiek op de HB verschillen per watersysteem maar zijn over het algemeen klein en bedragen enkele centimeters; zie (Geerse en Verkaik, 2010). De windstatistiek van (Caires, 2009) geldt voor hoge windsnelheden, hoger dan de drempelwaardes (voor Schiphol 16,6 m/s). Voor lage windsnelheden is op basis van metingen en turven de statistiek afgeleid. Hierbij is de methode zoals toegepast in (Geerse en Verkaik, 2010) gehanteerd.

Tabel 2.7 Relatie windsnelheid en herhalingstijd volgens de (nieuwe) windstatistiek van Caires (2009).

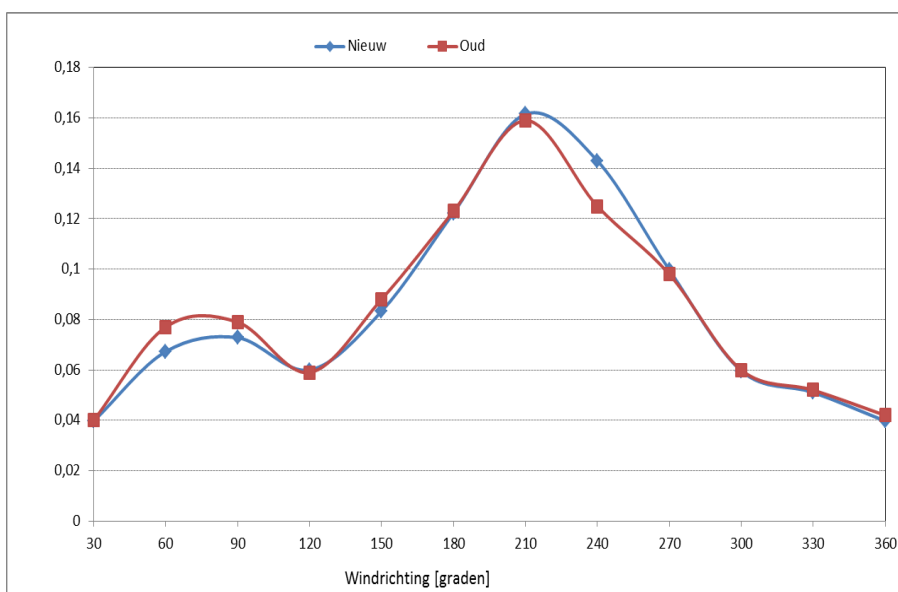
Herhalingstijd [jaar]	Windsnelheid Schiphol [m/s]	95%-ondergrens [m/s]	95%-bovengrens [m/s]
2	19,9	19,3	20,5
10	22,9	21,8	24,1
50	25,9	24,3	27,6
100	27,2	25,3	29,1
1.000	31,5	28,8	34,2
2.000	32,8	29,9	35,7
4.000	34,1	31,0	37,3
10.000	35,8	32,4	39,3
30.000	37,8	34,0	41,7
100.000	40,1	35,9	44,3



Figuur 2.5 Werklijn windsnelheid station Schiphol, inclusief 95%-betrouwbaarheidsbanden (Caires, 2009).

2.5.4.2 Windrichting

De windrichting geldt als basisstochast. Aan de hand van de windmetingen is ook de kansverdeling van de windrichting voor WBI-2017 opnieuw bepaald. Figuur 2.6 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 2.6 Vergelijking van de kansverdeling op windrichting (30 graden) voor Schiphol (Deltares, 2016a).

De kansverdeling van de windrichting bij station Schiphol is weergegeven in Tabel 2.8.

Tabel 2.8 Kansverdeling windrichting voor station Schiphol.

Windrichting [gr]	Kans [-]
0,0	0,03074
22,5	0,02547
45,0	0,03700
67,5	0,06078
90,0	0,05269
112,5	0,04530
135,0	0,05171
157,5	0,06669
180,0	0,09159
202,5	0,12332
225,0	0,11277
247,5	0,10011
270,0	0,07520
292,5	0,05009
315,0	0,03961
337,5	0,03693

2.5.5 Beheersituatie Ramspolkering

De Ramspolkering gelegen tussen Ketelmeer en het Zwarte Meer moet bij een stormsituatie uit westelijke richting hoge waterstanden op het Zwarte Meer (veroorzaakt door opstuwing vanuit het IJsselmeer/Ketelmeer) voorkomen. De Ramspolkering sluit op basis van de opgetreden waterstanden; de kering gaat dicht indien de waterstand op het Ketelmeer 0.5 m+NAP overschrijdt én een stroming in oostelijke richting optreedt ter plaatse van de kering. De kering opent weer wanneer de waterstand aan de buitenzijde lager wordt dan de waterstand aan de binnenzijde.

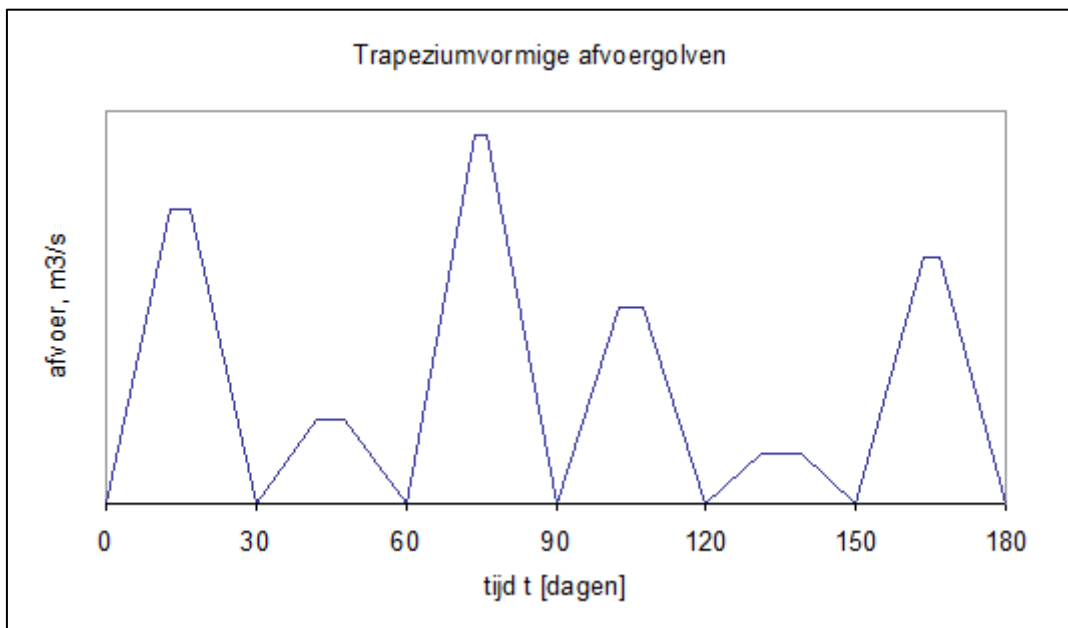
De Ramspolkering kan falen. Er is sprake van falen indien de kering niet sluit als dit volgens de geldende sluitcriteria wel zou moeten. Hierbij wordt geen onderscheid gemaakt tussen niet sluiten, niet tijdig sluiten of constructief falen na sluiten. De faalkans uit WTI-2011, gebaseerd op basis van de MER Ramspol (Kors et al., 1994), is gesteld op 0,0035 per sluitvraag. In WBI-2017 zal worden uitgegaan van de wettelijke normering die uitgaat van een maximaal toelaatbare faalkans in 2050 en die bedraagt 0,01 per sluitvraag (Deltares, 2016a).

2.6 Modellerings tijdsverlopen basisstochasten

De afvoeren van zowel de IJssel bij Olst als de Vecht bij Dalfsen worden geschematiseerd door middel van trapezia (NTI – Numerieke Tijds-Integratie) of met blokken (FBC - Ferry Borges Castanheta model). De afvoer van de Vecht bij Dalfsen en van de IJssel bij Olst evenals het IJsselmeerpeil zijn stochasten die langzaam variëren in de tijd, ook trage stochasten genoemd. De vorm van het verloop van de afvoer is onveranderd ten opzichte van WTI-2011 en HR-2006 en is afgebeeld in Figuur 2.7. De basis van de trapezia duurt 30 dagen. De topduren van de trapezia hangen af van het afvoerniveau; voor afvoeren hoger dan 6.000 m³/s is de topduur constant en bedraagt 12 uur.

Bij het opstellen van het probabilistische model voor de VIJD is een karakteristieke tijdsduur van 12 uur ingevoerd. Die duur moet min of meer overeenstemmen met de duur van de fluctuaties van de snelle stochasten, hier de windsnelheid en de windrichting. Verder is aangenomen dat deze snelle stochasten elke 12 uur een andere waarde aannemen, waarbij de waarden in opeenvolgende uren statistisch onafhankelijk van elkaar worden aangenomen. In de VIJD wordt slechts het winterhalfjaar beschouwd (oktober t/m maart), vanwege de aanname dat bedreigende situaties in de zomer verwaarloosbaar zijn. Dit winterhalfjaar bestaat uit 180 dagen (overeenkomend met de basis van het verloop in de figuur).

Voor de trage stochasten afvoer en meerpeil geldt dat ze gedurende een periode van 12 uur relatief weinig variëren in de tijd. Vandaar dat de afvoer en het meerpeil gelijk genomen kunnen worden aan respectievelijk de gemiddelde afvoer en het gemiddelde meerpeil in een tijdsduur van 12 uur. In principe kan de windrichting gedurende deze blokduur wat variëren. Als representatieve windrichting wordt de (vectorieel) gemiddelde windrichting van de 12 uurwaarden genomen. De windsnelheid kan zeker variëren gedurende de 12 uren. Bij een constante afvoer, constant meerpeil en constante (representatieve) windrichting in het blok zal de maximale belasting in het blok vooral bepaald worden door de maximale windsnelheid in het blok.



Figuur 2.7 Modellerings afvoeren door trapezia, basisduur 30 dagen (Geerse, 2006).

Ten behoeve van de tijdsintegratie zijn in Hydra-Ring twee rekentechnieken beschikbaar: een NTI (Numerieke Tijds-Integratie) en een FBC (Ferry Borges Castanheta). In de WBI-2017 berekeningen zijn beide methoden gebruikt. De rekentechniek NTI doorloopt de 30 dagen altijd in tijdstappen van 12 uur, dus 60 stappen totaal. FBC maakt er eerst een grote tijdstap van en bepaalt in 3 iteraties welke waarde van de tijdstap optimaal is. Daarom is FBC aanzienlijk sneller dan NTI. Echter, voor gebieden waar zowel snelle als langzame stochasten van belang zijn, zal NTI nauwkeuriger zijn. Zie voor details Diermanse et al (2016).

2.7 Extra stochasten kennisonzekerheid

2.7.1 Modelling kennisonzekerheid

Kennisonzekerheid (statistische en modelonzekerheid) kan als extra stochast toegevoegd worden aan Hydra-Ring. Voor een uitgebreide beschrijving van de wijze waarop deze onzekerheden zijn gemodelleerd wordt verwezen naar (Deltares, 2015b, 2016a). Hydra-Ring houdt voor de VIJD rekening met de volgende kennisonzekerheden:

1. Modelonzekerheid lokale waterstand,
2. Modelonzekerheid golfhoogte (H_{m0}),
3. Modelonzekerheid golfperiode (T_p en/of $T_{m-1,0}$),
4. Statistische onzekerheid IJsselafvoer bij Olst,
5. Statistische onzekerheid Vechtafvoer bij Dalfsen,
6. Statistische onzekerheid IJsselmeerpeil en
7. Statistische onzekerheid windsnelheid Schiphol.

2.7.2 Modelonzekerheid waterstand

Met betrekking tot kwantificering en implementatie in Hydra-Ring van modelonzekerheid in lokale waterstand gelden de volgende uitgangspunten; zie voor een uitgebreide beschrijving (Diermanse et al, 2016). Als eerste uitgangspunt geldt dat modelonzekerheid (in de lokale waterstand) normaal verdeel is en wordt (in principe) uitgedrukt in een bias (μ) en een standaardafwijking (σ). Omdat de productieberekeningen uitgevoerd worden met gekalibreerde en gevalideerde modellen, waarbij de kalibratie als doel heeft een bias te minimaliseren, is in WBI-2017 de modelonzekerheid in waterstand enkel uitgedrukt in een standaardafwijking en de bias is gelijk aan nul gesteld voor alle rivierentakken. Het tweede uitgangspunt is dat er één getal wordt gebruikt voor σ voor het hele bereik aan herhalingstijden. Bij de vaststelling van dit getal is rekening gehouden met extreme situaties. Het uitgangspunt houdt feitelijk in dat modelonzekerheid niet afhangt van de herhalingstijd. Voor lage herhalingstijden kan er bijgevolg sprake zijn van een overschatting van modelonzekerheid, maar dit bereik is in veel gevallen minder relevant voor de hydraulische belastingen.

Modelonzekerheid voor het gebied van de VIJD is beschreven in (Deltares, 2015b). Zonder details te vermelden, doen we hier opgave van gemaakte schattingen voor modelonzekerheid. Beide gebieden, de IJssel- en Vechtdelta zijn hierbij opgesplitst in drie deelgebieden. De IJsseldelta is opgedeeld in: de IJsseldelta bovenstrooms, het overgangsgebied en de IJsseldelta benedenstrooms. De Vechtdelta is opgedeeld in: Overijsselse Vecht, Zwarte Water en Zwarte Meer. Tabel 2.9 en Tabel 2.10 tonen de schattingen van de modelonzekerheid voor de IJssel- en Vechtdelta respectievelijk.

Tabel 2.9 Modelonzekerheid voor de IJsseldelta

Deelgebied	Bias [m]	Standaardafwijking [m]
IJssel bovenstrooms van km 993	0	0,20
Overgangsgebied: km 993 – km 996	0	0,30
IJsseldelta benedenstrooms van km 996	0	0,30

De correlatie tussen de bodemruwheid in WAQUA en de bodemruwheid gehanteerd in de hydrodynamische modellering van GRADE is verdisconteerd in de standaardafwijkingen gegeven in Tabel 2.9.

Tabel 2.10 Modelonzekerheid voor: de Vechtdelta

Deelgebied	Bias [m]	Standaardafwijking [m]
Vecht bovenstrooms van km 60 en Zwarte Water bovenstrooms van km 8	0	0,35
Zwarte Water benedenstrooms van km 8	0	0,40
Zwarte Meer: het hele gebied van Zwarte Meer, de grens met Zwarte Water ligt bij km 20 (punt hoort bij Zwarte Water)	0	0,40

De onzekerheden als gevolg van kalibratie, ruwheden en morfologische veranderingen bepalen de onzekerheid in het bovenstroomse deel van de Vecht. Deze onzekerheidsbronnen gelden ook voor het Zwarte water en Zwarte Meer. Afvoer speelt immers ook in dit gebied een belangrijke rol. Daarnaast dragen de onzekerheid in windmodellering en onderloopgedrag van Kampereiland ook bij in deze gebieden aan modelonzekerheid. De bijdrage van de onzekerheid in de bodemligging en falen van Ramspolkering is relatief klein.

2.7.3 Modelonzekerheid golfcondities

Op het Ketelmeer en het Zwarte Meer zijn de golfcondities met SWAN (Deltares, 2016c) bepaald. Voor de smalle wateren in de VIJD wordt de formule van Bretschneider (TAW, 1989, Leidraad Rivierdijken deel 2 pag. 150) toegepast om te komen tot golfcondities aan de teen van de kering. Bij het gebruik van de formulering van Bretschneider geldt een sterke versimpeling van de werkelijkheid ten aanzien van bodemhoogte en strijklengte en er worden aannames gedaan ten aanzien van het verwaarloosbaar zijn van o.a. effecten van stroming. Modelonzekerheid in de Bretschneiderformule is onderzocht en gerapporteerd (Deltares, 2015a) en (RWS, 2015). De modelonzekerheid in golfparameters voor de verschillende systemen van de VIJD is weergegeven in Tabel 2.11, zie ook Deltares (2015b).

Tabel 2.11 Modelonzekerheid golfparameters systemen van de Vecht- en IJsseldelta

Watersysteem	H_{m0}		$T_{m-1,0}$		T_p	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ
Ketelmeer en Vossemeer (IJsselmeer)	-0,01	0,19	-0,04	0,11	-	-
Zwarte Meer	-0,06	0,15	-0,11	0,04	-0,01	0,07
Smalle wateren (Overijsselse Vecht en IJssel)	-0,04	0,27	-	-	+0,03	0,13

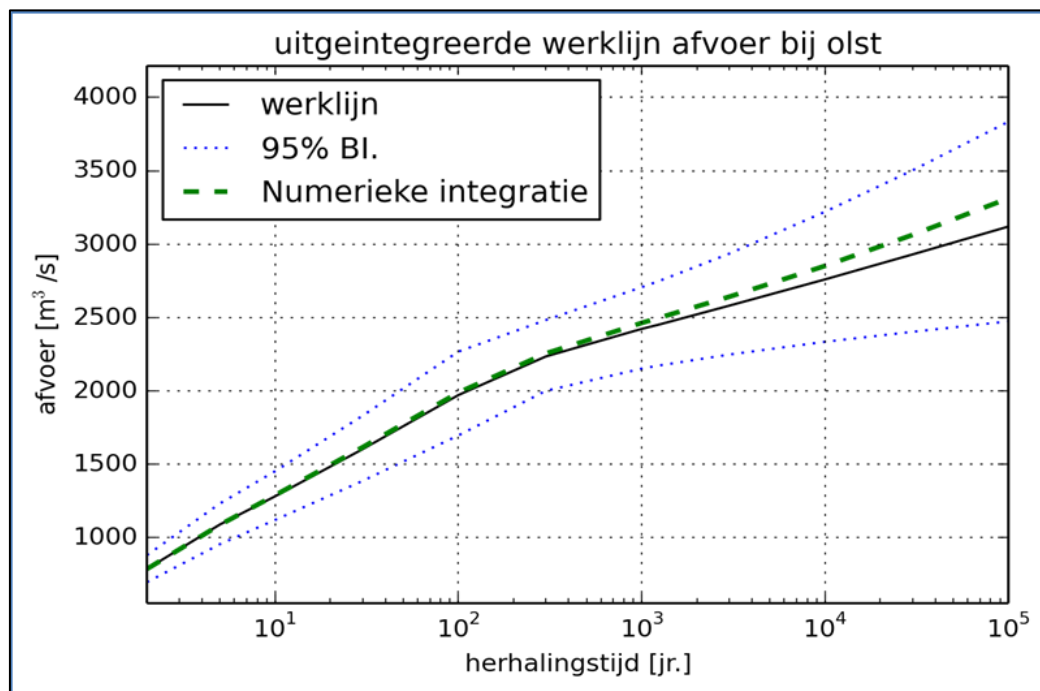
2.7.4 Statistische onzekerheid basisstochasten

2.7.4.1 Statistische onzekerheid IJsselafoer bij Olst

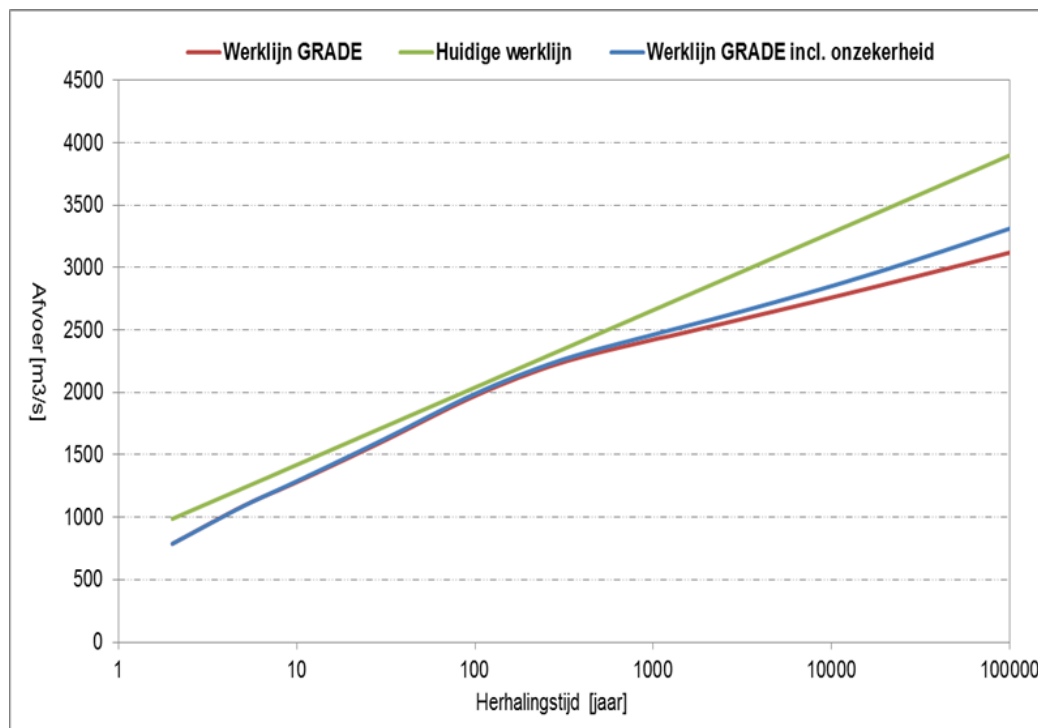
De statistische onzekerheid van de IJsselafoer bij Olst is gemodelleerd door middel van een normale verdeling, met een gemiddelde en een standaardafwijking die afhangen van de/het herhalingstijd/afvoerniveau. Tabel 2.12 toont de parameters van de normale verdeling, evenals de afvoeren waarin de normale verdeling, die de statistische onzekerheid beschrijft, is uit-geïntegreerd (zie laatste kolom van 2.12). Deze laatste beschrijft de werklijn waarin kennis-onzekerheden en natuurlijke variabiliteit (inherente onzekerheden) zijn gecombineerd in één kansverdeling. Figuur 2.8 toont de werklijn en de uit-geïntegreerde werklijn van de IJssel bij Olst. In Figuur 2.9 staat de werklijn uit HR2006 en de werklijnen van GRADE bij Olst, met en zonder statistische onzekerheid. Beide werklijnen van GRADE, liggen lager dan de HR2006 werklijn; vooral voor extreme situaties is het verschil groot. Het gevolg hiervan is (bij gelijk blijvende normen) een reductie in waterstanden op locaties waar de IJsselafoer een dominante rol speelt.

Tabel 2.12 Statistische onzekerheid afvoerstatistiek van de IJssel bij Olst: additief model, normale verdeling met $\mu = 0,0 \text{ m}^3/\text{s}$ en σ afhankelijk van herhalingstijd.

Herhalingstijd [jaar]	Afvoer Olst [m ³ /s]	Schatting onzekerheid		Afvoer incl. stat. onzek. [m ³ /s]
		μ [-]	σ [-]	
2	787	0	46	787
5	1.090	0	69	1.088
10	1.282	0	83	1.289
30	1.603	0	111	1.616
100	1.972	0	142	1.989
300	2.235	0	120	2.256
1.000	2.423	0	138	2.463
1.250	2.453	0	144	2.499
3.000	2.581	0	171	2.642
10.000	2.760	0	221	2.852
30.000	2.930	0	275	3.063
100.000	3.120	0	340	3.312



Figuur 2.8 Werklijn IJssel bij Olst, met en zonder uit-geïntegreerde statistische onzekerheid (Deltares, 2016a).



Figuur 2.9 Vergelijking werklijn HR-2006 met werklijnen volgens uit GRADE met en zonder onzekerheid voor station Olst (Deltares, 2016a).

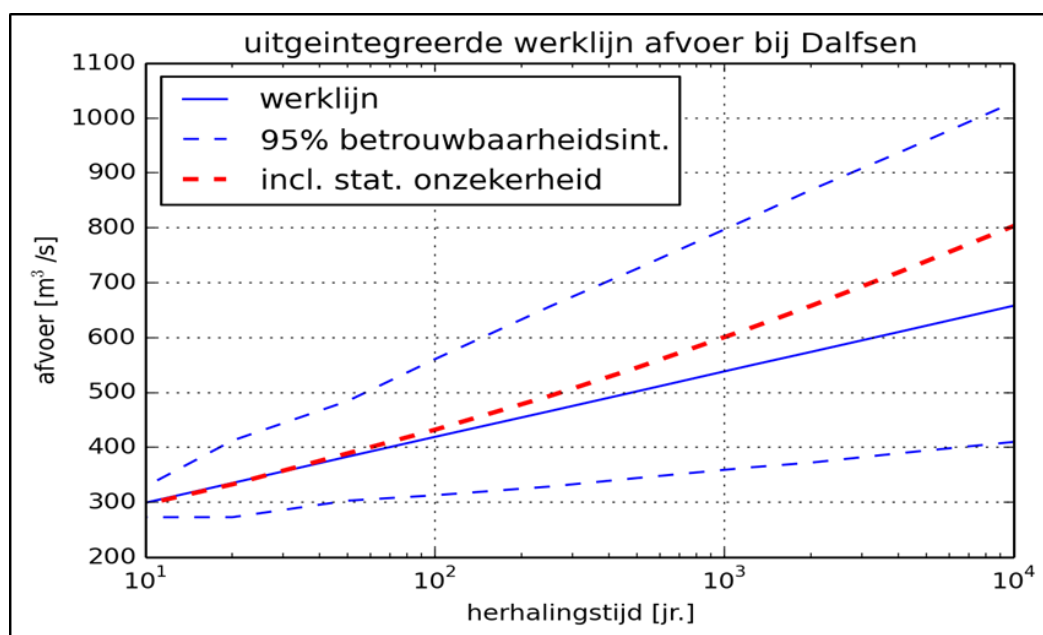
2.7.4.2 Statistische onzekerheid Overijsselse Vecht bij Dalfsen

De statistische onzekerheid van de Vechtafvoer bij Dalfsen is gemodelleerd door middel van een lognormale verdeling met parameters zoals weergegeven in Tabel 2.13 Naast de μ en de σ wordt deze verdeling gedefinieerd door de parameter epsilon, de locatieparameter en de vormparameter. Een uitgebreide beschrijving van deze parameters is opgenomen in Geerse (2016).

Tabel 2.13 Statistische onzekerheid afvoerstatistiek van de Overijsselse Vecht bij Dalfsen: additief model, lognormale verdeling met $\mu = 0,0 \text{ m}^3/\text{s}$ en σ afhankelijk van herhalingsstijd.

Herhalingsstijd	Afvoer	μ	σ	eps	locatiepar.	vormpar.	Afvoer incl stat. onz.
[jaar]	[m ³ /s]	[-]	[-]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[-]	[m ³ /s]
2	216	0	5,77	-116	4.752	0,050	216
5	263	0	10,30	-163	5.092	0,063	263
10	299	0	14,10	-199	5.291	0,071	296
20	335	0	35,80	-235	5.448	0,151	333
50	383	0	46,32	-283	5.632	0,163	389
100	419	0	63,58	-319	5.746	0,197	432
250	466	0	84,18	-366	5.877	0,227	494
500	502	0	97,68	-402	5.968	0,240	545
1.250	550	0	117,04	-450	6.077	0,256	619
2.000	574	0	127,76	-474	6.126	0,265	658
4.000	610	0	140,97	-510	6.198	0,271	719
10.000	658	0	159,43	-558	6.285	0,280	804
20.000	694	0	171,70	-594	6.347	0,283	872
50.000	741	0	193,47	-641	6.419	0,295	966
100.000	777	0	202,84	-677	6.475	0,293	1.040

Figuur 2.10 toont de werklijnen van de Vecht bij Dalfsen met en zonder statistische onzekerheid.



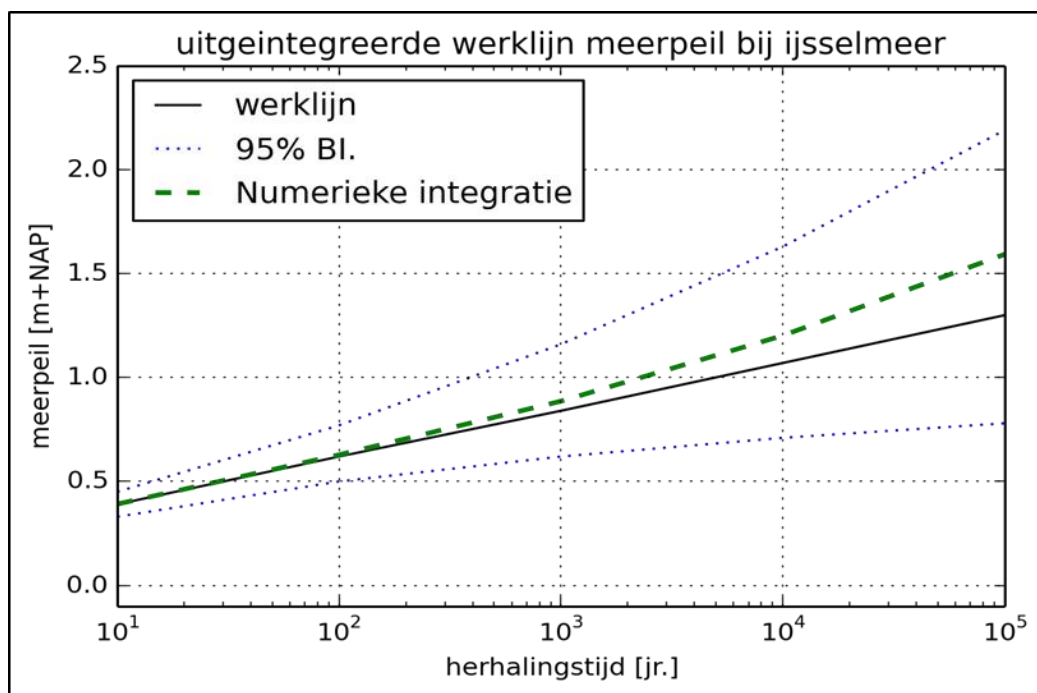
Figuur 2.10 Werklijn Vecht bij Dalfsen, met (rood) en zonder (blauw) uit-geïntegreerde statistische onzekerheid (Deltares, 2016a).

