

# **Hydraulische Belastingen Kust**

**Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017**





# **Hydraulische Belastingen Kust**

**Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017**

Jacco Groeneweg  
Joost den Bieman

1230087-002



## Titel

Hydraulische Belastingen Kust

## Opdrachtgever

RWS - WVL

## Project

1230087-002

## Kenmerk

1230087-002-HYE-0001

## Pagina's

60

## Trefwoorden

Hydraulische Belastingen, Waddenzee, Hollandse Kust, Westerschelde, WBI-2017

## Samenvatting

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

Dit document beschrijft de afleiding en controle van de HB voor de harde keringen in het kustgebied met uitzondering van de Oosterschelde. De resultaten zijn beoordeeld door middel van verschilanalyses met WTI-2011 en door analyse van de ruimtelijke variatie. De verschilanalyse laat zien dat de overgang van Hydra-K naar Hydra-Ring en de implementatie van de nieuwe windstatistiek voor het merendeel van de locaties leiden tot verhoging van de lokale waterstand van 0.1 tot 0.2 m en tot 0.5 m in hydraulisch belastingniveau (HBN). Slechts voor enkele locaties zijn de verschillen groter. De verschillen in HBN lijken voornamelijk voort te komen uit verschillen in de correlatiemodellen tussen wind en zeewaterstand, zoals deze geïmplementeerd zijn in Hydra-K en Hydra-Ring. Datzelfde geldt voor verschillen in significante golfhoogte, waar de verschillen over het algemeen kleiner zijn dan 0.2 m, maar op een aantal Waddenzee locaties oploopt tot 0.4 m.

Het effect van de introductie van kennisonzekerheden op de lokale waterstand en de significante golfhoogte is beperkt. Dat geldt niet voor het HBN. Wanneer we naar de HBN kijken kan dit effect bij locaties met hoge golven oplopen tot meerdere meters, wat ogenschijnlijk veel is. Deels wordt dit veroorzaakt door een dubbeltelling van de modelonzekerheid in de golfperiode in Hydra-Ring, deels door de keuze om met standaardprofielen te rekenen.

Uit de verschilanalyse trekken we de conclusie dat de afgeleide lokale waterstanden, HBN's en golfhoogtes betrouwbaar zijn.

Bij dit rapport worden spreadsheets geleverd met maatgevende waterstanden, HBN en golfhoogtes voor de harde keringen in het kustgebied (met uitzondering van de Oosterschelde) voor een zevental beschouwde herhalingstijden.

**Titel**  
Hydraulische Belastingen Kust

**Opdrachtgever**  
RWS - WVL

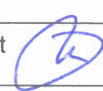
**Project**  
1230087-002

**Kenmerk**  
1230087-002-HYE-0001

**Pagina's**  
60

**Referenties**

Plan van Aanpak WTI KPP 2016, maart 2016

| Versie | Datum     | Auteur           | Paraaf                                                                            | Review        | Paraaf                                                                            | Goedkeuring     | Paraaf                                                                              |
|--------|-----------|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 1      | juni 2016 | Jacco Groeneweg  |                                                                                   | Hans de Waal  |                                                                                   | Marcel van Gent |                                                                                     |
|        |           | Joost den Bieman |                                                                                   |               |                                                                                   |                 |                                                                                     |
| 2      | juli 2016 | Jacco Groeneweg  |                                                                                   | Joost Beckers |                                                                                   | Marcel van Gent |                                                                                     |
|        |           | Joost den Bieman |                                                                                   |               |                                                                                   |                 |                                                                                     |
| 4      | dec 2016  | Jacco Groeneweg  |                                                                                   | Joost Beckers |                                                                                   | Marcel van Gent |                                                                                     |
|        |           | Joost den Bieman |                                                                                   |               |                                                                                   |                 |                                                                                     |
| 5      | apr 2017  | Jacco Groeneweg  |  | Joost Beckers |  | Marcel van Gent |  |
|        |           | Joost den Bieman |                                                                                   |               |                                                                                   |                 |                                                                                     |

**Status**  
definitief

## Inhoud

|                                                                  |           |
|------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 Inleiding</b>                                               | <b>1</b>  |
| 1.1 Positionering rapportage in WBI-2017 structuur               | 1         |
| 1.2 Overgang naar WBI-2017                                       | 3         |
| 1.3 Doelstelling                                                 | 6         |
| 1.4 Algemene uitgangspunten berekeningen                         | 6         |
| 1.5 Aanpak                                                       | 8         |
| 1.6 Leeswijzer                                                   | 8         |
| 1.7 Producten                                                    | 8         |
| 1.8 Totstandkoming                                               | 9         |
| <b>2 Belastingmodel HR kust</b>                                  | <b>11</b> |
| 2.1 Inleiding                                                    | 11        |
| 2.2 Belastingmodel van het kustgebied                            | 11        |
| 2.3 Statistiek                                                   | 12        |
| 2.3.1 Windstatistiek                                             | 13        |
| 2.3.2 Zeewaterstand statistiek                                   | 16        |
| 2.3.3 Correlaties stochasten                                     | 16        |
| 2.4 Database                                                     | 17        |
| 2.5 Extra stochasten t.b.v. het meenemen van kennis onzekerheden | 17        |
| 2.5.1 Model onzekerheden                                         | 17        |
| 2.5.2 Statistische onzekerheden                                  | 18        |
| 2.6 Probabilistische rekentechniek                               | 18        |
| <b>3 Verschilanalyse HB kust</b>                                 | <b>21</b> |
| 3.1 Inleiding                                                    | 21        |
| 3.2 Werkwijze analyse HB resultaten                              | 21        |
| 3.3 Uitgangspunten berekening                                    | 21        |
| 3.3.1 Algemeen                                                   | 21        |
| 3.3.2 Hydra instellingen                                         | 22        |
| 3.4 Resultaten lokale waterstand en HBN                          | 24        |
| 3.4.1 Vergelijking tussen Hydra-K en Hydra-Ring                  | 24        |
| 3.4.2 Effect onzekerheden                                        | 35        |
| 3.4.3 Vergelijking bij oude en nieuwe norm                       | 39        |
| 3.5 Marginale statistiek van de golfhoogte                       | 42        |
| 3.5.1 Vergelijking tussen Hydra-K en Hydra-Ring                  | 43        |
| 3.5.2 Effect van onzekerheden                                    | 45        |
| <b>4 Resultaten HB kust</b>                                      | <b>47</b> |
| 4.1 Inleiding                                                    | 47        |
| 4.2 Uitgangspunten probabilistische productieberekeningen        | 47        |
| 4.3 Rekenresultaten lokale waterstanden                          | 47        |
| 4.4 Rekenresultaten Golfhoogte                                   | 49        |
| 4.5 Rekenresultaten HBN                                          | 51        |
| 4.6 Revisie rekeninstellingen                                    | 54        |
| 4.7 Rekentijden                                                  | 54        |
| <b>5 Conclusies en aanbevelingen</b>                             | <b>55</b> |

|                       |                                           |            |
|-----------------------|-------------------------------------------|------------|
| 5.1                   | Conclusies                                | 55         |
| 5.2                   | Aanbevelingen                             | 56         |
| <b>6</b>              | <b>Referenties</b>                        | <b>59</b>  |
| <br><b>Bijlage(n)</b> |                                           |            |
| <b>A</b>              | <b>Ruimtelijke verdeling waterstanden</b> | <b>A-1</b> |
| A.1                   | Waddenzee                                 | A-1        |
| A.2                   | Hollandse Kust                            | A-4        |
| A.3                   | Westerschelde                             | A-9        |
| <b>B</b>              | <b>Ruimtelijke verdeling HBN</b>          | <b>B-1</b> |
| B.1                   | Waddenzee                                 | B-1        |
| B.2                   | Hollandse Kust                            | B-4        |
| B.3                   | Westerschelde                             | B-9        |
| <b>C</b>              | <b>Ruimtelijke verdeling golfhoogtes</b>  | <b>C-1</b> |
| C.1                   | Waddenzee                                 | C-1        |
| C.2                   | Hollandse Kust                            | C-4        |
| C.3                   | Westerschelde                             | C-9        |

## 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 coastal region, Oosterschelde excluded. The results were judged by analysing the probability exceedance curves and differences with WTI-2011, as well as spatial contours of the Hydraulic Loads. The difference analyses shows that changing from the presently used Hydra-K to Hydra-Ring and the inclusion of new wind statistics lead increase of the local water level of 0.1 to 0.2 m and of 0.5 m in HBN. For only a few locations the differences are larger. The differences in HBN are likely to be caused by the different wind – water level correlation models, implemented in Hydra-K and Hydra-Ring. This is also valid for the differences in significant wave height, which are in general smaller than 0.2 m. For a few locations in the Waddenzee the differences increase to 0.4 m.

The impact of the inclusion of statistical and model uncertainties on the local water level and the significant wave height is relatively small. That is not valid for HBN and the wave loads on revetments. For HBN the effect at locations with high waves can be up to several meters, which is more than to be expected. This is at least due to the choice of performing the calculations with standard profiles. Assuming independency between wave height and wave period may lead to a significant effect of model uncertainties on HBN.

From the difference analysis we draw the conclusion that the derived local water levels, HBNs and wave heights are reliable.

Excel files with the Hydraulic Loads (water levels, HBN, significant wave heights) for all locations and each of the seven frequencies have been produced at all locations in the coastal region (Oosterschelde excluded) and will be attached to this report.



# 1 Inleiding

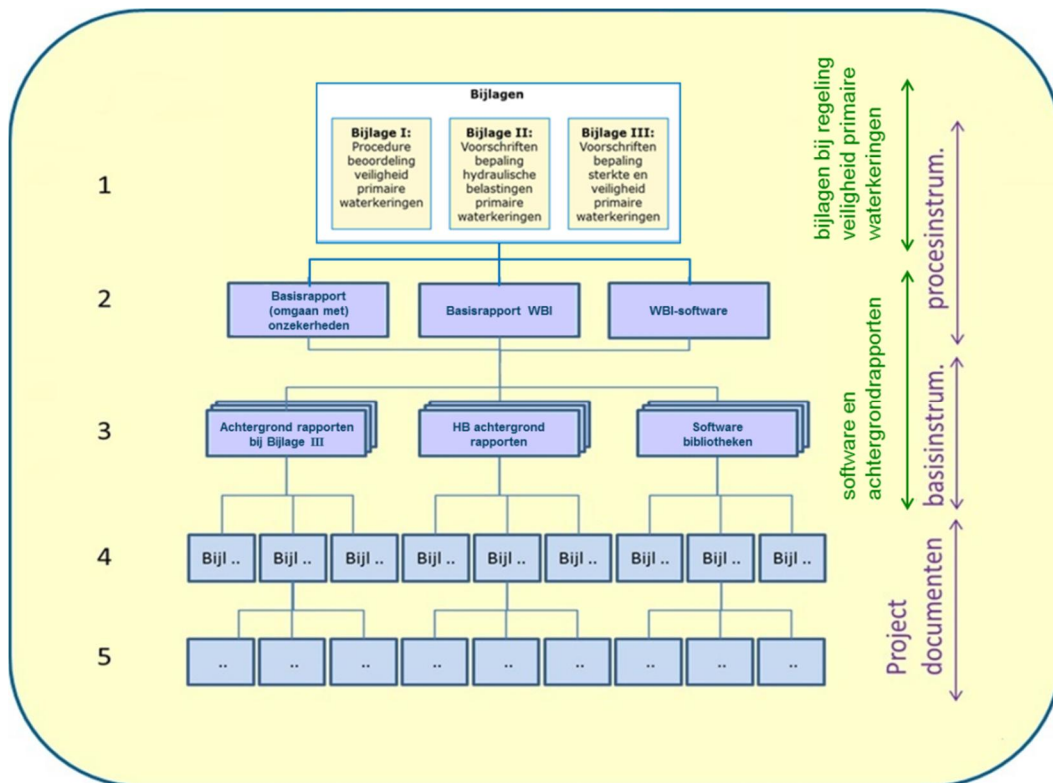
## 1.1 Positionering rapportage in WBI-2017 structuur

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 (hierna: Bijlage I Procedure).  
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 (hierna: Bijlage II Hydraulische belastingen).  
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 (hierna: Bijlage III Sterkte en veiligheid).  
In deze bijlage staat op welke manier de primaire waterkering moet worden beoordeeld om te komen tot een oordeel over de veiligheid van de gehele kering.

De 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 applicatie-software. 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), alsmede een 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 Kust zijn verkregen, hoe de resultaten er uit zien en hoe ze zich verhouden tot WTI-2011. De HB voor de Oosterschelde worden niet beschreven in dit rapport. Hiervoor wordt verwezen naar Deltares (2016c). Deze zullen in een ander rapport worden beschouwd. Naast de kustgebieden zijn soortgelijke rapportages voor het Merengebied, Bovenrivierengebied, Vecht-IJsseldelta en Benedenrivierengebied geschreven. Dit zijn dus allemaal specialistische achtergrondrapporten. Een aggregatie van deze rapporten vindt plaats in het HR achtergrondrapport.

Alvorens de doelstelling van voorliggende rapportage te 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 Westerschelde en Waddenzee staan bekend onder de naam CR2011, concept randvoorwaarden. Voor de Hollandse Kust zijn de HR uit 2006 overgenomen. De vierde toetsronde zal in 2017 starten. Het daartoe te gebruiken Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI-2017) maakt gebruik van een groot aantal onderdelen uit het WTI-2011. Desalniettemin zijn er vele verschillen.

De Hydraulische Belastingen (HB) per locatie bestaan uit een combinatie van waterstand en golfhoogte, -periode en -richting. De vigerende HR2006 gaat uit van de overschrijdingskansbenadering, die kijkt naar de kans op overschrijding van een kritieke belasting voor een tevoren vastgesteld faalmechanisme en (eigenschappen van) een 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 en een beschouwing van de slachtoffer risico's (zie samenvatting in Deltares, 2011) en op 4 juli 2016 wettelijk vastgesteld<sup>1</sup>.

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

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



*Figuur 1.2 Normfrequenties voor de primaire waterkeringen. Dit betreft in dit geval de ondergrens, 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 wordt standaard gedefinieerd als een waarde met een overschrijdingskans die getalsmatig gelijk is aan de norm.

Bovenstaande uitleg wordt in Tabel 1.1 nog eens 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 toetser 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 waterstand, HBN en golfcondities bij vaste waterstand)                   |
|               |         | Volledig prob  | Gras & duinen    | Norm aangepast voor lengte effect en faalkansverdeling              | Ringtoets                 |                                                                                                          |
|               | traject | Volledig prob. | alle             | Gehele frequentielijn                                               | Ringtoets                 |                                                                                                          |

Omdat de hydraulische belastingen per watersysteem verschillen hebben we er voor gekozen de HB voor ieder watersysteem apart te rapporteren. Zo maken we onderscheid in de watersystemen Kust, Meren, Bovenrivieren, Vecht- en IJsseldelta en Benedenrivieren. In deze rapportage beschouwen we het kustgebied. Aan de hand van een groot aantal berekeningen zijn Hydraulische Belastingen (HB) voor de harde keringen in het kustgebied 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 drieledig:

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

### 1.4 Algemene uitgangspunten berekeningen

Bij het bepalen van de Hydraulische Belastingen worden de volgende uitgangspunten gehanteerd.

- Tot het kustgebied behoren de regio's Waddenzee (regio's 9 en 10 in Figuur 1.3), Hollandse Kust (regio's 11, 12 en 13) en Westerschelde (regio 15). Het betreft alleen harde keringen, dus de HB voor de duinenkust worden hier niet gerapporteerd. Dat is al in Deltares (2016a) gedaan. Ook de HB voor de Oosterschelde (regio 14) worden apart gerapporteerd.
- De Hydraulische Belastingen voor de eenvoudige toets vormen input voor Ringtoets en dienen om die reden op alle oeverlocaties te worden bepaald en voor alle relevante herhalingstijden. De relevante herhalingstijden worden afgeleid 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).
- De betrouwbaarheid van de resultaten wordt mede bepaald door de keuze van de probabilistische rekentechniek. De meest geschikte rekentechniek is voor alle gebieden

in overleg met Hydra-Ring ontwikkelaars vastgesteld. Toch kunnen we niet uitsluiten dat op sommige locaties HB worden berekend die minder betrouwbaar zijn. Waar dit optreedt zal het in dit rapport zoveel mogelijk worden geduid. In een vervolganalyse (Deltares, 2017) zijn de gehanteerde rekentechnieken nader beschouwd in relatie tot de betrouwbaarheid van de resulterende HB.



Figuur 1.3 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 4.6).

De producten die we uitleveren en beschreven staan in Paragraaf 1.7 zijn gebaseerd op de fases 1 en 2. Dat betekent dat de geleverde Hydraulische Belastingen niet per definitie zijn afgeleid met de optimale rekeninstellingen, welke in Fase 3 zijn bepaald.

## 1.6 Leeswijzer

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

- 1 Beschrijven van het belastingmodel van WBI-2017 voor de harde keringen in het kustgebied (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 worden 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,
- Hydraulische 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 worden de volgende data en applicaties opgeleverd:

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

### **1.8 Totstandkoming**

Bijdragen aan dit document en onderliggende rekenresultaten zijn geleverd door:

- Jacco Groeneweg
- 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 Hans de Waal en Joost Beckers.

Van de zijde van RWS is inbreng geleverd door:

- Deon Slagter
- Robert Slomp
- Marcel Bottema

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



## 2 Belastingmodel HR kust

### 2.1 Inleiding

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

### 2.2 Belastingmodel van het kustgebied

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

De basis van het belastingmodel voor golfoverslag is het Hydra-Ring model, dat gevoed wordt door de volgende invoer:

1. Statistiek: dit is de statistiek van de basisstochasten wind (snelheid en richting) en zeewaterstand die de belangrijkste variabiliteit van het watersysteem beschrijven. Tevens wordt hun onderlinge correlatie beschouwd. In WBI-2017 vallen onder de statistiek ook de kansverdelingen van model- en statistische onzekerheden.
2. Database: de database geeft de vertaling van een set stochastcombinaties naar de hydraulische belasting bij de teen van de waterkering.
3. Informatie over dijkprofiel, kritiek overslagdebiet en frequentie.

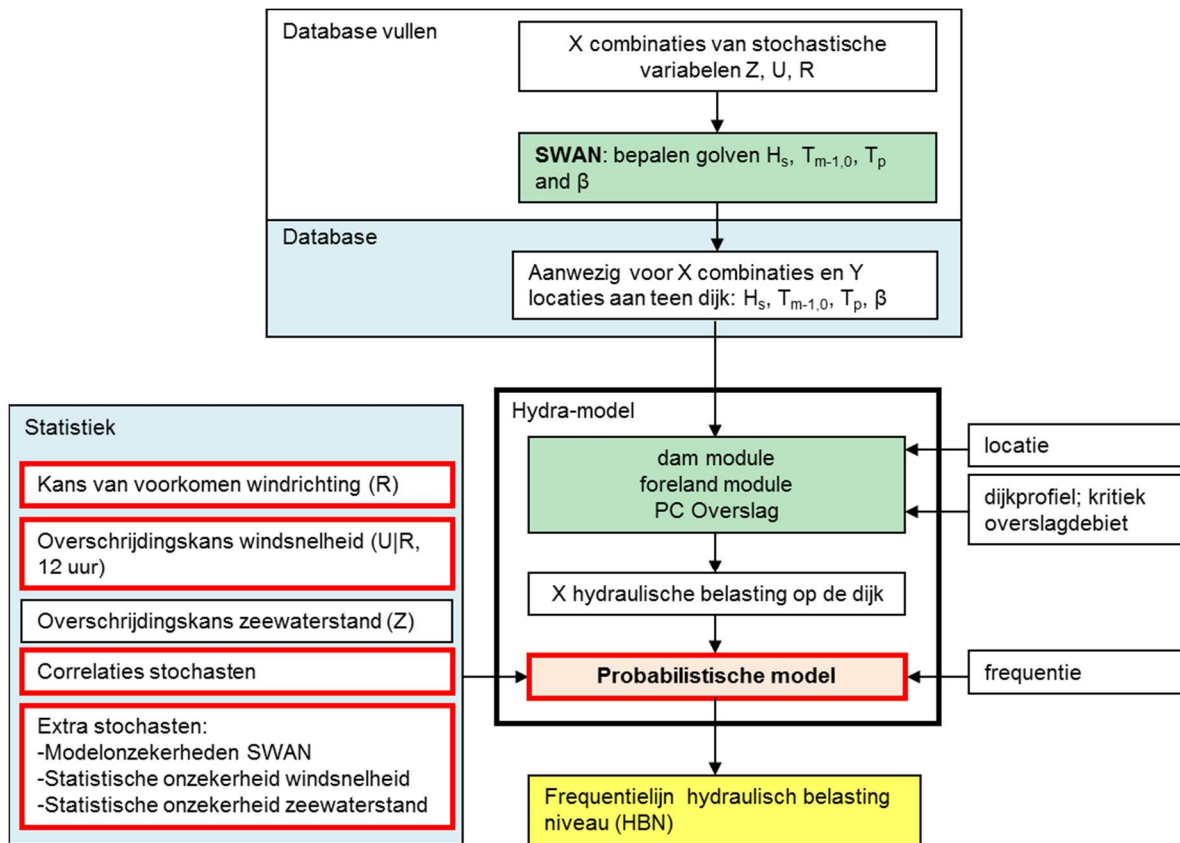
Het belastingmodel combineert realisaties van de basisstochasten, vertaalt deze naar een belasting bij de teen van de kering, berekent een overslagdebiet en bepaalt de kans op overschrijding van kritieke waarden. Het overslagdebiet wordt berekend met behulp van PC-Overslag, waarbij een dam- en voorlandmodule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

Het Hydra-Ring model kan deterministische en probabilistische overslagberekeningen uitvoeren. Het Hydra-K model dat binnen WTI-2011 gebruikt werd kon alleen deterministische overslagberekeningen uitvoeren. Om de resultaten te kunnen vergelijken zijn de overslagberekeningen in Hydra-Ring ook deterministisch uitgevoerd, met dezelfde modelfactoren als in Hydra-K. De modelonzekerheden aan de sterktekant zijn in Hydra-Ring ook niet meegenomen, aangezien we ons in deze studie richten op verschillen in Hydraulische Belastingen.

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

In de onderstaande paragrafen worden de genoemde onderdelen nader toegelicht. Daarbij wordt ook ingegaan op de verschillen tussen HR2006, WTI-2011 en WBI-2017. In Figuur 2.1 zijn de onderdelen die zijn gewijzigd in WBI-2017 rood omlijnd. De belangrijkste aanpassingen ten opzichte van WTI2011 zijn:

- Nieuw probabilistisch model Hydra-Ring;
- Update van de windstatistiek;
- Update van correlatie tussen wind en zeewaterstand;
- Introductie van kennisonzekerheden (statistische en modelonzekerheden).



Figuur 2.1 Schematische weergave belastingmodel kust. Hierin worden de componenten genoemd die nodig zijn bij het bepalen van de frequentie van het hydraulisch belasting niveau voor hoogte-gerelateerde faalmechanismen. Voor bepalen van de frequentie voor het geotechnische faalmechanismen of bekledingen ziet het schema er iets anders uit. De rode componenten zijn aangepast in WBI-2017 t.o.v. WTI-2011 (dam- en voorland module buiten beschouwing latend).

## 2.3 Statistiek

De basisstochasten in het kustgebied betreffen windsnelheid, windrichting en zeewaterstand. De statistiek van deze stochasten, alsmede hun onderlinge correlatie, wordt bepaald op basis van metingen. Per regio worden verschillende meetstations beschouwd. In Tabel 2.1 zijn de basisstochasten voor de verschillende watersystemen weergegeven.

Tabel 2.1 Basisstochasten per regio in Hydra-Ring.

| Regio | Naam basisstochast             | Regio | Naam basisstochast              |
|-------|--------------------------------|-------|---------------------------------|
| 9     | Windrichting Hoek van Holland  | 12    | Windrichting Hoek van Holland   |
|       | Waterstand Lauwersoog          |       | Waterstand Den Helder           |
|       | Waterstand Harlingen           |       | Waterstand IJmuiden             |
|       | Waterstand Delfzijl            |       | Waterstand Hoek van Holland     |
|       | Waterstand Huibergat           |       | Waterstand IJmuiden extra       |
|       | Waterstand West Terschelling   |       | Windsnelheid IJmuiden           |
|       | Windsnelheid West Terschelling | 13    | Windrichting Hoek van Holland   |
| 10    | Windrichting Hoek van Holland  |       | Waterstand Den Helder           |
|       | Waterstand Lauwersoog          |       | Waterstand IJmuiden             |
|       | Waterstand Harlingen           |       | Waterstand Hoek van Holland     |
|       | Waterstand Den Helder          |       | Waterstand Vlissingen           |
|       | Waterstand Den Oever           |       | Waterstand Oosterschelde buiten |
|       | Waterstand Huibergat           |       | Windsnelheid Hoek van Holland   |
|       | Waterstand West Terschelling   | 15    | Windrichting Hoek van Holland   |
|       | Windsnelheid West Terschelling |       | Waterstand Vlissingen           |
| 11    | Windrichting Hoek van Holland  |       | Waterstand Hansweert            |
|       | Waterstand Harlingen           |       | Waterstand Vlissingen extra     |
|       | Waterstand Den Helder          |       | Windsnelheid Vlissingen         |
|       | Waterstand IJmuiden            |       |                                 |
|       | Waterstand Den Oever           |       |                                 |
|       | Waterstand West Terschelling   |       |                                 |
|       | Waterstand IJmuiden extra      |       |                                 |
|       | Windsnelheid De Kooy (DH)      |       |                                 |

### 2.3.1 Windstatistiek

Wind heeft betrekking op windsnelheid (m/s) en windrichting (graden t.o.v. Noord). De statistiek van beide aspecten is geactualiseerd voor WBI-2017.

#### Windsnelheid

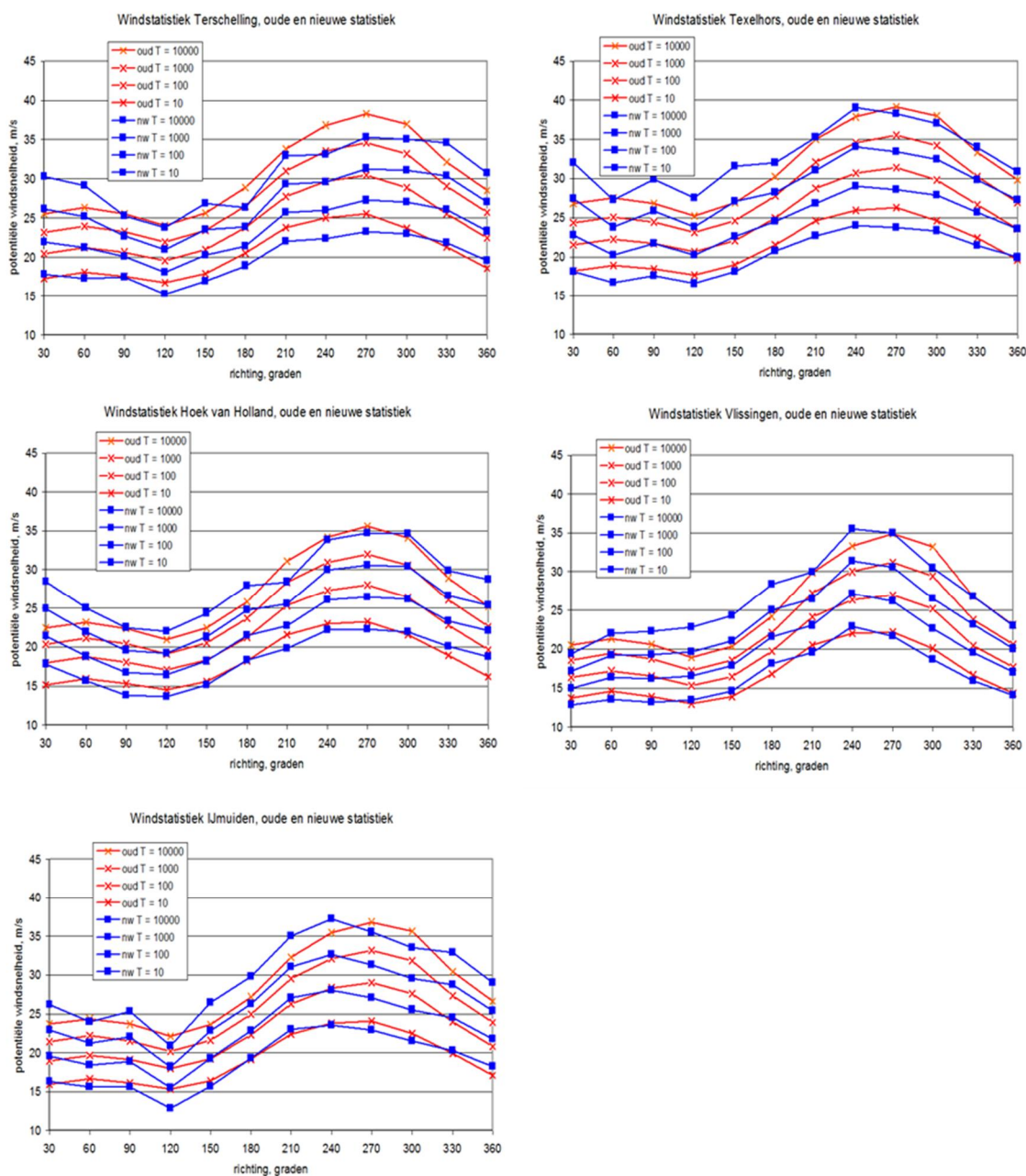
In het kader van WTI-SBW is recentelijk in opdracht van Rijkswaterstaat onderzoek gedaan naar de windstatistiek waarbij o.a. windmetingen uit de periode vanaf 1970 zijn gebruikt. Op basis van deze langere en betrouwbaardere meetreeksen is door Deltares in samenwerking met het KNMI nieuwe windstatistiek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

Een vergelijking tussen de windstatistiek zoals gebruikt in WTI-2011 (volgens het Rijksoort-Weibull model) en de nieuwe windstatistiek voor de vijf windstations genoemd in meest relevante<sup>2</sup> windstations en windrichtingen is weergegeven in Figuur 2.2. Om globaal conclusies te kunnen trekken over de veranderingen in windstatistiek, beperken we ons hier tot de richtingen 210°N t/m 330°N, voor T = 1.000 en 10.000 jaar. In dat geval zijn de globale conclusies als volgt:

<sup>2</sup> Dit zijn de windstations die gebruikt worden in Hydra-Ring.

- West Terschelling
  - o De kans op hoge windsnelheden in de sector 330°N gaat omhoog (t.o.v. de oude statistiek)
  - o De kans op hoge windsnelheden in sectoren 210°N t/m 300°N worden lager (t.o.v. de oude statistiek)
- Texelhors
  - o De kans op hoge windsnelheden in sectoren 270°N en 300°N worden iets lager
- IJmuiden
  - o De kans op hoge windsnelheden in sectoren 210°N, 240°N en 330°N worden hoger
  - o De kans op hoge windsnelheden in sectoren 270°N en 300°N worden lager
- Hoek van Holland
  - o De kans op hoge windsnelheden in sectoren 210°N, 240°N en 270°N worden (iets) lager
  - o De kans op hoge windsnelheden in sector 330°N gaat iets omhoog
- Vlissingen
  - o De kans op hoge windsnelheden in sector 240°N gaat omhoog
  - o De kans op hoge windsnelheden in sector 300°N gaat omlaag

Anders dan in WTI-2011 wordt in WBI-2017 voor regio 11 (Hollandse Kust Noord) de windstatistiek van De Kooij gehanteerd. Over het algemeen valt deze iets lager uit dan voor Texelhors, wat maakt dat voor de richtingen 270°N en 300°N de windsnelheid bij de herhalingstijden van 1.000 en 10.000 jaar nog iets lager uitvallen.



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

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

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

## Windrichting

Voor alle kustgebieden wordt in Hydra-Ring de kansverdeling van de windrichting bij station Hoek van Holland gebruikt. Het is noodzakelijk om voor alle locaties dezelfde kansverdeling te gebruiken vanwege reproduceerbaarheid van en consistentie met de omni-directionele statistiek (zie Deltares, 2016b).

Voor een verschilanalyse tussen Hydra-Ring en Hydra-K is het van belang te benadrukken dat de windrichting in de beide belastingmodellen anders wordt behandeld. In Hydra-Ring is de windrichting een van de basisstochasten. Er wordt een kansverdeling van wind uit de verschillende sectoren gebruikt. In Hydra-K worden simultane metingen van wind en waterstand opgeschaald naar extreme condities onder de aanname van gelijkblijvende correlatie tussen wind en waterstand. Een vooraf bepaalde hoeveelheid stormen wordt in het faaldomein geschoven, onafhankelijk van de windrichting. De windrichtingsafhankelijkheid zit in de simultane waarnemingen besloten en wordt niet middels een windrichtingstatistiek vastgelegd.

Vanwege de vervlechting van windrichtingstatistiek met het probabilistische model zullen we de verandering in de windrichtingstatistiek in de verschilanalyses in dit rapport scharen onder de veranderingen in probabilistisch model, d.w.z. Hydra-Ring versus Hydra-K.

### 2.3.2 Zeewaterstand statistiek

De zeewaterstand statistiek is gebaseerd op de basispeilen uit (Dillingh et al., 1993). Deze gelden voor de situatie in het jaar 1985. In verband met een mogelijke stijging van de hoogwaters door zeespiegelrijzing en lokale effecten zijn de basispeilen geactualiseerd voor het jaar waarin de toetsing van een waterkering betrekking heeft. Voor WTI-2017 betreft dat het jaar 2023 (het einde van de toetsperiode). Op basis van de voor WTI-2011 gehanteerde werkwijze (Deltares, 2010) zijn toeslagen voor hoogwaterstanden tussen 1985 en 2023 berekend op basis van tijdreeksen t/m 2012, zie Deltares (2016b).

De volgende correcties/toeslagen zijn doorgevoerd voor 2023 ten opzichte van 1985:

- Voor Nederlandse kust met uitzondering van Hoek van Holland en Petten Zuid, de Waddenzee en de Westerschelde kust tot Hansweert geldt een toeslag van 8 cm,
- Voor Hoek van Holland en Petten Zuid geldt een toeslag van 10 cm,
- Voor de Westerschelde kust na Hansweert wordt een lineaire toename van 8 tot 14 cm bij Bath aangehouden,
- Voor de Eems-Dollard geldt een gemiddelde toeslag van 7 cm.

De gemiddelde toeslagen langs de Hollandse kust, Westerschelde en Waddenkust voor 2023 zijn gelijk gebleven aan de toeslagen voor peildatum 2017, zoals toegepast in WTI-2011, met uitzondering van Hoek van Holland en Petten Zuid. Van deze twee waterstandstations wordt alleen Hoek van Holland gebruikt als basisstochast. Voor WBI-2017 werd de waterstandstatistiek opgehoogd met 2 cm ten opzichte van WTI-2011.

### 2.3.3 Correlaties stochasten

Wind en zeewaterstand zijn gecorreleerd. Het correlatiemodel in Hydra-Ring gebruikt een geparametriseerd model dat de correlatie tussen de potentiële windsnelheden en de zeewaterstanden beschrijft. Hiertoe zijn de simultane waarnemingen van wind en zeewaterstand bewerkt volgens het model, zoals ook beschreven in Vrouwenfelder et al. (2003) en Deltares (2016b).

In Hydra-K wordt een volledig andere aanpak gebruikt om correlaties tussen wind en waterstand in rekening te brengen (zie paragraaf 2.3.1). Het effect van de overgang op het nieuwe parametrische correlatiemodel is niet eenvoudig te isoleren van andere verschillen tussen Hydra-K en Hydra-Ring. Rekenresultaten met Hydra-K en Hydra-Zout (probabilistisch model voor kustzone met geparametriseerd correlatiemodel) in de Westerschelde en Waddenzee (HKV, 2016) laten orde decimeters verschil in lokale waterstand en HBN zien. In die studie wordt echter niet aangetoond dat die verschillen volledig te wijten zijn aan het verschil in gehanteerd correlatiemodel.

## 2.4 Database

De database geeft per locatie de vertaling van een stochastcombinatie (windsnelheid, windrichting en zeewaterstand) naar bijbehorende hydraulische belasting op typisch 50 m van de waterkering, in termen van golfhoogte, golfperiode en golfrichting. Voor het vullen van de database liggen productieberekeningen ten grondslag met het golfmodel SWAN. Voor meer informatie wordt verwezen naar (Deltares, 2012).

De databases met resultaten van de golfberekeningen met SWAN zijn voor zowel Waddenzee, Hollandse Kust als de Westerschelde gelijk aan de databases zoals gebruikt in de WTI-2011. Dit zijn:

- Waddenzee: CR2011
- Hollandse Kust: HR2006
- Westerschelde: CR2011

Hieruit kunnen dus geen verschillen ontstaan tussen HB2011 en HB2017.

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

Nieuw binnen WBI-2017 is het meenemen van kennisonzekerheid bij het bepalen van de Hydraulische Belastingen. Kennisonzekerheden in de belastingen zijn onder te verdelen in statistische- en modelonzekerheden.

Hydra-Ring is dusdanig ontworpen dat het toevoegen van extra stochasten zonder veel moeite kan plaatsvinden. Zowel model- als statistische onzekerheden zijn als optionele extra stochasten toegevoegd aan Hydra-Ring. De wijze van implementatie in Hydra-Ring is globaal beschreven in de Scientific Documentation van Hydra-Ring (Diermanse et al, 2016).

### 2.5.1 Model onzekerheden

De modelonzekerheden binnen WBI Hydraulische Belastingen zijn: mogelijke onnauwkeurigheden in de parameterinstellingen (kalibratie), de modelschematisaties en modelinvoer van de modellen waarmee waarden van de basisstochasten worden vertaald naar lokale belastingen op de waterkering. Onzekerheden aan de sterktekant, zoals modelonzekerheden in de overslagmodule, worden in deze studie buiten beschouwing gelaten. Voor de kustregio's betreft het dus de productieberekeningen met SWAN voor de golfcondities. In tegenstelling tot andere watersystemen wordt de waterstand op kustlocaties bepaald door middel van interpolatie tussen de basisstations en wordt er geen numeriek model WAQUA ingezet om de lokale waterstand te bepalen. De onzekerheid van de interpolatie is zeer beperkt en wordt verder buiten beschouwing gelaten.

Tabel 2.2 geeft de SWAN-resultaten waarop in Hydra-Ring een onzekere toeslag als gevolg van modelonzekerheid wordt gerekend. Deze toeslagen zijn geïmplementeerd in Hydra-Ring als extra stochasten. De waarden van de onzekerheden worden nader toegelicht in Deltares (2015).

Tabel 2.2 Golfparameters in Hydra-Ring waarop modelonzekerheden worden toegepast.

| Model | Onzekere resultaat                                               |
|-------|------------------------------------------------------------------|
| SWAN  | Golfhoogte $H_s$<br>golfperiode $T_{m-1,0}$<br>piekperiode $T_p$ |

### 2.5.2 Statistische onzekerheden

De statistische onzekerheden zijn gerelateerd aan onzekere coëfficiënten in de kansverdelingen van de basisstochasten, meestal vanwege het beperkte <sup>3</sup> aantal meetgegevens. Voor de kustgebieden is de statistische onzekerheid bepaald voor

- Windsnelheid
- Zeewaterstand

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

## 2.6 Probabilistische rekentechniek

Het grootste verschil tussen Hydra-Ring en Hydra-K is de probabilistische rekenmethode. Hydra-K maakt gebruik van methode De Haan. In Hydra-Ring kunnen verschillende rekentechnieken gekozen worden, waaronder FORM, Numerieke Integratie en Directional Sampling. Methode de Haan is niet geïmplementeerd in Hydra-Ring. Vanwege het meenemen van onzekerheden worden in Hydra-Ring meer stochasten gebruikt. Dit maakt dat de rekentijden sterk zullen oplopen bij rekentechnieken als Numerieke Integratie en Directional Sampling. Voor het kustgebied wordt om deze reden FDIR gehanteerd. Dit is een combinatie van FORM en Directional Sampling. Indien een FORM berekening niet convergeert wordt overgestapt op de meer robuuste rekentechniek Directional Sampling.

Stochasten als rivieraafvoer, wind, zeewaterstand en meerpeil hebben een verschillende tijdschaal. Daar moet in het probabilistisch model rekening mee gehouden worden, zeker als in het belastingmodel zowel een trage als een snelle stochast voorkomt. Dit is bijvoorbeeld het geval in het Benedenrivierengebied met afvoer als trage stochast en wind en zeewaterstand als snelle stochasten. De vorm (tijdsverloop) van de afvoer is in Hydra-Ring gemodelleerd door middel van trapezia van 30 dagen in de basis. De topduren van de trapezia hangen af van het afvoerniveau. Voor de snelle stochasten wordt een blokduur van 12 uur (ongeveer een getijperiode) aangehouden.

De tijdsintegratiemethode NTI (Numerieke Tijdsintegratie) doorloopt de 30 dagen in tijdstappen van 12 uur, dus 60 stappen totaal. FBC (Ferry Borges Castanheta) maakt er 1 grote tijdstap van. De grootte van die tijdstap is afhankelijk van het ontwerp punt op twee manieren

Voor de watersystemen in het kustgebied hebben we alleen met snelle stochasten te maken. Dan is het niet relevant om onderscheid te maken tussen FBC en NTI. Om deze reden is de snelste methode, zijnde FBC, voor de kustgebieden toegepast.

<sup>3</sup> De lengte van de meetperiodes is beperkt in vergelijking met de geldende normen. Afvoermetingen bijvoorbeeld zijn beschikbaar voor een periode van 100 jaar; op basis hiervan wordt geëxtrapoleerd naar extreme situaties.





### 3 Verschilanalyse HB kust

#### 3.1 Inleiding

Doelstelling van de analyse van verschillen tussen de HB uit WTI-2011 en WBI-2017 is om vertrouwen te krijgen in de HB 2017 en om verschillen met WTI-2011 te kunnen verklaren. In deze studie is bewust gekozen voor een vergelijking van HB 2017 met de resultaten van WTI-2011, omdat de vergelijking tussen WTI-2011 en HR2006 in de Westerschelde en Waddenzee al is gemaakt (zie Deltares, 2012). Voor de Hollandse Kust is WTI-2011 gelijk aan HR2006.

In dit hoofdstuk worden voor een beperkt aantal locaties de Hydra-Ring resultaten besproken en vergeleken met de Hydra-K resultaten. Tevens wordt het effect van het meenemen van kennisonzekerheden bepaald. De analyse richt zich voornamelijk op de Hydraulische Belastingen t.b.v. de semi-probabilistische toets op vakniveau. Het gaat hier dus vooral om de lokale waterstanden en HBN's. Wel wordt er kort ingegaan op de invoer van de eenvoudige toets, de marginale statistiek van de golven.