2.7.4.3 Statistische onzekerheid IJsselmeerpeil

De statistische onzekerheid van het meerpeil is evenals de Vechtafvoer gemodelleerd door middel van een lognormale verdeling met parameters zoals weergegeven in Tabel 2.14. De afleiding van de μ , de σ , de parameter epsilon, de locatieparameter en de vormparameter worden uitgebreid beschreven in Geerse (2016).

Tabel 2.14 Parameters statistische onzekerheid IJsselmeerpeil, inclusief peil met onzekerheid

Herhalingstijd	Meerpeil	μ	σ	eps	locatiepar.	vormpar.	Meerpeil incl. stat. onz.
[jaar]	[m+NAP]	[-]	[-]	[m+NAP]	[m+NAP]	[-]	[m+NAP]
10	0,39	0	0,031	-0,79	-0,236	0,039	0,39
100	0,62	0	0,067	-1,02	0,018	0,066	0,63
1.000	0,84	0	0,136	-1,24	0,209	0,110	0,89
10.000	1,07	0	0,231	-1,47	0,373	0,156	1,20
100.000	1,30	0	0,350	-1,70	0,510	0,204	1,59



Figuur 2.11 Werklijn IJsselmeerpeil, met en zonder statistische onzekerheid (Deltares, 2016a).

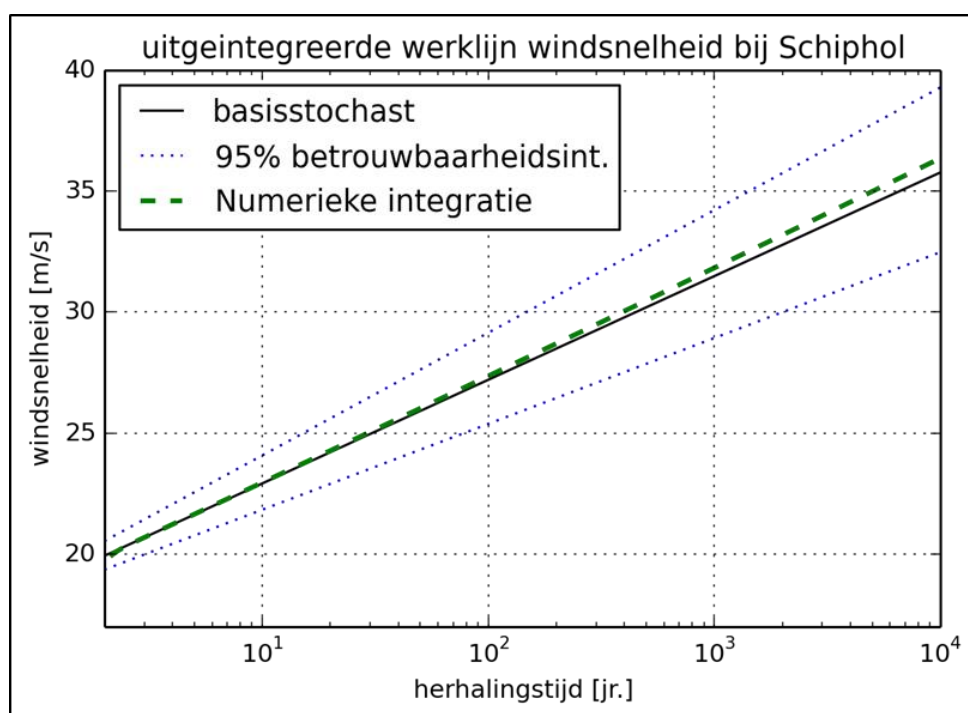
2.7.4.4 Statistische onzekerheid windsnelheid bij Schiphol

De uitgeïntegreerde werklijn van de omni-directionele windsnelheid bij station Schiphol is afgebeeld in Figuur 2.12. De onzekerheid van de windsnelheid bij Schiphol is normaal verdeeld. De parameters van deze normale verdeling, als mede de uitgeïntegreerde windsnelheid behorende bij enkele relevante herhalingstijden zijn weergegeven in Tabel 2.15.

Ten behoeve van de probabilistische berekeningen met Hydra-Ring is de richtingsafhankelijke windstatistiek nodig, inclusief statistische onzekerheid. Verkennende berekeningen met spreidingen die afhangen van de herhalingstijd hebben geresulteerd in minimale verschillen (enkele millimeters) met berekeningen met een constante spreiding. Dit geldt voor alle watersystemen. Om deze reden is besloten om de statistische onzekerheid in windsnelheid niet af te laten hangen van de herhalingstijd. Voor Schiphol is constante variatie-coëfficiënt geïmplementeerd die gelijk is aan 0,047 (de variantie behorende bij T = 10.000 jaar in Tabel 2.15). Tabel 2.16 toont de gehanteerde spreiding (de tabel bevat in grijs-cursief ook de spreidingen voor andere windstations in Hydra-Ring).

Tabel 2.15 Modelparameters statistische onzekerheid bij Schiphol, omni-directioneel.

Herhalingstijd	Windsnelheid	μ	σ	Windsnelheid incl. onzek.
[jaar]	[m/s]	[-]	[-]	[m/s]
2	19,91	1	0,015	19,90
10	22,90	1	0,025	22,96
50	25,88	1	0,032	26,02
100	27,16	1	0,035	27,36
500	30,14	1	0,040	30,47
1.000	31,43	1	0,042	31,83
10.000	35,69	1	0,047	36,36



Figuur 2.12 Werklijn van de windsnelheid bij Schiphol, met en zonder statistische onzekerheid (Deltares, 2016a).

Tabel 2.16 Windstations en bijbehorende parameters (μ en σ) voor de statistische onzekerheid van de omnidirectioneel en de richtingsafhankelijke situaties. Alleen station Schiphol wordt gebruikt voor de berekeningen in VIJD.

Windstation	Regio's	μ [-]	σ [-]
Schiphol	1 t/m 8 en 17	1	0,047
Deelen	1, 2 en 18	1	0,046
West Terschelling	9, 10	1	0,048
De Kooy/Texelhors	11	1	0,046
IJmuiden	12	1	0,040
Hoek van Holland	13	1	0,036
Vlissingen	14 en 15	1	0,042

2.8 Probabilistische rekentechniek

Voor de bepaling van de HB is in WTI-2011 gebruikt gemaakt van Hydra-Zoet (Vechtdelta) en de Verhanglijnmethode (IJsseldelta). In WBI-2017 wordt gebruik gemaakt van het nieuwe probabilistische instrumentarium Hydra-Ring. In Hydra-Ring kunnen veel verschillende probabilistische rekentechnieken gekozen worden om overschrijdingskansen te berekenen van belastingniveaus die van meerdere stochasten afhangen. Door het meenemen van kennisonzekerheden heeft het belastingmodel van VIJD nu een relatief groot aantal stochasten. Dat maakt dat de rekentechniek “numerieke integratie” (waarop de berekening met Hydra-Zoet is gebaseerd) geen aantrekkelijk alternatief is, omdat de rekentijd bij deze techniek exponentieel toeneemt met het aantal stochasten.

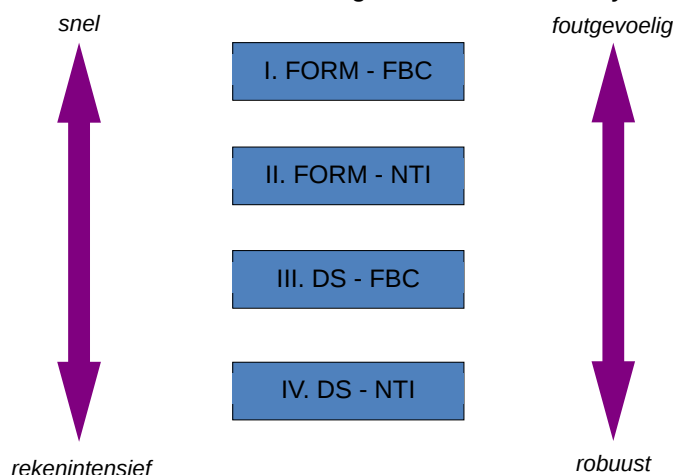
Voor het gebied van de VIJD zijn om deze reden andere probabilistische rekentechnieken toegepast: FORM (First Order Reliability Method), Directional Sampling (DSFI) en een combinatie van FORM en Directional Sampling (FDIR).

FORM is in kringen van constructieve veiligheid een wijdverbreide en algemene methode om faalkansen te berekenen. De methode is erop gebaseerd dat de zogenoemde betrouwbaarheidsfunctie behorende bij een bepaald faalmechanisme, indien nodig, wordt gelineariseerd en dat eventuele niet-normaal verdeelde basisstochasten worden getransformeerd naar normaal verdeelde variabelen. Meer details over FORM zijn te vinden in (Diermanse et al, 2016).

Directional Sampling is een methode uit de Monte Carlo familie. (Ditlevsen & Bjerager, 1987). De methode komt ruwweg op het volgende neer. Bij een standaard (2D) Monte Carlo sampling bestaat elke trekking uit zowel een x-coördinaat als een y-coördinaat. De faalkans wordt geschat door de frequentie te bepalen waarmee deze x- en y-coördinaten zich in het faalgebied bevinden. Bij Directional Sampling worden, in plaats van deze x- en y-coördinaten, poolcoördinaten getrokken en wel zodanig dat de hoek ‘random’ wordt getrokken. Vervolgens wordt voor deze hoek de afstand tot het faalgebied bepaald en deze afstand is bepalend voor de faalkans (gegeven de ‘trekking’ van de hoek).

FORM heeft als voordeel dat het relatief weinig rekentijd vergt, maar het heeft als nadeel dat het niet altijd een resultaat geeft; de onderliggende iteratieve methode kan soms niet convergeren. De faalkans wordt door FORM (First Order Reliability Method) bepaald door in de kansruimte direct naar het illustratiepunt te zoeken met behulp van linearisatie (zie paragraaf 2.2.5 uit Diermanse et al, 2016). Directional Sampling doet verschillende trekkingen in het faalgebied en kan daarom beter omgaan met niet een niet-uniforme belastingfuncties (zie paragraaf 2.2.4 uit Diermanse et al, 2016). Deze Directional Sampling vergt alleen veel rekentijd. Om die reden is in Hydra-Ring ook een combinatie van FORM en Directional Sampling geïmplementeerd: Indien een FORM berekening niet convergeert voor een specifieke locatie wordt overgestapt op de robuustere rekentechniek Directional Sampling. Met deze methode wordt rekentijd bespaard waar het kan (FORM) en extra rekentijd geïnvesteerd (Directional sampling) waar het moet. Daarnaast kan ook gekozen worden om alleen met Directional Sampling te rekenen.

Deze probabilistische rekentechnieken kunnen worden gecombineerd met rekenmethode voor de tijdsintegratie; beschikbaar zijn NTI en FBC (zie paragraaf 2.6). Bij het uitvoeren van berekeningen moet dan een combinatie gekozen worden van een probabilistische rekentechniek en een rekentechniek voor tijdsintegratie. Voor deze vier combinaties geldt Figuur 2.13. Per belastingparameter en per locatie in de VIJD zal bepaald moeten worden welke combinatie het meest geschikt is voor de Hydra-Ring berekening.



Figuur 2.13 Schema voor de keuze van de rekenmethode Hydra-Ring.

3 Verschilanalyse HB Vecht- en IJsseldelta

3.1 Inleiding

Doelstelling van de analyse van verschillen tussen HB uit WTI-2011 en WBI-2017 is om vertrouwen te krijgen in WBI-2017 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 HB t.b.v. de semi-probabilistische toets op dijkvakniveau. De HB bestaat uit drie belastingparameters, namelijk de lokale waterstand, de golfhoogte en het hydraulisch belastingniveau (HBN). Het gaat hier vooral om (de marginale 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 HR berekening

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

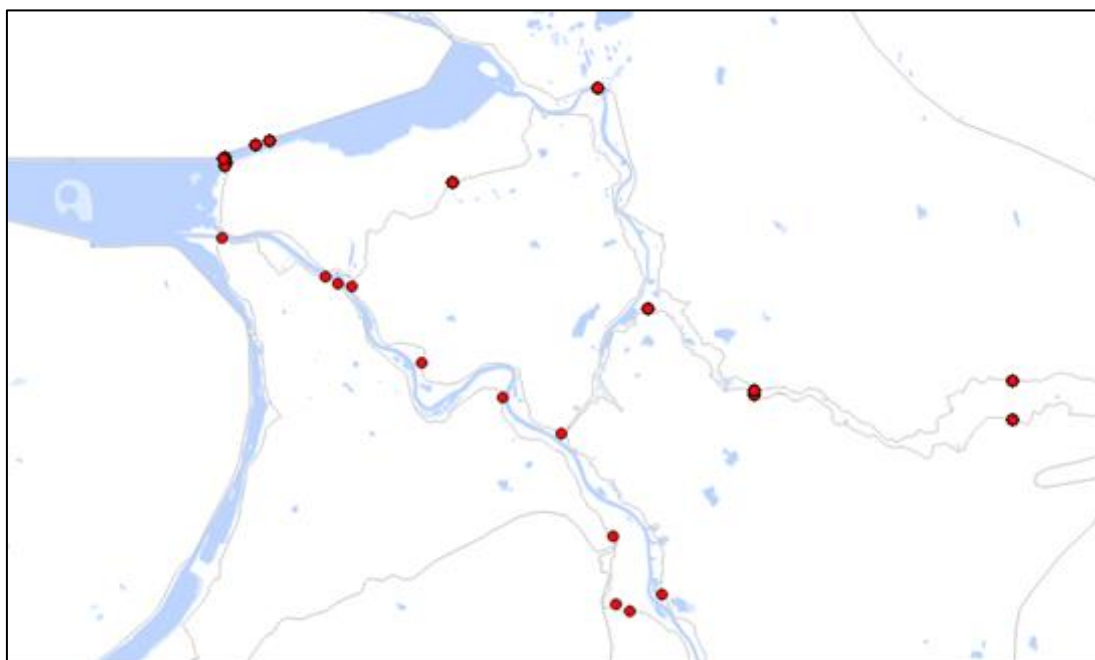
- 1 Vergelijking van Hydra-Zoet (zonder onzekerheden, nieuwe statistiek) resultaten met Hydra-Zoet (zonder onzekerheden, oude statistiek) referentieberekeningen. Hiermee wordt het verschil als gevolg van nieuwe statistiek geïdentificeerd.
- 2 Vergelijking van Hydra-Ring (zonder onzekerheden, nieuwe statistiek) resultaten met Hydra-Zoet (zonder onzekerheden, nieuwe statistiek) resultaten. Hiermee wordt het verschil als gevolg van de overgang op een nieuwe rekentechniek geïdentificeerd.
- 3 Vergelijking van Hydra-Ring (met onzekerheden, nieuwe statistiek) resultaten met Hydra-Ring (zonder onzekerheden, nieuwe statistiek). Hiermee wordt het effect van het meenemen van onzekerheden geïdentificeerd.

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

3.3 Uitgangspunten berekening

3.3.1 Algemeen

In de analysefase zijn de resultaten op een deelverzameling van alle beschikbare locaties beschouwd. De selectie (zie Figuur 3.1) zorgt voor een goede ruimtelijke dekking, met 13 testlocaties in de Vechtdelta en 13 testlocaties in de IJsseldelta. Merk op dat als gevolg van herdefinitie van uitgangspunten met betrekking tot ligging uitvoerlocaties, de ligging van locaties niet gelijk hoeft te zijn ten opzichte van CR2011. In die gevallen waarvoor locaties verschoven zijn, is de dichtstbijzijnde locatie uit de CR2011 locaties gebruikt voor de analyse. De afstand tussen testlocaties en de CR2011 locaties is veelal kleiner dan 100 m en in ieder geval niet meer dan 200 m. De oriëntatie en het dijkprofiel kunnen verschillen en ook zijn er kleine verschillen in de strijklengten en bodemhoogten. Hierdoor zullen verschillen in de berekening van golven en hydraulisch belastingniveau optreden. Bij de verklaring van de resultaten zal hier rekening mee worden gehouden.



Figuur 3.1 Geselecteerde testlocaties langs Vecht, Zwarte Water, Zwarte Meer en IJssel.

3.3.2 Instellingen Hydra's

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

- Hydra-Zoet zonder onzekerheden en met nieuwe statistiek
- Hydra-Zoet zonder onzekerheden en met oude statistiek
- Hydra-Ring met onzekerheden en met nieuwe statistiek
- Hydra-Ring zonder onzekerheden en met nieuwe statistiek

De instellingen van bovengenoemde berekeningen worden hieronder besproken.

Berekening Hydra-Zoet zonder onzekerheden en met nieuwe statistiek		
Onderdeel	Naam	Bestand & bron
Instrument	Hydra-Zoet versie 1.6.3	Deltares (2014).
Databases	Vechtdelta CR2011	CR2011_VIJD_Vechtdelta_oever_a_07_v01.mdb CR2011_VIJD_Vechtdelta_oever_a_09_v01.mdb CR2011_VIJD_Vechtdelta_oever_a_10_v01.mdb CR2011_VIJD_Vechtdelta_oever_a_53_v01.mdb
Statistiek	Meerpeil IJsselmeer	WTI 2011, zie Deltares (2016a)
	Rivierafvoer Olst	WBI 2017, zie Deltares (2016a)
	Rivierafvoer Dalfsen	WBI 2017, zie Deltares (2016a)
	Windsnelheid per richting Schiphol	WBI 2017, zie Deltares (2016a)
	Kans op windrichting Schiphol	WBI 2017, zie Deltares (2016a)
Profiel (t.b.v. HBN en bekledingen)	Dijknormaal	MetalInfo_vechtdelta.xlsx
	Ruwheid bekleding	1,0
	Helling	Standaard 1 op 3

Berekening Hydra-Zoet zonder onzekerheden en met nieuwe statistiek		
Onderdeel	Naam	Bestand & bron
Criteria HBN	Overslagdebiet	1 l/s/m
Uitvoer	Belastingparameter	Lokale waterstand, HBN
		Bij 10 herhalingstijden berekent Hydra de bijbehorende belastingparameter
	Oeverlocaties	13 (alleen Vechtdelta)

In onderstaande tabel zijn de alleen de onderdelen weergegeven die zijn aangepaste t.o.v. de Hydra-Zoet berekening met nieuwe statistiek.

Berekening Hydra-Zoet zonder onzekerheden en met oude statistiek		
Onderdeel	Naam	Bestand & bron
Statistiek	Meerpeil IJsselmeer	Geerse (2016) op basis van brondata Deltares (2016a)
	Rivierafvoer Olst	Geerse (2016) op basis van brondata Deltares (2016a)
	Rivierafvoer Dalfsen	Geerse (2016) op basis van brondata Deltares (2016a)
	Windsnelheid per richting Schiphol	Geerse (2016) op basis van brondata Deltares (2016a)
	Kans op windrichting Schiphol	Geerse (2016) op basis van brondata Deltares (2016a)

Berekening Hydra-Ring met onzekerheden en met nieuwe statistiek		
Onderdeel	Naam	Bestand & bron
Instrument	Hydra-Ring versie 2 oktober 2015	-
Databases	Vecht- IJsseldelta WBI-2017	HRD vechtdelta.sqlite HRD ijsseldelta.sqlite
Statistiek	Meerpeil IJsselmeer	WTI 2011
	Rivierafvoer Olst	WBI 2017, zie Deltares (2016a)
	Rivierafvoer Dalfsen	WBI 2017, zie Deltares (2016a)
	Windsnelheid per richting Schiphol	WBI 2017, zie Deltares (2016a)
	Kans op windrichting Schiphol	WBI 2017, zie Deltares (2016a)
	Statistische onzekerheden meerpeil	WBI 2017, zie Deltares (2016a)
	Statistische onzekerheden windsnelheid	WBI 2017, zie Deltares (2016a)
	Modelonzekerheden waterstanden	WBI 2017, zie Deltares (2015b)
	Modelonzekerheden golven	WBI 2017, zie Deltares (2015b)
Profiel (t.b.v. HBN en bekledingen)	Dijknormaal	MetalInfo_vechtdelta.xlsx MetalInfo_ijsseldelta.xlsx
	Ruwheid bekleding	1,0
	Helling	Standaard 1 op 3
Criteria HBN	Overslagdebiet	1 l/s/m
Instellingen	TijdsInt.	FBC of NTI (afhankelijk van belastingparameter en locatie)
	Methode	FORM, FDIR of DSFI (afhankelijk van belastingparameter en locatie)
	Startmethode	8 of 9 (afhankelijk van belastingparameter en locatie)

Berekening Hydra-Ring met onzekerheden en met nieuwe statistiek		
Onderdeel	Naam	Bestand & bron
	Rel. Fact.	0,15
	ϵ_{β}	0,005
	ϵ_{HOH}	0,005
	ϵ_Z	0,005
	Nr. Iter.	150
Uitvoer	Belastingparameter	Lokale waterstand, HBN, golfhoogte
	Type 2 en 3	Type 3: voor een interval van een belastingparameter berekent Hydra-Ring de bijbehorende frequentie.
	oeverlocaties	Alle

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

Berekening Hydra-Ring zonder onzekerheden en met nieuwe statistiek		
Onderdeel	Naam	Bestand & bron
Statistiek	Meerpeil IJsselmeer	WTI 2011, zie Deltares (2016a)
	Windsnelheid per richting	WBI 2017, zie Deltares (2016a)
	Rivierafvoer Olst	WBI 2017, zie Deltares (2016a)
	Rivierafvoer Dalfsen	WBI 2017, zie Deltares (2016a)
	Kans op windrichting Schiphol	WBI 2017, zie Deltares (2016a)
Uitvoer	belastingparameter	Lokale waterstand, HBN, golfhoogte
	Type 3	Type 3: voor een interval van de belastingparameter berekent Hydra de bijbehorende frequentie.
	oeverlocaties	26 (13 Vechtdelta + 13 IJsseldelta)

3.4 Vergelijking tussen nieuwe en oude statistiek

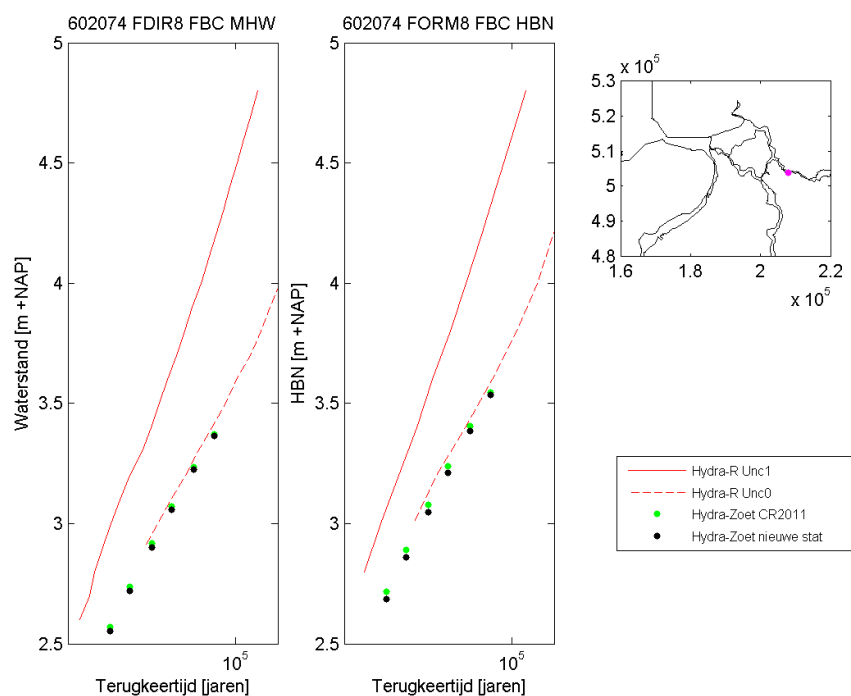
3.4.1 Inleiding

In deze paragraaf worden de Hydra-Zoet (nieuwe statistiek) resultaten vergeleken met Hydra-Zoet (oude statistiek) referentieberekeningen. Hiermee wordt het verschil als gevolg van het gebruik van nieuwe statistiek van de wind bij locatie Schiphol en nieuwe statistiek van de rivierafvoer op de IJssel bij locatie Olst geduid. Immers de statistiek van het IJsselmeerpeil en de rivierafvoer op de Vecht bij Dalfsen is niet gewijzigd. Een ander belangrijk verschil tussen beide berekeningen is de faalkans van de Ramspolkering in de nieuwe statistiek berekening faalt de kering 1 op de 100 sluitingen (Wettelijke normering). In WTI-2011 was dit 1 op de 285 sluitingen. De faalkans van de kering neemt toe in WBI-2017.

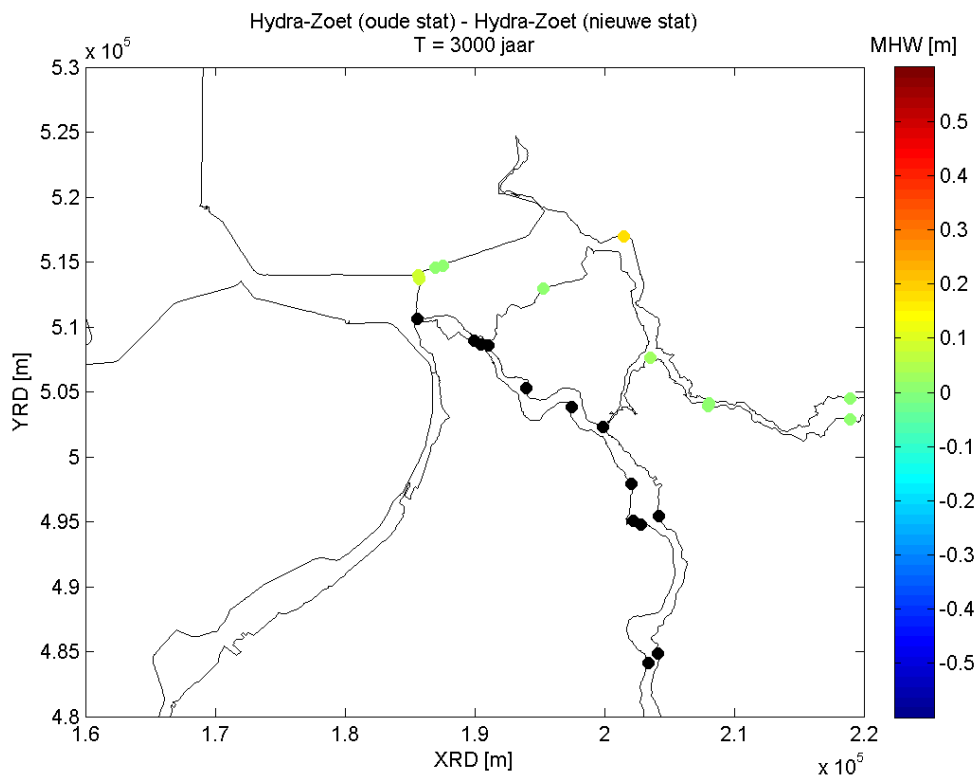
Er zijn voor 13 oeverlocaties langs de Vechtdelta figuren gemaakt conform Figuur 3.2. De groene punten geven de resultaten van de Hydra-Zoet (oude statistiek) referentie berekening. De zwarte punten geven de resultaten van de Hydra-Zoet (nieuwe statistiek) berekening, waardoor het effect van de aanpassing van de statistiek zichtbaar wordt. De doorgetrokken, rode lijn geeft de resultaten van de Hydra-Ring berekening waarbij kennisonzekerheid is meegenomen. De onderbroken, rode lijn geeft de resultaten van de Hydra-Ring berekening zonder kennisonzekerheid. Beide rode lijnen worden in de volgende paragrafen besproken, hier worden alleen de Hydra-Zoet resultaten behandeld.