#### 3.2 Werkwijze analyse HB resultaten

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

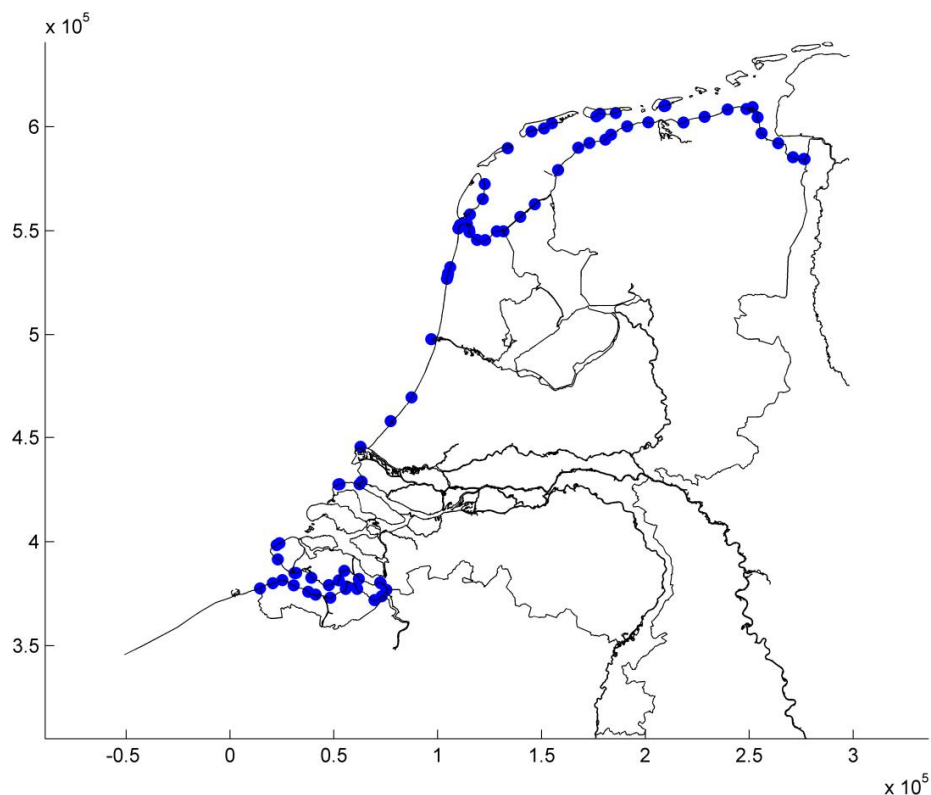
- 1 Vergelijking van Hydra-Ring resultaten zonder onzekerheden met Hydra-K referentieberekeningen met oude statistiek voor wind en zeewaterstand. Hiermee wordt het verschil als gevolg van nieuwe statistiek, ander correlatiemodel (belastingmodel) en nieuwe rekentechnieken geduid.
- 2 Vergelijking Hydra-Ring resultaten met onzekerheden en zonder onzekerheden. Hiermee wordt het effect van het meenemen van onzekerheden geduid.
- 3 Vergelijking van Hydra-Ring resultaten met onzekerheden bij de nieuwe norm met Hydra-K resultaten bij de oude norm. Hiermee wordt het verschil tussen oude en nieuwe HB inzichtelijk gemaakt bij in deze studie gehanteerde uitgangspunten.

De marginale statistiek van de golfhoogte in de kustgebieden wordt in WBI-2017 voor het eerst als belastingparameter afgeleid (voor meren werd dit in 1996 ook gedaan, maar in 2001 is deze aanpak weer verlaten, pers. comm. R. Slomp). Met Hydra-K is het mogelijk de marginale statistiek te berekenen en uit te voeren. Op een aantal testlocaties is nagegaan of de Hydra-Ring resultaten met en zonder onzekerheden een realistisch verschil vertonen en hoe de resultaten zonder onzekerheden zich verhouden tot de Hydra-K resultaten.

#### 3.3 Uitgangspunten berekening

##### 3.3.1 Algemeen

Om de rekentijd te beperken zijn in de analyse de resultaten voor een subset van alle beschikbare locaties beschouwd. De selectie (zie Figuur 3.1) zorgt voor een goede ruimtelijke dekking, met 41 locaties in de Waddenzee, 16 langs de Hollandse Kust en 26 in de Westerschelde.



Figuur 3.1 Geselecteerde locaties in de Waddenzee, langs de Hollandse Kust en in de Westerschelde.

### 3.3.2 Hydra instellingen

De instellingen van de Hydra-Ring berekeningen staan beschreven in onderstaande tabel. 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 4.6 staat welke instellingen er worden aanbevolen door Deltares (2017).

| Berekeningen Hydra-Ring |                                                         |                                                                                                                                                                                     |
|-------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Onderdeel               | Naam                                                    | Bestand & bron                                                                                                                                                                      |
| Instrument              | Hydra-Ring                                              | -                                                                                                                                                                                   |
| Databases               | Waddenzee, Hollandse Kust en Westerschelde WB-I2017     | HRD waddenzee oost.sqlite<br>HRD waddenzee oost.sqlite<br>HRD dutch coast north.sqlite<br>HRD dutch coast middle.sqlite<br>HRD dutch coast south.sqlite<br>HRD westerschelde.sqlite |
| Statistiek              | Zeewaterstand per richting (15 locaties, zie Tabel 2.1) | WBI 2017, zie Deltares (2016b)                                                                                                                                                      |
|                         | Windsnelheid per richting (5 locaties, zie Tabel 2.1)   | WBI 2017, zie Deltares (2016b)                                                                                                                                                      |
|                         | Kans op windrichting Hoek van Holland                   | WBI 2017, zie Deltares (2016b)                                                                                                                                                      |
|                         | Statistische onzekerheden zeewaterstand                 | WBI 2017, zie Deltares (2016b)                                                                                                                                                      |

|                   |                                        |                                                                                                                                                                                                                               |
|-------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                   | Statistische onzekerheden windsnelheid | WBI 2017, zie Deltares (2016b)                                                                                                                                                                                                |
|                   | Modelonzekerheden lokale waterstanden  | WBI 2017, zie Deltares (2015)                                                                                                                                                                                                 |
|                   | Modelonzekerheden golven               | WBI 2017, zie Deltares (2015)                                                                                                                                                                                                 |
| Profiel (tbv HBN) | Dijknormaal                            | MetaInfo_waddenzee_oost.xlsx<br>MetaInfo_waddenzee_west.xlsx<br>MetaInfo_kust_noord.xlsx<br>MetaInfo_kust_centraal.xlsx<br>MetaInfo_kust_zuid.xlsx<br>MetaInfo_westerschelde.xlsx                                             |
|                   | Helling                                | Standaard 1 op 3                                                                                                                                                                                                              |
|                   | Ruwheidsparemeter                      | 1.0                                                                                                                                                                                                                           |
| Criteria HBN      | Kritiek overslagdebiet                 | 1 l/s/m                                                                                                                                                                                                                       |
| Instellingen      | TijdsInt.                              | FBC                                                                                                                                                                                                                           |
|                   | Methode                                | FDIR                                                                                                                                                                                                                          |
|                   | Startmethode                           | 4                                                                                                                                                                                                                             |
|                   | Rel.Fact.                              | 0,15                                                                                                                                                                                                                          |
|                   | $\epsilon_{\beta}$                     | 0,005                                                                                                                                                                                                                         |
|                   | $\epsilon_{HOH}$                       | 0,005                                                                                                                                                                                                                         |
|                   | $\epsilon_z$                           | 0,005                                                                                                                                                                                                                         |
|                   | Nr. Iter.                              | 150                                                                                                                                                                                                                           |
| uitvoer           | Belastingparameter                     | Lokale waterstand<br>HBN<br>Golfhoogte                                                                                                                                                                                        |
|                   | Type 2 en 3                            | Type 3: voor een reeks van vooraf gespecificeerde waarden van een belastingparameter berekent Hydra-Ring de bijbehorende frequentie.<br>Type 2: Bij 7 herhalingstijden berekent Hydra-Ring de bijbehorende belastingparameter |
|                   | Locaties                               | Waddenzee: 41<br>Hollandse Kust: 16<br>Westerschelde: 26                                                                                                                                                                      |

De Hydra-K berekeningen zijn beschreven in Deltares (2011). Voor WTI-2011 zijn een vijftiental overschrijdingsfrequenties beschouwd: 1:10, 1:50, 1:100, 1:300, 1:500, 1:1000, 1:1250, 1:2000, 1:3.000, 1:4.000, 1:5.000, 1:10.000, 1:20.000, 1:30.000, 1:100.000 en 1:300.000. In onderstaande tabel zijn de instellingen van de Hydra-K berekeningen weergegeven. In de Hydra-Ring en de Hydra-K berekeningen zijn dezelfde profielinformatie en kritiek overslagdebiet gebruikt. Deze informatie is afkomstig uit de profielendatabase van Hydra-K. De dijknormalen zijn opgeslagen in zogenaamde MetaInfo bestanden.

| Berekeningen Hydra-K |                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                            |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Onderdeel            | Naam                                                              | Bestand & bron                                                                                                                                                                                                                             |
| Instrument           | Hydra-K versie 3.6.5                                              | Deltares (2014)                                                                                                                                                                                                                            |
| Databases            | Waddenzee CR2011<br>Hollandse Kust HR2006<br>Westerschelde CR2011 | SWAN_Waddenzee_Oost.mdb<br>SWAN_Waddenzee_West.mdb<br>SWAN_Hollandse_Kust_Sector_Noord.mdb<br>SWAN_Hollandse_Kust_Sector_Midden.mdb<br>SWAN_Hollandse_Kust_Sector_Zuid.mdb<br>SWAN_Westerschelde.mdb<br>SWAN_Verbindende_Waterkeringen.mdb |
| Statistiek           | Zeewaterstand                                                     | WTI 2011, zie Deltares (2012)                                                                                                                                                                                                              |
|                      | Windsnelheid per richting                                         | WTI 2011, zie Deltares (2012)                                                                                                                                                                                                              |
| Profiel (tbv HBN)    | Dijknormaal                                                       | MetaInfo_waddenzee_oost.xlsx<br>MetaInfo_waddenzee_west.xlsx<br>MetaInfo_kust_noord.xlsx<br>MetaInfo_kust_centraal.xlsx<br>MetaInfo_kust_zuid.xlsx<br>MetaInfo_westerschelde.xlsx                                                          |
|                      | Helling                                                           | Standaard 1 op 3                                                                                                                                                                                                                           |
|                      | Ruwheidsparemeter                                                 | 1.0                                                                                                                                                                                                                                        |
| Criteria HBN         | Kritiek overslagdebiet                                            | 1 l/s/m                                                                                                                                                                                                                                    |
| Uitvoer              | Belastingparameter                                                | Lokale waterstand<br>HBNGolfhoogtes                                                                                                                                                                                                        |
|                      |                                                                   | Bij 15 herhalingstijden berekent Hydra de bijbehorende belastingparameter                                                                                                                                                                  |
|                      | Locaties                                                          | Waddenzee: 41<br>Hollandse Kust: 16<br>Westerschelde: 26                                                                                                                                                                                   |

### 3.4 Resultaten lokale waterstand en HBN

#### 3.4.1 Vergelijking tussen Hydra-K en Hydra-Ring

In deze paragraaf worden de Hydra-Ring resultaten zonder onzekerheden met Hydra-K referentieberekeningen vergeleken. Verschillen zijn een gevolg van de overgang op zowel een nieuw belastingmodel (aanpassing windstatistiek en nieuw correlatiemodel) als op een nieuwe rekentechniek (Hydra-Ring met FDIR en Hydra-K met Methode De Haan).

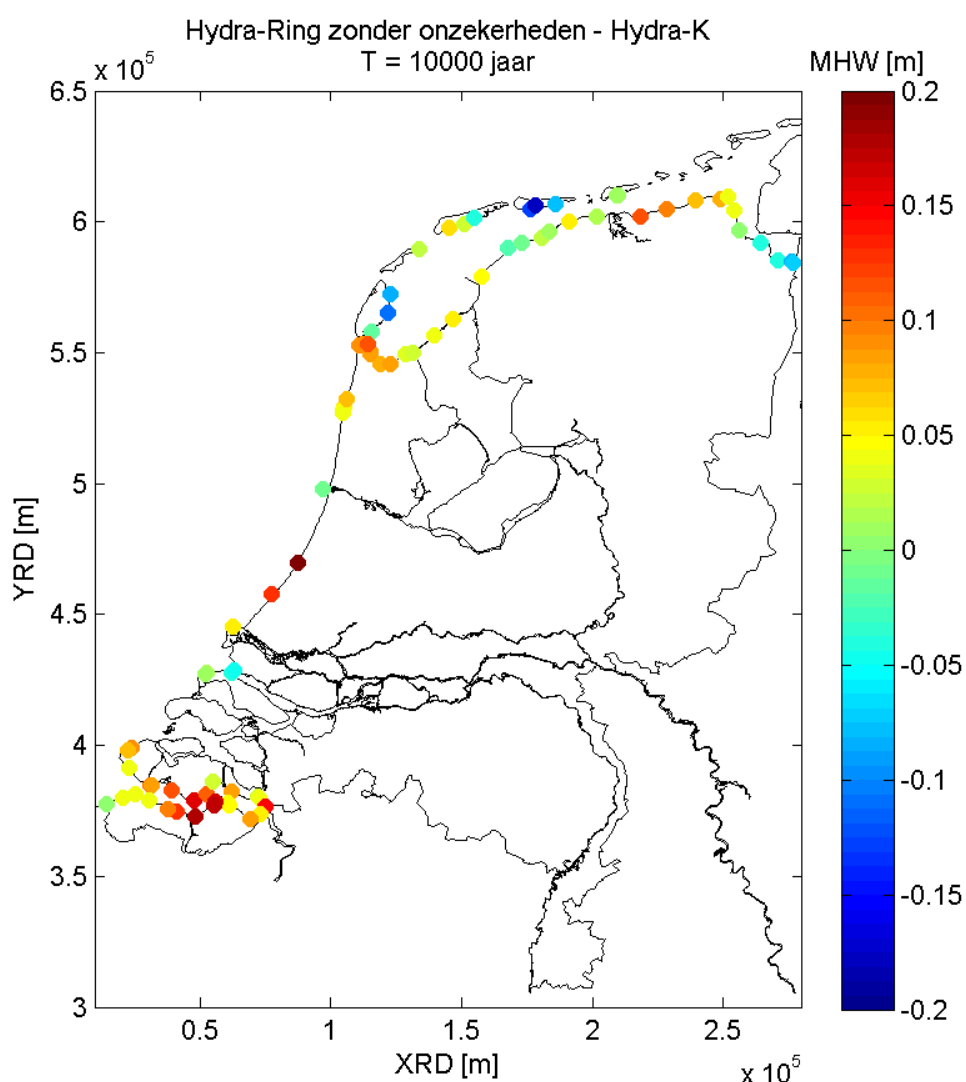
#### **Lokale waterstand-resultaten**

Figuur 3.2 geeft een ruimtelijk beeld van verschillen in lokale waterstand op 83 testlocaties bij een herhalingstijd van 10.000 jaar. Voor het merendeel van de locaties komen de Hydra-Ring resultaten overeen met de Hydra-K resultaten.

In Tabel 3.1 zijn de minimale, maximale en gemiddelde verschillen in waterstand weergegeven over alle (test)locaties voor een viertal herhalingstijden. De verschillen zijn beperkt tot ongeveer 20 cm.

Tabel 3.1 Minimum, maximum en gemiddelde verschil over alle locaties in lokale waterstanden tussen Hydra-Ring en Hydra-K (Hydra-Ring - Hydra-K).

| Herhalings-<br>tijd (jaar) | Verschil in lokale waterstand (m) |      |      |                |      |      |               |      |      |
|----------------------------|-----------------------------------|------|------|----------------|------|------|---------------|------|------|
|                            | Waddenzee                         |      |      | Hollandse Kust |      |      | Westerschelde |      |      |
|                            | Min                               | max  | gem. | min            | max  | gem. | min           | max  | gem. |
| 100                        | -0.09                             | 0.10 | 0.04 | -0.05          | 0.19 | 0.07 | 0.02          | 0.17 | 0.08 |
| 1000                       | -0.17                             | 0.12 | 0.01 | -0.06          | 0.17 | 0.06 | 0.02          | 0.17 | 0.08 |
| 10000                      | -0.18                             | 0.12 | 0.01 | -0.04          | 0.21 | 0.06 | 0.03          | 0.18 | 0.09 |
| 100000                     | -0.18                             | 0.12 | 0.01 | -0.05          | 0.19 | 0.05 | 0.02          | 0.19 | 0.09 |



Figuur 3.2 Ruimtelijke verdeling van het verschil tussen waterstand bij een herhalings-tijd van 10.000 jaar berekend door Hydra-Ring (zonder onzekerheden) en die berekend door Hydra-K.

In Figuur 3.3 worden de resultaten van de Hydra-K berekeningen voor een tiental herhalings-tijden vergeleken met de Hydra-Ring overschrijdingskrommes voor berekeningen zonder respectievelijk met onzekerheden. De onderste twee panelen in deze figuur geven het absolute verschil weer tussen de Hydra-K en Hydra-Ring resultaten voor die herhalings-tijden

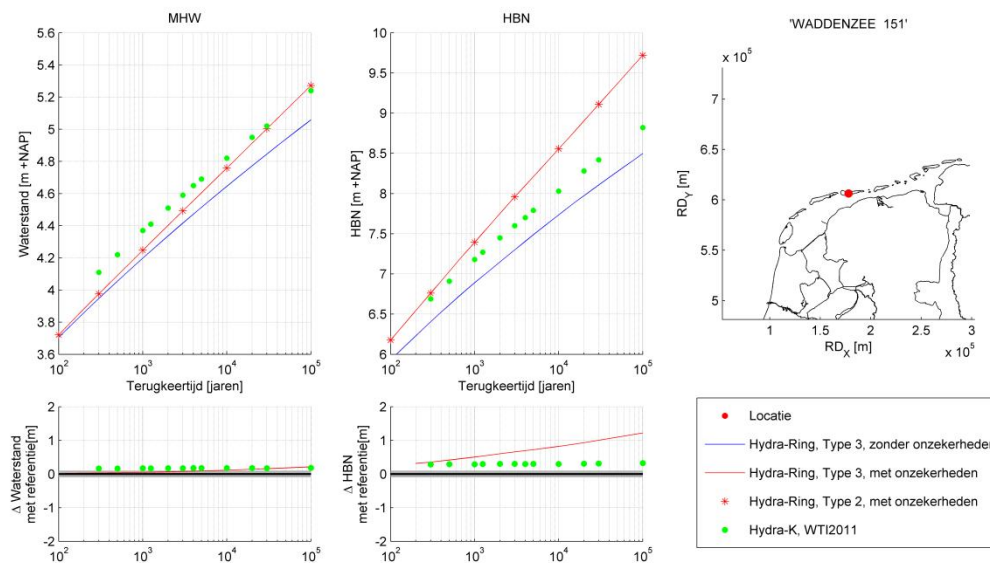
waarvoor Hydra-K berekeningen zijn gemaakt. De Hydra-Ring resultaten zijn verkregen met behulp van interpolatie naar de gewenste herhalingsjijd.

De belangrijkste verschillen tussen Hydra-K en Hydra-Ring resultaten worden hieronder per watersysteem beschreven.

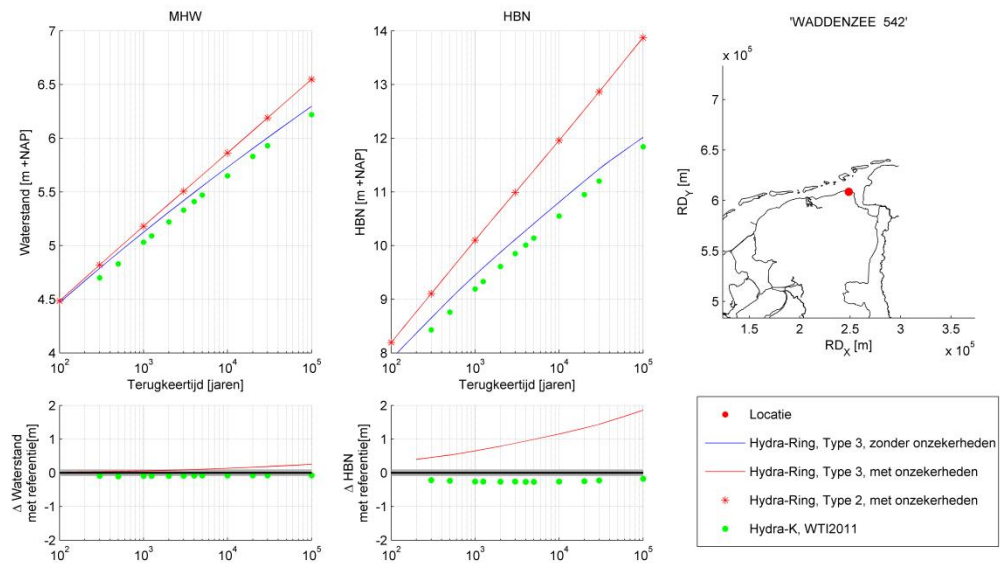
## Waddenzee

In de Waddenzee zien we verschillen die gecategoriseerd kunnen worden per deelgebied:

1. Langs de Afsluitdijk, Friese Kust en Groningse Kust, voor zover afgeschermd door de Waddeneilanden, zijn de verschillen kleiner dan 10 cm.
2. Op de Waddeneilanden (aan de Waddenzeezijde) zijn de lokale waterstanden verkregen met Hydra-Ring tot 20 cm lager dan de Hydra-K resultaten, zoals is getoond in Figuur 3.3 (in figuren wordt lokale waterstand nog als MHW aangegeven).
3. Op locaties langs de Groningse Kust die niet worden afgeschermd door de Waddeneilanden zijn echter de lokale waterstanden verkregen met Hydra-Ring hoger. Het verschil met de Hydra-K resultaten bedraagt 10 - 15 cm, zoals is te zien in Figuur 3.4. In de Dollard zijn de waterstanden zoals berekend met Hydra-K echter weer groter.

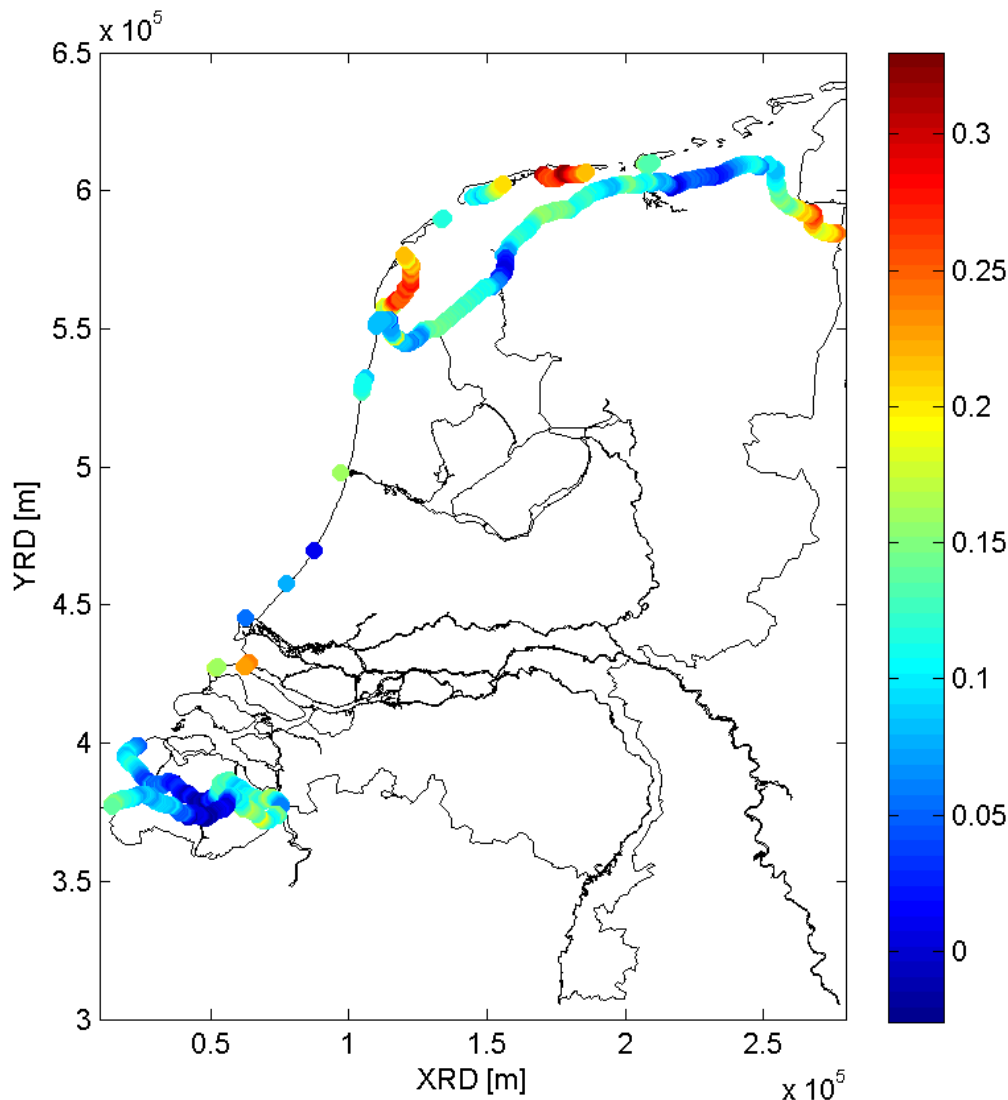


Figuur 3.3 Overschrijdingsfrequentielijnen lokale waterstand (links) en HBN (rechts) verkregen met Hydra-Ring en Hydra-K, alsmede het absolute verschil tussen de resultaten (onderste panelen). Locatie 900151 op Ameland



Figuur 3.4 Overschrijdingsfrequentielijnen lokale waterstand (links) en HBN (rechts) verkregen met Hydra-Ring en Hydra-K, alsmede het absolute verschil tussen de resultaten (onderste panelen). Locatie 900542 nabij Eemshaven.

De verschillen tussen de waterstanden volgens Hydra-K en Hydra-Ring kunnen gedeeltelijk verklaard worden door verschillen in toetspeilcorrecties. Het belastingmodel in Hydra-K en Hydra-Ring zit zodanig in elkaar dat de waterstanden worden bepaald door de opgelegde statistiek in de meetlocaties. Op uitvoerlocaties wordt de waterstand verkregen middels interpolatie tussen de meetlocaties. Omdat de zeewaterstandstatistiek niet is gewijzigd t.o.v. WTI-2011 (m.u.v. Hoek van Holland), zou er geen noemenswaardig verschil mogen zitten tussen de waterstanden berekend met Hydra-Ring en Hydra-K. Echter, in Hydra-K worden de waterstanden geforceerd naar de toetspeilen. Deze zogenaamde toetspeilcorrectie wordt niet meer toegepast voor WBI-2017. In Figuur 3.5 zijn de waarden voor de toetspeilcorrectie weergegeven. Deze vormen standaard uitvoer van een overslagberekening.



Figuur 3.5 Correctie van toetspeilen (in m) in Hydra-K berekeningen.

Achter Texel en Ameland en in de Dollard zijn de toetspeilcorrecties het grootst, lokaal zelfs tussen 25 en 30 cm. De toetspeilcorrectie is het kleinst in het open deel van de Groningse Kust. Wanneer we de toetspeilcorrectie optellen bij de verschillen uit Figuur 3.2 dan komen we uit op een verschil tussen Hydra-Ring en Hydra-K (schatting zonder toetspeilcorrectie) van 10 - 15 cm. Dit verschil wordt veroorzaakt door een fout in de correctie voor zeespiegelstijging in de Hydra-Ring invoerbestanden. Hier komen we aan het einde van de paragraaf op terug.

#### Hollandse Kust

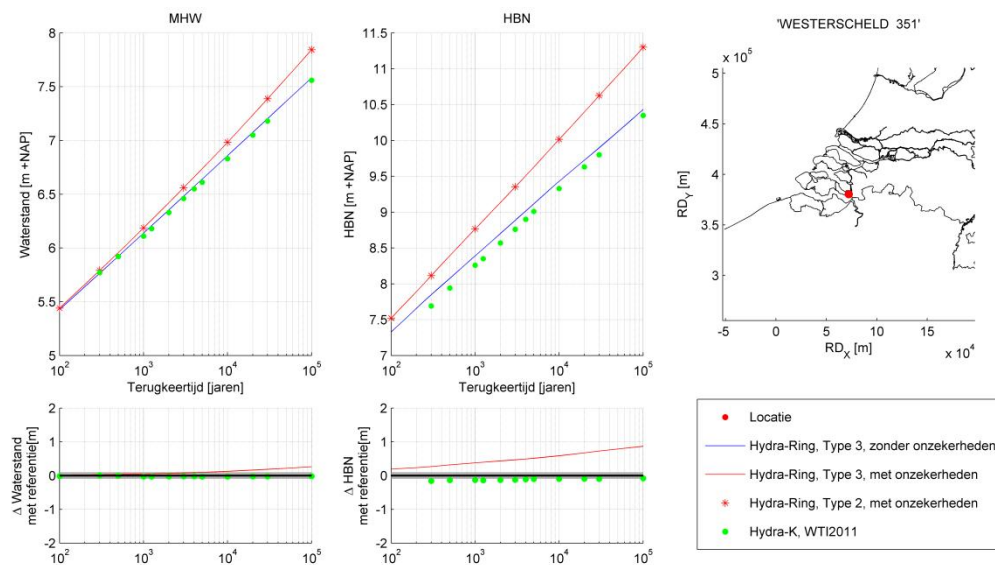
De verschillen in waterstanden langs de Hollandse Kust berekend met enerzijds Hydra-Ring en anderzijds Hydra-K blijven beperkt tot 10 cm. Alleen bij Scheveningen en Katwijk zijn de verschillen tussen de 10 en 20 cm, waarbij Hydra-Ring hogere waarden geeft. De toetspeilcorrectie in deze locaties is minder dan 8 cm, dus dat is geen verklaring van dit

verschil. Het verschil wordt deels wel verklaard door een fout in de correctie voor zeespiegelstijging in de Hydra-Ring invoerbestanden.

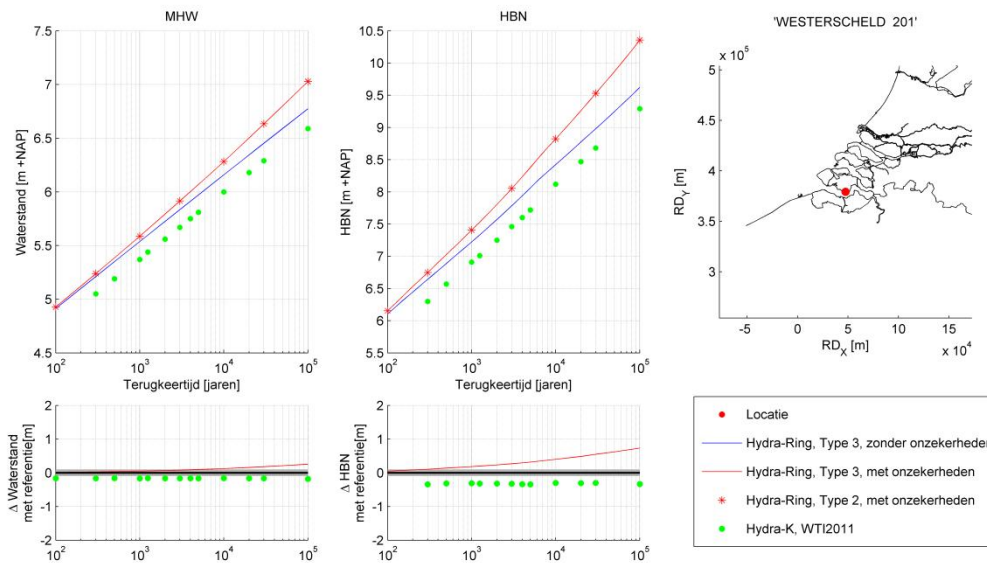
### Westerschelde

In de Westerschelde zijn de lokale waterstanden berekend met Hydra-Ring groter dan die berekend met Hydra-K. Het verschil is op de meeste locaties kleiner dan 10 cm (zie bijvoorbeeld Figuur 3.6 voor locatie Bath), maar zonder toetspeilcorrectie (ongeveer 10-15 cm) zou het verschil ongeveer 15 - 20 cm bedragen.

In het middendeel van het estuarium lopen de verschillen echter op tot bijna 20 cm (zie bijvoorbeeld Figuur 3.7, voor locatie Ellewoutsdijk). De toetspeilcorrectie in Hydra-K is hier te verwaarlozen. Het verschil tussen de lokale waterstanden zoals berekend met Hydra-Ring en Hydra-K dus ongeveer 15 - 20 cm over de gehele Westerschelde.



Figuur 3.6 Overschrijdingsfrequentielijnen lokale waterstand (links) en HBN (rechts) verkregen met Hydra-Ring en Hydra-K, alsmede het absolute verschil tussen de resultaten (onderste panelen). Locatie 1500351 nabij Bath.



Figuur 3.7 Overschrijdingsfrequentielijnen lokale waterstand (links) en HBN (rechts) verkregen met Hydra-Ring en Hydra-K, alsmede het absolute verschil tussen de resultaten (onderste panelen). Locatie 1500201 nabij Ellewoutsdijk.

#### Fout in de correctie voor zeespiegelstijging

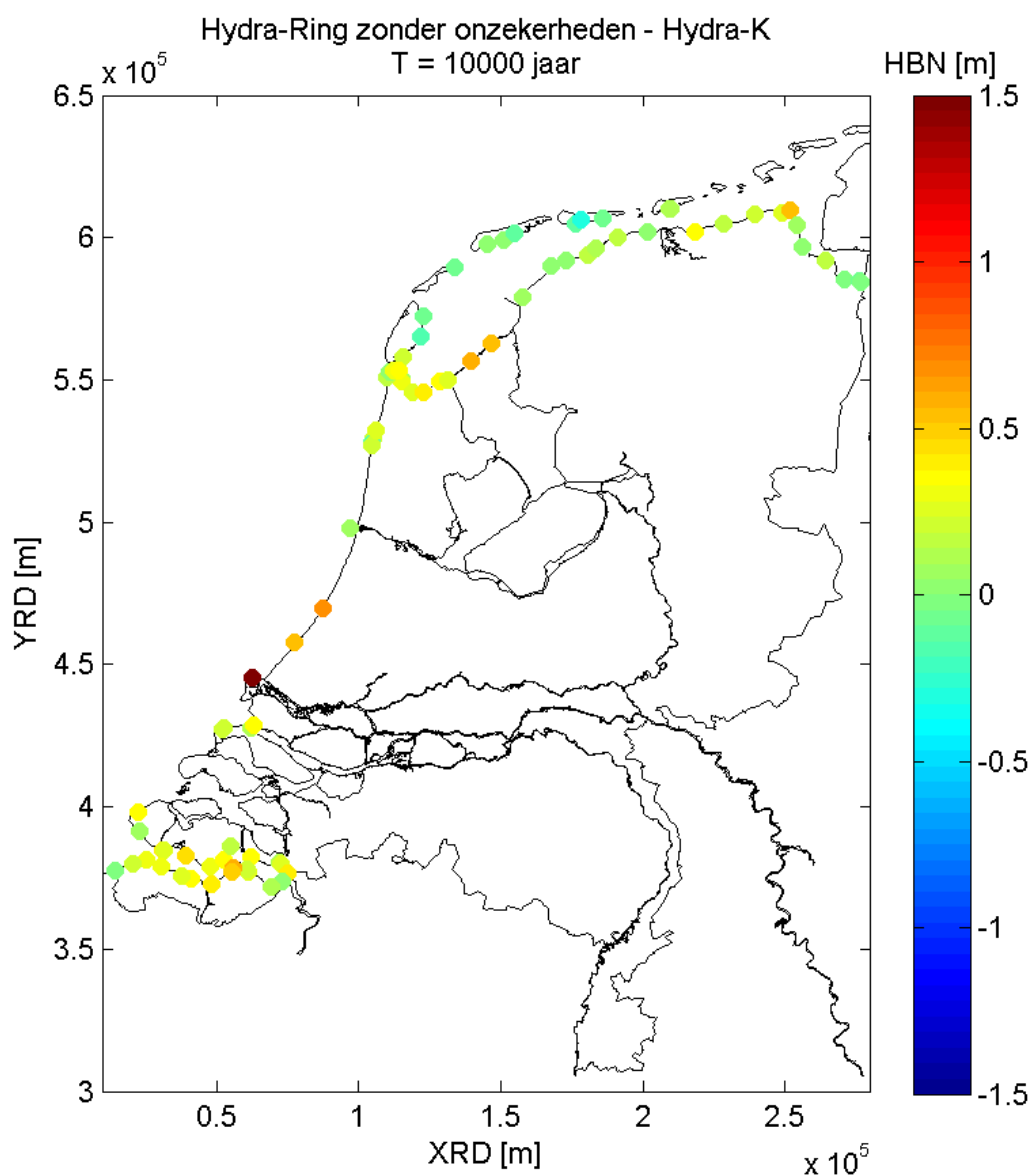
De overschatting door Hydra-Ring van de lokale waterstanden met 10-20 cm is als volgt te verklaren. Nadere analyse van de statistische bestanden van de zeewaterstand in Hydra-Ring laat zien dat zeespiegelstijging ten onrechte is toegepast. De invoerbestanden van Hydra-Ring gebruiken als basis de conditionele Weibull verdeling van de zeewaterstanden, zoals afgeleid door Deltares (2010). Deze waterstanden hebben een peildatum van 2017. Dat wil zeggen dat uitgaande van de basispeilen van 1985 een hoogwaterstijging over het bereik van 1985 tot 2017 is verdisconteerd. Voor meer details verwijzen we naar Deltares (2010) en Deltares (2016b). In laatstgenoemd rapport is aangegeven dat voor peildatum 2023 alleen voor Hoek van Holland en Petten-Zuid een extra toeslag van 2 cm moet worden toegepast voor het niveau van 2017, zie ook Paragraaf 2.3.2. Echter, in de Hydra-Ring invoerbestanden blijkt niet alleen deze extra toeslag in rekening te zijn gebracht. Daar is de hoogwaterstijging ten opzichte van 1985 in zijn geheel in rekening gebracht, dus orde 10 cm (zie ook Paragraaf 2.3.2). Dit verklaart gelijk de gevonden resterende overschatting door Hydra-Ring.

De incorrecte waarden voor de hoogwaterstijging lijken ook in de invoerbestanden van Hydra-Zout (en dus Hydra-NL) te zitten. Om deze reden is in de vergelijking tussen Hydra-Ring en Hydra-Zout de foutieve zeewaterstand statistiek tot nu toe onopgemerkt gebleven. Aanbevolen wordt om de zeewaterstand statistiek te corrigeren.

#### HBN-resultaten

Verschillen in lokale waterstanden werken ook door in het HBN. Grofweg zien we dat verschillen in HBN verkregen met Hydra-Ring enerzijds en Hydra-K anderzijds eenzelfde afwijking vertonen als de lokale waterstanden, zij het dat de verschillen in HBN in absolute zin groter zijn. De te hoge zeewaterstand in Hydra-Ring werkt ook door in HBN. Grofweg kunnen we stellen dat in dieptebeperkte situaties een 10 cm hogere waterstand tot een 5 cm grotere golfhoogte en dus 12,5 cm hogere oploophoogte leidt (vuistregel: oploophoogte is gelijk aan 2.5 maal de golfhoogte). Het HBN zou daarmee ongeveer 22,5 cm hoger uitkomen. Merk op dat dit een zeer grove schatting is, die al een gedeelte verklaart van de overschattingen door

Hydra-Ring van de met Hydra-K berekende HBN waarden. In Figuur 3.8 is ter illustratie de ruimtelijke verdeling weergegeven van het verschil tussen HBN berekend met Hydra-Ring (zonder onzekerheden) en HBN berekend met Hydra-K bij een herhalingstijd van 10.000 jaar.



Figuur 3.8 Ruimtelijke verdeling van het verschil tussen HBN bij een herhalingstijd van 10.000 jaar berekend door Hydra-Ring (zonder onzekerheden) en die berekend door Hydra-K.

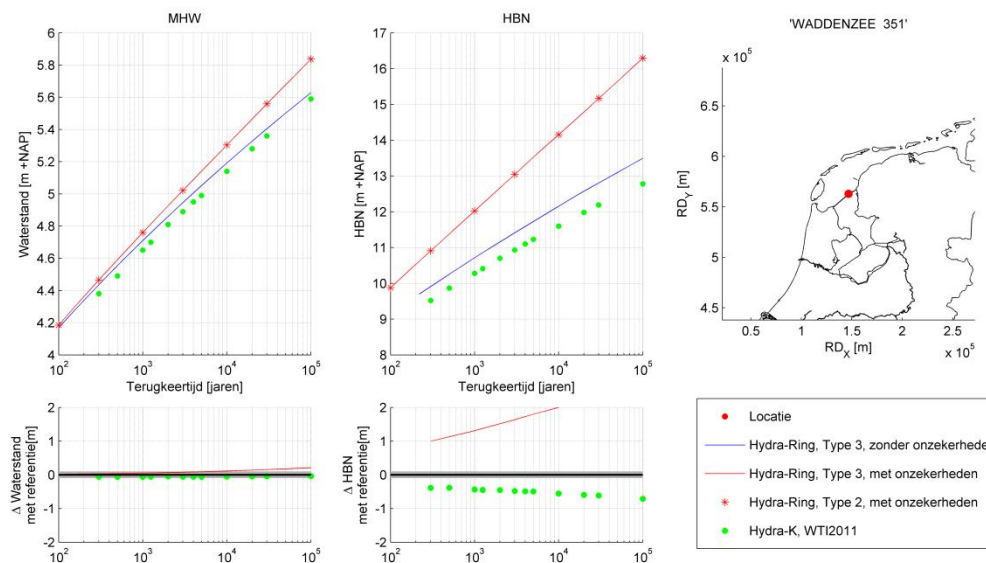
In Tabel 3.2 zijn per herhalingstijd de verschillen over alle locaties tussen de Hydra-Ring en Hydra-K resultaten weergegeven

Tabel 3.2 Minimum, maximum en gemiddelde verschil over alle locaties in HBN tussen Hydra-Ring en Hydra-K (Hydra-Ring - Hydra-K).