Voor de 13 oeverlocaties langs de IJsseldelta zijn geen Hydra-Zoet resultaten beschikbaar. Alleen HR2006 informatie is voor deze locaties beschikbaar, geen WTI-2011 databases. Doordat destijds de verhanglijn methode is gebruikt zijn voor de IJsseldelta geen probabilistische berekeningen van WTI-2011 beschikbaar ter verificatie van Hydra-Ring berekeningen (zie paragraaf 2.3). Als gevolg van het project Ruimte voor de Rivier is veel veranderd aan de inrichting van het winterbed in vergelijking met de situatie die voor HR2006 is gemodelleerd (bijv. dijkverlegging, aanleg hoogwatergeul en bypass Reevediep). Hierdoor zijn de verschillen tussen Hydra-Ring en deze beschikbare referentie (HR2006) moeilijker interpreteerbaar. Om deze reden is afgezien van het aanmaken van een Hydra-Zoet referentie voor de IJsseldelta.

In Figuur 3.3 is de ruimtelijke verdeling van het verschil in de lokale waterstand bij een herhalingstijd van 3.000 jaar tussen de oude en de nieuwe statistiek berekend met Hydra-Zoet. Dit ruimtelijk beeld van het verschil tussen oude en nieuwe statistiek is gemaakt voor de herhalingstijden 100, 1.000, 3.000 en 10.000 jaar en voor de belastingparameters lokale waterstand, HBN en golfhoogte. In deze figuren zijn de locaties langs de IJssel weergegeven met de kleur zwart, omdat hier geen Hydra-Zoet resultaten beschikbaar voor zijn.



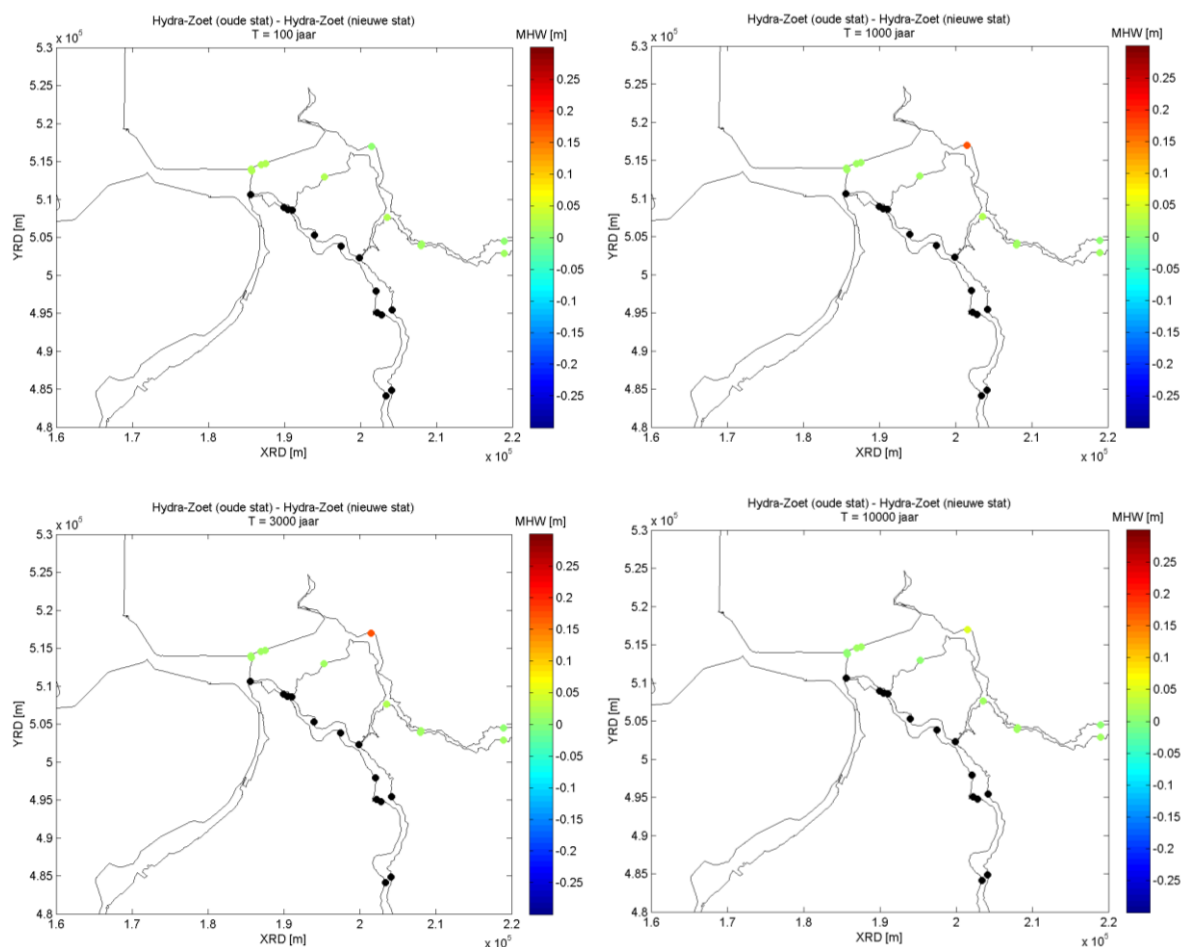
Figuur 3.2 Overschrijdingsfrequentielijnen lokale waterstand en HBN, locatie 602074.



Figuur 3.3 Ruimtelijke verdeling van het verschil in de lokale waterstand bij een herhalingstijd van 3.000 jaar tussen de oude en de nieuwe statistiek berekend met Hydra-Zoet (met een zwarte kleur worden ontbrekende waarden weergegeven).

3.4.2 Resultaten lokale waterstand

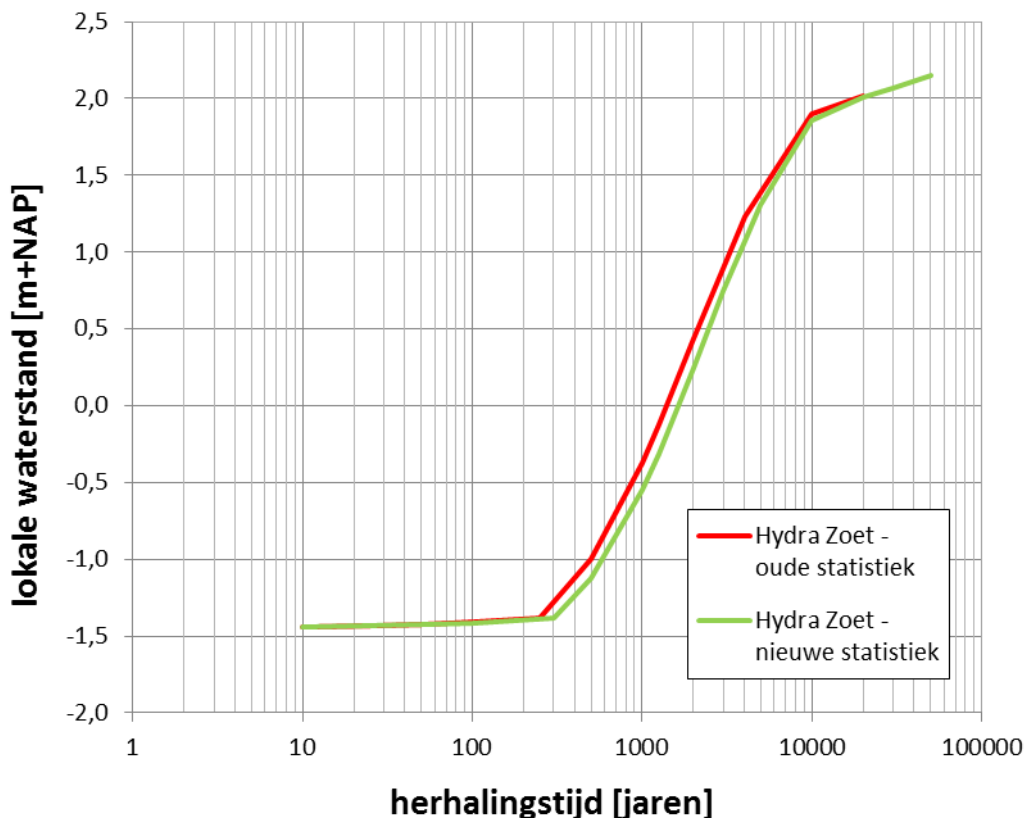
Het effect van de nieuwe windstatistiek en de toename van de faalkans van de Ramspolkering op de lokale waterstanden is voor vier herhalingstijden (100, 1.000, 3.000 en 10.000 jaar) te zien in Figuur 3.4. In de figuur is te zien dat voor alle locaties behalve de locatie nabij Zwartsluis de aanpassing van de statistiek en de faalkans van de Ramspolkering een beperkte invloed heeft op de marginale statistiek van de lokale waterstand. Deze resultaten komen overeen met de verwachting, omdat de aanpassing van de windstatistiek gering.



Figuur 3.4 Ruimtelijke verdeling van het verschil in de lokale waterstand bij een herhalingstijd van 100, 1.000, 3.000 en 10.000 jaar tussen de oude en de nieuwe statistiek berekend met Hydra-Zoet (met een zwarte kleur worden ontbrekende waarden weergegeven).

In de resultaten voor locatie Zwartsluis (meest noordelijke locatie) is te zien dat de lokale waterstand voor herhalingstijden groter dan 100 en kleiner dan 10.000 jaar toeneemt met 0,15-0,20 m, (met name) als gevolg van de toename van de faalkans van de Ramspolkering (paragraaf 2.5.5) i.c.m. verandering van de statistiek van de windrichting (paragraaf 2.5.4). Opstuwing van de waterstand vanuit het Zwarte Meer (windrichting) en bij een falende kering (faalkans) vanuit het Ketelmeer beïnvloedt de waterstand op deze locatie. Toename van de faalkans zorgt er voor dat de opstuwing vanuit het Ketelmeer sterker doorwerkt in de marginale statistiek van de lokale waterstand. De aanpassing van de richtingskansen zorgt voor een grotere kans op opstuwing vanuit ongunstige windrichting.

Bij locatie Zwartsluis (DR9_334_ZW in database CR2011) treedt ook een uitzondering op. Bij iets meer dan de helft van de productiesommen treedt droogval op. De lokale waterstand in de database is dan gelijk aan -1,455 m+NAP. Dit heeft tot gevolg dat in de probabilistische berekening een lagere waterstand bij herhalingstijd 1250 jaar (norm tot 2017) wordt uitgerekend dan het toetspeil van de HR2006 (namelijk 1,8 m+NAP). In Figuur 3.5 is te zien dat de lokale waterstand vanaf herhalingstijd 250 jaar snel toeneemt tot herhalingstijd 10.000 jaar. Door aanpassing van de faalkans en de statistiek van de windrichting verschuift de frequentielijn een beetje naar de extremere herhalingstijden. In Deltares (2016a) is aangegeven dat het effect van de aanpassing van de faalkans van de Ramspolkering voornamelijk speelt op het Zwarte Meer en minder is dan 0,1 m. Mede als gevolg van de droogval resultaten in de productiesommen, werkt de aanpassing bij de locatie Zwartsluis wat meer door.

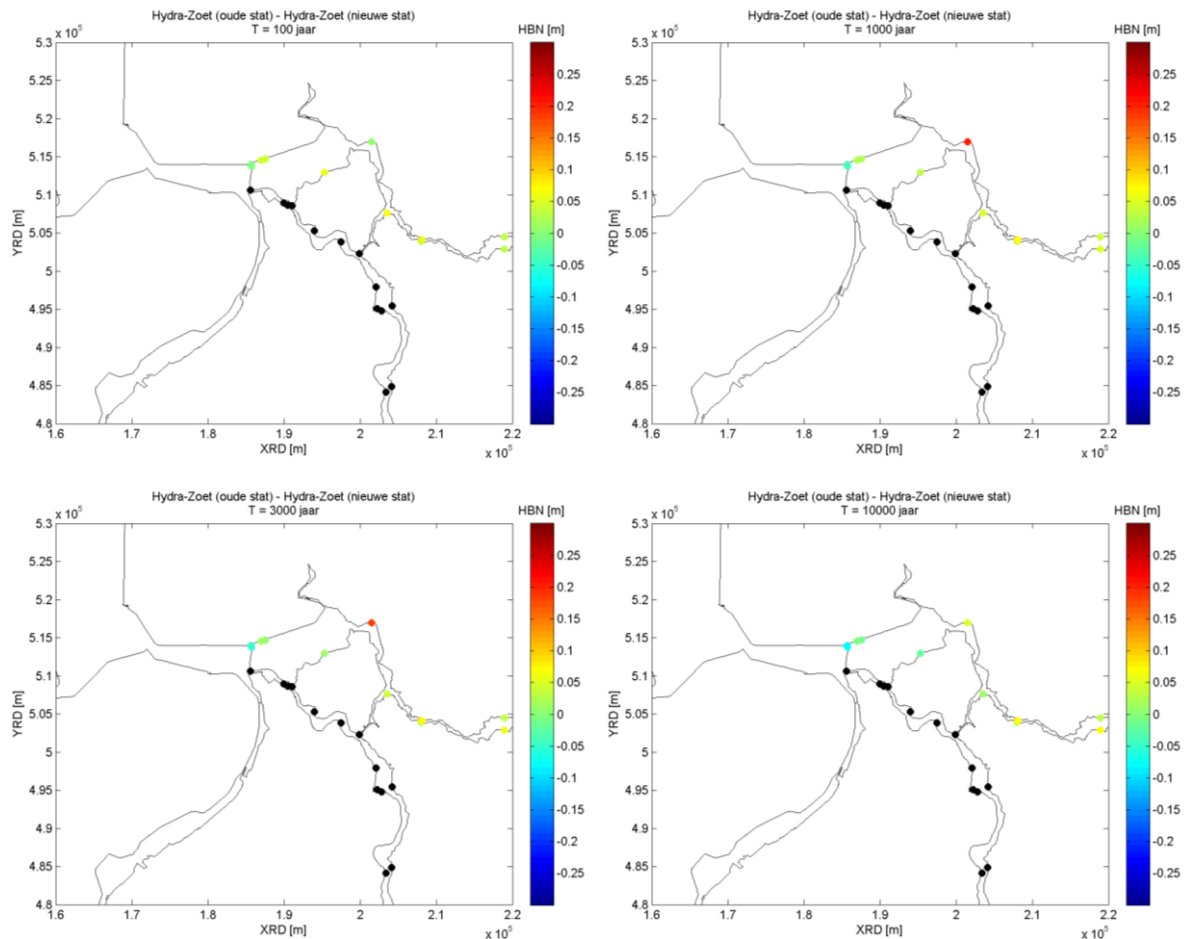


Figuur 3.5 Overschrijdingsfrequentielijnen lokale waterstand van Hydra-Zoet berekeningen (oude en nieuwe statistiek), locatie 603071 (Zwartsluis - DR9_334_ZW in database CR2011).

3.4.3 Resultaten hydraulisch belastingniveau

In Figuur 3.6 is het effect te zien van de nieuwe windstatistiek (paragraaf 2.5.4) en de aanpassing van de faalkans van de Ramspolkering (paragraaf 2.5.5) op de hydraulische belasting voor vier herhalingstijden (100, 1.000, 3.000 en 10.000 jaar). In de afbeeldingen is te zien dat langs dijkkring 7 (Noordoostpolder), 9 (noordelijke oever Zwarte water en Vecht), 10 (Mastenbroek) en 53 (Salland) de aanpassing van de statistiek en de faalkans nauwelijks invloed heeft op het hydraulisch belastingniveau (minder dan 0,1 m). Deze resultaten komen overeen met de verwachting, omdat de aanpassing van de windstatistiek gering is en het

HBN weinig wordt beïnvloed door de aanpassing van de faalkans van de Ramspolkering (Deltares, 2016a).



Figuur 3.6 Ruimtelijke verdeling van het verschil in het hydraulisch belastingniveau bij een herhalingsstijd van 100, 1.000, 3.000 en 10.000 jaar tussen de oude en de nieuwe statistiek berekend met Hydra-Zoet (met een zwarte kleur worden ontbrekende waarden weergegeven).

Op het HBN van de locatie nabij Zwartsluis heeft de aanpassing van statistiek en faalkans meer effect (namelijk 0,15-0,20 m). De berekening van het HBN wordt ook beïnvloed door het percentage droogval in de productieberekeningen. Het verloop van de frequentielijn van het HBN is vergelijkbaar met de marginale statistiek van de lokale waterstand (zie Figuur 3.5). Door aanpassing van de faalkans verschuift de frequentielijn enigszins, maar wel met het gevolg dat het HBN tussen eens per 250 en eens per 10.000 jaar significant wijzigt.

Tot slot wordt opgemerkt dat een deel van de verschillen in het HBN ook wordt veroorzaakt doordat de ligging van locaties niet gelijk hoeft te zijn aan die in CR2011. Hierdoor zullen verschillen in de berekening van golven en hydraulisch belastingniveau optreden. Dit is niet in detail uitgezocht. Gegeven het berekende verschil, is de verwachting dat het verschuiven van de locaties een beperkt effect heeft (minder dan 5 cm) op het berekende verschil in Figuur 3.6.

3.5 Vergelijking tussen Hydra-Zoet en Hydra-Ring

3.5.1 Inleiding

In deze paragraaf worden de Hydra-Ring (zonder kennisonzekerheid en met nieuwe statistiek) resultaten vergeleken met Hydra-Zoet (nieuwe statistiek) berekeningen. Hiermee wordt het verschil als gevolg van de overgang op een nieuwe rekentechniek geduid. Hydra-Ring bevat een grote verscheidenheid aan rekentechnieken, waarbij ook mogelijkheden bestaan om rekentechnieken te combineren. In die zin is het aantal mogelijkheden zeer uitgebreid en divers. De belangrijkste technieken zijn:

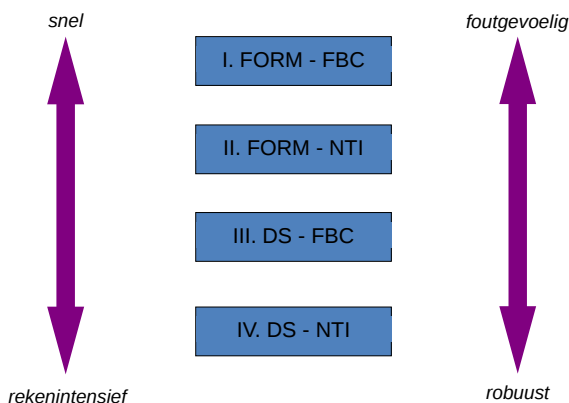
Rekenmethoden probabilistiek (paragraaf 2.8)

- First Order Reliability Method (FORM)
- Directional Sampling (DS)

Rekenmethoden tijdsintegratie (paragraaf 2.6)

- Ferry Borges Castanheta (FBC)
- Numerieke Tijds Integratie (NTI)

Er is per locatie uitgezocht welke technieken betrouwbare uitkomsten geven en wat de benodigde rekentijden zijn. Deze rekentijden zijn relevant, zowel voor de uitvoerbaarheid van de geplande analyses als ook later voor de praktische toepasbaarheid in de formele beoordeling. In Figuur 3.7 wordt de relatie tussen de rekentechniek en de robuustheid en de toepasbaarheid van de techniek weergegeven. Bij het uitvoeren van berekeningen moet een combinatie gekozen worden van een probabilistische rekentechniek en een rekentechniek voor tijdsintegratie. Alle vier combinaties uit de figuur zijn mogelijk. Allereerst zijn alle locaties doorgerekend met techniek I FORM-FBC en vervolgens zijn de andere technieken toegepast. Zodra een techniek een betrouwbaar resultaat heeft opgeleverd, zijn berekeningen met volgende technieken niet meer uitgevoerd.



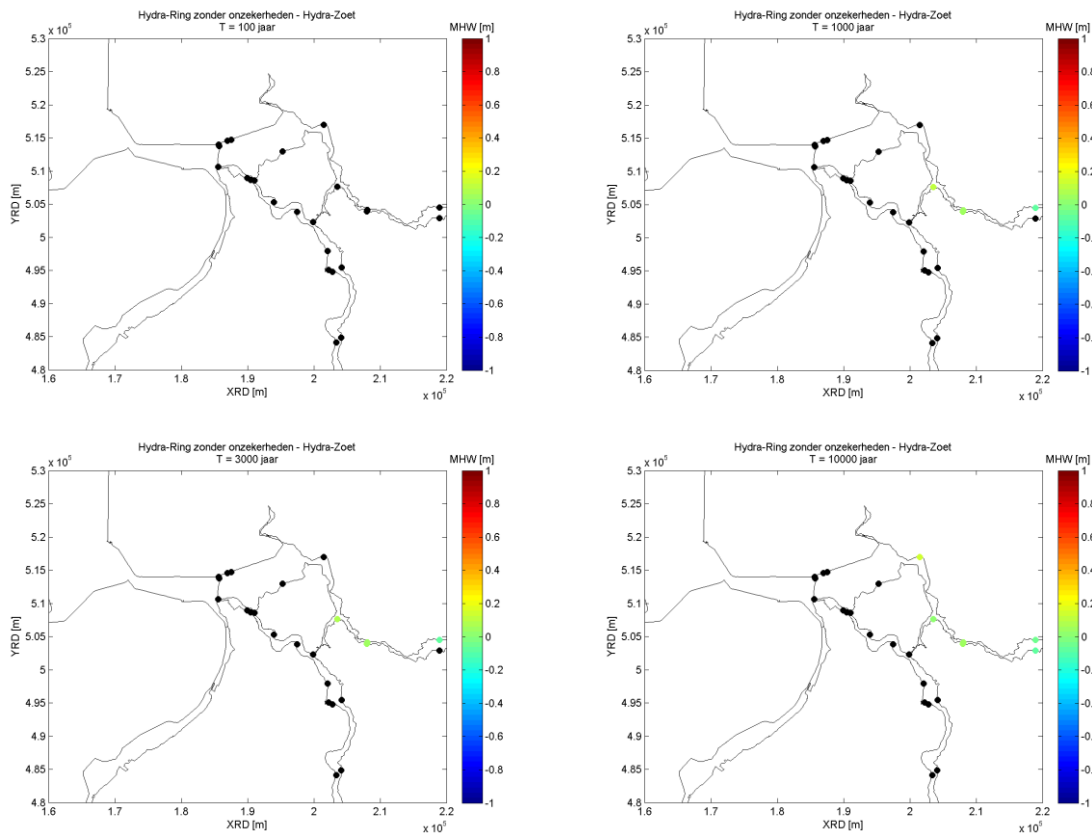
Figuur 3.7 Schema voor de keuze van de rekentechnieken uit vier combinaties voor probabilistisch rekenen en tijdsintegratie.

Doordat rekentechnieken verschillen, is er ook een verschil in uitkomsten. In de paragrafen 3.5.2 en 3.5.3 worden de resultaten getoond van alle beschikbare berekeningen. Naast dat de vergelijking van de Hydra-Ring resultaten met de Hydra-Zoet resultaten logisch moet zijn, geeft een onderlinge vergelijking van de resultaten van de verschillende rekentechnieken inzicht in de robuustheid van de berekening.

Omdat de Hydra-Ring berekeningen zijn uitgevoerd met databases gevuld door WBI-2017 productieberekeningen, treden er ook verschillen tussen deze berekeningen en de Hydra-Zoet op. De Hydra-Zoet berekeningen zijn namelijk uitgevoerd met WTI-2011 databases. In WBI-2017 en WTI-2011 zijn verschillende droogval-procedures toegepast, waardoor verschillen optreden. Trajecten waar hoogwatermaatregelen worden ingezet (inzet hoogwatergeul Veessen-Wapenveld en afvoer via het Reevediep in de IJsseldelta) of trajecten die zijn beschermd door de inzet van stormvloedkeringen (sluiten van de Ramspolkering in de Vechtdelta), hebben vaak te maken met niet uniform oplopende waterstanden en golven in de database. Indien dit het geval is, corrigeert Hydra-Zoet waterstanden in de database tot een uniform oplopende reeks. Het nadeel hiervan is dat er relevante informatie wordt weggegooid, daarom hiervan in de Hydra-Ring berekening van afgezien. Ook hierdoor treden verschillen in uitkomsten op.

3.5.2 Resultaten lokale waterstand

Het effect van de nieuwe rekentechniek en de nieuwe databases op de lokale waterstanden is voor vier herhalingstijden (100, 1.000, 3.000 en 10.000 jaar) te zien in Figuur 3.8. In de figuur is te zien dat voor veel locaties geen resultaat beschikbaar is. Door de lange rekentijden is het niet voor elke locatie gelukt om het benodigde bereik van lokale waterstanden met Hydra-Ring (zonder kennisonzekerheid en met nieuwe statistiek) door te rekenen. De gebruiker van Hydra Ring geeft een set waterstanden op, waarvoor de herhalingstijd moet worden berekend. Als blijkt dat in de uitvoer van de berekening niet het gehele bereik van herhalingstijden 100 t/m 10.000 jaar is bepaald, moet iteratief worden vastgesteld voor welke waterstanden aanvullend de herhalingstijd berekend moet worden. Deze iteratie in combinatie met een aanzienlijke rekentijd, zorgt voor een behoorlijke doorlooptijd van alle berekeningen.



Figuur 3.8 Ruimtelijke verdeling van het verschil in de lokale waterstand bij een herhalingsijd van 100, 1.000, 3.000 en 10.000 jaar tussen de oude en de nieuwe statistiek berekend met Hydra-Zoet (met een zwarte kleur worden ontbrekende waarden weergegeven).

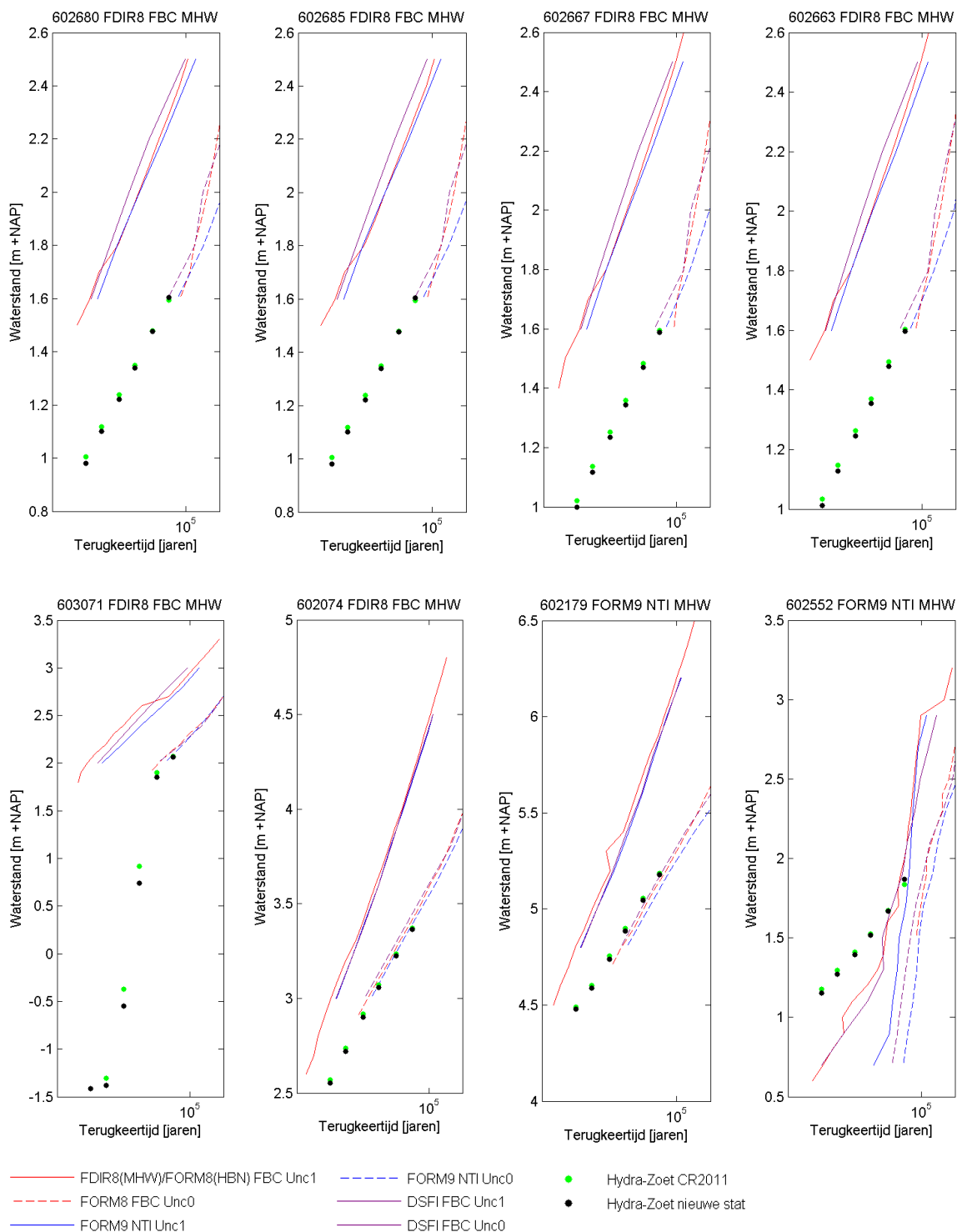
Zoals hierboven gesteld wordt de vergelijking tussen de Hydra-Ring (zonder kennisonzekerheid en met nieuwe statistiek) berekening en de Hydra-Zoet (met nieuwe statistiek) berekening bemoeilijkt door de lange rekentijd van Hydra-Ring, de verschillen tussen de databases en de toepassing van automatische correcties op de database (door Hydra-Zoet). Hieronder is per testlocatie uitgelegd op welke wijze de vergelijking moet worden geïnterpreteerd. Hiervoor maken we gebruik van de grafieken uit Figuur 3.9. In de grafieken komen resultaten van meerdere Hydra-Ring berekeningen voor. In de legenda (onderaan in de figuur) is aangegeven met welke rekentechniek de berekening is uitgevoerd.