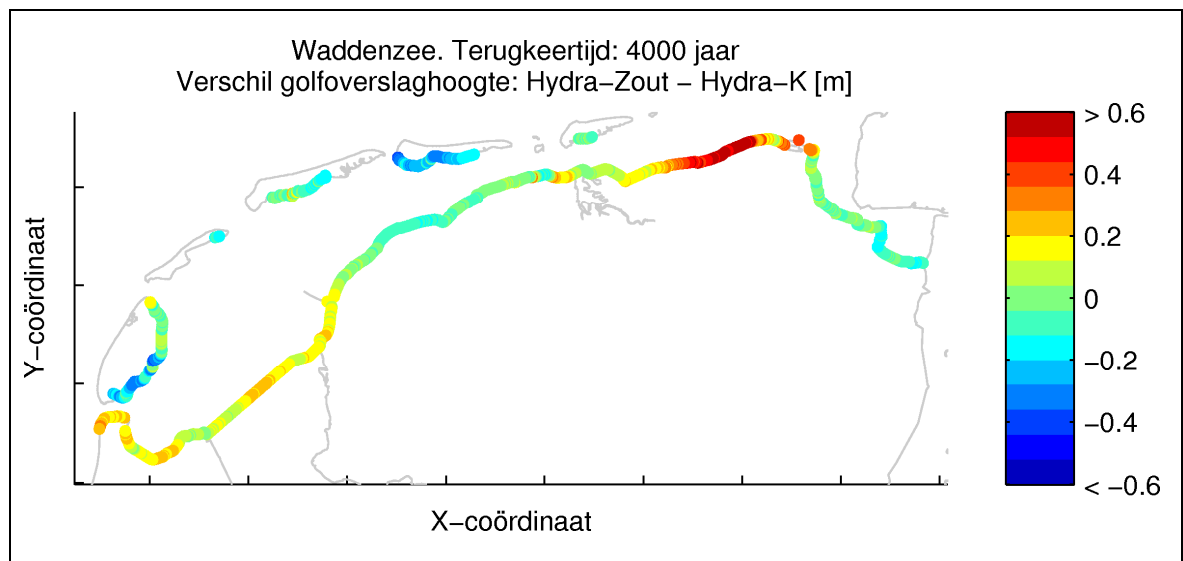
| Herhalings-<br>tijd (jaar) | Verskil in HBN (m) |      |      |                |      |      |               |      |      |
|----------------------------|--------------------|------|------|----------------|------|------|---------------|------|------|
|                            | Waddenzee          |      |      | Hollandse Kust |      |      | Westerschelde |      |      |
|                            | min                | max  | gem. | min            | max  | gem. | min           | max  | gem. |
| 100                        | -0.09              | 0.28 | 0.09 | -0.02          | 2.33 | 0.41 | 0.03          | 0.59 | 0.34 |
| 1000                       | -0.29              | 0.47 | 0.11 | -0.04          | 1.59 | 0.31 | -0.02         | 0.55 | 0.28 |
| 10000                      | -0.30              | 0.60 | 0.12 | -0.12          | 2.02 | 0.35 | -0.02         | 0.56 | 0.28 |
| 100000                     | -0.32              | 0.85 | 0.13 | 0.01           | 1.13 | 0.33 | -0.02         | 0.62 | 0.30 |

### Waddenzee

Het verschil tussen HBN berekend met Hydra-Ring en Hydra-K is van dezelfde orde als voor lokale waterstanden voor afgeschermd gebied, zie ook Figuur 3.3 aan de zuidzijde van Ameland. Het verschil neemt toe tot ongeveer 0.5 m bij Eemshaven (deels ook geïllustreerd in Figuur 3.4 voor een nabijgelegen locatie) en langs de Afsluitdijk ook tot ruim 0.5 m toeneemt, zoals geïllustreerd in Figuur 3.9. Dit is conform de bevindingen in HKV (2014), waarin Hydra-Zout (ook met foutieve zeewaterstand statistiek) en Hydra-K resultaten voor HBN zijn vergeleken, zoals is te zien in Figuur 3.10. Ook hier treden de grootste verschillen op voor de onbeschutte Groningse Kust, de Afsluitdijk en de Kop van Noord-Holland. Daarbij moet worden opgemerkt dat een deel van de verschillen tussen Hydra-Zout en Hydra-K wordt veroorzaakt door reparaties van de database in Hydra-Zout (zie HKV, 2016). Deze reparaties vinden niet in Hydra-K en Hydra-Ring plaats. Omdat wind- en zeewaterstand statistiek in beide laatstgenoemde modellen dezelfde waren, concluderen we dat de verschillen voor het overgrote deel worden veroorzaakt door de verschillen in het gehanteerde correlatiemodel, naast de eerder vastgestelde verschillen in gehanteerde zeewaterstand statistiek. Voor de maatgevende windrichting uit het Noordwesten is de windsnelheid bij Terschelling-West niet noemenswaardig veranderd (zie Figuur 2.2).



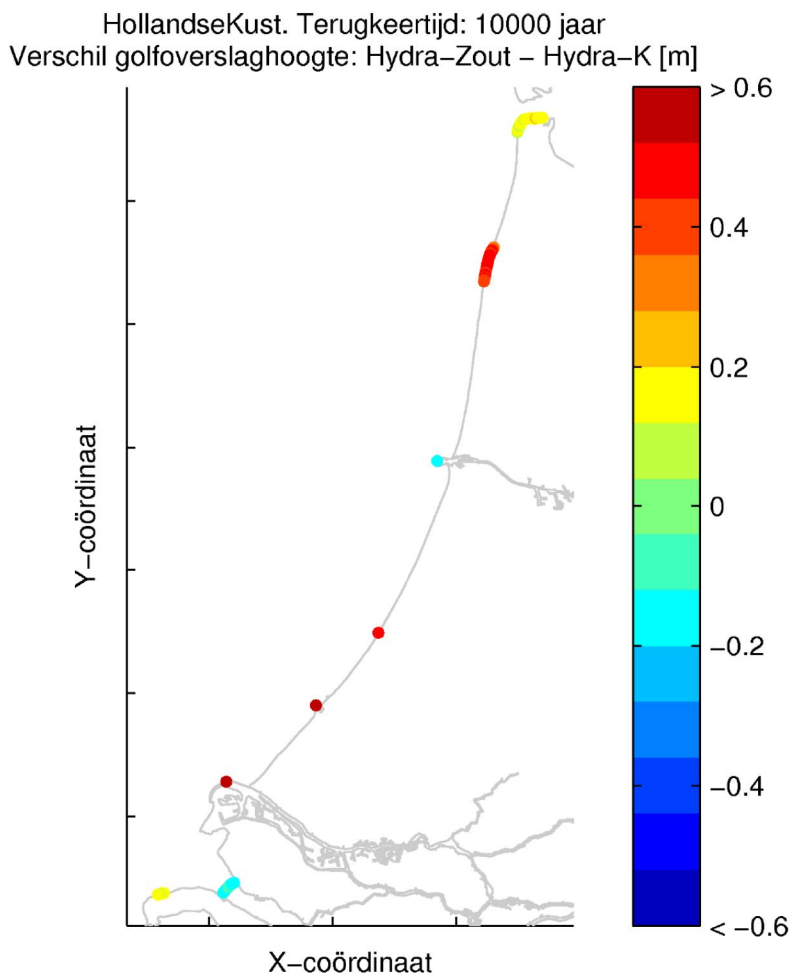
Figuur 3.9 Overschrijdingsfrequentielijnen lokale waterstand (links) en HBN (rechts) verkregen met Hydra-Ring en Hydra-K, alsmede het absolute verschil tussen de resultaten (onderste panelen). Locatie 1000351 voor de Afsluitdijk.



Figuur 3.10 Verskil in het hydraulisch belastingniveau tussen Hydra-Zout en Hydra-K voor locaties in de Waddenzee bij het faalmechanisme golfoverslag (kritiek overslagdebiet 1 l/s/m) voor terugkeertijd 4000 jaar (bron: HKV, 2014)

#### Hollandse Kust

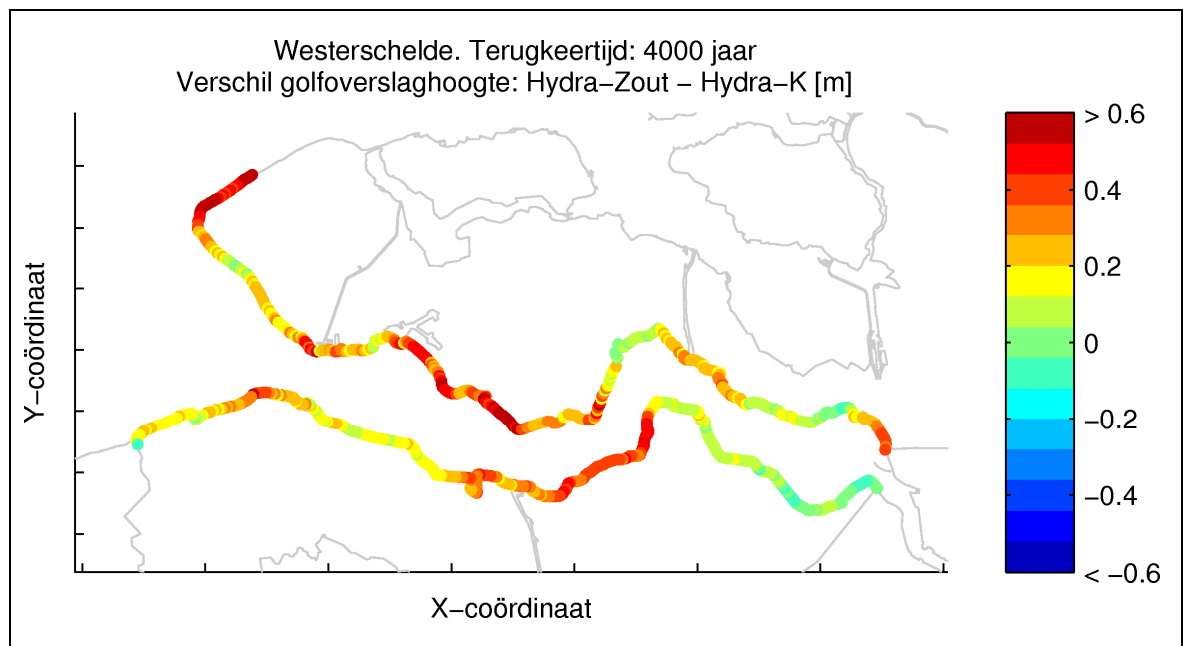
Langs de Hollandse Kust zien we verschillen in HBN van enkele decimeters tot ruim 1 m. Dit is in lijn met de bevindingen in HKV (2014), zoals ook is geïllustreerd in Figuur 3.11. Hiervan zijn twee decimeters te verklaren uit het verschil in gehanteerde zeewaterstand statistiek (foutieve correctie voor hoogwaterstijging). Omdat de verschillen in windstatistiek beperkt zijn, moet het resterende verschil worden veroorzaakt door het gebruik van verschillende correlatiemodellen in Hydra-K en Hydra-Ring.



**Figuur 3.11** Verskil in het hydraulisch belastingniveau tussen Hydra-Zout en Hydra-K voor locaties langs de Hollandse Kust bij het faalmechanisme golfoverslag (kritiek overslagdebiet 1 l/s/m) voor terugkeertijd van 10.000 jaar (bron: HKV, 2014).

## Westerschelde

Van de monding van de Westerschelde tot voorbij Terneuzen zijn de met Hydra-Ring berekende HBN's 0.2 tot 0.6 m hoger dan berekend met Hydra-K. Dat geldt ook voor enkele strekkingen in Zuid-Beveland, rondom Bath. Achter in de Westerschelde zijn de verschillen kleiner dan 0,2 m. Ook deze waarneming is geheel in lijn met de Hydra-Zout versus Hydra-K vergelijking in HKV (2014), zie Figuur 3.12. Ook hier is naar alle waarschijnlijkheid het correlatiemodel de reden voor de gevonden verschillen. Daar waar de wind de grootste invloed heeft op waterstand en golven, zijn de verschillen het grootst. De lagere windsnelheid in de statistiek voor Vlissingen (zie Figuur 2.2) zorgt enigszins voor een verlaging van het HBN, maar deze kan de toename als gevolg van de overgang op het nieuwe correlatiemodel niet teniet doen.



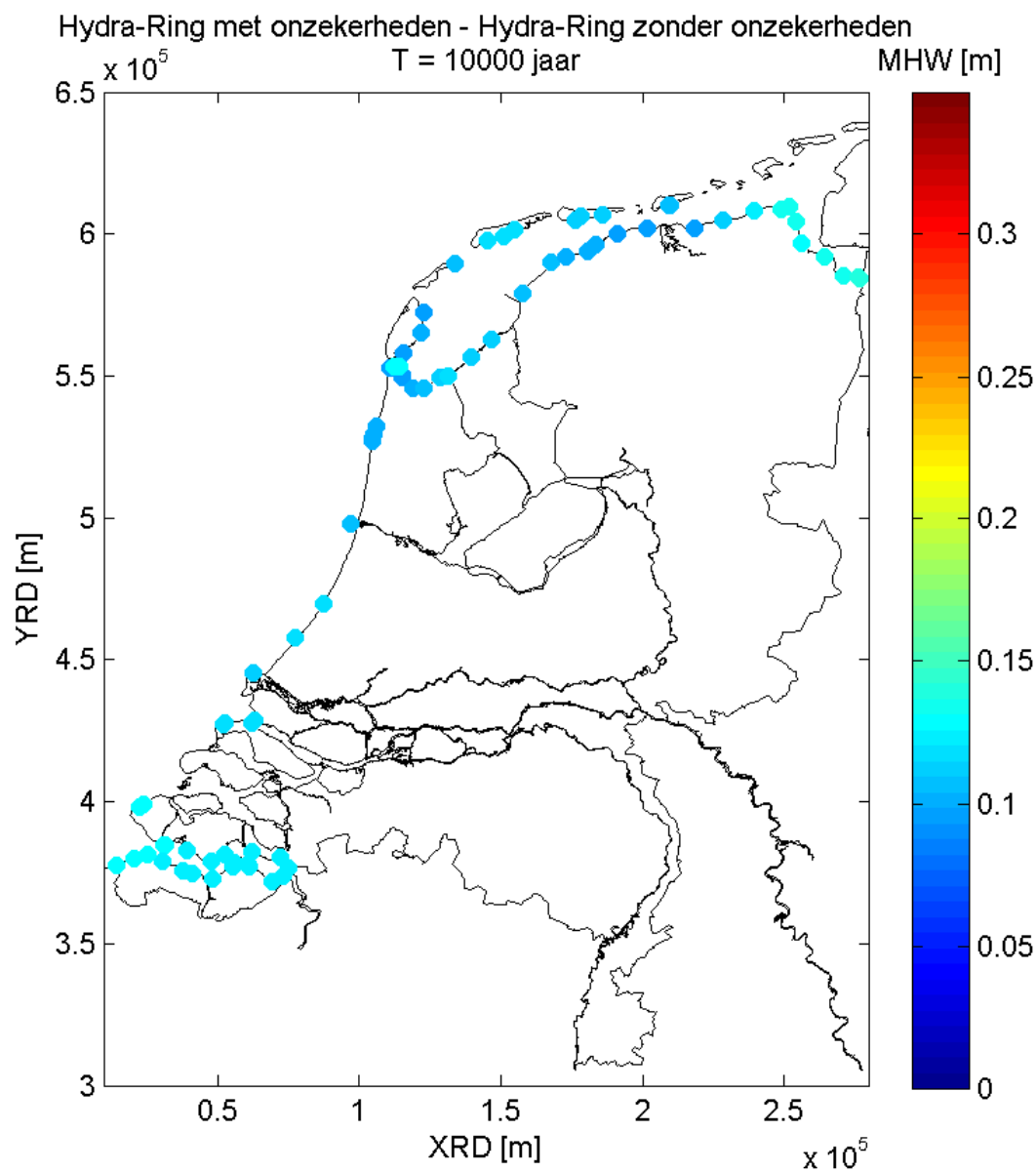
Figuur 3.12 Verschil in het hydraulisch belastingniveau tussen Hydra-Zout en Hydra-K voor locaties in de Waddenzee bij het faalmechanisme golfoverslag (kritiek overslagdebiet 1 l/s/m) voor terugkeertijd 4000 jaar (bron: HKV, 2014)

### 3.4.2 Effect onzekerheden

In deze paragraaf wordt naar het effect van onzekerheden gekeken. Hiertoe worden de Hydra-Ring resultaten met en zonder onzekerheden met elkaar vergeleken.

#### **Resultaten lokale waterstand**

Omdat de waterstanden in de kustregio's volledig door de statistiek op de basisstations worden bepaald, is de modelonzekerheid in Hydra-Ring gelijk genomen aan 0 (Deltares, 2015). Daarnaast is de statistische onzekerheid in de waterstandstatistiek klein (zie Deltares, 2016b). Als gevolg hiervan is het effect van onzekerheden op de maatgevende waterstanden ook klein. Voor herhalingstijden van minder dan 10.000 jaar is deze kleiner dan 15 cm, zoals ook te zien is in Figuur 3.13, waar de ruimtelijke verdeling van het verschil in waterstand berekend met en zonder onzekerheid bij een herhalingstijd van 10.000 jaar is getoond. Voor herhalingstijden tot 100.000 jaar is het verschil hooguit 26 cm, zoals ook te zien is in Tabel 3.3. Opvallend hierin is de minimale variatie over de locaties in de Westerschelde. Daar vindt interpolatie plaats op basis van de waterstandstatistiek bij Vlissingen en Hansweert. Het verschil tussen de uitgeïntegreerde waterstandsverdeling en oorspronkelijke verdeling is nagenoeg gelijk voor beide locaties.



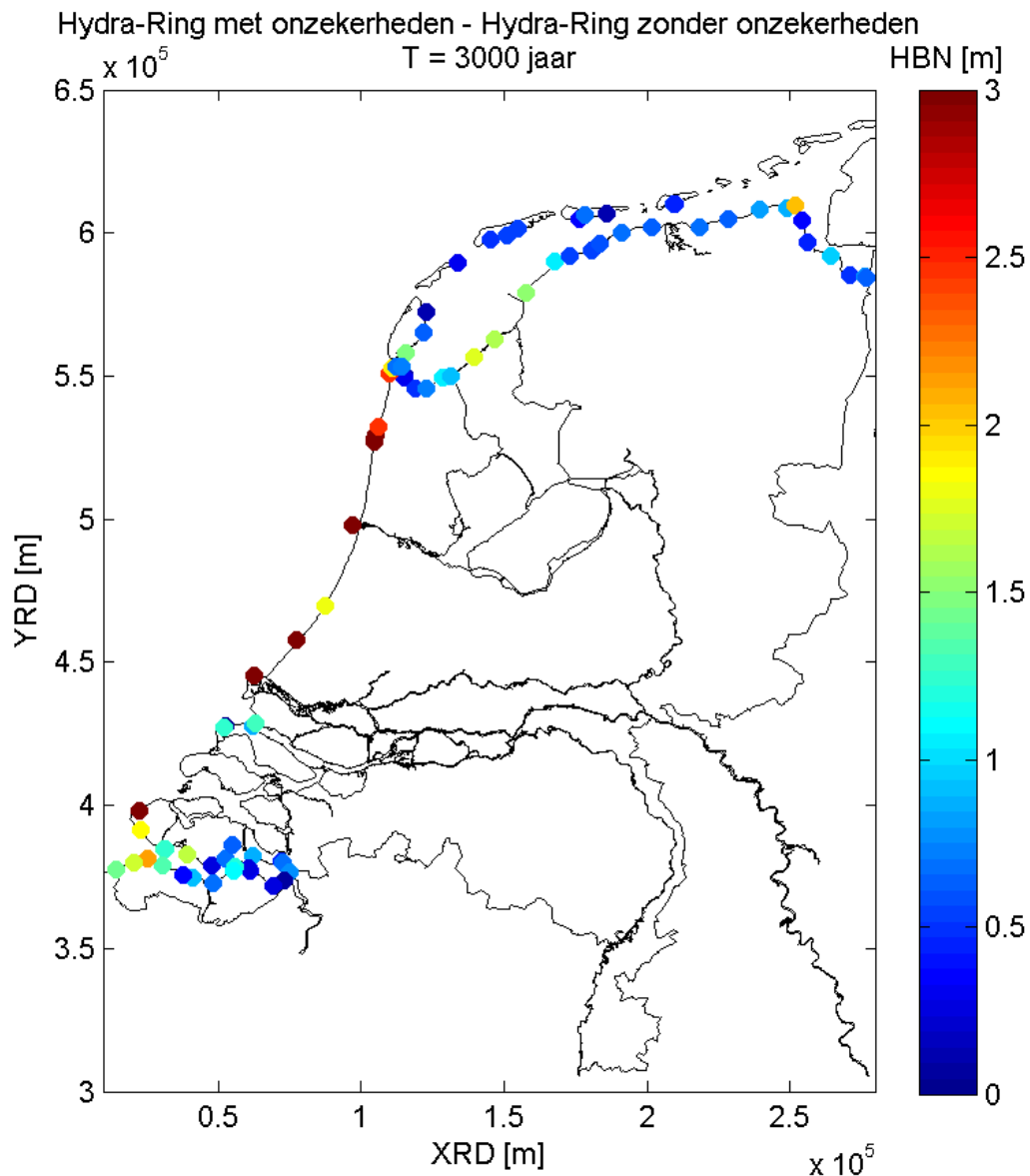
Figuur 3.13 Ruimtelijke verdeling van het verschil tussen HBN bij een herhalingstijd van 10.000 jaar berekend door Hydra-Ring met en zonder onzekerheden.

Tabel 3.3 Per herhalingstijd het minimum, maximum en gemiddelde verschil over alle locaties in MHW berekend met Hydra-Ring met en zonder onzekerheden.

| Herhalings-<br>tijd (jaar) | Verschil in MHW (m) |      |      |                |      |      |               |      |      |
|----------------------------|---------------------|------|------|----------------|------|------|---------------|------|------|
|                            | Waddenzee           |      |      | Hollandse Kust |      |      | Westerschelde |      |      |
|                            | min                 | max  | gem. | min            | max  | gem. | min           | max  | gem. |
| 100                        | 0.01                | 0.02 | 0.02 | 0.01           | 0.02 | 0.01 | 0.01          | 0.02 | 0.01 |
| 1000                       | 0.04                | 0.06 | 0.05 | 0.04           | 0.06 | 0.04 | 0.05          | 0.05 | 0.05 |
| 10000                      | 0.09                | 0.14 | 0.11 | 0.09           | 0.13 | 0.11 | 0.12          | 0.13 | 0.13 |
| 100000                     | 0.18                | 0.26 | 0.21 | 0.18           | 0.26 | 0.23 | 0.25          | 0.26 | 0.26 |

**HBN-resultaten**

Voor het HBN spelen de golfcondities en bijbehorende onzekerheden een rol. Dat maakt dat het effect van het meenemen van statistische en met name modelonzekerheden op HBN aanmerkelijk groter is dan op de lokale waterstand. Dit is goed te zien in de ruimtelijke verdeling van het effect van onzekerheden op HBN bij een herhalingstijd van 3.000 jaar in Figuur 3.14.



Figuur 3.14 Ruimtelijke verdeling van het verschil tussen HBN berekend met Hydra-Ring met en zonder onzekerheden bij een herhalingstijd van 3.000 jaar.

**Waddenzee**

Ook voor de analyse van het effect van meenemen van onzekerheden maken we onderscheid in locaties achter eilanden, langs het vaste land maar afgeschermd door eilanden en de open locaties: In de Waddenzee zien we verschillen die gecategoriseerd kunnen worden per deelgebied:

1. Langs de Friese Kust en Groningse Kust is het effect van het meenemen van onzekerheden een HBN toename in de orde van 0.5 m. Daar waar de strijklengtes groter zijn loopt dit op tot 1 – 1.5 m. Dat betreft de Afsluitdijk en een deel van de Friese kust ten noorden van de Afsluitdijk.
2. Op locaties aan de Waddenzeezijde van de Waddeneilanden zijn de effecten op HBN kleiner, in de orde van 0.2 - 0.5 m (zie ook Figuur 3.3).
3. Op locaties langs de Groningse Kust die niet worden afgeschermd door de Waddeneilanden loopt het effect van het meenemen van onzekerheden weer op tot 0,7 – 0,9 m (zie ook Figuur 3.4). Ook in de Dollard komen dergelijke toenames voor.

## Hollandse Kust

Er is een groot verschil tussen locaties die afgeschermd zijn voor golven vanaf de Noordzee en de meer open locaties. Voor de afgeschermd locaties is het effect van het meenemen van onzekerheden 1 - 1,5 m. Voor de open locaties loopt dit op tot bijna 8 m bij herhalingstijden van 10.000 jaar. Dit is fors meer dan de open locaties in de Waddenzee (0.7 - 0,9 m), omdat de golven op de Noordzeelocaties aanmerkelijk meer energie bevatten dan in de Waddenzee. De modelonzekerheden voor de golfhoogte in de kustzone zijn met een (relatieve) standaardafwijking van 19% (Deltares, 2015) fors. Dit maakt dat bij hoge golven, die met name voor de gestrekte kust voorkomen, de doorwerking enorm is.

Echter, het is de vraag of dit ook daadwerkelijk zoveel zou mogen zijn. Wanneer we het verschil tussen HBN en lokale waterstand gemakshalve toeschrijven aan de golfoploophoogte, dan zien we dat het effect een toename van de oploophoogte van ongeveer 1/3 veroorzaakt. Afhankelijk van het regime van het golfveld is de oploophoogte  $z_0$  evenredig met de golfhoogte  $H_s$  of (bij benadering) evenredig met het product van de golfperiode  $T$  en de wortel uit de golfhoogte  $H_s$ :

$$z_0 \propto T \sqrt{H_s}$$

Indien golfhoogte en golfperiode onafhankelijk zijn, en deze veronderstelling wordt in de huidige implementatie<sup>4</sup> wel gemaakt, dan geldt

$$\left( \frac{\sigma_{z_0}}{z_0} \right)^2 = \left( \frac{\sigma_T}{T} \right)^2 + \left( \frac{1}{2} \right)^2 \left( \frac{\sigma_{H_s}}{H_s} \right)^2$$

Dat betekent dat het effect van het meenemen van (model)onzekerheden, zijnde een (relatieve) standaardafwijking van 19% op golfhoogte en 11% op golfperiode, tot een verhoging van de oploophoogte van 31% zou moeten leiden, overeenkomend met bovengenoemde observatie. Echter in werkelijkheid zijn golfhoogte en golfperiode wel degelijk afhankelijk van elkaar. Daarmee zou de onzekerheid in oploophoogte lager uit moeten komen. Dit vergt een aanpassing in Hydra-Ring die niet zondermeer triviaal is.

<sup>4</sup> In Hydra-Ring worden modelonzekerheden op golfhoogte en golfperiode in rekening gebracht. Nadat de waterstand is berekend wordt aan de hand van de SWAN database de bijbehorende golfhoogte en golfperiode bepaald. Er is voor gekozen om niet onafhankelijk van elkaar de onzekerheden op de twee parameterwaarden te zetten. In plaats daarvan wordt eerst de onzekerheid op de golfhoogte in rekening gebracht. Onder de aanname dat de golfsteilheid niet verandert door deze stap, wordt de golfperiode aangepast. Tenslotte wordt de onzekerheid op de aangepaste golfperiode gezet. Kortom, hiermee wordt twee maal een onzekerheid op de golfperiode gezet.

Een in deze analyse berekende 8 m hogere HBN zou de verwachting kunnen wekken dat straks bij de feitelijke beoordeling in heel veel gevallen sprake zal zijn van afkeuring. Dat zal in de praktijk echter meevallen. Dit heeft te maken met het feit dat we in de HBN berekeningen uitgaan van een standaardprofiel en een groter kritiek overslagdebiet. In werkelijkheid zal een verhoogde ruwheid op een profiel met berm leiden tot aanmerkelijk lagere HBN niveaus en een kleiner effect van het meenemen van onzekerheden.

#### Westerschelde

Zoals te verwachten, is het verschil in het effect van het meenemen van onzekerheden groot voor locaties in de monding van de Westerschelde. In de monding is het effect 1 – 1.5 m bij een herhalingstijd van 3000 jaar, terwijl deze in het meer afgeschermd deel van de Westerschelde beperkt is tot 0.3 – 0.7 m. Beiden zijn in lijn met de effecten voor de Waddenzee. Door de golfdemping op de Vlake van de Raan zijn de golven minder hoog dan voor de Hollandse Kust. Het effect van onzekerheden is daarom ook minder groot.

Bovenstaande verschillen zijn alleen bij een relevante herhalingstijd beschouwd. Het verschil tussen het al dan niet meenemen van onzekerheden over alle herhalingstijden toont aanmerkelijk meer spreiding, oplopend tot 3.5 m in de Waddenzee, 4.5 m in de Westerschelde en zelfs 11,4 m voor de Hollandse Kust bij een herhalingstijd van 100.000 jaar.

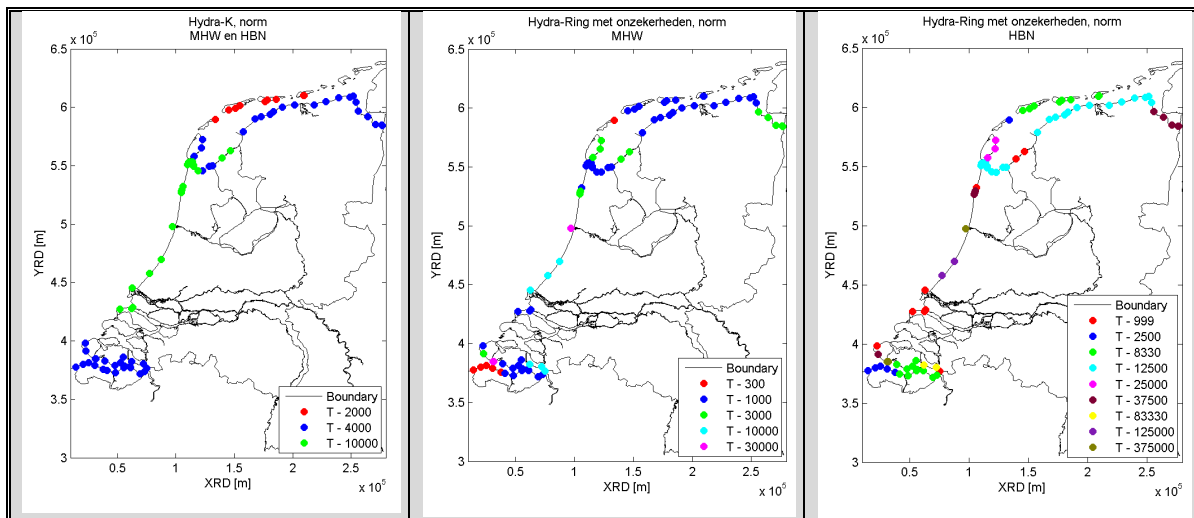
Tabel 3.4 Per herhalingstijd het minimum, maximum en gemiddelde verschil over alle locaties in HBN tussen Hydra-Ring met en zonder onzekerheden (met onzekerheden- zonder onzekerheden).

| Herhalings-tijd (jaar) | Verschil in HBN (m) |      |      |                |       |      |               |      |      |
|------------------------|---------------------|------|------|----------------|-------|------|---------------|------|------|
|                        | Waddenzee           |      |      | Hollandse Kust |       |      | Westerschelde |      |      |
|                        | min                 | max  | gem. | Min            | max   | gem. | min           | max  | gem. |
| 100                    | 0.01                | 0.23 | 0.14 | 0.24           | 3.26  | 1.47 | 0.01          | 1.55 | 0.48 |
| 1000                   | 0.07                | 1.68 | 0.54 | 0.51           | 5.50  | 2.51 | 0.05          | 2.63 | 0.84 |
| 10000                  | 0.17                | 2.49 | 0.92 | 0.84           | 8.07  | 3.62 | 0.15          | 3.52 | 1.24 |
| 100000                 | 0.32                | 3.49 | 1.39 | 1.25           | 11.43 | 4.74 | 0.32          | 4.56 | 1.73 |

#### 3.4.3 Vergelijking bij oude en nieuwe norm

Naast verandering in het belastingmodel, overstap op een ander correlatiemodel en de verdiscontering van onzekerheden is er ook de overstap op een nieuwe norm voor WBI-2017. Voor zowel de lokale waterstand als het HBN is het verschil bepaald tussen de belastingparameters zoals berekend met Hydra-Ring bij de nieuwe norm en die met Hydra-K bij de oude norm. Voor het HBN is de faalkanseis beschouwd door de trajectnorm te vermenigvuldigen met het faalkansbudget (0.24) en de lengte-effect factor voor het betreffende dijktraject. Merk op dat we voor de trajectnorm uit gaan van de ondergrens, zoals weergegeven in Figuur 1.2.

Voor alle testlocaties zijn de oude normen, zoals gehanteerd in de Hydra-K berekeningen, en de nieuwe normen (ondergrens), weergegeven in Figuur 3.15. Ten aanzien van de nieuwe normen is onderscheid gemaakt in de normen die worden beschouwd bij de berekeningen van de lokale waterstanden (ondergrens van de trajectnorm) en HBN (faalkanseis).

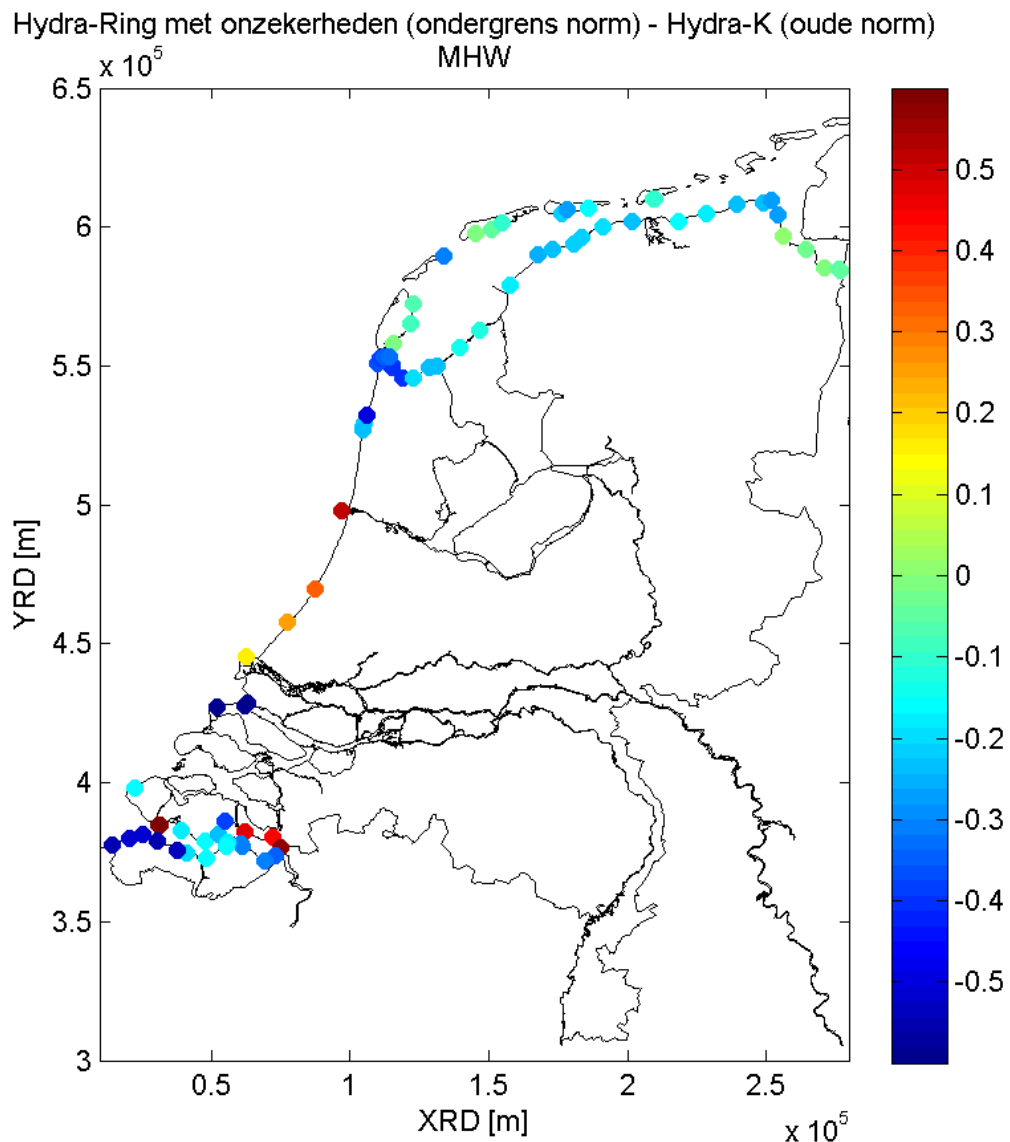


Figuur 3.15 Gehanteerde normen op testlocaties: Oude normen (links), nieuwe normen bij trajectnorm, ondergrens (midden) en faalkanseis voor HBN berekeningen (rechts). Een terugkeertijd van 999 in de rechterfiguur duidt op een duinlocatie of verbindende kering.

Met uitzondering van de Dollard en Texel wordt de norm minder streng (factor 2 tot 10). Hetzelfde geldt voor de Westerschelde, met uitzondering van Walcheren (gelijk) en Zuid-Beveland (van 1/4000 naar 1/10.000 per jaar). Langs de Kust van Zuid-Holland blijft de norm gelijk, langs de Noord-Hollandse Kust wordt deze minder streng, van 1/10.000 naar 1/3.000 en 1/1000 per jaar. IJmuiden vormt een uitzondering met een fors strengere norm.

De verschillen in lokale waterstand en HBN als gevolg van de nieuwe normering, meenemen van onzekerheden en een ander belastingmodel zijn weergegeven in Figuur 3.16 respectievelijk Figuur 3.17.

Voor de lokale waterstand hebben we gezien dat een overstap van Hydra-K naar Hydra-Ring (zonder onzekerheden) leidt tot verschillen variërend van -0.2 en 0.2 m. Wanneer onzekerheden worden beschouwd leidt dat tot een toename van ongeveer 10 cm. Bij gelijkblijvende norm zal een variatie van -0.1 tot 0.3 m resulteren. Overgang op nieuwe, minder strenge normen (factor 2 tot 10) zorgt voor een verlaging van de lokale waterstand van een halve tot een hele decimeringshoogte. Dit betreft meerdere decimeters. Als resultaat zullen de lokale waterstanden bij de nieuwe normen (ondergrens) lager uitkomen dan die bij de oude normen. In Figuur 3.16 is te zien dat dit tot verlagingen tot 0.5 m leidt. Voor bovengenoemde uitzonderingsgebieden geldt: de lokale waterstand blijft nagenoeg onveranderd in de Dollard en Texel. Voor Zuid-Beveland geldt een toename van ongeveer 0.5 m. Voor de locaties langs de kust van Zuid-Holland geldt een toename van 0.2 - 0.3 m en voor IJmuiden is de toename 0.5 m.

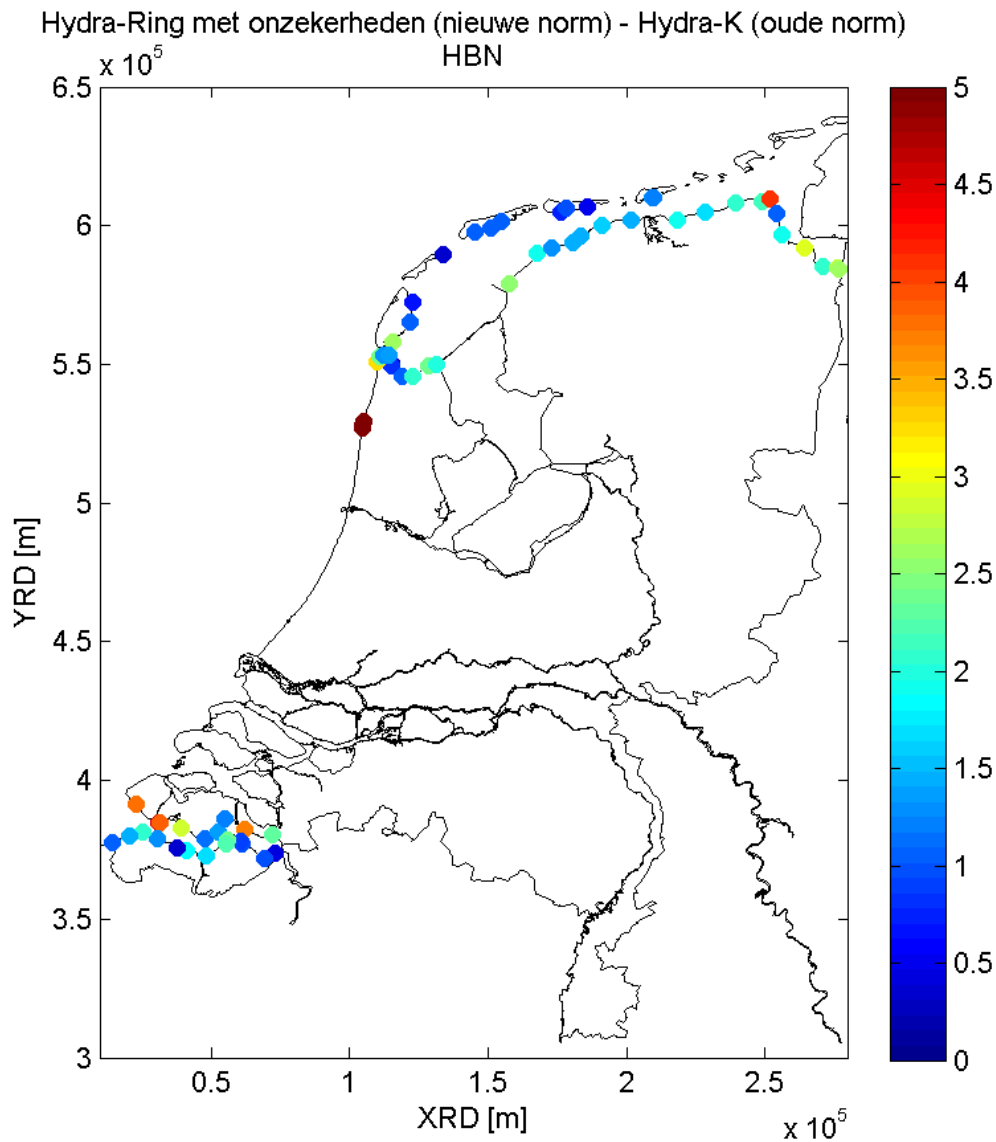


Figuur 3.16 Ruimtelijke verdeling van het verschil tussen lokale waterstand berekend met Hydra-Ring (met onzekerheden) bij de nieuwe norm en door Hydra-K bij de oude norm.