Locatie 602680 en 602685: Deze locaties liggen net achter de Ramspolkering op het Zwarte Meer. Gekozen is om voor hetzelfde bereik van waterstanden de frequentie uit te rekenen als in de berekening met kennisonzekerheid (namelijk 1,6 – 2,5 m+NAP, zie paragraaf 3.6). Door de aanzienlijke doorlooptijd die nodig is om voor het uitvoeren van de berekeningen was er geen tijd meer beschikbaar om deze berekeningen te herhalen voor een ander bereik. Linksboven in Figuur 3.9 is te zien dat de Hydra-Zoet resultaten in het verlengde liggen van de Hydra-Ring resultaten. De verwachting is daarom dat de Hydra-Ring resultaten niet of slechts in geringe mate afwijken van de Hydra-Zoet resultaten.

Locatie 602667 en 602663: Deze locaties liggen langs dijkkring 7 (Noordoostpolder) op het Zwarte Meer. Bij deze locaties ontbreken ook de Hydra-Ring resultaten in de grafieken vanwege het gekozen bereik van de waterstanden waarvoor de frequentie is bepaald. In de grafieken van locaties 602667 en 602663 rechtsboven in Figuur 3.9 is te zien dat de Hydra-Zoet resultaten in het verlengde liggen van de Hydra-Ring resultaten. Ook voor deze locaties is daarom de verwachting dat de Hydra-Ring resultaten slechts in geringe mate afwijken van de Hydra-Zoet resultaten.

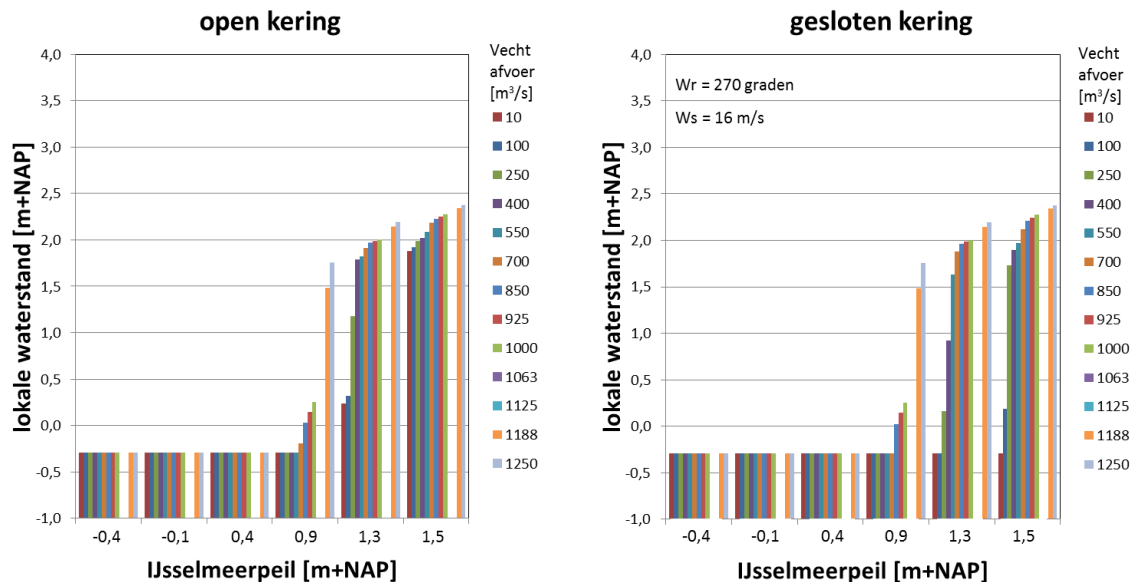
Locatie 603071: Deze locatie ligt nabij Zwartsluis langs dijkkring 9 bij de monding van het Zwarte Water. Deze locatie is eerder besproken in de vergelijking tussen oude en nieuwe statistiek in paragraaf 3.4. Daar bleek dat iets meer dan de helft van WTI-2011 productieberekeningen tot droogval leidt op de deze locatie (met bodem op -1,455 m+NAP). Ongeveer een tiende van de productieberekeningen van WBI-2017 leidt tot droogval op deze locatie (bodem op -2,32 m+NAP). Als gevolg van de actualisatie van de WAQUA schematisatie en eventueel geringe verschuiving van de exacte positie van de oeverlocatie, treedt dit verschil op. Uit de grafiek van locatie 603071 linksonder in Figuur 3.9 blijkt dat de Hydra-Ring berekening wel aansluit bij de resultaten van de Hydra-Zoet berekening.

Locaties 602332, 602443, 602179, 602074 en 602894: Van deze locaties kunnen wel waterstanden van meerdere herhalingstijden tussen de Hydra-Ring en de Hydra-Zoet berekening worden vergeleken. Uit deze vergelijking blijkt de Hydra-Ring berekening goed overeenkomt met de resultaten van de Hydra-Zoet berekening. De verschillen blijven beperkt tot ongeveer 0,1 m. In Figuur 3.9 zijn (ter illustratie) de resultaten van locaties 602179 en 602074 weergegeven.



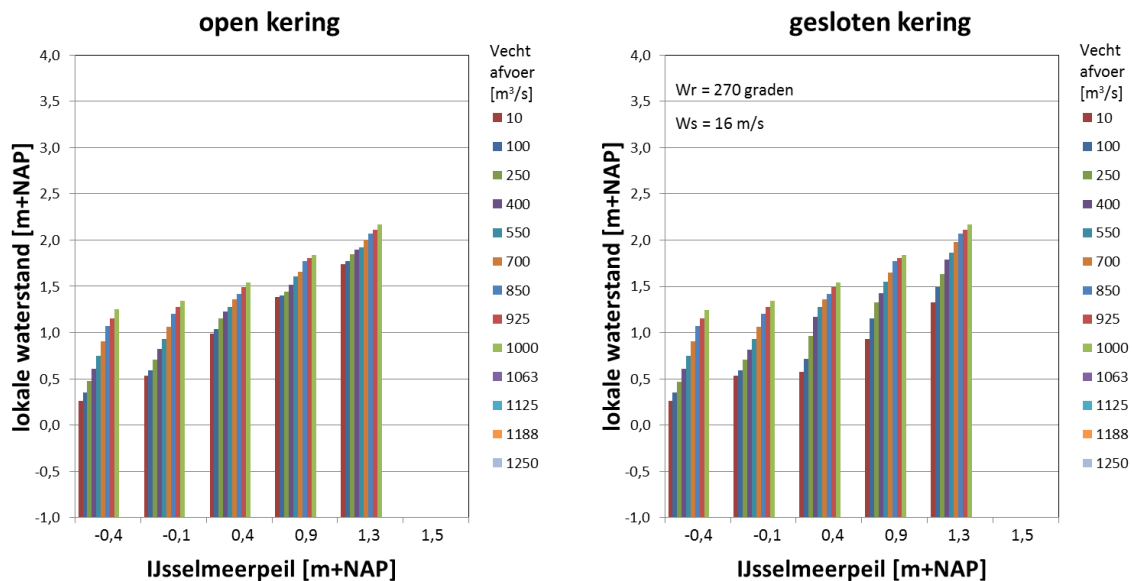
Figuur 3.9 Overschrijdingsfrequentielijnen lokale waterstand van Hydra-Ring berekeningen (zonder onzekerheden en met nieuwe statistiek), locaties 602680, 602685, 602667, 602663, 603071, 602074, 602179 en 602552.

Locatie 602552: Deze locatie ligt langs dijkkring 10 (Mastenbroek) aan de oostkant van het Zwarte meer. Uit de grafiek rechtsonder in Figuur 3.9 is te zien dat de Hydra-Ring berekening afwijkt van de Hydra-Zoet berekening. Dit is het gevolg van verschillen tussen de database van WBI-2017 en WTI-2011. In de WBI-2017 valt deze locatie bij een groot aantal productiesommen droog. In Figuur 3.10 is voor verschillende combinaties van IJsselmeerpeil en Vecht rivierafvoer de berekende lokale waterstand uit de WBI-2017 database weergegeven. Gekozen is om de productiesommen bij een westenwind (270 m/s) met een snelheid van 16 m/s te tonen voor een open en gesloten Ramspolkering. Deze windbelasting is illustratief voor de lokale waterstand bij een herhalingsjijd van 2.000 jaar. Uit deze figuur blijkt dat tot en met een meerpeil van 0,9 m+NAP en een Vechtafvoer van 700 m³/s deze locatie (aan het Zwarte Meer langs dijkkring 10) droogvalt. In de database is dan een waterstand van -0,29 m+NAP weggeschreven. Bij extremere belastingcombinaties staat er water tegen de kering aan (zo blijkt uit de WBI-2017 resultaten).



Figuur 3.10 Weergave lokale waterstanden uit WBI-2017 database bij westenwind van 16 m/s voor verschillende combinaties van meerpeil en rivierafvoer, locatie 602552.

In Figuur 3.11 is voor verschillende combinaties van IJsselmeerpeil en Vecht rivierafvoer de berekende lokale waterstand uit de WTI-2011 database weergegeven. Uit deze figuur blijkt dat in WTI-2011 resultaten de locatie helemaal niet droog valt. Gevolg is dat over het gehele frequentiebereik hogere lokale waterstanden worden uitgerekend door Hydra-Zoet.



Figuur 3.11 Weergave lokale waterstanden uit WTI-2011 database bij westenwind van 16 m/s voor verschillende combinaties van meerpeil en rivierafvoer, locatie 602552.

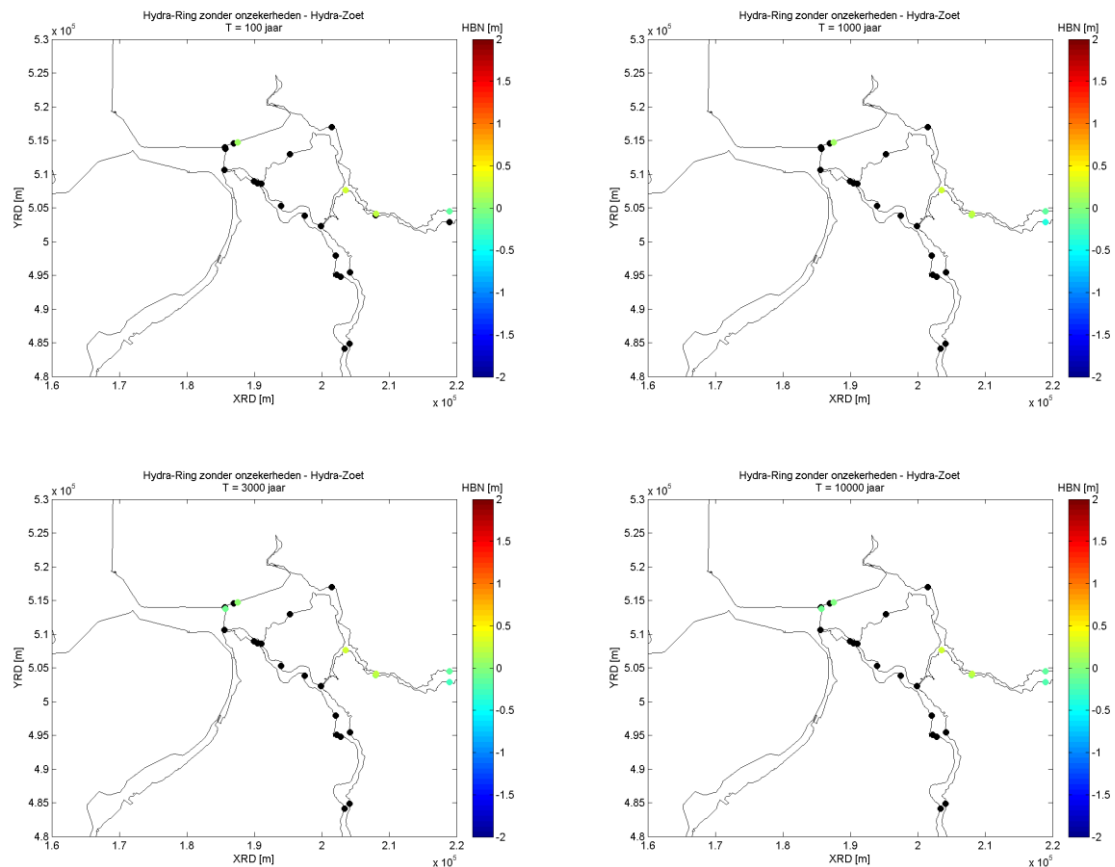
3.5.3 Resultaten hydraulisch belastingniveau

Het effect van de nieuwe rekentechniek en de nieuwe databases op het hydraulisch belastingniveau is voor vier herhalingsjiden (100, 1.000, 3.000 en 10.000 jaar) te zien in Figuur 3.12. Te zien is dat voor veel locaties geen resultaat beschikbaar is. Door de lange rekentijden is het ook niet mogelijk gebleken om het gehele bereik van het HBN voor alle locaties door te rekenen in de Hydra-Ring (zonder kennisonzekerheid en met nieuwe statistiek) berekening. Voor de locaties waarvan het HBN goed kan worden vergeleken, blijven de verschillen beperkt 0,15 m.

Ook hier wordt opgemerkt dat een deel van de verschillen in het HBN ook wordt veroorzaakt doordat de ligging van locaties niet gelijk hoeft te zijn aan die in CR2011. Hierdoor zullen verschillen in de berekening van golven en hydraulisch belastingniveau optreden. Dit is niet in detail uitgezocht. Gegeven het berekende verschil, is de verwachting dat het verschuiven van de locaties een beperkt effect heeft (minder dan 5 cm) op het berekende verschil.

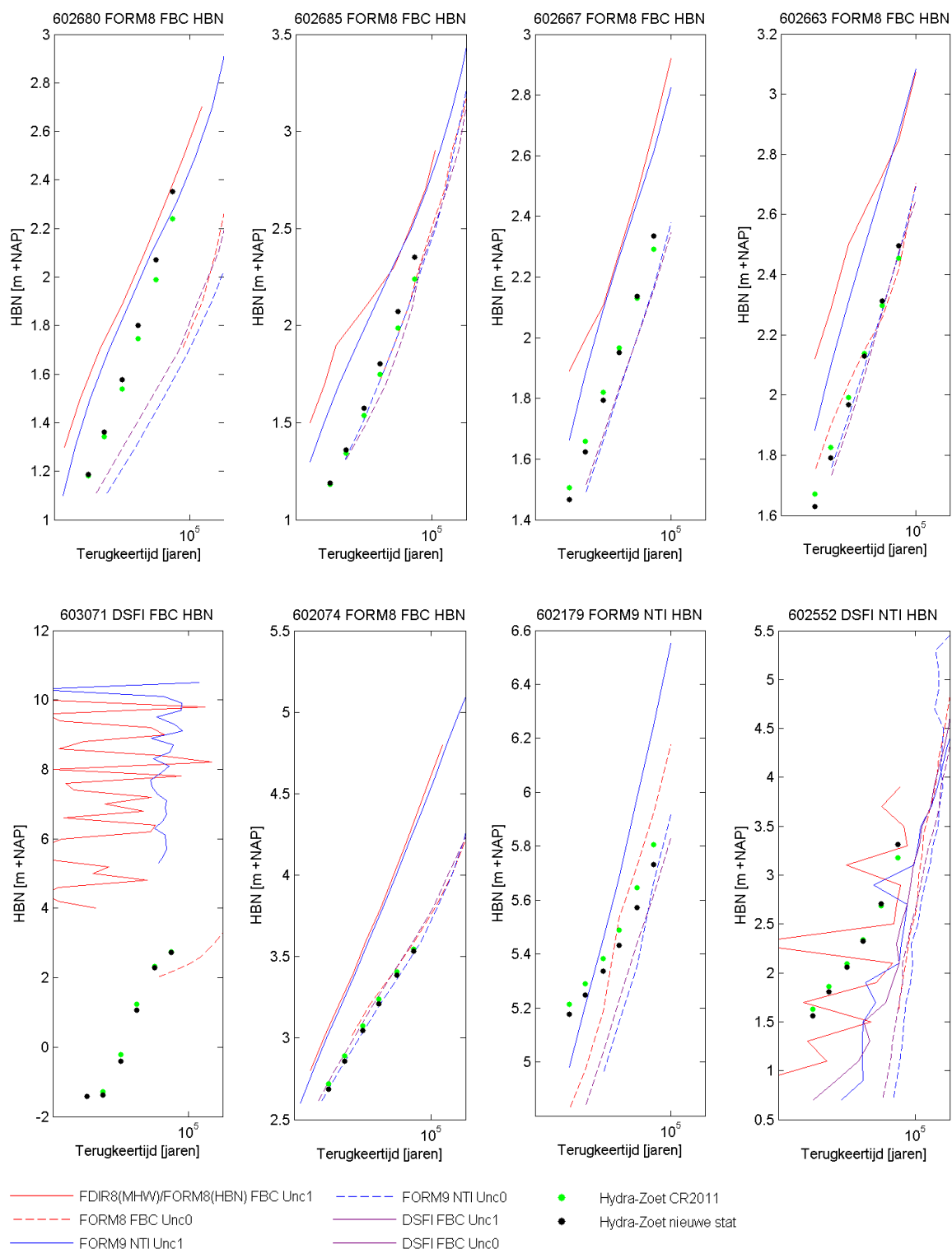
Net als in de voorgaande paragraaf 3.5.2 worden enkele locaties besproken om het verschil tussen de Hydra-Ring en de Hydra-Zoet berekening te duiden. Hiervoor zijn de frequentielijnen van het hydraulisch belastingniveau voor de verschillende rekentechnieken en meerdere locaties weergegeven in Figuur 3.13. Voor de helft van deze locaties blijkt dat de Hydra-Ring resultaten goed overeenkomen met de Hydra-Zoet resultaten. Uitzondering hierop zijn vier locaties. Deze worden hieronder besproken.

Locatie 602680: Deze WBI-2017 locatie ligt in het midden van het Zwarte Meer net achter de Rampsolkering, maar wordt vergeleken van een WTI-2011 locatie die aan de oever ligt (en net achter de kering). Doordat strijklengten hier verschillen, ontstaan de verschillen tussen beide berekeningen. In de vorige paragraaf was te zien dat de lokale waterstand van beide berekeningen goed op elkaar aansluiten. Daarnaast blijkt uit het resultaat van locatie 602685 (welke ook beschut ligt aan de oever), dat Hydra-Ring het HBN achter de kering met geringe afwijking t.o.v. Hydra-Zoet berekent.



Figuur 3.12 Ruimtelijke verdeling van het verschil in het hydraulisch belastingniveau bij een herhalingsijd van 100, 1.000, 3.000 en 10.000 jaar tussen de oude en de nieuwe statistiek berekend met Hydra-Zoet (met een zwarte kleur worden ontbrekende waarden weergegeven).

- Locatie 603071: Zowel bij de bespreking van de resultaten in paragraaf 3.4 als in 3.5.2 is aangegeven dat het hier een lastige locatie nabij Zwartsluis betreft. In de grafiek linksonder is te zien dat de Hydra-ring FORM8-un0 berekening aansluit bij de Hydra-Zoet resultaten. In de figuur is ook te zien dat de berekening met onzekerheid niet convergeert.
- Locatie 602179: Deze locatie ligt langs het Zwarte Water (langs dijkkring 53 Salland) net ten zuiden van de monding van Vecht. Doordat de precieze positie van de WBI-2017 locatie iets afwijkt van de WTI-2011 locatie ontstaan op deze locatie geringe afwijkingen van het HBN. Verschil in strijklengte en bodemligging is hier de oorzaak van. De verschillen zijn echter beperkt.
- Locatie 602552: Deze locatie ligt langs het Zwarte Meer (langs dijkkring 10 Mastenbroek) achter de regionale kering van het Kampereiland. In de voorgaande paragraaf 3.5.2 is al uitvoerig besproken dat de database van WBI-2017 aanzienlijk verschilt van de WTI-2011 database. In de WBI-2017 resultaten treedt op deze locatie veel meer droogval op. De verschillen die te zien zijn in de grafiek rechtsonder in Figuur 3.13 zijn op basis van deze verschillen in de database te verklaren.



Figuur 3.13 Overschrijdingsfrequentielijnen hydraulisch belastingniveau van Hydra-Ring berekeningen (zonder onzekerheden en met nieuwe statistiek), locaties 602680, 602685, 602667, 602663, 603071, 602074, 602179 en 602552.

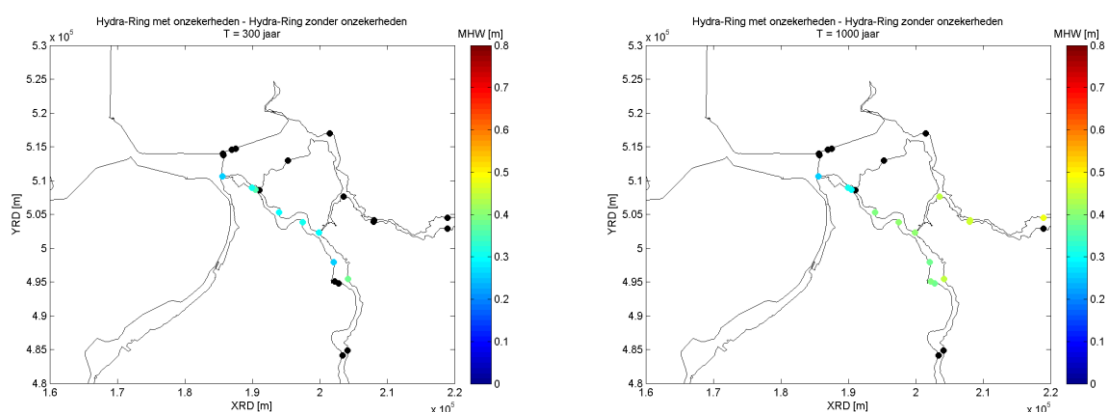
3.6 Effect onzekerheden

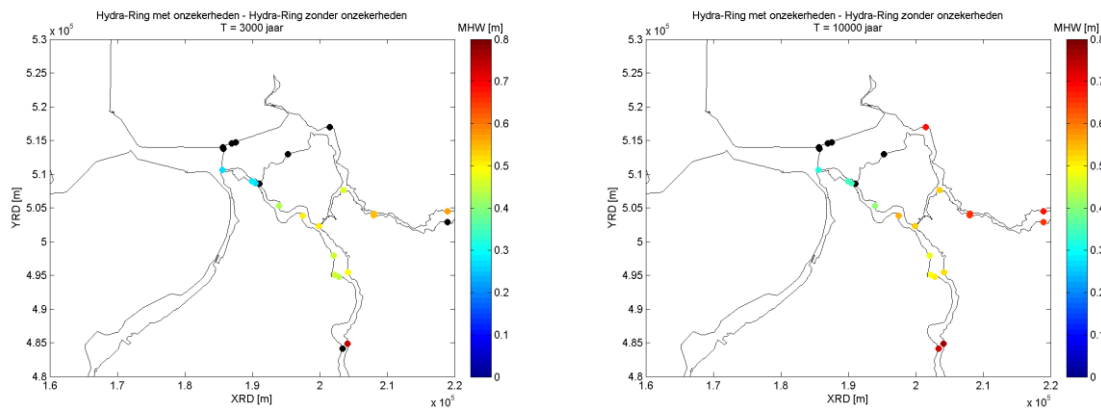
3.6.1 Inleiding

In deze paragraaf worden de Hydra-Ring (met kennisonzekerheid en met nieuwe statistiek) resultaten vergeleken met Hydra-Ring (zonder kennisonzekerheid en met nieuwe statistiek) berekeningen. Hiermee wordt het effect van het meenemen van onzekerheden geduid. Kennisonzekerheid (statistische en modelonzekerheid) kan als extra stochast toegevoegd worden aan Hydra-Ring. De extra stochasten die aan het belastingmodel zijn toegevoegd zijn beschreven in paragraaf 2.7. In WBI-2017 is de modelonzekerheid uitgedrukt in onzekerheid van de berekende lokale waterstand en in onzekerheid van de berekende golven. De onzekerheid in de statistiek van de basisstochasten IJsselafoer, Vechtafoer, IJsselmeerpeil en windsnelheid zijn ook in de Hydra-Ring berekening opgenomen (als statistische onzekerheid).

3.6.2 Resultaten lokale waterstand

Het effect van de kennisonzekerheid op de lokale waterstanden is voor vier herhalingstijden (300, 1.000, 3.000 en 10.000 jaar) te zien in Figuur 3.14. In de figuur is te zien dat voor een aantal van de analyse locaties geen resultaat beschikbaar is. Door de lange rekentijden is het niet voor elke locatie mogelijk gebleken om het benodigde bereik van lokale waterstanden met Hydra-Ring (zonder kennisonzekerheid en met nieuwe statistiek) door te rekenen (zoals ook al eerder aangegeven). In de plot rechtsboven in de figuur is te zien dat langs de IJssel de toename van de waterstand ongeveer gelijk is aan de sigma van normale verdeling waarmee de modelonzekerheid in de waterstand is doorgerekend. De bijdrage van de statistische onzekerheid is hier gering, omdat de onzekerheid in de statistiek bij deze kleine herhalingstijden gering is. Als de herhalingstijden groter worden, neemt het effect van kennisonzekerheid toe overeenkomstig de bijdrage van de statistische onzekerheid aan dit effect. In de figuur is ook te zien dat het effect van de kennisonzekerheid bovenstrooms op de Vecht en de IJssel het grootst is. Doordat de frequentielijn op de riviertakken minder stijl is, werkt de onzekerheid hier het sterkst door.

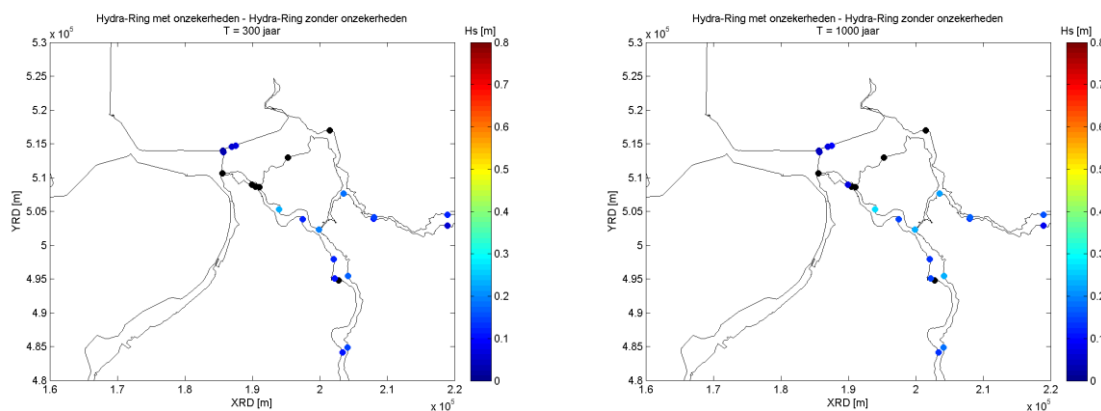


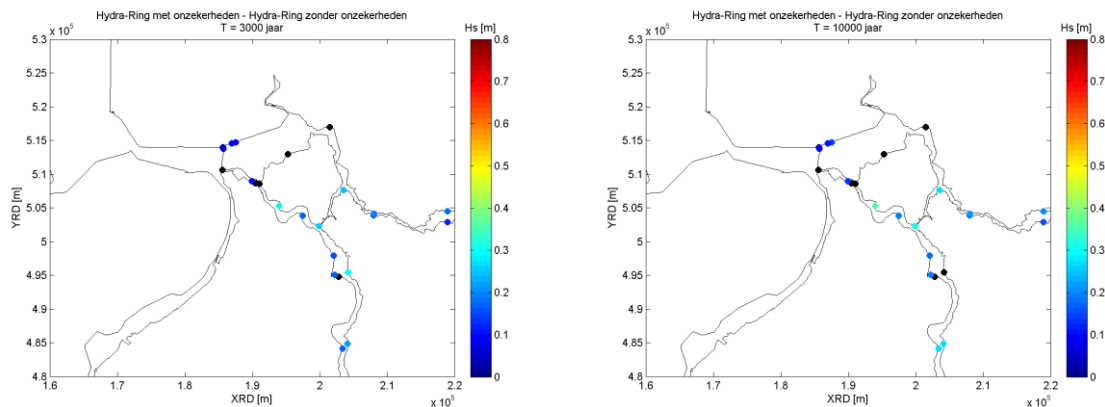


Figuur 3.14 Ruimtelijke verdeling van het verschil in de lokale waterstand bij een herhalingsstijd van 100, 1.000, 3.000 en 10.000 jaar tussen de Hydra-Ring berekening met en zonder onzekerheid (met een zwarte kleur worden ontbrekende waarden weergegeven) (met een zwarte kleur worden ontbrekende waarden weergegeven).