In Figuur 3.17 zijn de verschillen in HBN weergegeven. Opgemerkt moet worden dat in deze figuur de locaties waarvoor de faalkanseis kleiner is dan 1/100.000 per jaar niet zijn opgenomen. Immers, voor grotere herhalingstijden dan 100.000 jaar zijn geen HR bepaald. Tevens zijn duinlocaties en verbindende keringen buiten beschouwing gelaten. Dat betekent dat met name locaties in de Waddenzee en Westerschelde overblijven.

Zoals in Paragrafen 3.4.1 en 3.4.2 is beschreven is het effect van het meenemen van onzekerheden op het HBN beperkt tot orde 1 m, met uitzondering van de Afsluitdijk en de monding van de Westerschelde, waar het verschil tot 2 m oploopt. De overgang van Hydra-K naar Hydra-Ring laat aanmerkelijk kleinere verschillen, tot ongeveer 0.5 m, zien. In de Waddenzee is de faalkanseis over het algemeen een factor 4 tot 8 kleiner dan de oude norm, hetgeen tot een verdere verhoging van het HBN leidt. In totaal neemt het HBN 1 tot 3 m toe. In de Westerschelde leidt de overstap naar de nieuwe normering tot een verandering van de

faalkanseis tot hooguit een factor 2. Uitzondering hierop vormen Zuid-Beveland en Walcheren. In deze gebieden neemt het HBN daardoor ook fors toe 3 - 4 m. In de overige gebieden is de toename beperkt tot 1 - 2.5 m. Voor de Kust van Noord-Holland is de toename ruim 5 m. Deels wordt dit veroorzaakt door de overgang naar een 4 maal strengere norm. Het meenemen van onzekerheden heeft hier met ruim 3 m de grootste bijdrage.



Figuur 3.17 Ruimtelijke verdeling van het verschil tussen HBN berekend met Hydra-Ring (met onzekerheden) bij de nieuwe norm en door Hydra-K bij de oude norm.

### 3.5 Marginale statistiek van de golfhoogte

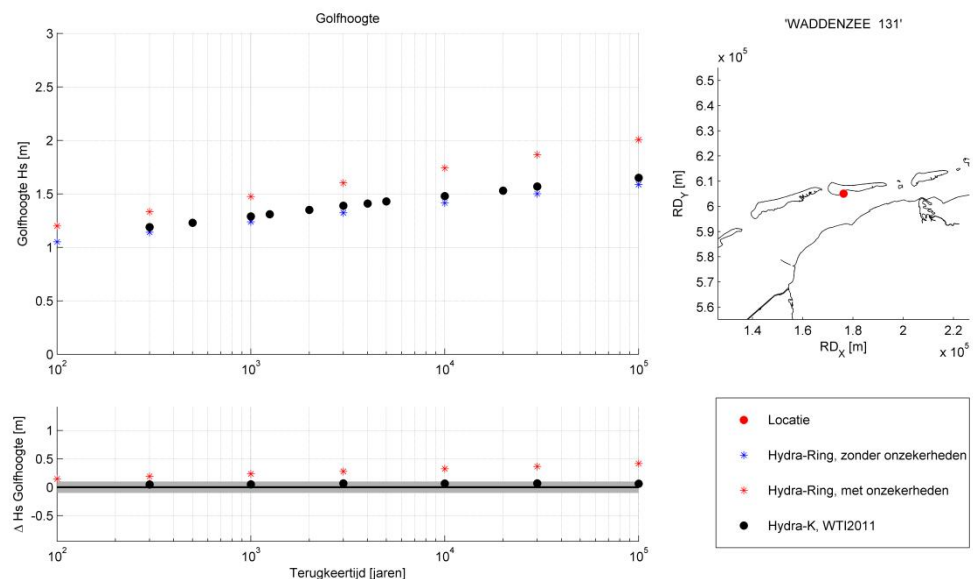
De marginale statistiek wordt gebruikt bij de eenvoudige toets van een aantal faalmechanismen. Om de betrouwbaarheid van de afgeleide golfhoogtes aan te tonen, hebben we op de testlocaties de marginale statistiek van de golfhoogte met Hydra-K en Hydra-Ring bepaald. Met Hydra-Ring hebben we dat zowel met als zonder onzekerheden gedaan. Deze resultaten worden hier nader belicht.

### 3.5.1 Vergelijking tussen Hydra-K en Hydra-Ring

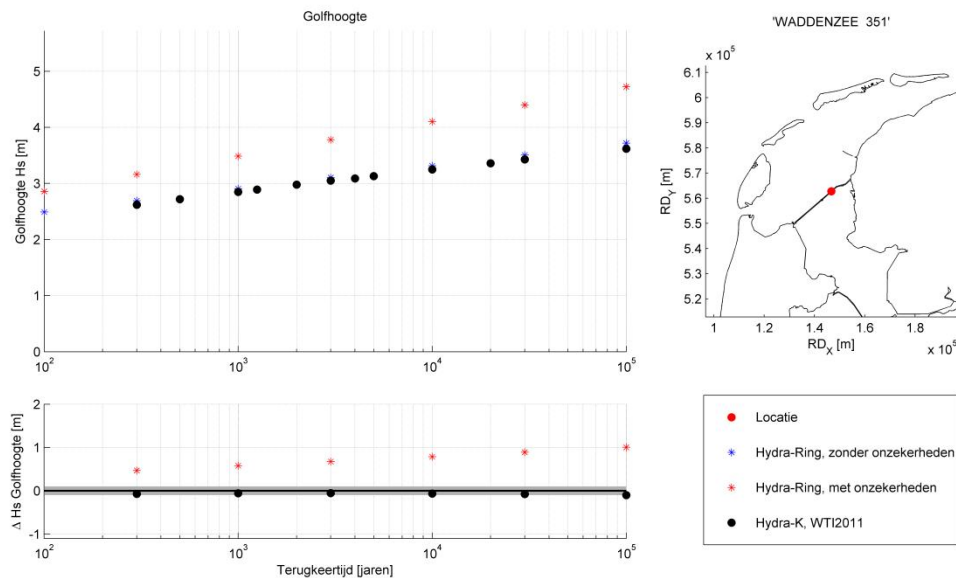
De verschillen in golfhoogte zoals berekend met Hydra-K en Hydra-Ring vertonen hetzelfde patroon als de verschillen in HBN. Dat betekent dat verschillen in windstatistiek en verschillen in correlatiemodel tussen wind en waterstand verantwoordelijk moeten zijn voor de verschillen. Per watersysteem beschouwen we de verschillen nader.

#### Waddenzee

Achter de eilanden zijn de met Hydra-Ring berekende golfhoogten tot ongeveer 10 cm lager dan volgens Hydra-K (zie Figuur 3.18). Op de overige locaties langs het vasteland, de Afsluitdijk en de Eems-Dollard zijn de Hydra-Ring golfhoogtes ongeveer 10 tot 15 cm hoger, zoals geïllustreerd in Figuur 3.19 voor een locatie langs de Afsluitdijk. Een lagere windsnelheid bij Terschelling-West voor de westelijke windrichtingen en iets hogere voor de noordelijke windrichtingen zorgen voor een beperkte verandering in golfhoogte. Het Hydra-Ring correlatiemodel leidt tot hogere waarden, als we de parallellen tussen golfhoogte en HBN enerzijds en Hydra-Ring en Hydra-Zout anderzijds trekken.



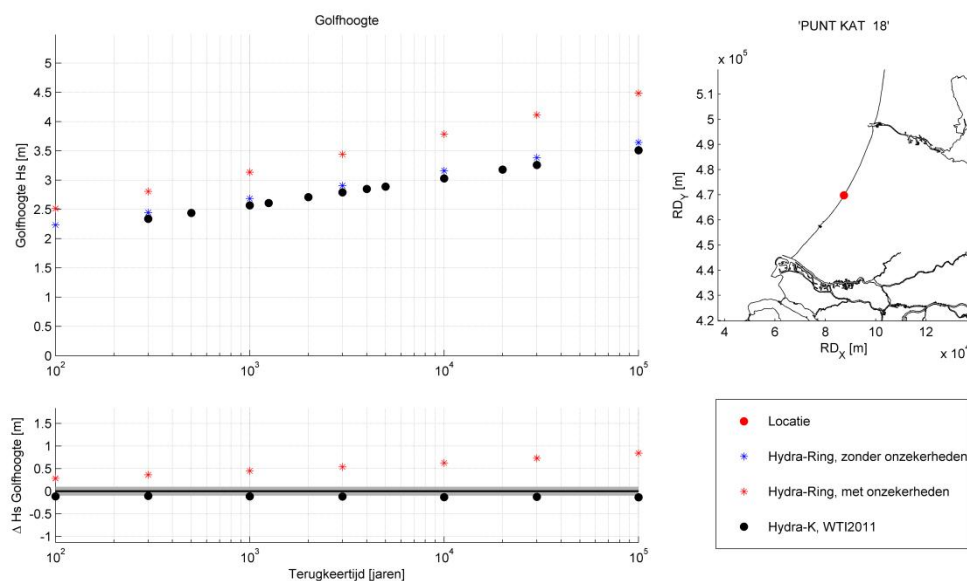
Figuur 3.18 Significante golfhoogte berekend met Hydra-Ring (met en zonder onzekerheden in rood resp. blauw) en Hydra-K. Onder: verschil tussen Hydra-K en Hydra-Ring (zonder onzekerheden) en effect op golfhoogten van meenemen onzekerheden. Locatie 900131 (Ameland)



Figuur 3.19 Significante golfhoogte berekend met Hydra-Ring (met en zonder onzekerheden in rood resp. blauw) en Hydra-K. Onder: verschil tussen Hydra-K en Hydra-Ring (zonder onzekerheden) en effect op golfhoogten van meenemen onzekerheden. Locatie 1000351 (Afsluitdijk)

## Hollandse Kust

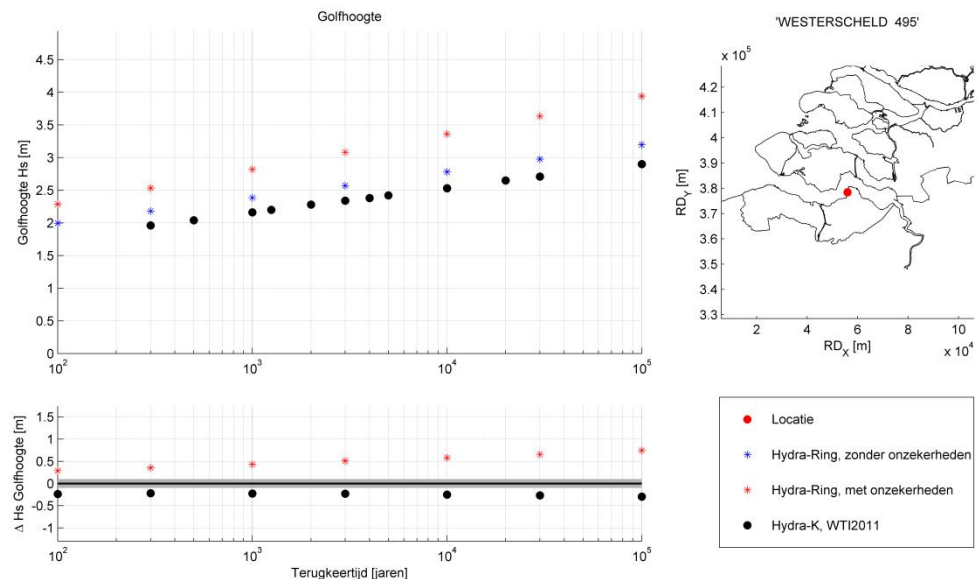
Langs de Hollandse Kust levert Hydra-Ring hogere golfhoogtes dan Hydra-K, opnieuw evenredig over de herhalingstijden. Deze verschillen lopen op tot 20 cm, zoals dat het geval is voor Katwijk, zie Figuur 3.20. De beperkte verlaging van windsnelheid statistiek wordt teniet gedaan door een verhoging als gevolg van het aangepaste correlatiemodel.



Figuur 3.20 Significante golfhoogte berekend met Hydra-Ring (met en zonder onzekerheden in rood resp. blauw) en Hydra-K. Onder: verschil tussen Hydra-K en Hydra-Ring (zonder onzekerheden) en effect op golfhoogten van meenemen onzekerheden. Locatie 1300018 (Katwijk)

### Westerschelde

In de gehele Westerschelde liggen de Hydra-Ring golfhoogtes boven de Hydra-K golfhoogtes voor alle terugkeertijden. Voor westelijke windrichting is de windstatistiek nagenoeg ongewijzigd. Het correlatiemodel lijkt daarmee de belangrijkste kandidaat om de offset te verklaren. Deze offset veroorzaakt verschillen variërend van 15 tot 40 cm, zie bijvoorbeeld Figuur 3.21.



Figuur 3.21 Significante golfhoogte berekend met Hydra-Ring (met en zonder onzekerheden in rood resp. blauw) en Hydra-K. Onder: verschil tussen Hydra-K en Hydra-Ring (zonder onzekerheden) en effect op golfhoogten van meenemen onzekerheden. Locatie 1500495 (Ossenisse)

Gezien de kwalitatieve overeenkomst tussen de verlopen van de golfhoogte volgens Hydra-K en Hydra-Ring vertrouwen we de Hydra-Ring resultaten. De verschillen met Hydra-K worden toegeschreven aan het verschil in correlatiemodel dat wordt gehanteerd. De foutieve waterstandstatistiek draagt ook voor een vijftal centimeters bij.

#### 3.5.2 Effect van onzekerheden

Het effect van onzekerheden op de marginale statistiek van de golfhoogte wordt bepaald door de statistische onzekerheid van de zeewaterstand en de windsnelheid en de modelonzekerheid op de golfhoogte. De statistische onzekerheid (Deltares, 20016b) is relatief klein en het effect op de golfhoogte is te verwaarlozen ten opzichte van de modelonzekerheid op de golfhoogte. Voor het kustgebied wordt een relatieve standaardafwijking van 0,19 aangehouden voor de modelonzekerheid op de golfhoogte (Deltares, 2015). Op alle locaties zien we het verschil in ongeveer 20% terugkomen. Dit wordt ook geïllustreerd in Figuur 3.18 tot en met Figuur 3.21.



## 4 Resultaten HB kust

### 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 bij harde keringen in het kustgebied. Daarnaast worden de HBN's voor dezelfde locaties besproken, hoewel dit geen invoer is voor de eenvoudige toets.

### 4.2 Uitgangspunten probabilistische productieberekeningen

De productieberekeningen kosten veel rekentijd en zijn daarom uitgevoerd op het Amazon rekencluster. 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 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.

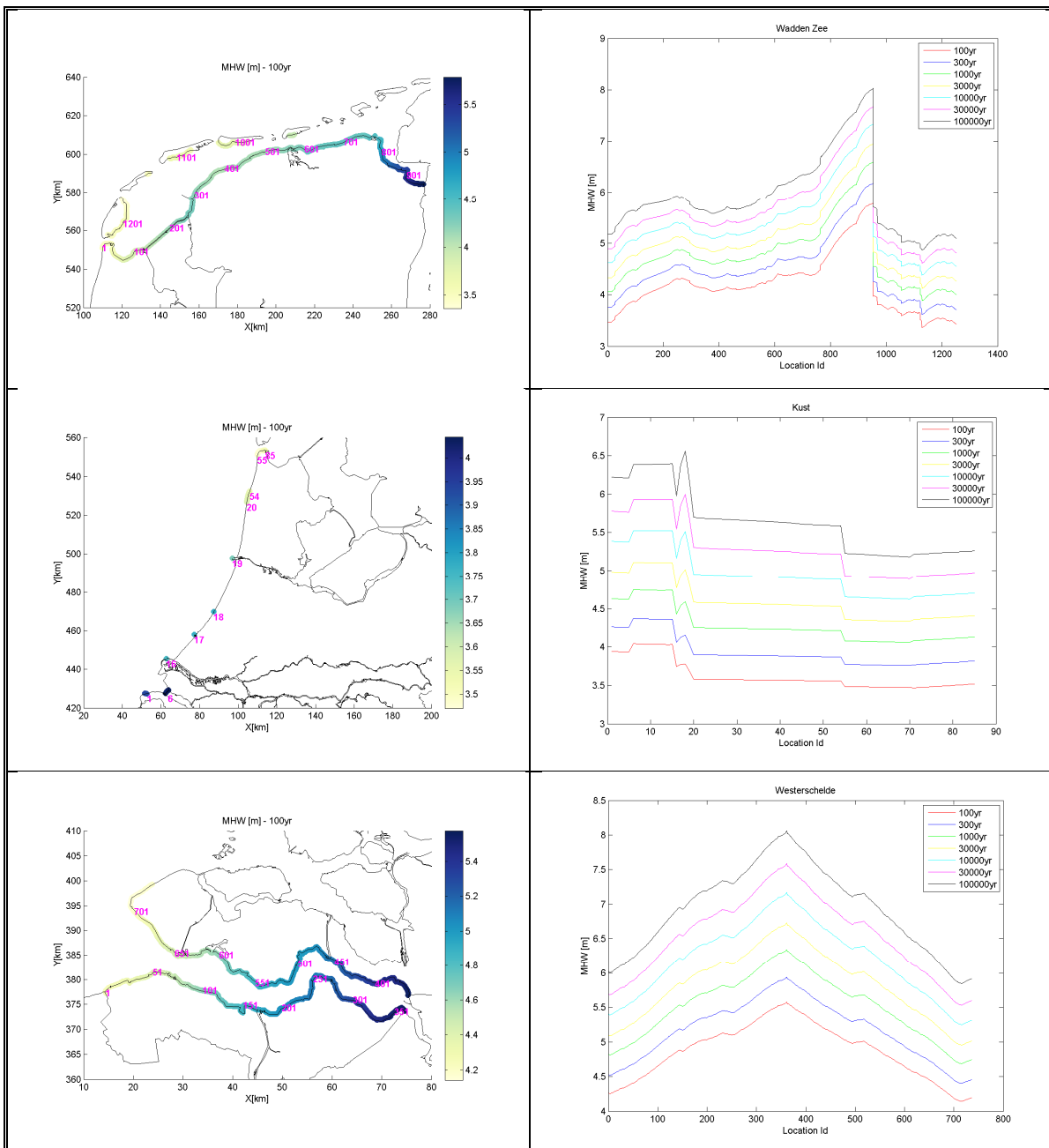
De resultaten in de figuren zijn ook allemaal opgenomen in een Excel spreadsheet, voor elke regio één. Per type belasting (waterstand, HBN, golfhoogte) is een tabblad aangemaakt. Op ieder tabblad staat voor iedere locatie de belasting per herhalingstijd aangegeven. Deze spreadsheets worden doorlopen om na te gaan of er uitschieters in de resultaten zitten.

### 4.3 Rekenresultaten lokale waterstanden

De waterstanden op Hydra-uitvoerlocaties zijn voor herhalingstijden van 100 tot 100.000 jaar getoond in de figuren in Bijlage A. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen Waddenzee, Hollandse Kust en Westerschelde in de paragrafen A.1, A.2 respectievelijk A.3. Omdat de waterstanden worden bepaald door interpolatie tussen de meetstations waarop de statistiek beschikbaar is, is het ruimtelijk verloop langs de kust glad.

Het opstuwende effect van de wind in de Waddenzee zien we terug in de toename van de waterstand in oostelijke richting. Deze opstuwung leidt in de Dollard tot de hoogste waterstanden in de Waddenzee. Ditzelfde beeld zien we ook in de Westerschelde, waar de hoogste waterstanden achter in de Westerschelde worden verkregen. Het verschil in waterstand tussen de monding en achter in de Westerschelde bedraagt ongeveer 2 meter. Langs de Hollandse Kust is de variatie beperkt tot enkele decimeters.

Aanvullend op de ruimtelijke verdelingen zijn langsverlopen van de waterstand gemaakt. Ook hier is het gladde verloop te zien. Belangrijker nog is de logische toename van de waterstand met toenemende herhalingstijd.



**Figuur 4.1** Langsverlopen van waterstand (in m+NAP) in de Waddenzee (boven), Hollandse Kust (midden) en Westerschelde (onder). De langsverlopen zijn weergegeven als functie van de locatie index. Deze zijn in de linkerfiguren aangegeven.

Controle van de tabbladen waterstand in de Excel sheets toont een tweetal uitschieters, te weten Katwijk en Scheveningen. Daar waar bij een herhalingsjijd van 10.000 jaar een waterstand bij Maasmond en IJmuiden van 5.16 respectievelijk 5.26 m + NAP wordt berekend, zijn de waterstanden in Scheveningen en Katwijk 5.41 respectievelijk 5.51 m + NAP. Dit zijn verschillen van 25 cm. Controleberekningen met Hydra-K geven tussen Maasmond en Scheveningen een verschil van 16 cm en tussen Maasmond en Katwijk van 20 cm bij een herhalingsjijd van 10.000 jaar. De laatste 10 cm verschil kunnen we niet verklaren.