3.6.3 Resultaten golfhoogte

Het effect van de kennisonzekerheid op de golfhoogte is voor vier herhalingsstijden (300, 1.000, 3.000 en 10.000 jaar) te zien in Figuur 3.15. Ook het effect van de onzekerheid op de golfhoogte is niet voor elke locatie bij elke herhalingsstijd beschikbaar. In de plots van de figuur is duidelijk te zien dat het effect van onzekerheid op de golfhoogte groter is bij westelijke georiënteerde locaties. Anders gesteld: locaties die westelijke georiënteerd zijn hebben frequenter te maken met golfaanvallen, omdat een sterke windbelasting vanuit het oosten zeer zeldzaam is. Logisch gevolg is dan ook dat de onzekerheid in de golfhoogte voornamelijk optreedt bij westelijk georiënteerde locaties. In de plot linksonder in de figuur (golfhoogte bij herhalingsstijd 3.000 jaar) is dit nog het duidelijkst te zien. Het effect van onzekerheid is bij de oostelijk georiënteerde locaties langs dijkkring 7 kleiner dan bij de locaties aan de zuidkant van dijkkring 10 en de locatie op de oostelijke oever van de IJssel (bovenstrooms van Veessen-Wapenveld).





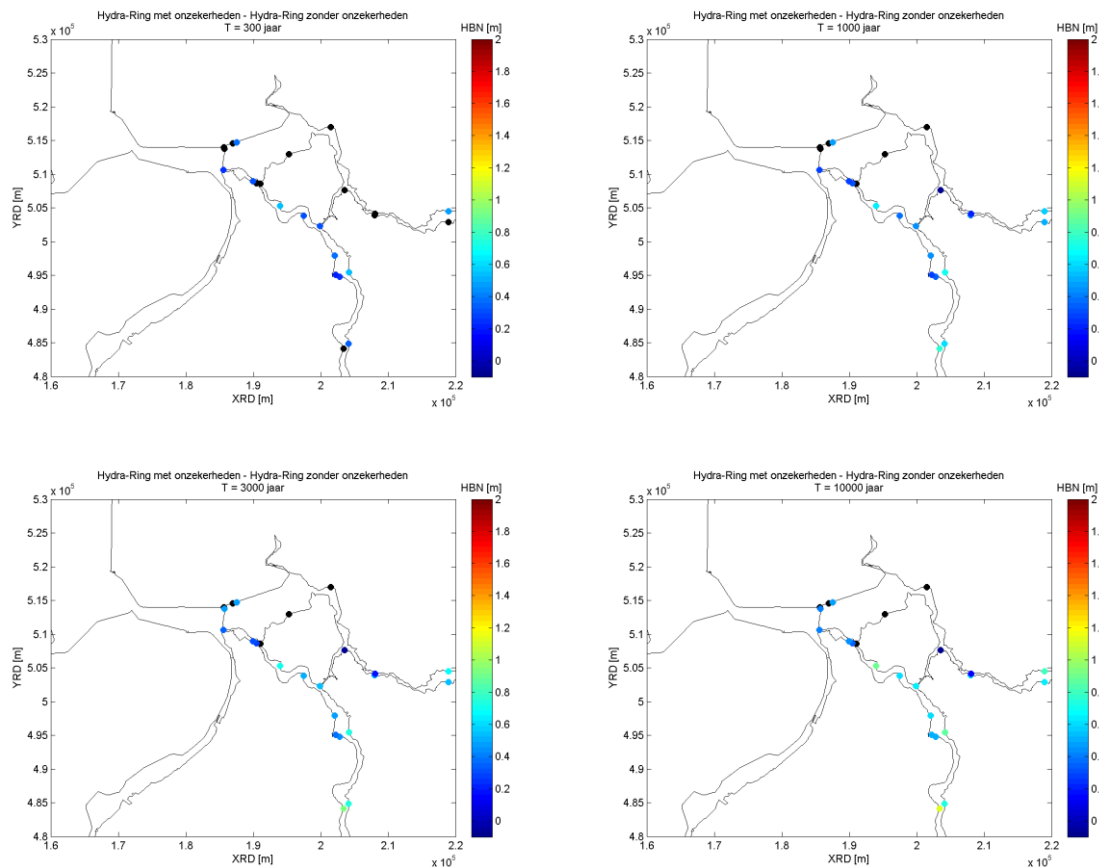
Figuur 3.15 Ruimtelijke verdeling van het verschil in de golfhoogte bij een herhalingsstijd van 100, 1.000, 3.000 en 10.000 jaar tussen de Hydra-Ring berekening met en zonder onzekerheid (met een zwarte kleur worden ontbrekende waarden weergegeven).

Voor de westelijk georiënteerde locaties is de golfhoogte onzekerder bij locaties met een grote (westelijk georiënteerde) strijklengte. Vooral het feit dat de resultaten van de locaties langs het Zwarte Meer ontbreken, maakt het wat lastig om dit te zien. Het effect is het meest duidelijk door de locatie ten zuiden van de Spooldersluis (op de oostelijke oever van de IJssel) te vergelijken de locaties direct beneden- en bovenstrooms van deze locatie (ook op de oostelijke oever van de IJssel).

Verder geldt (net als bij de lokale waterstand) ook voor de golfhoogte dat bij een toename van de herhalingsstijd het effect van de onzekerheid toeneemt. Dit is het gevolg van een grotere statistische onzekerheid bij extremere herhalingsstijden.

3.6.4 Resultaten hydraulisch belastingniveau

Het effect van de kennisonzekerheid op het hydraulisch belastingniveau is voor vier herhalingsstijden (300, 1.000, 3.000 en 10.000 jaar) te zien in Figuur 3.16. In de figuur is te zien dat voor een aantal van de analyse locaties geen resultaat beschikbaar is (zoals ook al eerder aangegeven). In de plots is te zien dat het effect van de onzekerheid op het HBN van de oostelijk georiënteerde locaties kleiner is. Op deze locaties is een golfaanval pas bij zeer extreme herhalingsstijden significant (dit is al in de voorgaande paragraaf toegelicht). Westelijk georiënteerde dijkvakken hebben eens per duizend jaar al te maken met aanzienlijke golf en dus ook met de onzekerheid in de hoogte van deze golven. Daarom is het effect van de onzekerheid op het HBN bij westelijk georiënteerde locaties groter.



Figuur 3.16 Ruimtelijke verdeling van het verschil in het hydraulisch belasting niveau bij een herhalingsstijd van 100, 1.000, 3.000 en 10.000 jaar tussen de Hydra-Ring berekening met en zonder onzekerheid (met een zwarte kleur worden ontbrekende waarden weergegeven).

In Figuur 3.16 is te zien dat het effect van de onzekerheid op het HBN toeneemt met de herhalingsstijd. Vergelijkbaar met de resultaten van de lokale waterstand en de golfhoogte. Dit is het gevolg de statistische onzekerheid. In de figuur is ook te zien dat de onzekerheid in het HBN op bovenstroomse locaties langs IJssel en Vecht (relatief) groot is. Dit is het gevolg van de onzekerheid in de waterstand. Immers de onzekerheid in de golfhoogte was relatief klein op deze locaties (zie Figuur 3.15).

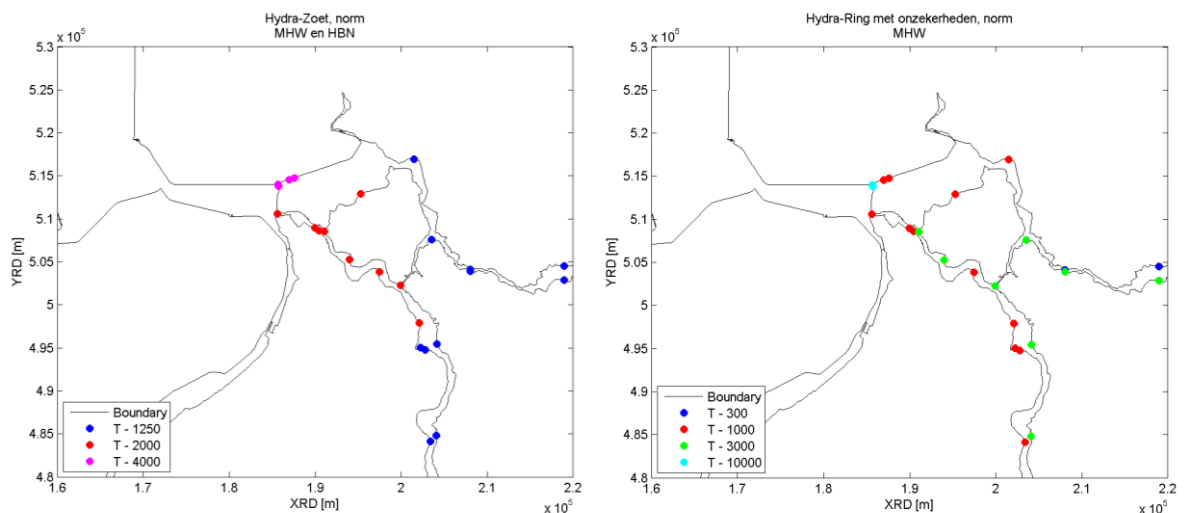
3.7 Totale verschillen tussen WTI-2017 en WBI-2017

3.7.1 Inleiding

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. Naast de veranderingen in het belastingmodel, de overstap op een ander probabilistisch model en de verdiscontering van onzekerheden is er in WBI-2017 de overstap op een nieuwe norm.

3.7.2 Effect op lokale waterstand

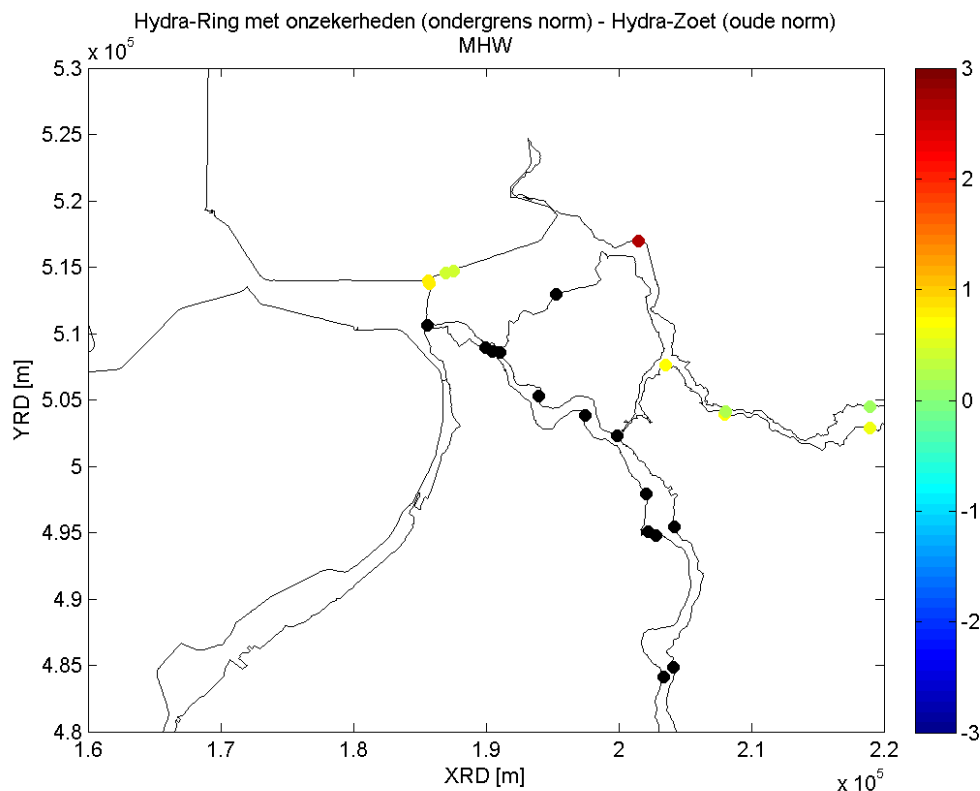
Ten aanzien van de nieuwe normen is onderscheid gemaakt tussen de normen die worden beschouwd bij de berekeningen van de lokale waterstanden (ondergrens van de trajectnorm) en HBN (faalkanseis). Voor alle testlocaties zijn de oude normen, zoals gehanteerd in de Hydra-Zoet berekeningen, en de nieuwe normen voor de lokale waterstand (ondergrens), weergegeven in Figuur 3.17. Bij de keringen van de Noordoostpolder langs het Zwarte Meer, langs de westelijke oever van de IJssel en langs de noordelijke oever van de Vecht is de nieuwe norm lager dan de oude norm. De nieuwe norm is dus minder streng. Langs Mastenbroek (dijkring 10) en Salland (dijkring 53) is de nieuwe norm strenger.



Figuur 3.17 Gehanteerde normen voor de lokale waterstand op testlocaties: oude normen (links) en nieuwe normen bij trajectnorm, ondergrens (rechts).

De verschillen in lokale waterstand als gevolg van de nieuwe norm, nieuwe windstatistiek, nieuwe afvoerstatistiek, de aangepaste faalkansen van de Ramspolkering en het meenemen van onzekerheden en een andere rekentechniek zijn weergegeven in Figuur 3.18. De figuur laat zien dat vlak achter de Ramspolkering de lokale waterstanden een meter stijgen mede door de strengere norm. Langs Salland (de zuidelijke oever van de Vecht) nemen de lokale waterstanden iets minder toe (namelijk ongeveer 0,75 m). Ook hier is de norm strenger geworden. Op andere locaties in de Vechtdelta is de toename van de lokale waterstanden geringer (minder dan 0,2 m). Omdat voor locaties in de IJsseldelta geen Hydra-Zoet berekeningen beschikbaar, kan ook geen effect van de aanpassingen worden bepaald voor deze locaties.

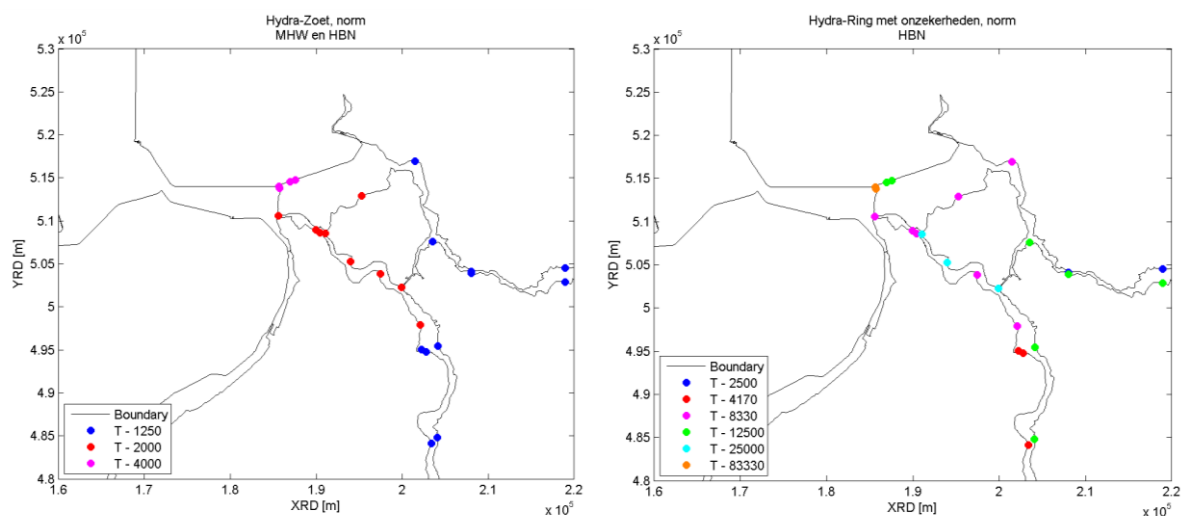
Opvallend is het verschil van bijna 2 m dat berekend is voor locatie 603071 (meest noordelijke locatie). Zowel bij de bespreking van de resultaten in paragraaf 3.4 als in 3.5 is aangegeven dat het hier een lastige locatie nabij Zwartsluis betreft. Zowel in de CR2011 als in de WBI-2017 databases treedt droogval op voor verschillende combinaties van stochasten bij deze locatie. De wijze waarop Hydra Zoet en Hydra-Ring hiermee omgaan is verschillend. Daarnaast veroorzaakt dit droogvallen voor een moeilijker convergentie van de Hydra Ring berekening. Het lijkt er op dat de resultaten op deze locatie minder betrouwbaar zijn (zowel in de Hydra Zoet als in de Hydra Ring berekening). De betrouwbaarheid van de resultaten wordt mede bepaald door de keuze van de probabilistische rekentechniek. Deze is voor alle gebieden in overleg met Hydra-Ring ontwikkelaars vastgesteld. Desondanks kunnen we niet uitsluiten dat op sommige locaties HB worden berekend die minder betrouwbaar zijn. In een vervolganalyse (Deltares, 2017) zijn de gehanteerde rekentechnieken nader beschouwd in relatie tot de betrouwbaarheid van de resulterende HB. De verwachting is dat in de vervolganalyse het resultaat van locatie 603071 nader wordt verklaard.



Figuur 3.18 Ruimtelijke verdeling van het verschil tussen lokale waterstand berekend met Hydra-Ring (met onzekerheden) bij de nieuwe norm en door Hydra-Zoet (oude statistiek) bij de oude norm (met een zwarte kleur worden ontbrekende waarden weergegeven).

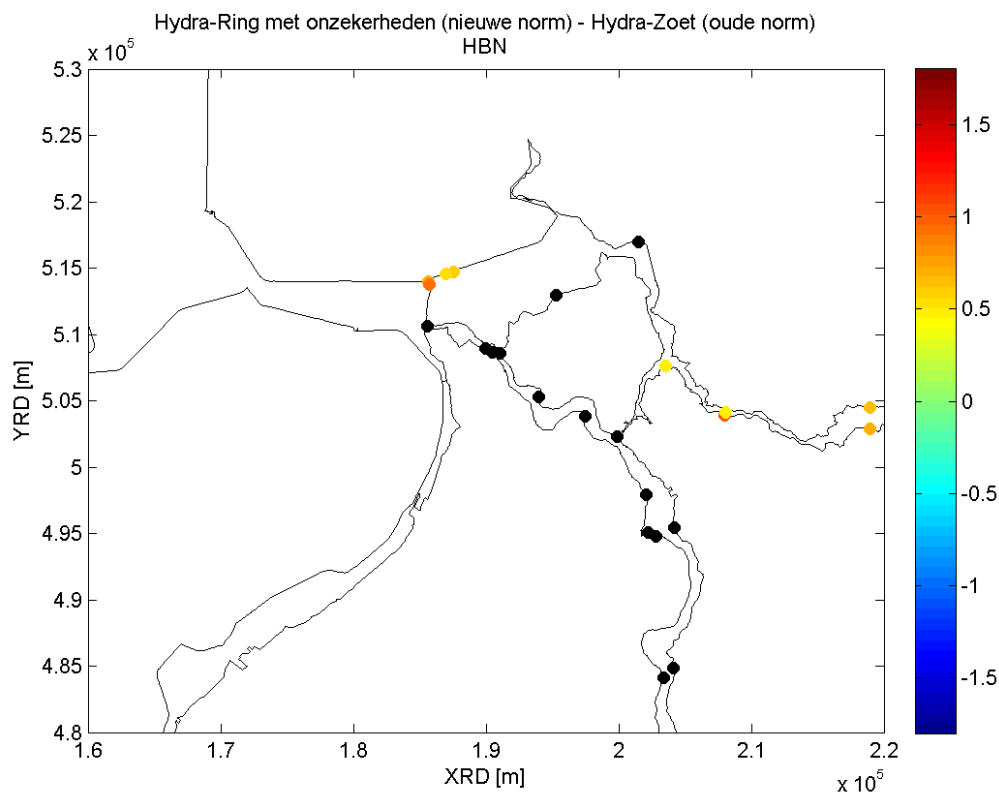
3.7.3 Effect op hydraulisch belastingniveau

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). Voor HBN is de faalkanseis beschouwd door de trajectnorm te vermenigvuldigen met het faalkansbudget (0.24) en de lengte-effect-factor. Merk op dat voor de trajectnorm uit is gegaan van de ondergrens (maximaal toelaatbare faalkans) zoals weergegeven Figuur 3.17. Voor alle testlocaties zijn de oude normen, zoals gehanteerd in de Hydra-Zoet berekeningen, en de nieuwe normen (faalkanseis), weergegeven Figuur 3.19.



Figuur 3.19 Gehanteerde normen voor het hydraulisch belastingniveau op testlocaties: oude normen (links) en faalkanseis voor HBN berekeningen (rechts).

Voor alle locaties in de VIJD wordt de norm voor HBN's een stuk strenger. De verschillen in HBN als gevolg van de nieuwe normering, nieuwe windstatistiek, het meenemen van onzekerheden en een andere rekentechniek zijn weergegeven in Figuur 3.20. Het hydraulisch belastingniveau neemt in de Vechtdelta met een halve tot een meter toe.



Figuur 3.20 Ruimtelijke verdeling van het verschil tussen hydraulisch belastingniveau berekend met Hydra-Ring (met onzekerheden) bij de nieuwe norm en door Hydra-Zoet (oude statistiek) bij de oude norm (met een zwarte kleur worden ontbrekende waarden weergegeven).

4 Resultaten HB Vecht- en IJsseldelta

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 waterstanden en de golfhoogtes voor alle locaties in het gebied van de Vecht-IJsseldelta. Tevens worden HBN's getoond, ook al zijn die geen invoer voor de eenvoudige toets. De reden is dat HBN's een goede impressie geven van het gecombineerde effect van waterstand en golfhoogte.

4.2 Uitgangspunten probabilistische productieberekeningen

De modelinstellingen staan genoemd in paragraaf 3.3.2 in de tabel "Berekening Hydra-Ring". De berekeningen zijn allemaal uitgevoerd met inachtneming van onzekerheden. De productieberekeningen zijn daarom uitgevoerd op het Amazon rekencluster vanwege de grote rekeninspanning. De HBN berekeningen maken gebruik van een standaard 1:3 profiel waarbij een kritiek overslagdebiet van 1 l/s/m is gehanteerd.

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 (belastingparameter bij gegeven herhalingstijd) hier weergegeven.

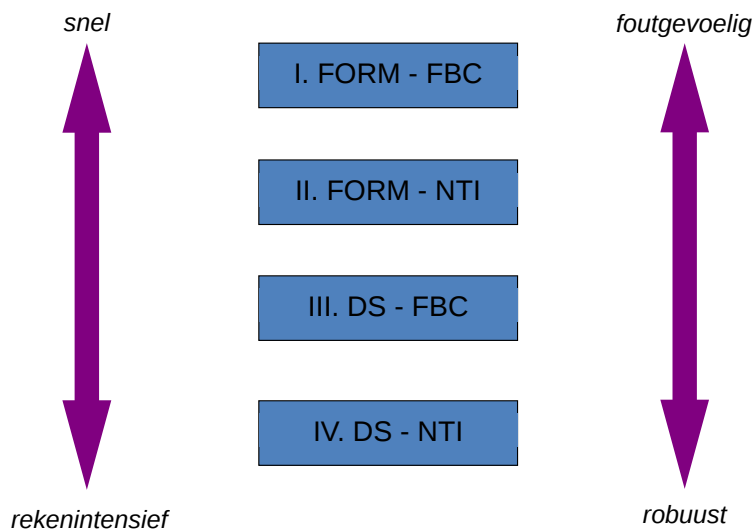
De resultaten in de figuren zijn ook allemaal opgenomen in een Excel spreadsheet, voor elke regio één. Per type belasting (waterstand, HBN, golfhoogte) is een tabblad aangemaakt. Op ieder tabblad staat voor iedere locatie de belasting per herhalingstijd aangegeven.

4.3 Keuze rekentechniek

Hydra-Ring bevat een grote verscheidenheid aan rekentechnieken, waarbij ook mogelijkheden bestaan om rekentechnieken te combineren (zie paragraaf 2.6, 2.8 of 3.5.1). Alvorens de resultaten van de Hydra-Ring worden gepresenteerd, gaan we eerst in op de rekentechnieken die zijn toegepast in de productieberekeningen. 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 beschreven welke instellingen er worden aanbevolen door Deltares (2017).

Er is per locatie uitgezocht welke technieken betrouwbare uitkomsten geven (criterium A). Bij het kiezen van de rekeninstellingen zijn de rekentijden (criterium B) ook relevant, zowel voor de uitvoerbaarheid van de productieberekening als ook later voor de praktische toepasbaarheid in de formele beoordeling van de keringen.

Bij het uitvoeren van berekeningen is een combinatie gekozen worden van een probabilistische rekentechniek en een rekentechniek voor tijdsintegratie. Voor de vier combinaties geldt de volgende figuur.



Figuur 4.1 Schema voor de keuze van de rekentechnieken uit vier combinaties voor probabilistisch rekenen en tijdsintegratie.

Zolang de resultaten betrouwbaar zijn verdient methode I de voorkeur. Deze methode is (verreweg) het snelst. Echter, deze methode is foutgevoelig. Dat betekent dat voor 'complexere' situaties de methode niet altijd een betrouwbaar antwoord geeft. In de VIJD zijn diverse locaties waarvoor de met methode I berekende frequentiecurven tot onrealistische resultaten leiden. Dit heeft alleen betrekking op de lokale waterstand of hydraulische belasting. De berekening van de marginale statistiek van de golfhoogte met methode I geeft wel voor alle locaties betrouwbare resultaten. Er is daarom voor waterstand en HBN een 'getrapte aanpak' toegepast. De vier (combinaties van) rekentechnieken zijn als volgt gebruikt:

- I. Combinatie FORM-FBC: alle locaties zijn met deze combinatie doorgerekend.
- II. Combinatie FORM-NTI: alle locaties waarvoor methode I resulteerde in instabiele resultaten zijn doorgerekend met deze methode.
- III. Combinatie DS-FBC: alle locaties waarvoor methode I en II resulteerden in instabiele resultaten zijn doorgerekend met deze methode.
- IV. Combinatie DS-NTI: de rekentijd van deze combinatie is dusdanig groot dat hier geen berekeningen mee zijn uitgevoerd in dit kader.

Idealiter worden de vier combinaties op alle locaties een keer toegepast. Omdat dit een erg grote inspanning zou vergen wordt het verloop van de frequentiecurve gebruikt om te bepalen welke methode het meest geschikt is voor een locatie.

Het criterium is gebruikt dat een toename van de waterstand (of HBN) nooit mag leiden tot een toename van de berekende overschrijdingsfrequentie. Indien dat wel het geval is, wordt de betreffende locatie gemarkeerd als 'instabiel' en komt deze in aanmerking voor een meer robuuste en rekenintensieve methode. Tabel 4.1 vat het resultaat van deze exercitie samen. De eerste kolom met getallen toont het percentage locaties waarvoor rekenmethode I stabiele resultaten geeft. De tweede kolom met getallen toont het percentage locaties waarvoor methode I geen stabiele rekenresultaten geeft, maar methode II wel. De derde kolom met getallen toont het percentage locaties waarvoor methode I en II geen stabiele rekenresultaten geven, maar methode III wel. De laatste kolom toont het percentage locaties waarvoor met geen van de rekenmethoden stabiele resultaten zijn verkregen.

Tabel 4.1 Percentage locaties waarvoor respectievelijk methode I, II of III wordt toegepast

Berekende belastingparameter	Rekenmethode			
	I	II	III	resterend
Lokale waterstand	90.4	3.3	5.5	0.8
Golfhoogte	100,0	-	-	-
Hydraulisch belastingniveau	57.0	34.1	6.8	2.1

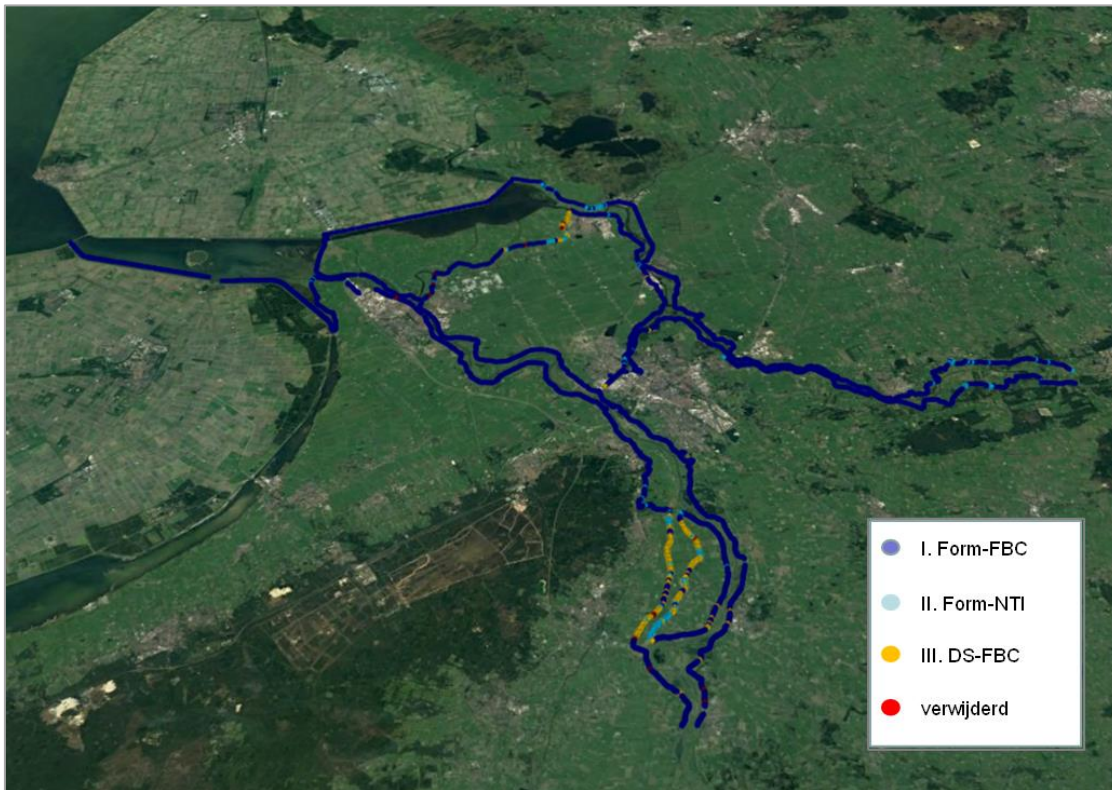
Op basis van uitgevoerde analyse zijn vier categorieën locaties gedefinieerd ten behoeve van de keuze van rekeninstellingen in de WBI-software:

- locaties die met rekenmethode I worden doorgerekend;
- locaties die met rekenmethode II worden doorgerekend;
- locaties die met rekenmethode III worden doorgerekend en
- locaties die (tijdelijk) worden verwijderd uit de database omdat voor deze locaties geen stabiel rekenresultaat verkregen wordt met de thans beschikbare en toepasbare rekentechnieken. Feitelijk betekent dit dat de locaties onzichtbaar gemaakt worden voor de gebruiker.

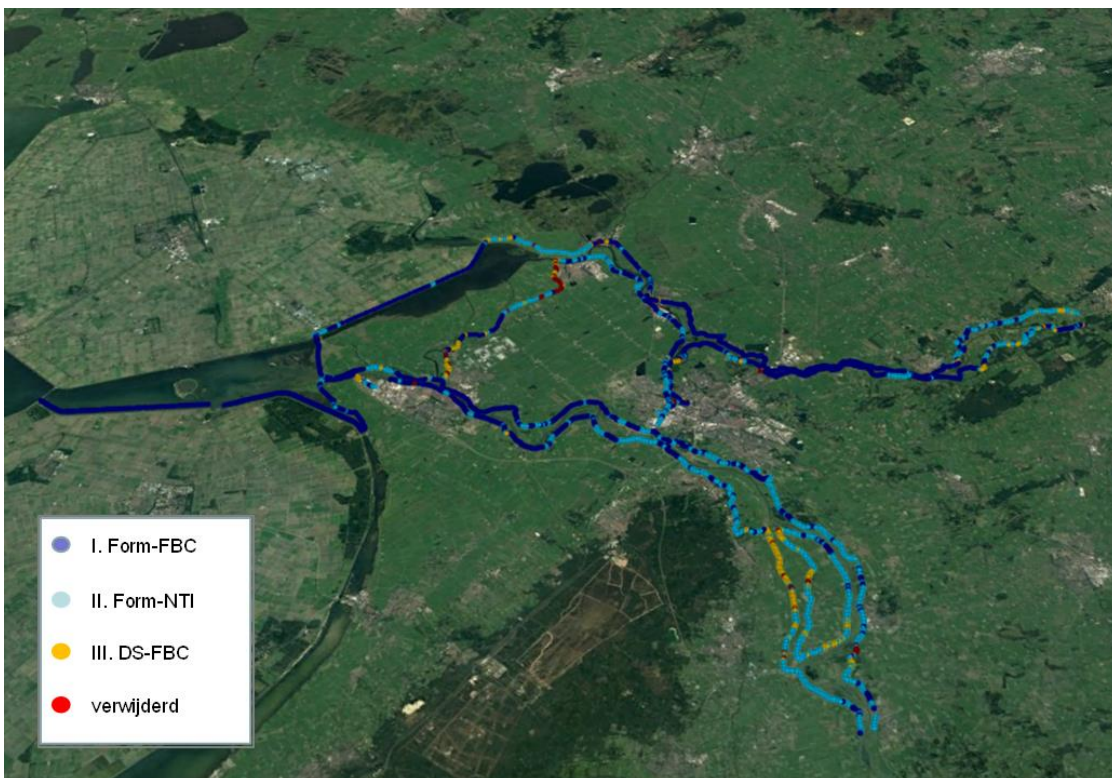
De figuren op de volgende pagina tonen voor de lokale waterstand en het hydraulisch belastingniveau welke rekentechnieken worden toegepast. Te zien is dat in 10% van de resultaten van methode I de berekening van de lokale waterstand instabiliteit vertoont. Deze locaties liggen voornamelijk in de hoogwatergeul bij Veessen-Wapenveld en in de noordoostelijke hoek van het Zwarte Meer (langs dijkkring 10). Na toepassing van methode II is nog ongeveer 6% van de berekeningen (locaties) instabiel (zie Tabel 4.1). Het toepassen van methode III resulteert er in dat slechts 1% van de locaties uit de database is verwijderd. Voor deze locaties is geen stabiel resultaat van de lokale waterstand berekend.

Voor het HBN is in Figuur 4.3 te zien dat ongeveer 43% van de resultaten in stabiel zijn bij een berekening met methode I. Deze locaties liggen langs de IJssel tussen Olst en Zwolle, bovenstrooms van Dalfsen langs de Vecht, langs het Zwarte Meer bij IJsselmuiden en langs de noordoosthoek van het Zwarte Meer. Na toepassing van rekenmethode III is de berekening van het HBN bij nog 2,1% van de locaties instabiel (zie Tabel 4.1). Het blijkt vooral lastig om voor locaties langs dijkkring 10 bij Genemuiden stabiele resultaten te berekenen.

In de Excel spreadsheet met voor iedere locatie de belasting per type belasting (waterstand, HBN, golfhoogte) en per herhalingsstijf is ook de gebruikte rekentechniek aangegeven.



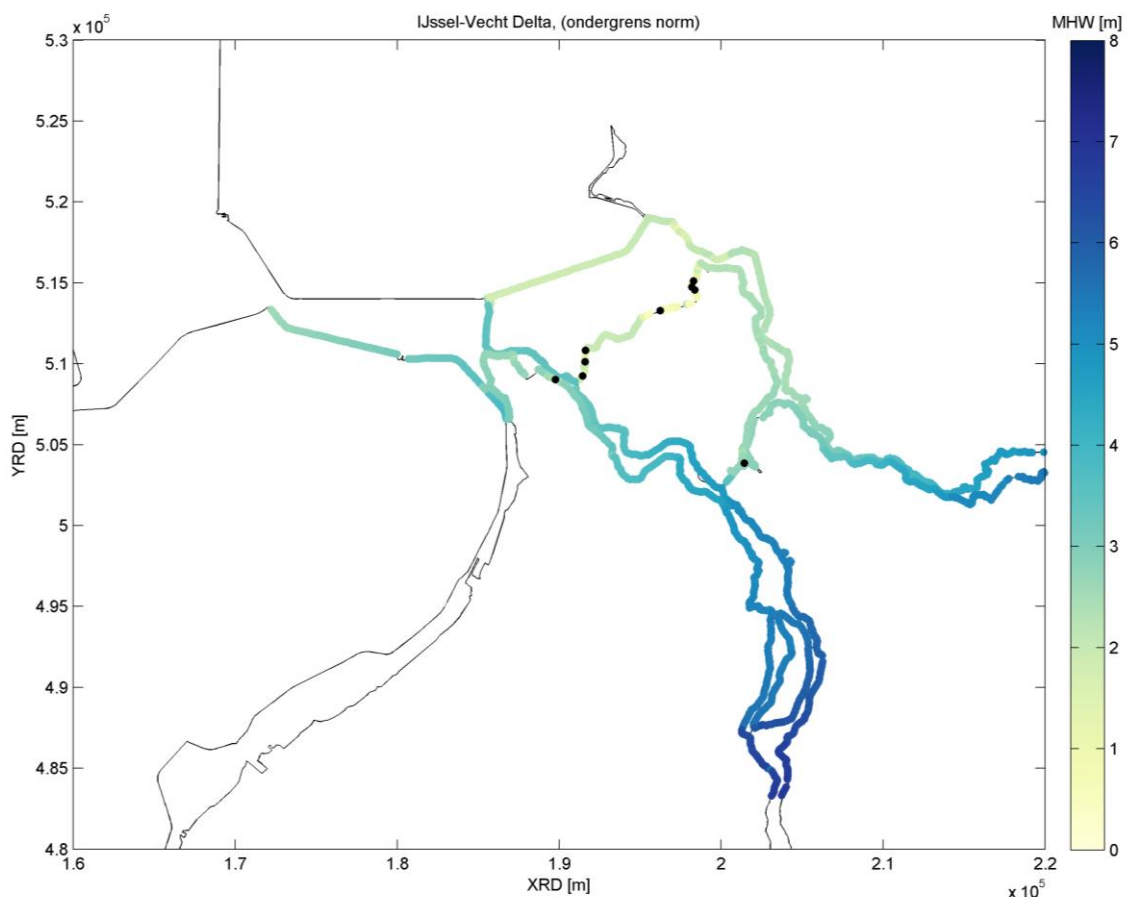
Figuur 4.2 Weergave van de toegepaste rekentechniek voor de marginale statistiek van lokale waterstand in berekening Hydra-ring met onzekerheden.



Figuur 4.3 Weergave van de toegepaste rekentechniek voor hydraulisch belastingniveau berekening Hydra-ring met onzekerheden.

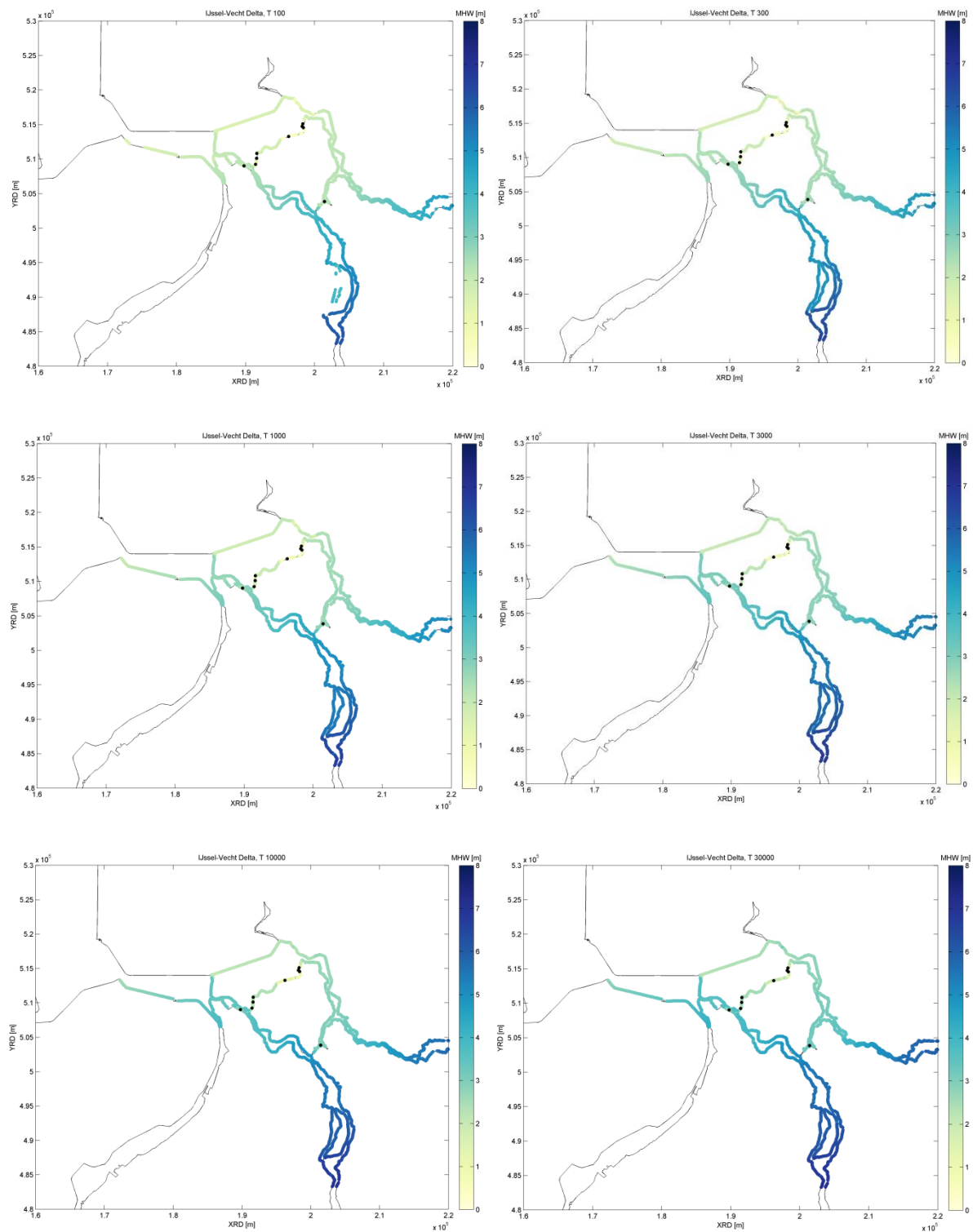
4.4 Rekenresultaten lokale waterstand

Merk op dat de hieronder gepresenteerde resultaten afgeleid zijn met de in paragraaf 4.3 beschreven instellingen, dus niet met de gereviseerde instellingen uit paragraaf 4.7. De lokale waterstand bij de nieuwe norm (ondergrens) is weergegeven in Figuur 4.4. In Figuur 4.5 en Figuur 4.6 wordt voor verschillende herhalingstijden een ruimtelijk beeld gegeven van de marginale statistiek van de lokale waterstand. De resultaten geven een realistisch en consistent beeld. Zoals verwacht lopen de waarden op bij een grotere herhalingstijd. Verder zijn de waarden het grootst bovenstrooms op de riviertakken en nemen ze af richting het IJsselmeer. In de voorgaande paragraaf is aangegeven, dat de berekeningen van een klein deel van de locaties geen bruikbaar resultaat opleveren. Deze locaties zijn met een zwarte kleur gemarkeerd in de figuren. Sommige locaties ontbreken in de figuren, dit wordt in de meeste gevallen veroorzaakt doordat het opgegeven bereik van de waterstand (waarvoor de frequenties moeten worden bepaald) niet toereikend is voor alle herhalingstijden. In enkele gevallen ontbreekt de locatie in de database of is de berekening niet beschikbaar⁵.

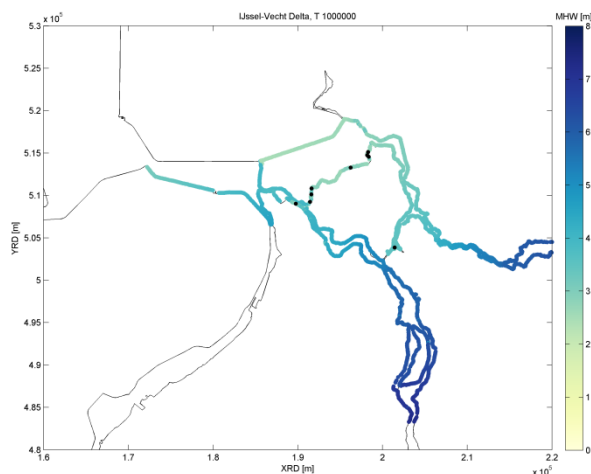


⁵ De Hydra-Ring berekeningen voor een set locaties worden als een batch opgegeven. Daarbij wordt de maximaal benodigde tijd voor de batch als afbreekcriterium opgegeven. Deze maximale rekentijd is vooraf ingeschat op basis van de benodigde rekentijd per locatie. Het kan voorkomen dat de rekentijden zo oplopen, dat niet alle berekeningen zijn uitgevoerd voor dat de maximale tijd is bereikt, hierdoor is voor een deel van de locaties geen resultaat beschikbaar.

Figuur 4.4 Ruimtelijke verdeling van de lokale waterstand berekend met Hydra-Ring (met onzekerheden) bij de nieuwe norm – ondergrens (met een zwarte kleur worden locaties aangegeven waarvoor geen stabiel resultaat is verkregen).



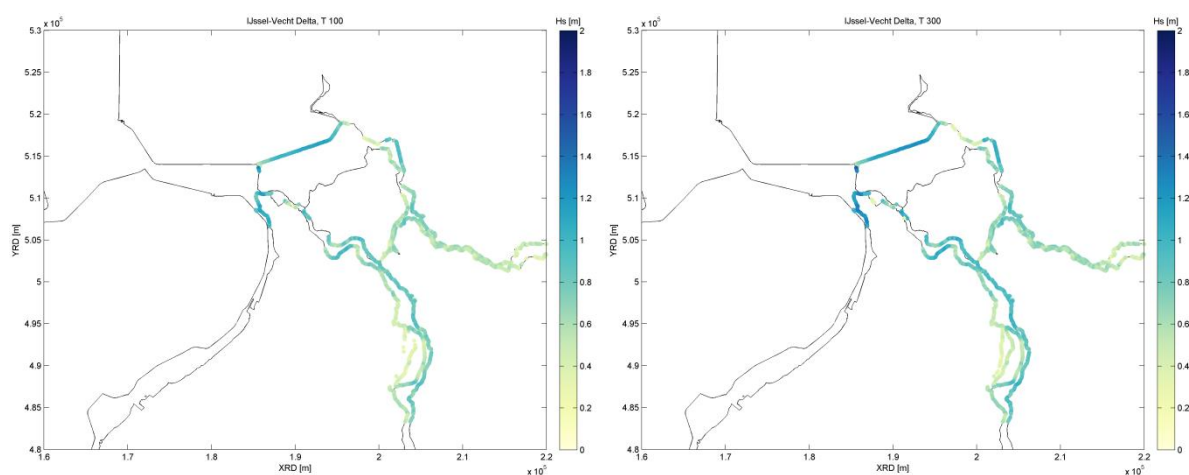
Figuur 4.5 Ruimtelijke verdeling van de lokale waterstand berekend met Hydra-Ring (met onzekerheden) bij herhalingstijden 100, 300, 1.000, 3.000, 10.000 en 30.000 jaar (met een zwarte kleur worden locaties aangegeven waarvoor geen stabiel resultaat is verkregen).



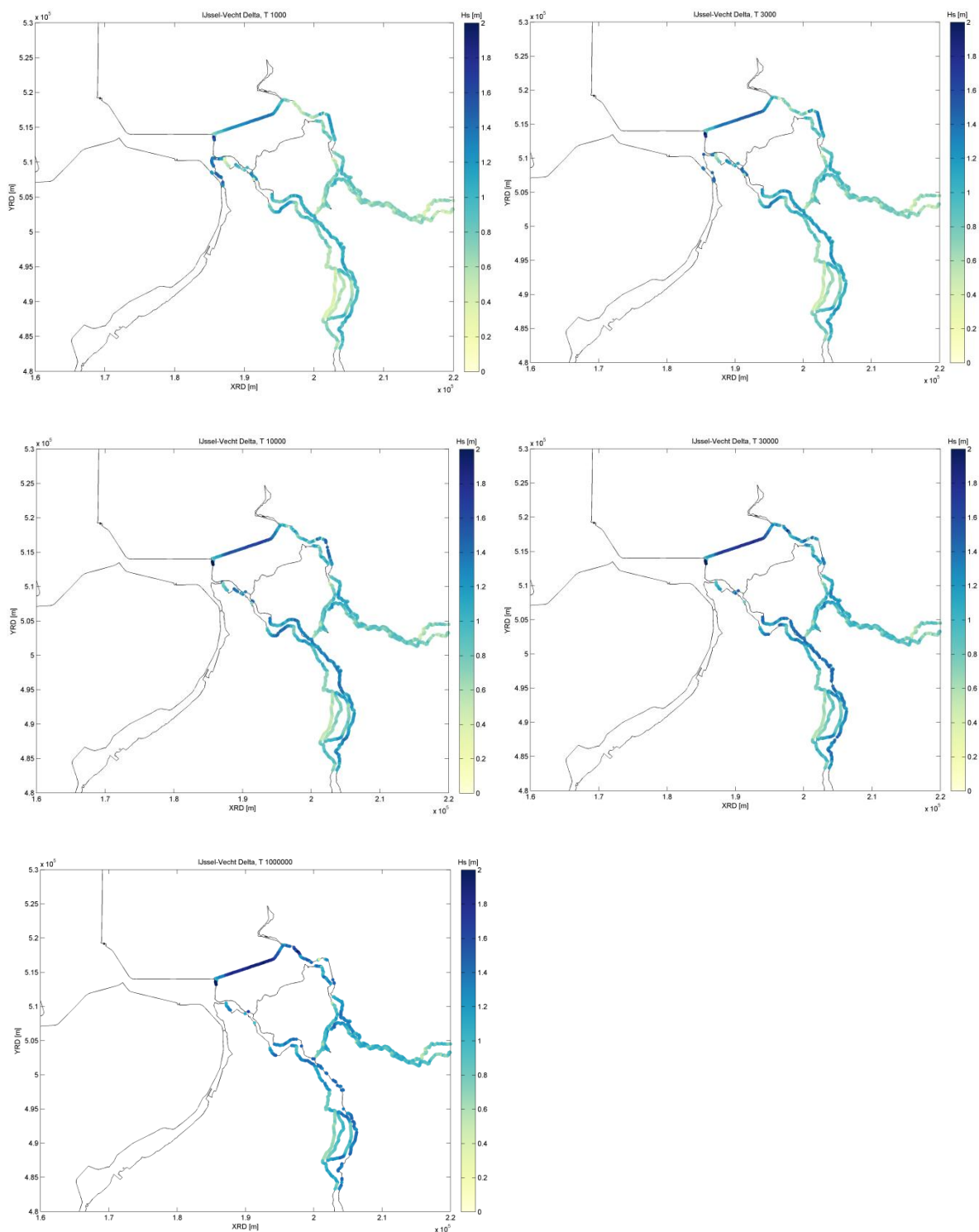
Figuur 4.6 Ruimtelijke verdeling van de lokale waterstand berekend met Hydra-Ring (met onzekerheden) bij herhalingstijd 100.000 jaar (met een zwarte kleur worden locaties aangegeven waarvoor geen stabiel resultaat is verkregen).

4.5 Rekenresultaten golfhoogte

In Figuur 4.7 en Figuur 4.8 wordt voor verschillende herhalingstijden een ruimtelijk beeld gegeven van de significante golfhoogte (H_s). In Tabel 4.3 is te zien dat met name voor de berekening van de golfhoogte, de rekentijden aanzienlijk zijn. De resultaten geven voor het beschikbare deel van de locaties een realistisch beeld. Wind-gedomineerde locaties geven duidelijk hogere golfhoogtes.



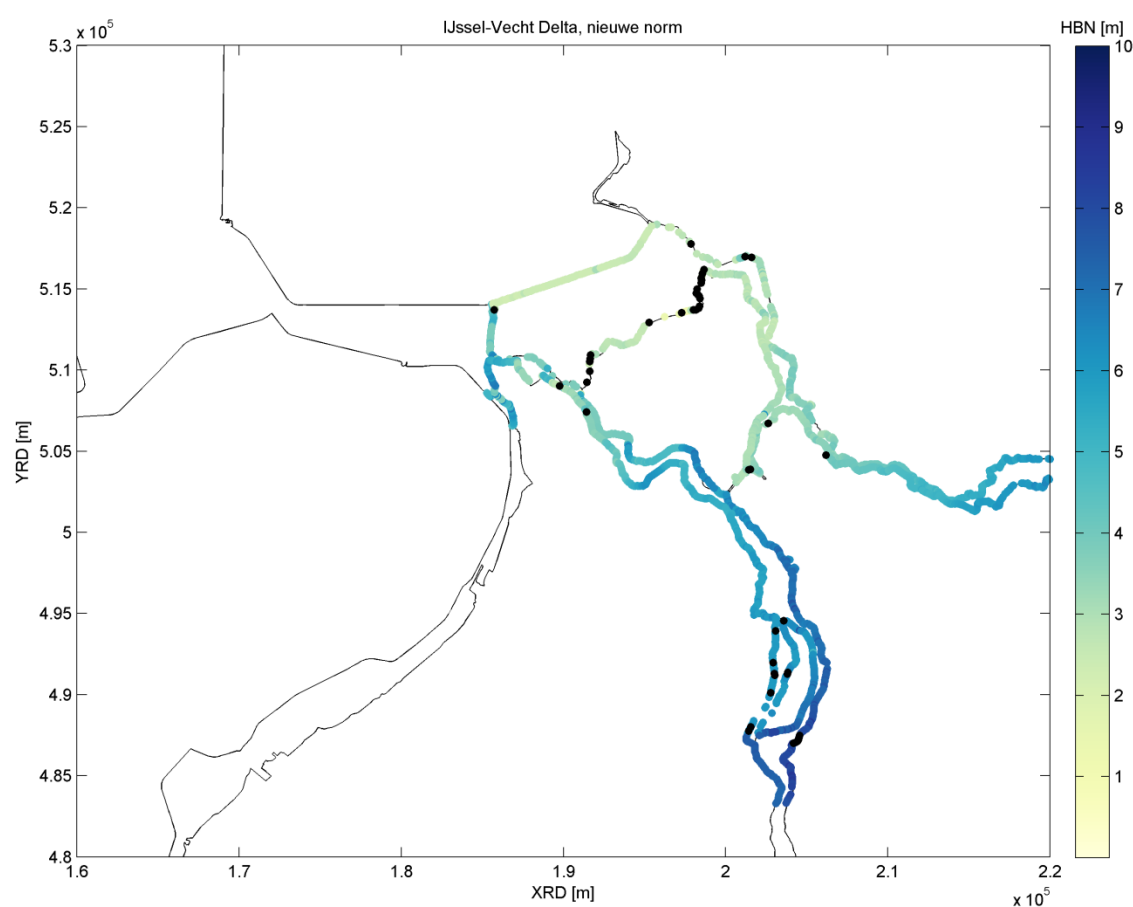
Figuur 4.7 Ruimtelijke verdeling van de golfhoogte berekend met Hydra-Ring (met onzekerheden) bij herhalingstijden 100 en 300 jaar.



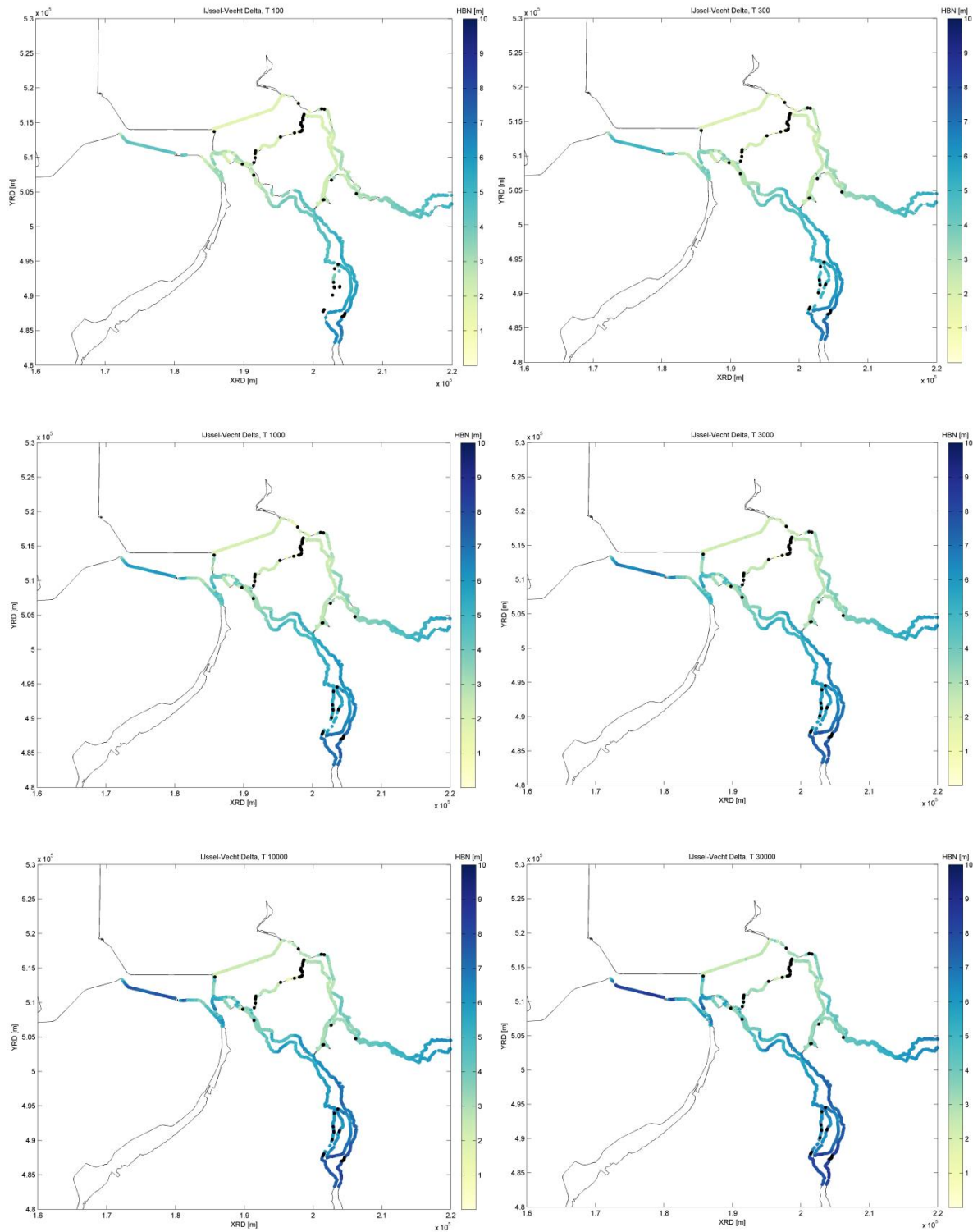
Figuur 4.8 Ruimtelijke verdeling van de golfhoogte berekend met Hydra-Ring (met onzekerheden) bij herhalingstijden 1.000, 3.000, 10.000, 30.000 en 100.000 jaar.

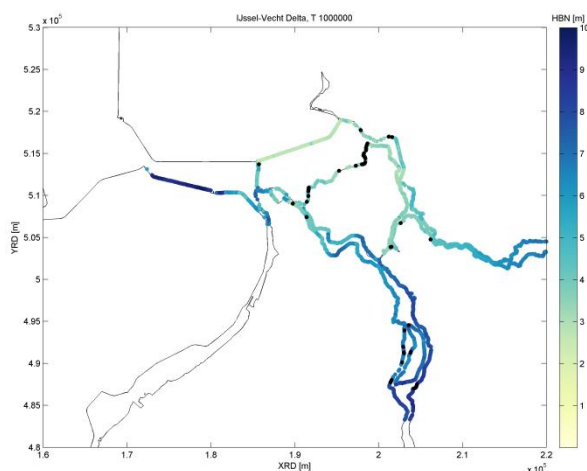
4.6 Rekenresultaten hydraulisch belastingniveau

Het hydraulisch belastingniveau bij de nieuwe norm (faalkanseis) is weergegeven in Figuur 4.9. Voor het HBN is de faalkanseis beschouwd door de trajectnorm te vermenigvuldigen met het faalkansbudget (0.24) en de lengte-effect-factor, daarbij is voor de trajectnorm uitgegaan van de ondergrens (maximaal toelaatbare faalkans). In Figuur 4.10 wordt voor verschillende herhalingstijden een ruimtelijk beeld gegeven van de HBN waarden. De resultaten geven op basis van de ruimtelijke verdeling een realistisch beeld. In de figuren kan het voorkomen dat locaties ontbreken (dit is te zijn aan de onderbroken stukken lijn, langs de kruin van de dijk). Dit is het gevolg van een ontbrekend deel van de frequentiecurve op het bereik eens per 100 t/m 100.000 jaar. In enkele gevallen zijn geen resultaten beschikbaar.



Figuur 4.9 Ruimtelijke verdeling van het hydraulisch belastingniveau berekend met Hydra-Ring (met onzekerheden) bij de nieuwe norm – faalkanseis (met een zwarte kleur worden locaties aangegeven waarvoor geen stabiel resultaat is verkregen).





Figuur 4.10 Ruimtelijke verdeling van het hydraulisch belastingniveau berekend met Hydra-Ring (met onzekerheden) bij herhalings tijden 100, 300, 1.000, 3.000, 10.000, 30.000 en 100.000 jaar (met een zwarte kleur worden locaties aangegeven waarvoor geen stabiel resultaat is verkregen).

4.7 Revisie rekentechnieken

Na het afronden van de watersysteem-rapportages (waaronder 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 4.2 worden de in WBI2017 ingebouwde instellingen (gelijk aan dit uit Deltares (2017)) voor de Vecht- en IJsseldelta weergegeven. Daarnaast is de ruimtelijke verdeling van deze instellingen weergegeven in Figuur 4.11. Merk op dat de resultaten in dit rapport dus niet met deze instellingen zijn berekend, maar met de instellingen zoals beschreven in paragraaf 4.3.

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

Systeem	Deel van systeem	Waterstand	HBN	Golfhoogte
IJVD (5, 6)	IJsseldelta	FDIR8-FBC	FDIR8-FBC	FDIR8-FBC
	Zwarte Meer, Vecht	FDIR4-FBC	FDIR4-FBC	FDIR4-FBC
	Zwarte Water	DSFI-FBC	DSFI-FBC	DSFI-FBC

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

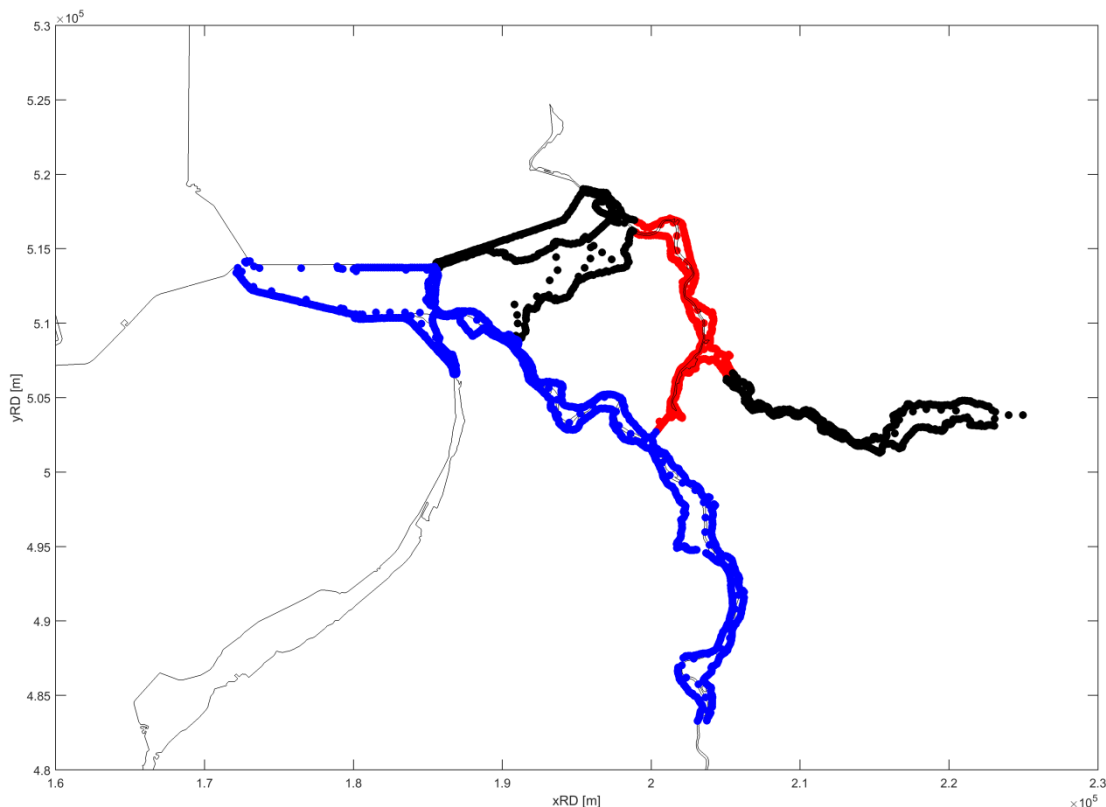
Net als voor de meren moeten we ook in de IJssel- en Vechtdelta in principe startmethode 4 kiezen als de afvoer (trage stochast) dominant wordt. Omdat de duurlijnen van de afvoer korter zijn dan die van met name het Markermeerpeil, hoeft geen onderscheid gemaakt te worden tussen 4 en 8 als startmethode. We zullen hier de keuze voor een rekentechniek laten afhangen van consistentie tussen en binnen de watersystemen.

In de IJsseldelta is het benedenstroomse deel wind-gedomineerd en wordt voor de berekening van alle belastingparameters geadviseerd FDIR8-FBC te gebruiken. De bovenstroomse locaties zijn afvoer-gedomineerd en daar speelt de wind nauwelijks een rol.

Ook daar adviseren we FDIR-FBC te gebruiken en vanuit consistentie met het benedenstroomse deel de startmethode 8.

Ook in de Vechtdelta adviseren we om vanuit consistentie-overwegingen voor waterstand, golfhoogte en HBN dezelfde rekentechniek te hanteren. Net als voor het IJsselmeer bevelen we aan om FDIR4-FBC voor het Zwarte Meer te hanteren. Omdat golven aanmerkelijk kleiner zijn dan op het IJsselmeer en Markermeer en daardoor de wind een minder grote rol speelt voor HBN, is het niet nodig NTI te hanteren. De combinatie met FORM is ook geen gelukkige op de vele droogvallende locaties. Ook op de afvoer-gedomineerde Vecht bevelen we FDIR-FBC aan. Daar kiezen we de startmethode 4, consistent met het Zwarte Meer. Tenslotte zijn we genoodzaakt om in het overgangsgebied van het Zwarte Water de dure combinatie van DSFI-FBC te adviseren, vanwege de overgang van meerpeil-gedomineerd naar wind-gedomineerd bij relevante herhalingstijden. Hydra-Ring voorziet nog niet in een goede startmethode om terug te kunnen vallen op FDIR voor dergelijke omstandigheden.

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 4.11 Ruimtelijk overzicht van verschillende instellingen uit Tabel 4.2 in de IJsseldelta (blauw), Zwarte Water (rood) en Zwarte Meer en Vecht (zwart). In de figuur is ook de overlap tussen de watersystemen meegenomen, in de praktijk ligt een deel van de weergegeven punten in de Bovenrijn danwel het IJsselmeer.

4.8 Rekentijden

De rekentijden van alle uitgevoerde berekeningen variëren enorm. De benodigde rekentijden zijn gelogd voor methode FDIR. Wanneer een FORM berekening (rekentijd enkele minuten) niet convergeert, wordt overgestapt op Directional Sampling die veel meer rekentijd vergt (rekentijd tot vele uren). In onderstaande tabel is per type HB aangegeven wat de minimale en maximale rekentijd is en wat de mediaan is, gezien over alle locaties.

Het valt op dat de berekening van de golfhoogte veel minder snel convergeert dan de andere berekeningen. Daar waar droogval in de productieberekeningen optreedt, is (logischerwijs) ook verondersteld dat geen golven aanwezig zijn. Als gevolg hiervan zal vermoedelijk de convergentie van de golfhoogteberekening worden bemoeilijkt. Dit fenomeen is natuurlijk ook van invloed op de berekening van het HBN. In de HBN berekening is de golfploop gelijk aan de lokale waterstand bij afwezigheid van golven. Vermoedelijk dat hierdoor bij meer locaties met droogval de waterstand/HBN berekening wel convergeert, terwijl de golfhoogte berekening dit niet doet.

Tabel 4.3 Minimale en maximale rekentijden per terugkeertijd van lokale waterstand, HBN en golfhoogte berekening over alle locaties

Type Hydraulische Belasting	min	max	mediaan
Locale waterstand	1,3 min	26,1 h	2,8 min
HBN	1,2 min	22,1 min	5,7 min
Golfhoogte	0,9 min	15,6 h	1,4 h

Deze rekentijden zijn gemeten op het Amazon cluster. Op andere hardware kunnen deze tijden anders zijn. De genoemde rekentijden zijn daarom indicatief.

4.9 Aansluiting watersystemen

Hydra-Ring onderscheidt 18 regio's (zie Tabel 2.2). Per regio geldt in principe een apart belastingmodel (basisstochasten, modelschematisatie, e.d.). De belastingmodellen inclusief resulterende berekeningsresultaten dienen goed op elkaar aan te sluiten. Daarbij dient de begrenzing duidelijk aangegeven te worden. Voor de Vecht-IJsseldelta betreft het de begrenzing tussen:

- IJsseldelta (regio 5) en Ketelmeer/Vossemeer (regio 7)
- IJssel (regio 1) en IJsseldelta (regio 5)

In de volgende twee paragrafen worden beide overgangen besproken.

4.9.1 Ketelmeer/Vossemeer – IJsseldelta

Voor een zevental locaties zijn berekeningen gemaakt met Hydra-Ring. De berekeningen zijn uitgevoerd met onzekerheden voor zeven herhalingstijden, variërend tussen 100 en 100.000 jaar, met zowel het belastingmodel⁶ van IJsselmeer als het belastingmodel van de IJsseldelta. De gekozen locaties zijn beschreven in Figuur 4.12.

Tabel 4.4 toont het verschil tussen de berekeningsresultaten met onzekerheden met het belastingmodel van het IJsselmeer en dat van de IJsseldelta. Figuur 4.13 toont het verschil in grafische vorm. Voor de 1^{ste}, 4^{de} en 7^{de} locatie zijn frequentielijnen geplot en weergegeven in Figuur 4.14.

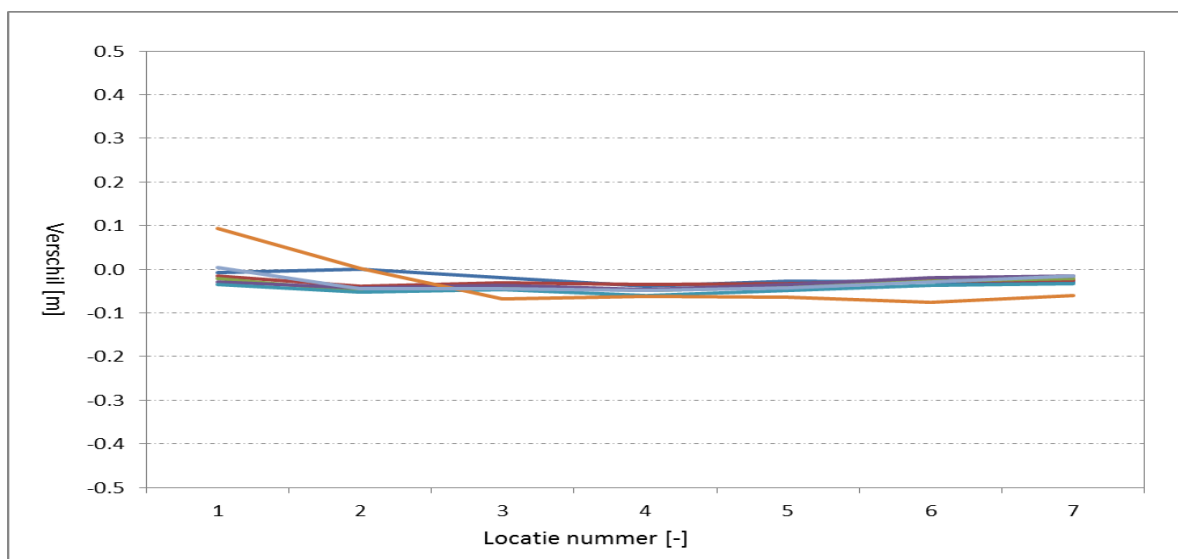
Met uitzondering van de locatie in de IJsselmonding is het verschil klein en bedraagt slechts enkele centimeters. Voor de locatie in de IJsselmonding waar het effect van de afvoer naar verwachting maximaal is, is het verschil kleiner dan 9 cm. Ook de frequentielijnen beschreven in Figuur 4.14 laten een consistent beeld zien van de verschillen tussen de gebruikte belastingmodellen. Op basis van dit resultaat is er in principe geen aanleiding om de huidige begrenzing tussen Ketelmeer/ Vossemeer en IJsseldelta aan te passen en de beide meren te betrekken bij het IJsselmeer.

In de gebieden van het Ketelmeer/Vossemeer en benedenstrooms 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 4.12.

⁶ 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 basisstochasten beschouwd.



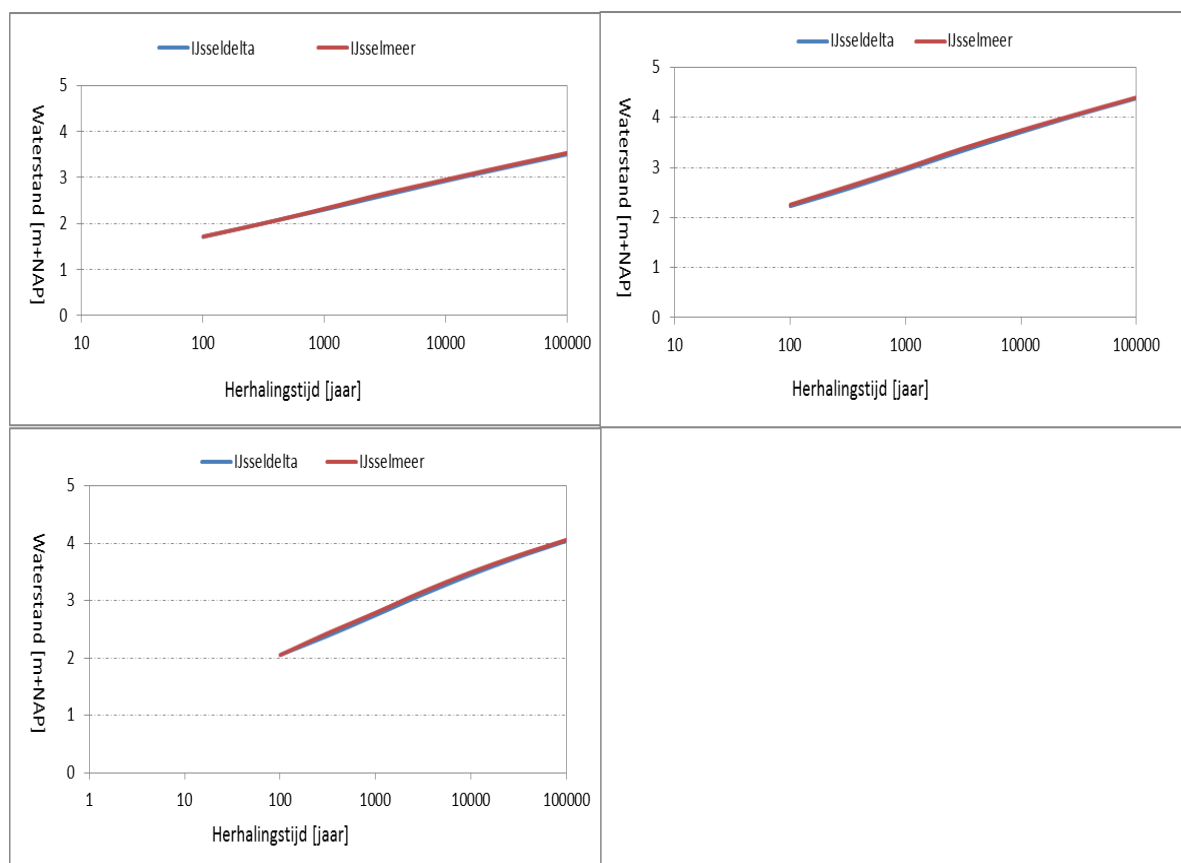
Figuur 4.12 Ligging van de gekozen zeven locaties (rood) in Ketelmeer/Vossemeer. Groene punten geven grenzen tussen dijktrajecten aan.



Figuur 4.13 Verschil in berekende waterstand (m) voor de zeven beschouwde locaties in het Ketelmeer/Vossemeer (model IJsseldelta – model Ketelmeer/Vossemeer).

Tabel 4.4 Verschil (m) tussen de berekeningsresultaten met belastingmodellen 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 4.14 Frequentielijnen (gebaseerd op 7 herhalingstijden) voor 3 locaties: locatie 1, locatie 4 en locatie 7.

Dijktraject 8-4 ligt volledig in het gebied van Ketelmeer en Vossemeer; afvoer speelt in dit gebied nauwelijks een rol. Hetzelfde geldt voor Roggebotsluis (verbindende kering 226) en dijktraject 7-2. Het ligt dan ook voor de hand om voor deze 3 dijktrajecten het belastingmodel van IJsselmeer te gebruiken. Het dijktraject 11-2 ligt grotendeels in de IJsseldelta (tot Kampen) en omvat het gebied 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 het bovenstaande is echter gebleken dat er nauwelijks verschillen zijn tussen de rekenresultaten met de twee verschillende belastingmodellen. Dezelfde argumentatie geldt voor de verbindende Ramspolkering dat deels in de IJsseldelta ligt en deels in Ketelmeer.

Op basis van bovenstaande resultaten wordt voorgesteld om voor bovenvermelde 5 dijktrajecten de belastingmodellen te gebruiken zoals weergegeven in Figuur 4.13.

Tabel 4.5 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

4.9.2 IJssel en IJsseldelta

Voor het bovenstroomse deel van de IJssel geldt het belastingmodel van de bovenrivieren en voor het benedenstroomse deel dat van de IJsseldelta. Deze paragraaf betreft een nadere analyse ten behoeve van de begrenzing tussen de IJssel en de IJsseldelta. Hiertoe gelden de volgende vier criteria:

- Het verschil tussen de berekeningsresultaten in het overlappende gebied moet acceptabel klein zijn,
- De grens mag niet halverwege een dijktraject komen te liggen,
- Het gebied met een zware rekentechniek dient zo klein mogelijk te zijn
- De grens tussen 2 systemen mag niet te dicht bij een WAQUA modelrand komen te liggen.

De productieberekeningen voor het gebied van de IJssel zijn uitgevoerd met het Rijntakkenmodel. De modelranden liggen bij Lobith (bovenrand) en Ketelbrug (benedenrand). Voor het gebied van de Vecht- en IJsseldelta geldt het IJVD WAQUA model dat naast o.a. de IJsseldelta ook het hele gebied van het IJsselmeer tot de Afsluitdijk omvat. Andere relevante zaken met betrekking tot deze 2 modellen zijn:

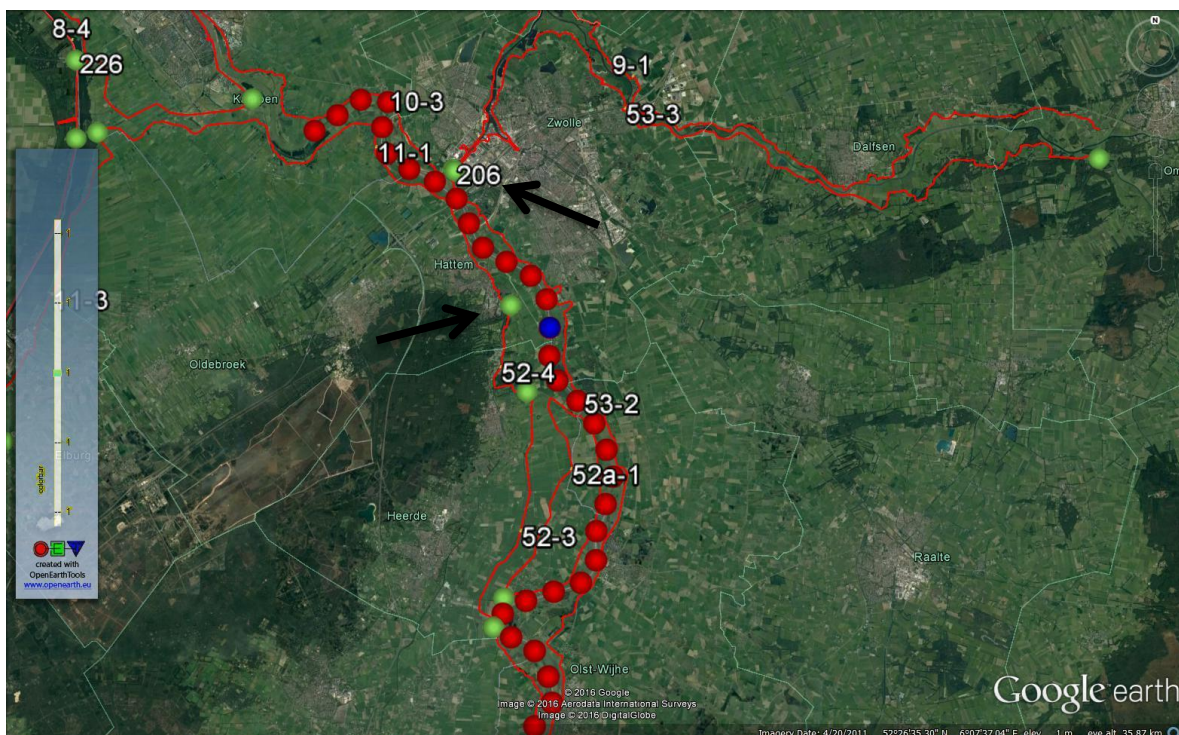
- De wind geldt weliswaar als basisstochast maar is niet beschouwd in de productieberekeningen voor het gebied van de bovenrivieren,
- De productieberekeningen voor het gebied van de bovenrivieren zijn uitgevoerd met afvoergolven (volgend uit GRADE),

- In het belastingmodel van de IJsseldelta is de wind variabel, evenals het IJsselmeerpeil,
- In het belastingmodel van de IJsseldelta wordt alleen van afvoerniveaus hoger dan 2300 m³/s de afvoergolfvorm beschouwd; afvoerniveaus lager dan 2300 m³/s worden stationair doorgerekend.

In de HR-2006 ligt de grens tussen bovenrivieren (IJssel) en IJsseldelta bij kmr 974. Deze grens is blauw aangegeven in Figuur 4.15.

Om de grens tussen bovenrivieren en IJsseldelta te definiëren zijn voor een set van 28 as locaties (loc 1 t/m loc 28; nummering oplopend in de bovenstroomse richting) langs de IJssel waterstandsberekeningen gemaakt met Hydra-Ring. Figuur 4.15 toont de gekozen locaties. Locatie loc 1 komt overeen met kmr 989: het punt waar de wind een belangrijke rol begint te spelen. Dit is geïllustreerd in Figuur 4.16 (merk op dat in figuur de 90%-percentielen van de wind zijn gepresenteerd). Hieruit kan worden geconcludeerd dat de grens tussen de IJssel en de IJsseldelta in ieder geval bovenstrooms van loc 1 moet komen te liggen.

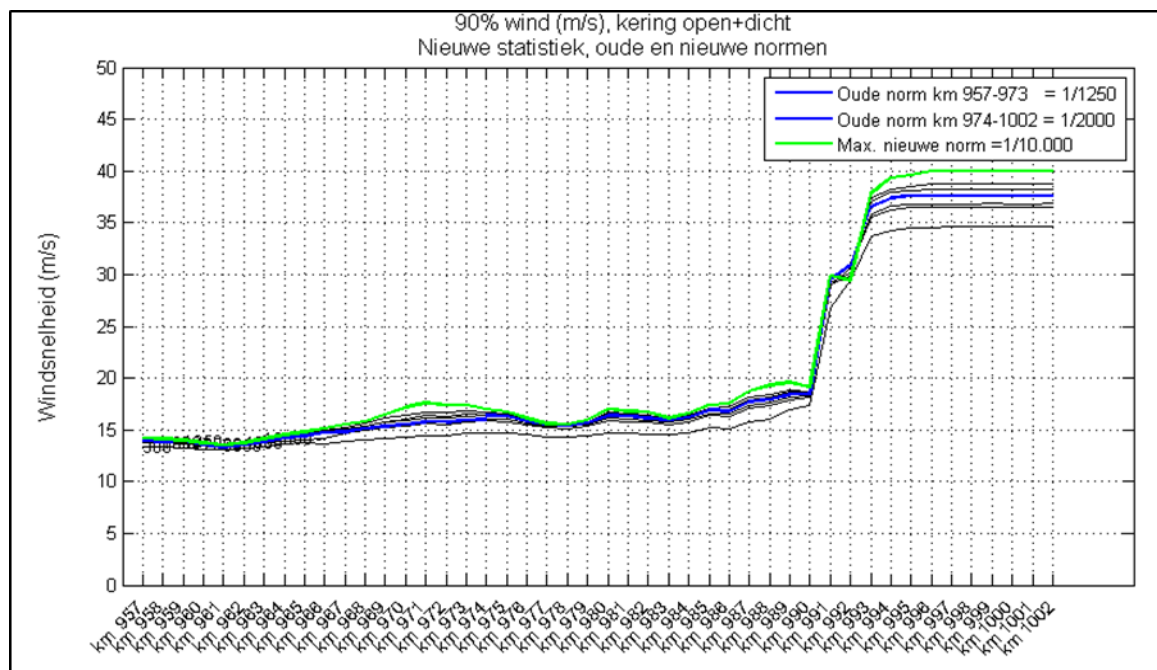
De berekeningen zijn uitgevoerd voor 7 herhalingstijden (100, 300, 1000, 3.000, 10.000, 30.000 en 100.000 jaar) met zowel het belastingmodel van de bovenrivieren als dat van de IJsseldelta.



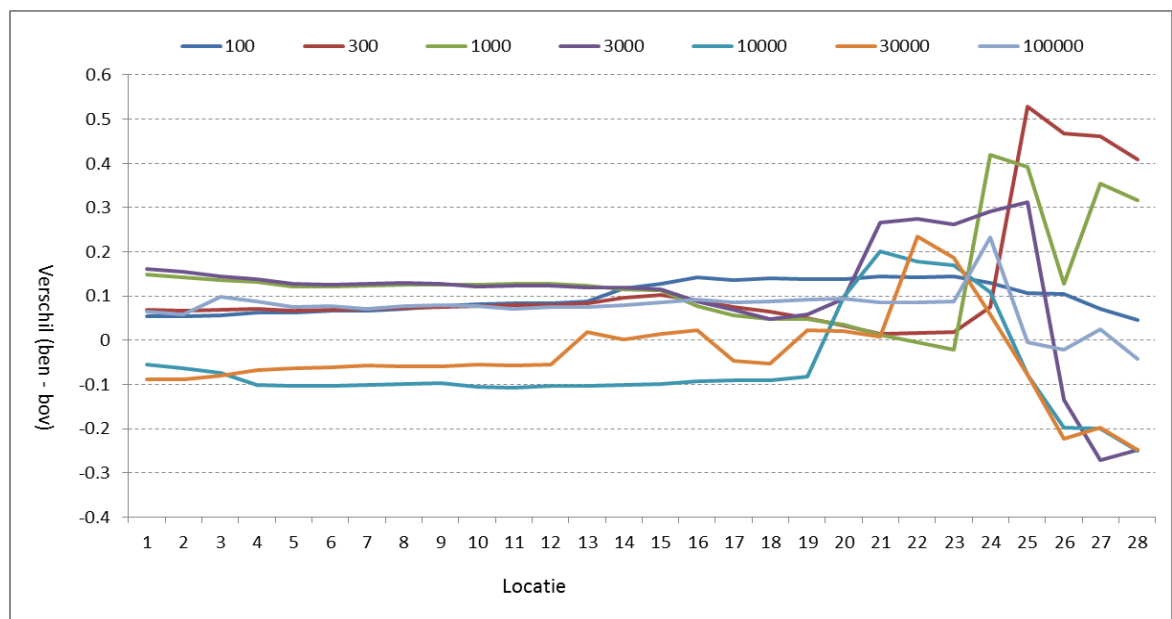
Figuur 4.15 Onderzochte locaties langs de IJssel (rood), grens tussen IJssel en IJsseldelta uit HR-2006 (blauw).

Figuur 4.17 en Tabel 4.6 laten de verschillen zien van de berekende waterstanden. Figuur 4.18 en Figuur 4.19 tonen de frequentielijnen van de waterstand voor loc 1 en loc 15 respectievelijk loc 22 en loc 28.

Het verschil voor de 20 benedenstroomse locaties (loc 1 t/m loc 20) is beperkt (rond 10 cm) en laat bovendien een consistent beeld zien; voor de 8 bovenstroomse locaties (loc 21 t/m loc 28) geldt echter een diffuus beeld en is het verschil dan ook relatief groter (loopt op tot 50 cm), zie Figuur 4.17. Dit beeld is ook te zien in frequentielijnen van de waterstand; vergelijk Figuur 4.18 en Figuur 4.19.



Figuur 4.16 Rol wind locaties langs de IJsseldelta voor verschillende herhalingsjaren (Bron (Chbab en Stuparu, 2016)).



Figuur 4.17 Verschil (in m) in berekende waterstanden langs de IJssel met de databases Bovenrivieren en IJsseldelta.

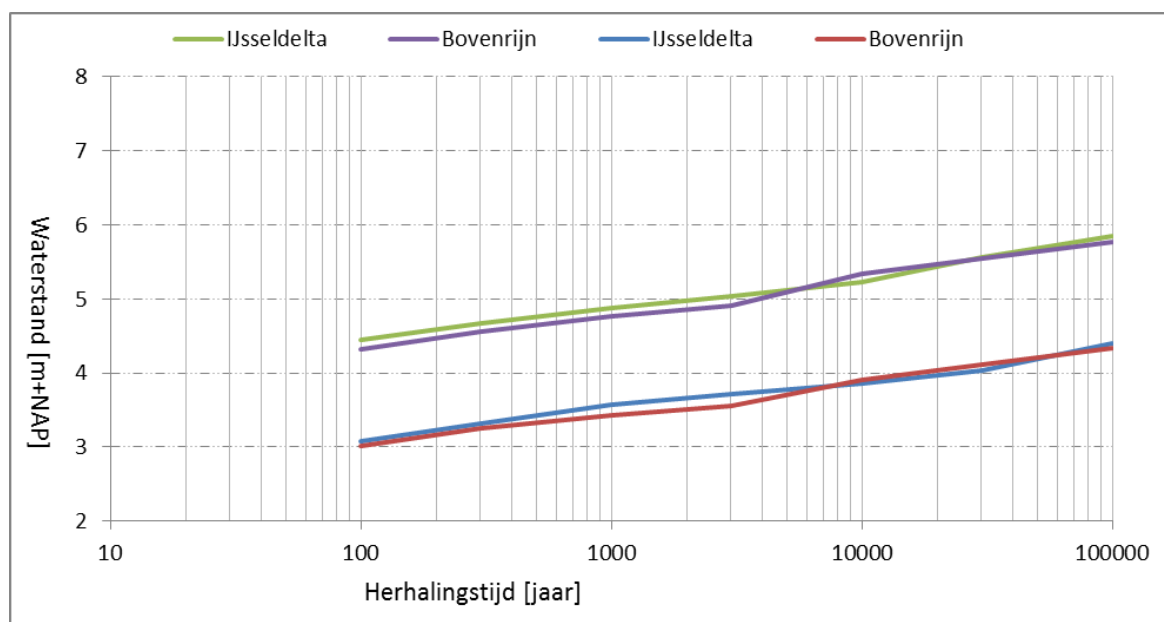
Tabel 4.6 Verschil (in m) in berekende waterstanden langs de IJssel met databases Bovenrivieren en IJsseldelta.

	100	300	1000	3000	10000	30000	100000
loc 1	0.05352	0.06787	0.14782	0.16031	-0.05423	-0.08823	0.06379
loc 2	0.05418	0.06745	0.14306	0.15423	-0.06376	-0.08775	0.05818
loc 3	0.05605	0.06826	0.13656	0.14488	-0.07352	-0.08074	0.09813
loc 4	0.06163	0.07032	0.13257	0.1387	-0.10106	-0.06822	0.08834
loc 5	0.06178	0.06589	0.12033	0.12726	-0.10292	-0.0633	0.07523
loc 6	0.06646	0.06816	0.12079	0.12612	-0.10233	-0.06036	0.0771
loc 7	0.06681	0.07126	0.12335	0.12753	-0.10095	-0.05761	0.07088
loc 8	0.07147	0.07301	0.12518	0.12939	-0.09872	-0.06021	0.07698
loc 9	0.07631	0.07501	0.12574	0.12848	-0.09662	-0.0594	0.07885
loc 10	0.08146	0.07614	0.12613	0.12218	-0.1057	-0.05413	0.07738
loc 11	0.08303	0.07928	0.12653	0.1224	-0.10688	-0.05682	0.06986
loc 12	0.08441	0.07877	0.12709	0.1234	-0.10384	-0.05504	0.07497
loc 13	0.08718	0.0837	0.12309	0.11872	-0.10285	0.01861	0.07506
loc 14	0.11634	0.09532	0.11594	0.11832	-0.10202	0.00078	0.07932
loc 15	0.12756	0.10261	0.11359	0.1146	-0.09962	0.01406	0.0861
loc 16	0.14218	0.08969	0.07771	0.08665	-0.09213	0.02287	0.09081
loc 17	0.13625	0.07581	0.05579	0.06791	-0.09148	-0.04657	0.08489
loc 18	0.13908	0.06538	0.04838	0.04796	-0.09159	-0.05281	0.08855
loc 19	0.13859	0.05028	0.04853	0.05724	-0.08133	0.02285	0.09191
loc 20	0.13792	0.03311	0.03471	0.09386	0.09738	0.01946	0.09357
loc 21	0.14403	0.01425	0.01126	0.26604	0.20045	0.00795	0.08515
loc 22	0.14305	0.01729	-0.00491	0.27539	0.17737	0.23418	0.08504
loc 23	0.14337	0.01742	-0.02084	0.26093	0.1701	0.18725	0.08666
loc 24	0.12918	0.07514	0.41875	0.29086	0.10821	0.05875	0.23179
loc 25	0.10667	0.52797	0.39278	0.31181	-0.07902	-0.07757	-0.00525
loc 26	0.10471	0.46716	0.12761	-0.13463	-0.19767	-0.22387	-0.02187
loc 27	0.06983	0.46216	0.35332	-0.27025	-0.19907	-0.19687	0.02414
loc 28	0.04483	0.40795	0.3162	-0.24849	-0.25124	-0.24857	-0.04195

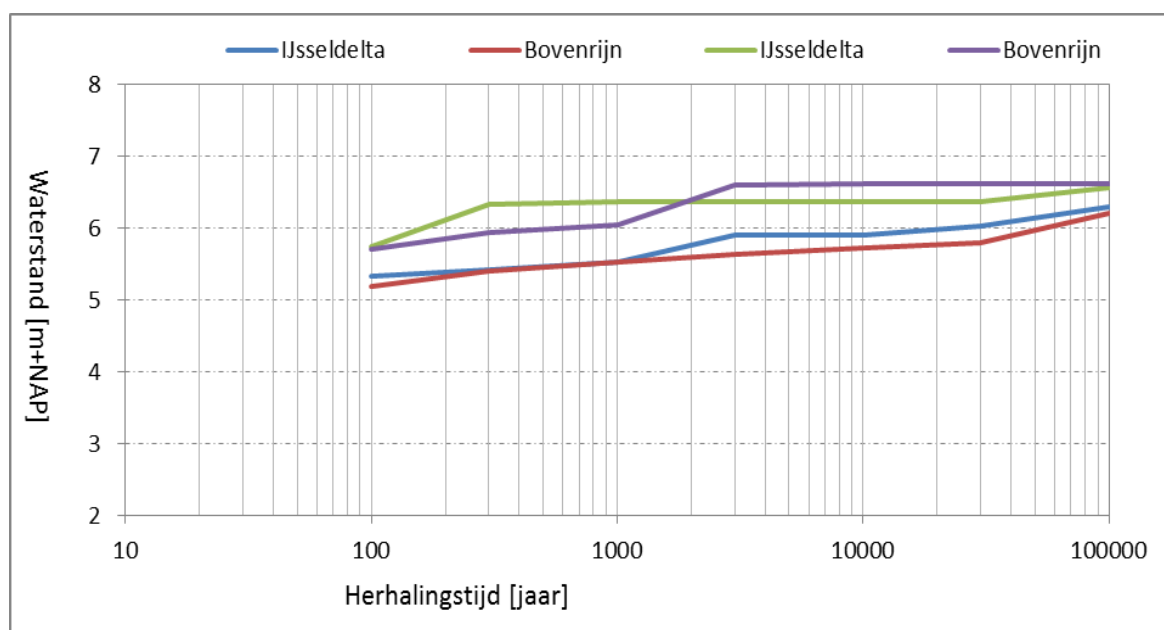
De frequentielijnen van de waterstand voor de locaties loc 1 en loc 15 (huidige grens) volgend uit de 2 gebruikte databases (Bovenrivieren en IJsseldelta) laten veel overeenkomsten zien. Ook is het verschil klein en wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het belastingmodel. Het belastingmodel van de Bovenrijn wordt enkel bepaald door de stochast afvoer; terwijl dat van de IJsseldelta uit meerdere stochasten bestaat (o.a. meerpeil en wind). Afvoer speelt in het belastingmodel van de IJsseldelta weliswaar een dominante rol maar andere stochasten dragen blijkbaar ook enigszins bij. Dit blijkt ook uit Figuur 4.16.

Op basis van de verschilresultaten (Tabel 4.6), het verloop van de frequentielijnen (Figuur 4.18 en Figuur 4.19) en de constatering dat de grens tussen de IJssel en de IJsseldelta tussen loc 1 en loc 20 moet komen te liggen, wordt voorgesteld om de grens langs de IJssel te leggen op de grens tussen de dijktrajecten (aangegeven met zwarte pijlen in Figuur 4.15):

- 206 en 53-2 voor de rechter oever
- 11-1 en 52-4 voor de linker oever.



Figuur 4.18 Frequentielijnen waterstand van loc 1 en loc 15 (grens tussen IJssel en IJsseldelta in HR-2006)



Figuur 4.19 Frequentielijnen waterstand voor loc 22 en loc 28.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Inleiding

In deze studie zijn de Hydraulische Belastingen (HB) voor de harde keringen in de Vecht- en IJsseldelta afgeleid met Hydra-Ring. De HB bestaat uit:

- Marginale statistiek voor de lokale waterstand en significante golfhoogte. Deze worden afgeleid voor de eenvoudige toets en vormen direct invoer voor Ringtoets.
- Waterstanden (t.b.v. geotechnische toetssporen), hydraulische belastingniveaus (HBN, voor golfoverslag-gerelateerde toetssporen) en maatgevende golfcondities per waterstandsniveau (bekledingen). Dit zijn referentiewaarden voor de HR voor de gedetailleerde toets die de toetsers uiteindelijk zelf met Ringtoets afleidt. De HBN's en golfcondities zijn bepaald met standaardinstellingen voor het dijkprofiel.

5.2 Conclusies

De resultaten zijn gecontroleerd aan de hand van verschilanalyses met onder andere de resultaten van WTI-2011 en door middel van ruimtelijke visuele beoordeling. De conclusies hieruit zijn als volgt:

- De Hydra-Zoet (nieuwe statistiek) resultaten zijn vergeleken met Hydra-Zoet (oude statistiek) referentieberekeningen. Hiermee is het verschil als gevolg van het gebruik van nieuwe statistiek van de wind bij locatie Schiphol op lokale waterstand en HBN geduid. De nieuwe statistiek leidt tot geringe verschillen bij locaties langs de Vecht, het Zwarte Water en het Zwarte Meer. Er zijn geen geschikte Hydra-Zoet resultaten voor locaties langs de IJssel beschikbaar, waardoor het effect van de nieuwe statistiek van de rivierafvoer op de IJssel bij locatie Olst niet kon worden bepaald.
- De Hydra-Ring (zonder kennisonzekerheid en met nieuwe statistiek) resultaten zijn vergeleken met resultaten uit Hydra-Zoet (nieuwe statistiek) berekeningen. Hiermee is het verschil als gevolg van de overgang op een nieuwe rekentechniek en nieuwe modelschematisatie (database met rekenresultaten uit productieberekeningen van waterstanden en golfcondities) geduid. Dit betreft locaties langs het Zwarte Meer, het Zwarte Water en de Vecht. Er zijn geen Hydra-Zoet resultaten voor locaties langs de IJssel beschikbaar. De verschillen blijven beperkt tot 0,1 m voor de waterstand en 0,15 m voor HBN. De verschillen zijn logisch verklaarbaar en het gevolg van verschillen tussen beide databases, door automatische correcties die Hydra-Zoet uitvoert op de waarden in de database of door verschillen die ontstaan door verschuiving van de positie van de locaties in WBI-2017 verschoven is t.o.v. WTI-2011. Uitzondering hierop is de berekening van locatie 603071 (meest noordelijke locatie nabij Zwartsluis). Dit betreft een lastige locatie. Zowel in de CR2011 als in de WBI-2017 databases treedt droogval op in verschillende productieberekeningen. De wijze waarop Hydra Zoet en Hydra Ring hiermee omgaan is verschillend. Daarnaast veroorzaakt dit droogvallen voor een moeilijker convergentie van de Hydra Ring berekening. Het lijkt er op dat de resultaten op deze locatie minder betrouwbaar zijn (zowel in de Hydra Zoet als in de Hydra Ring berekening). In een vervolganalyse (Deltares, 2017) worden de gehanteerde rekentechnieken nader beschouwd in relatie tot de betrouwbaarheid van de resulterende HB. De verwachting is dat in de vervolganalyse het resultaat van locatie 603071 nader wordt verklaard. De resultaten van Hydra-Ring en Hydra-Zoet komen goed overeen op die locaties waarvan de invoer van de berekeningen voldoende

overeenkomen. Dit geeft vertrouwen in de nieuwe rekentechnieken voor VIJD berekeningen.

Op basis van de beschikbare resultaten met en zonder kennisonzekerheden kunnen we de volgende conclusies trekken ten aanzien van het effect van het meenemen van deze kennisonzekerheden op de Hydraulische Belastingen.

- Als gevolg van het meenemen van kennisonzekerheid in de Hydra-Ring berekening, neemt de lokale waterstand langs de IJssel toe met ongeveer 0,3 m voor eens per 300 jaar, tot meer dan een halve meter voor eens per 10.000 jaar. In het overgangsgebied tussen IJssel en Ketelmeer is het effect van het meenemen van de onzekerheid beperkt tot 0,3 m. Het effect neemt ook nauwelijks toe met de herhalingstijden. Langs de Vecht en het Zwarte Water is het effect van de onzekerheid op de lokale waterstand 0,4 m eens per 1000 jaar, tot ruim 0,6 m eens per 10.000 jaar. Langs het Zwarte Meer is het effect van de onzekerheid zo groot (ongeveer een meter), dat er geen resultaten van de Hydra-Ring berekening beschikbaar zijn voor de herhalingstijden 100 t/m 10.000 jaar. Om resultaten te krijgen moeten de instellingen van de Hydra-Ring berekening worden aangepast. Verwachting is dat in de vervolganalyse hier aandacht aan wordt besteed (Deltares, 2017).
- Langs de IJssel neemt de berekende golfhoogte toe met 0,1 m eens per 100 jaar, tot bijna 0,4 m eens per 10.000 jaar door het meenemen van kennisonzekerheid. Langs de Vecht en het Zwarte Water neemt de golfhoogte ook toe met 0,1 m eens per 100 jaar, maar wordt de golfhoogte niet groter dan 0,3 m eens per 10.000 jaar. Langs het Zwarte Meer zijn alleen resultaten beschikbaar van locaties die oostelijk georiënteerd zijn. Hier is het effect van onzekerheid beperkt tot ongeveer 0,1 m. Het hydraulisch belastingniveau neemt langs de IJssel toe met 0,2 m eens per 100 jaar tot 0,8 m eens per 10.000 jaar. Langs de Vecht en het Zwarte Water is dit iets kleiner. Langs het Zwarte Meer zijn te weinig resultaten beschikbaar om hierover conclusies te trekken. Ook hier geldt dat deze locaties in de vervolganalyse mbt rekentechnieken nader worden geanalyseerd (Deltares, 2017). Het valt op dat door het meenemen van kennisonzekerheid in de probabilistische berekening de toename in waterstanden groter is dan de toename in HBN. Mogelijk dat door de oriëntatie van de kering het effect van onzekerheid kleiner is. Mogelijk dat een andere windrichting dominant is in de golfoploop berekening, waardoor onzekerheid in waterstanden en statistiek op een andere wijze doorwerken (zie ook vervolganalyse).
- Het effect van de onzekerheid op de belastingparameters neemt toe met de herhalingstijd. Dit is met name het gevolg van de statistische onzekerheid. In de resultaten is ook te zien dat het effect van de onzekerheid op de golfhoogte en het HBN van de oostelijk georiënteerde locaties kleiner is. Op deze locaties is een golfaanval pas bij zeer extreme herhalingstijden significant. Westelijk georiënteerde dijkvakken hebben eens per duizend jaar al te maken met aanzienlijke golven. Daarom is het effect van de onzekerheid op het HBN bij westelijk georiënteerde locaties groter.

Voor de Vechtdelta is het effect van overgang op nieuwe normen bepaald. Omdat voor locaties in de IJsseldelta geen Hydra-Zoet resultaten beschikbaar zijn, kan ook geen effect van de aanpassing van de norm worden bepaald voor deze locaties.

- Bij de keringen van de Noordoostpolder langs het Zwarte Meer, langs de westelijke oever van de IJssel en langs de noordelijke oever van de Vecht is de nieuwe norm lager dan de oude norm. De nieuwe norm is hier dus minder streng. Langs Mastenbroek (dijkkring 10) en Salland (dijkkring 53) is de nieuwe norm strenger. Vlak achter de Ramspolkering stijgen de lokale waterstanden met een meter als gevolg van

aanpassing van de windstatistiek, de faalkans van de Ramspolkering en het meenemen van onzekerheden in de probabilistische berekening. Langs Salland (de zuidelijke oever van de Vecht) nemen de lokale waterstanden iets minder toe (namelijk ongeveer 0,75 m). Op andere locaties in de Vechtdelta is de toename van de lokale waterstanden nog geringer (minder dan 0,2 m).

- 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 het HBN (faalkanseis). De bijdrage van het mechanisme golfoverloop neemt af t.o.v. WTI-2011. Voor alle locaties in de VIJD is de nieuwe norm voor HBN's mede daarom een stuk strenger. Het hydraulisch belastingniveau neemt in de Vechtdelta toe met een halve tot een meter. Deze verschillen in waterstand en HBN zijn niet alleen het gevolg van de nieuwe normfrequentie, maar ook van nieuwe windstatistiek, de faalkans van de Ramspolkering, het meenemen van onzekerheden en een andere rekentechniek.

Gedurende het uitvoeren van de berekeningen en analyses is aanzienlijk veel geleerd over de benodigde instellingen van Hydra-Ring voor het succesvol doorrekenen van de VIJD. Toch is gebleken dat niet voor elke locatie een rekenresultaat beschikbaar is. Eén van de oorzaken is dat een set waterstanden moet worden opgegeven, waarvoor de herhalingstijd moet worden berekend. Door de verschillen tussen het belastingmodel van WTI-2011 en WBI-2017 is het op voorhand niet duidelijk welk bereik opgegeven moet worden. Een gevolg hiervan kan zijn dat voor een aantal herhalingstijden van 100 t/m 100.000 jaar geen belastingen zijn berekend. Voor een gebruiker van Hydra-Ring is dit niet relevant omdat de belasting wordt bepaald bij een gegeven herhalingstijd.

Het gebiedsdekkende overzicht van de marginale statistiek van de waterstanden, golfhoogte en hydraulisch belastingniveau waarin alle oeverlocaties zijn meegenomen geeft een ruimtelijk logisch en consequent beeld weer voor locaties met betrouwbare resultaten. Concluderend kunnen er met Hydra-Ring betrouwbare Hydraulische Belastingen worden afgeleid die in Deltares (2017) zijn vergeleken met Hydra-NL.

5.3 Aanbevelingen

Op basis van de uitgevoerde analyse zijn de volgende aanbevelingen opgesteld:

- Het aantal testlocaties waarmee voor het volledige bereik van de herhalingstijden een vergelijking kon worden gemaakt tussen berekeningen met oude statistiek, oude rekentechniek en zonder kennisonzekerheid was beperkt (vaak minder dan 10 locaties). Voor een uitvoerigere onderbouwing van de kwaliteit van de berekening wordt aanbevolen om te overwegen om de uitgevoerde analyse uit te breiden met meer testlocaties.
- De keuze van de rekentechniek in dit rapport is gebaseerd op de stabiliteit van de berekening. In Deltares (2017) heeft vervolgonderzoek plaatsgevonden naar de rekentechnieken voor Hydra-Ring, onder meer door een vergelijking met Hydra-NL. Daaruit volgt een andere aanbeveling voor de rekeninstellingen, zoals ook beschreven in paragraaf 4.7 van dit rapport. Dit zijn de instellingen die uiteindelijk zijn ingebouwd in WBI2017. 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 Referenties

- Beijk, V.A.W. en Geerse, C.P.M., 2004. Bivariate correlatiemodellen gebaseerd op exponentiële marginale verdelingen. Beschrijving en werking MATLAB-programmatuur RIZA-Werkdocument 2004.109x. RIZA Lelystad, mei 2004.
- 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). Samenvatting van analyse slachtofferrisico's en maatschappelijke kosten-batenanalyse Waterveiligheid. Deltares rapport 1204144-005-ZWS-0002, Mei 2011.
- Deltares (2012). Achtergrondrapport WTI-2011 voor de Vechtdelta. Concept hydraulische randvoorwaarden HR2011 voor de Vechtdelta. Deltares rapport 1204143-003-ZWS-0025. Juli 2012 (H. Chbab).
- Deltares (2014). Hydra reference runs based on WTI2011. Deltares report 1209433-003-HYE-0002, December 2014 (A. Camarena Calderon and J. Morris).
- Deltares (2015a). Kwantificering van de onzekerheden van het gebruik van Bretschneider in het bovenrivierengebied. Deltares rapport 1209433-007-HYE-0007, Maart 2015 (J. van Nieuwkoop).
- Deltares (2015b). Modelonzekerheid Hydra-Ring. Wettelijk toetsinstrumentarium WTI-2017. Deltares rapport 1209433-008-HYE-0007, Juli 2015 (H. Chbab en J. Groeneweg).
- Deltares (2016a). Basisstochasten WTI-2017. Statistiek en statistische onzekerheid. Deltares rapport 1209433-012-HYE-007, Januari 2016 (H. Chbab en D. Eilander).
- Deltares (2016b). WAQUA Productieberekeningen IJssel-Vecht Delta. Deltares rapport 1220082-001-HYE-0014, Februari 2016 (R. Agtersloot en A. Paarlberg).
- Deltares (2016c). SWAN productieberekeningen IJssel-Vechtdelta, Deltares rapport 1220082-001-HYE-0017, Juni 2006 (M. Klein en M. Westra).
- 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. (2016) Hydra-Ring Scientific Documentation. Deltares & TNO-Bouw. Deltares rapport 1206006-004. Deltares 2016
- Ditlevsen, O. and Bjerager, P. 1987. Plastic Reliability Analysis by Directional Simulation. Technical University of Denmark, Report no. 353.
- Geerse C.P.M. 2003. Probabilistisch model hydraulische randvoorwaarden Vecht- en IJsseldelta. RIZA werkdocument 2003.129X. September 2003.

- Geerse, C.P.M. 2006, Hydraulische Randvoorwaarden 2006 Vecht- en IJsseldelta, Statistiek IJsselmeerpeil, afvoeren en stormverlopen voor Hydra-VIJ, RWS RIZA werkdocument 2006.036x, Lelystad 2006.
- Geerse, C.P.M., Wojciechowska, K. 2014. Betrouwbaarheidsintervallen voor kwantilen vande overschrijdingsfrequentie. Toepassing op kuststations en IJsselmeergebied. HKV lijn in water. PR2829.20.
- Geerse, C.P.M. en Verkaik, J.W, 2010. Effect nieuwe windstatistiek op toetspeilen en benodigde kruinhoogten. HKV rapport PR1601.10. Lelystad.
- Geerse, C.P.M. (2016). Werkwijze uitintegreren onzekerheden basisstochasten voor Hydra-NL Afvoeren, meerpeilen, zeewaterstanden en windsnelheden - Update februari 2016 HKV rapport PR3216.10. Lelystad.
- Hartman, J. 2005. Onderbouwing Hydraulische Randvoorwaarden HR2001 voor de IJsseldelta. RIZA rapport 2002-018. September 2005.
- Klerk, W.J., 2014. Analyse betrouwbaarheid en verlenging van meetreeks van de afvoer van de Overijsselse Vecht. Deltares memo 1209433-012-HYE-0005. Delft 2014.
- Kors, A.G., Zwol, J.H. van, Franken, A., 1994. Projectnota/MER Ramspol, Hydraulische Randvoorwaarden, Deelrapport van de werkgroep Hydraulica, november 1994.
- KNMI 1983. A compound Weibull model for the description of surface wind velocity distributions. Rijkoort, P.J. De Bilt: KNMI, Scientific Report WR 83-13, 1983
- RWS (2015). Modelonzekerheden Bretschneider Bovenrivierengebied. Rapport RWS-WVL, maart 2015 (M. Bottema en G. van Vledder).
- TAW, 1989, Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken. Deel 2 - Bovenrivierengebied. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. Staatsuitgeverij. 's Gravenhage.