#### 4.4 Rekenresultaten Golfhoogte

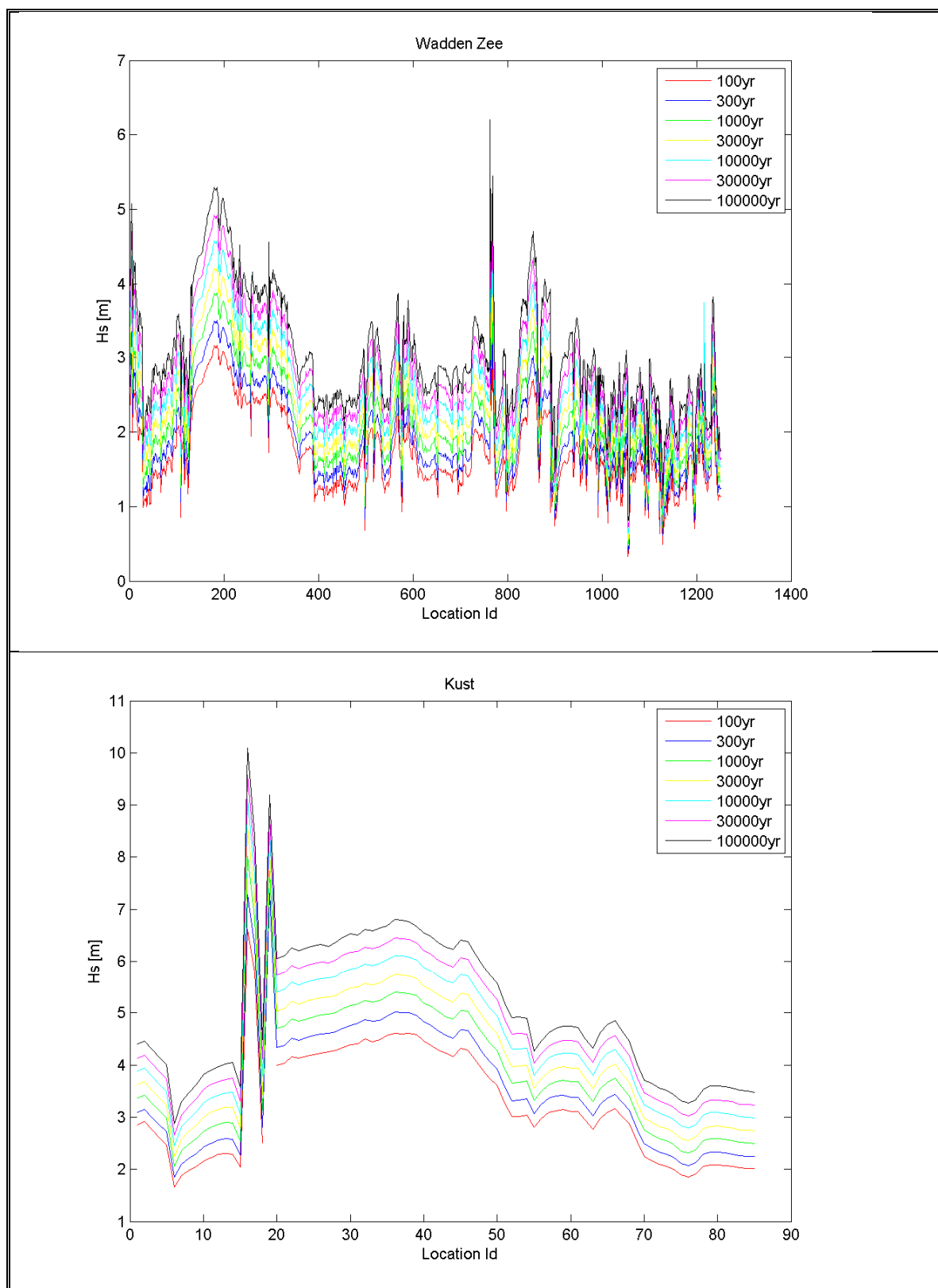
Voor de golfhoogten staan de figuren van ruimtelijke verdelingen per herhalingstijd in Bijlage C. In algemene zin zien deze ruimtelijke verdelingen er realistisch uit.

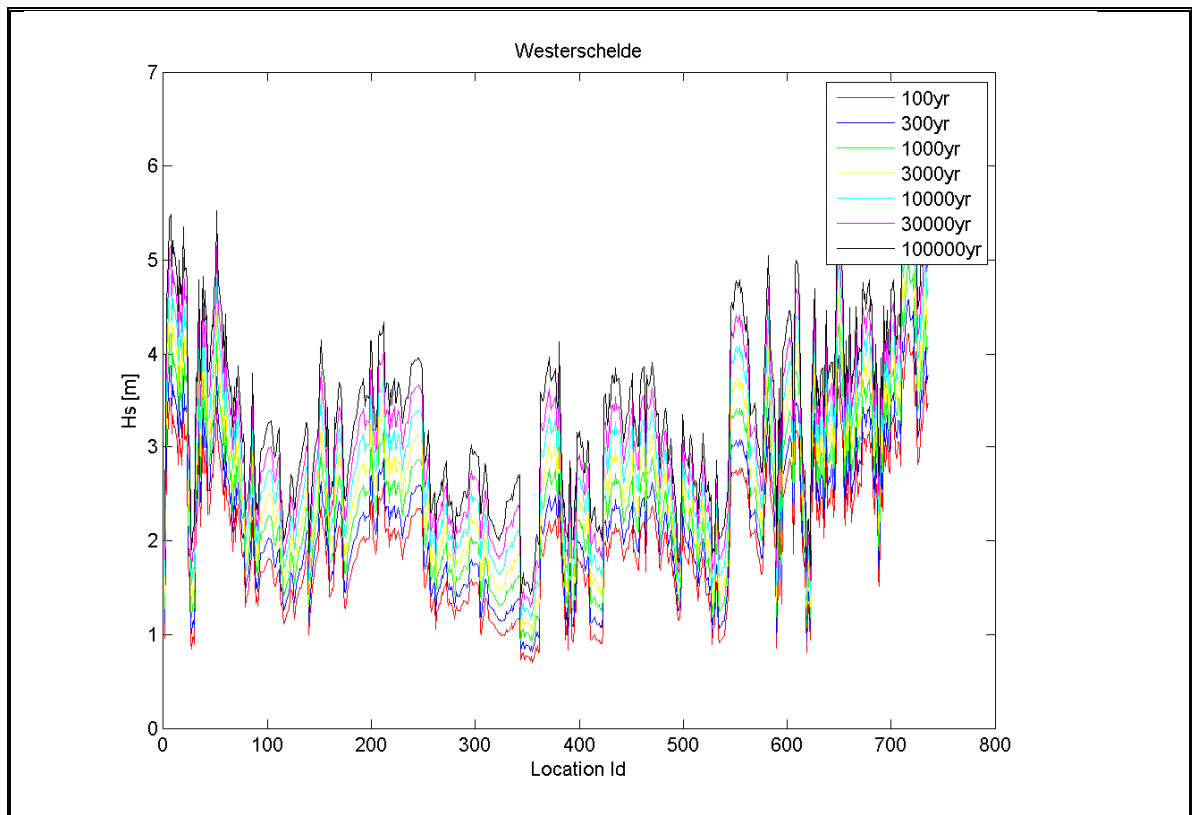
In de Waddenzee worden de golven sterk bepaald door de waterstand. De hoogste waterstanden treden op bij noordwestelijke wind. In de ruimtelijke verdelingen is duidelijk te zien dat golfhoogtes op locaties die worden afgeschermd (bijv doordat zij in de luwte van eilanden liggen) bij een noordwestelijke wind beduidend lager zijn dan de golfhoogtes op locaties die niet of in mindere mate worden afgeschermd. De laagste golfhoogtes worden daarom verkregen achter de eilanden en langs de op het oosten georiënteerde dijken in de Eems-Dollard. De hoogste golven treden op in de meer open delen in de Oostelijke Waddenzee, met name in de buurt van Eemshaven en langs de Afsluitdijk en het gebied rondom Harlingen. Dit is te zien in de figuren in Bijlage C.1 In laatstgenoemd gebied zijn de strijklengtes relatief lang in vergelijking met het vasteland achter Ameland en Schiermonnikoog.

Ook in de Westerschelde worden de grootste golfhoogtes verkregen bij hoge waterstanden. Deze treden op wanneer de Zuidelijke Noordzee tussen Nederland en Engeland zich kan vullen en het water de Westerschelde ingeduwd kan worden. Hiervoor zijn westelijke en noordwestelijke winden maatgevend. Winden uit deze richtingen bepalen dan ook de golfhoogtes. Op locaties voor dijken die op het westen zijn georiënteerd gelden grotere golfhoogtes dan op locaties waar de dijken een noordelijke, zuidelijke en met name een oostelijke oriëntatie hebben, zie figuren in Bijlage C.3. Hoe hoog de golven dan worden wordt met name door strijklengte en waterdiepte bepaald. Een voorbeeld hiervan is het achterste deel van de Westerschelde. Op locaties aan de noordoever is de strijklengte 10-15 kilometer, wat leidt tot hogere golven dan meer westelijk gelegen locaties. Op de tegenovergelegen strekking is de strijklengte minstens zo lang. Echter het ondiepe Land van Saeftinghe zorgt ervoor dat de golfhoogte beperkt blijft. De hoogste golven treden op in de monding. Op de kop van Walcheren is de golfhoogte ongeveer 5 m bij een terugkeertijd van 3000 jaar.

De golfhoogtes langs de Hollandse kust zijn aanmerkelijk hoger dan in de estuaria van de Westerschelde en de Waddenzee (Bijlage C.2). Net als voor de kust van Walcheren is de golfhoogte bij een herhalingstijd van 3000 jaar ongeveer 5 m langs de Hondsbossche en Pettemer Zeewering en Het Flauwe Werk. Voor de havens van Scheveningen, IJmuiden en Hoek van Holland zijn de golfhoogtes aanmerkelijk hoger, nl. ongeveer 7 m bij een herhalingstijd van 3000 jaar. De reden voor de grotere golfhoogte zit hem in het feit dat de locaties aanmerkelijk dieper liggen dan de eerder genoemde kustlocaties. Voor de Haringvlietdam zijn de golven iets lager dan langs de gestrekte kust, deels vanwege de gedeeltelijke afscherming van de Noordzee en deels vanwege de ondiepte in de monding.

Langsverlopen van de golfhoogte zijn weergegeven in Figuur 4.2. Hier is duidelijk te zien dat de ruimtelijke variatie aanmerkelijk groter is dan voor de waterstand. De geometrie (bodempligging en oriëntatie kustlijn) is hier grotendeels verantwoordelijk voor. Ook hier is duidelijk dat de golfhoogte toeneemt met toenemende herhalingstijd. Deze toename ziet er realistisch uit.





Figuur 4.2 Langsverlopen van de golfhoogte (in m) in de Waddenzee (boven), Hollandse Kust (midden) en Westerschelde (onder). De langsverlopen zijn gelijk aan die weergegeven in Figuur 4.1.

Controle van de tabbladen 'golfhoogte' in de verschillende spreadsheets laten geen onregelmatigheden zien op 1 locatie westelijk van Den Oever na. Deze locatie is niet verwijderd uit het Excel bestand, wel (geel) gemarkeerd als zijnde niet betrouwbaar.

#### 4.5 Rekenresultaten HBN

Het ruimtelijk beeld van het HBN vertoont, zoals verwacht, sterke overeenkomsten met dat van de golfhoogte. Dit geldt voor alle regio's.

Waar de golven in de Waddenzee hoog zijn, d.w.z. langs de Afsluitdijk, rondom Harlingen en op strekkingen die niet in de schaduw liggen van de Waddeneilanden, is het HBN niveau ook hoog ten opzichte van de overige locaties. Dit is te zien in de figuren in Bijlage B.1.

Een enkele Hydra-Ring berekening is niet geconvergeerd, dat wil zeggen dat de iteraties die onderdeel zijn van de FORM en Directional Sampling geen oplossing hebben kunnen vinden. In totaal gaat het om 23 geïsoleerde locaties, in alle gevallen voor slechts één herhalingstijd. Voorbeelden hiervan zijn locaties op Texel en Ameland en een aantal locaties op de ondiepe kwelder ten westen van Holwerd. In bijgeleverd Excel bestand is dit aangegeven met de uitzonderingswaarde -99. De HBN voor een enkele herhalingstijd wijkt af van de serie voor de overige herhalingstijden. Hydra-Ring geeft een waarschuwing wanneer een berekening niet is geconvergeerd en de resultaten moeten dan als onbetrouwbaar worden beschouwd. Omdat het om geïsoleerde locaties en een enkele herhalingstijd gaat, is dit acceptabel. Om deze reden is het niet nodig deze locaties te verwijderen.

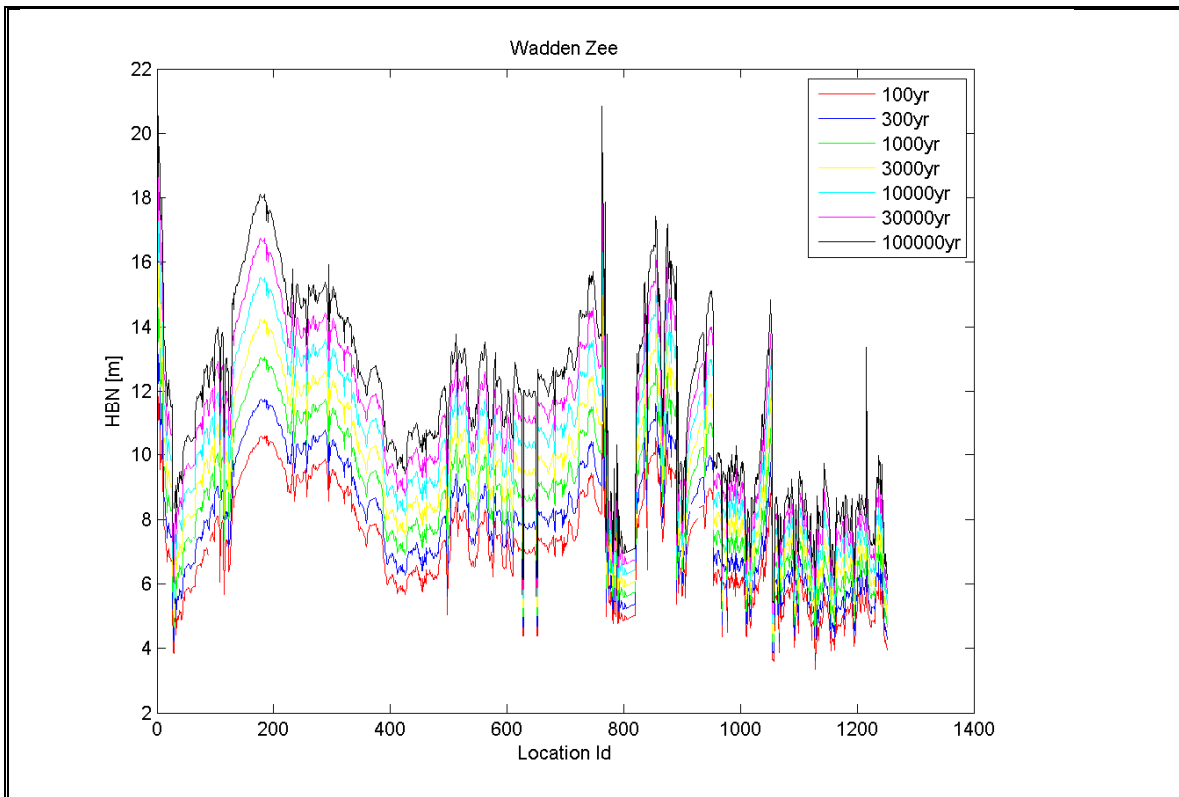
Het ruimtelijk verloop van de HBN in de Westerschelde ziet er eveneens realistisch uit (Bijlage B.3). Het vertoont eenzelfde patroon als in de Waddenzee. De HBN's zijn hoger in de

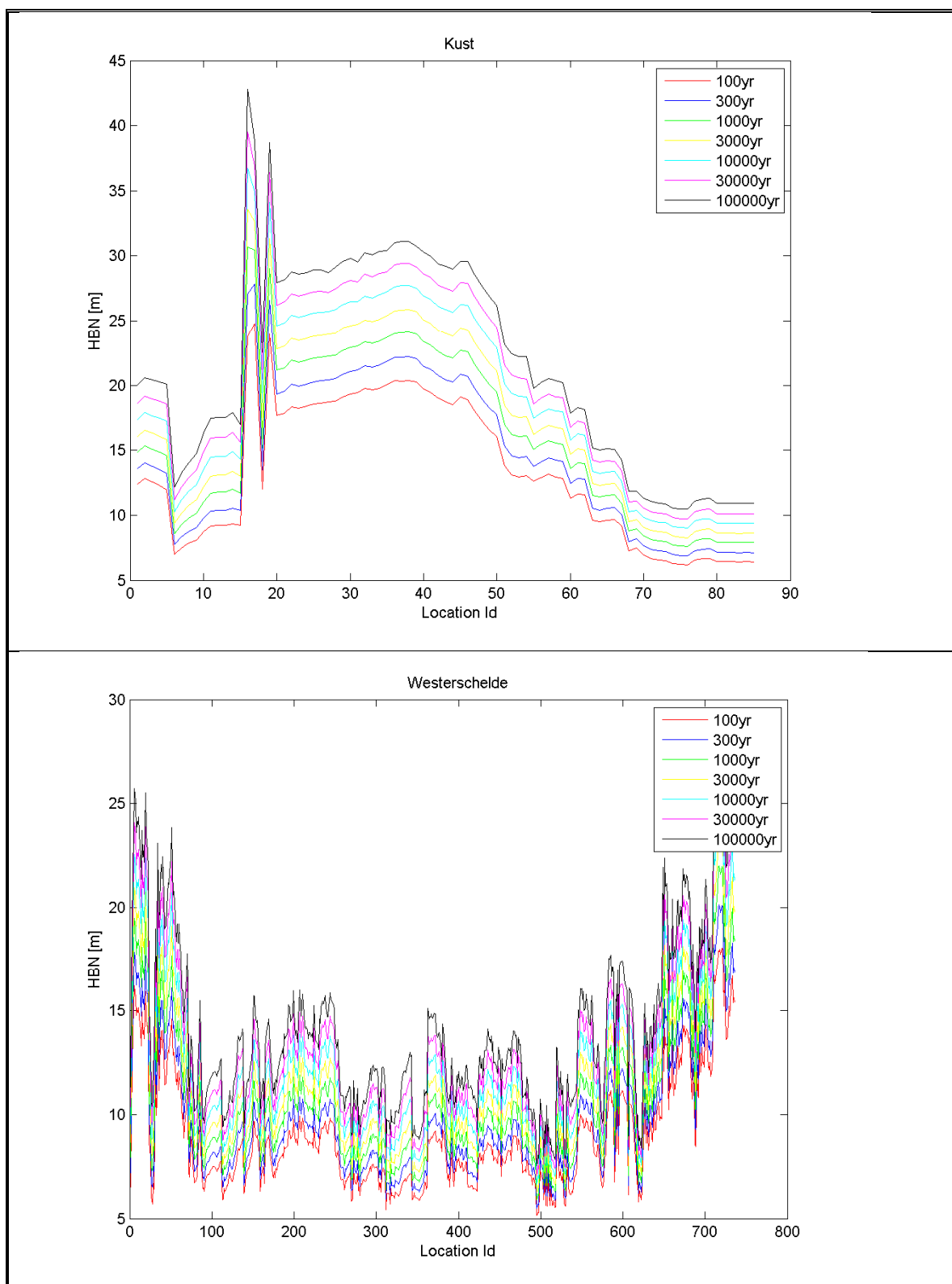
monding van de Westerschelde en op locaties waar de golven een lange strijklengte ervaren bij westelijke en noordwestelijke wind en niet sterk gedempt worden door ondieptes. De variatie in HBN in langsrichting per herhalingstijd is niet groot, minder dan in de Waddenzee. Er zijn geen berekeningen die niet geconvergeerd zijn.

De HBN's langs de Hollandse Kust zijn aanmerkelijk groter dan in de estuaria. De grotere golfhoogtes en langere periodes zijn hier debet aan. De ruimtelijke verlopen zien er redelijk logisch uit. Datzelfde geldt voor de langsverlopen in Figuur 4.3.

Controle van de tabbladen HBN in de Excel sheets toont twee locaties langs de Hondsbossche Zeewering waarvan de HBN onrealistisch laag zijn. Overige waarden zijn wel realistisch en beschouwen we als betrouwbaar. Zelfs de hoge waarden voor Maasmond, Scheveningen en IJmuiden zijn gegeven het gladde talud en de 1:3 helling van het standaard profiel niet onlogisch. Deze locaties liggen op dieper water dan de uitvoerlocaties langs de keringen (Haringvlietdam, Flauwe Werk en Hondsbossche en Pettemer Zeewering). Vergelijken we de illustratiepunten bij Scheveningen en Hondsbossche Zeewering dan zijn de waterstanden en windsnelheden vergelijkbaar. Bij een frequentie van 1/3000 per jaar is de significante golfhoogte in Scheveningen 5.6 m en voor de Hondsbossche Zeewering 4 m. Dit verklaart het verschil in HBN van bijna 6 m tussen de locaties.

Al met al concluderen we dat de HBN resultaten, verkregen met Hydra-Ring inclusief onzekerheden, realistisch zijn.





Figuur 4.3 Langsverlopen van het HBN (in m) in de Waddenzee (boven), Hollandse Kust (midden) en Westerschelde (onder). De langsverlopen zijn gelijk aan die weergegeven in Figuur 4.1.

#### 4.6 Revisie rekeninstellingen

Na het afronden van de watersysteem-rapportages (zoals onderhavig rapport) is er in Deltares (2017) integraal gekeken naar de optimale rekentechnieken voor alle watersystemen, onder andere door de resultaten van Hydra-Ring te vergelijken met die van Hydra-NL. Hieruit volgt dat voor een aantal watersystemen andere instellingen worden aanbevolen dan dat in de watersysteem-rapportage zijn gebruikt. Dat is niet het geval voor de Kust, de instellingen blijven dus gelijk aan de in paragraaf 3.3.2 beschreven instellingen. Dit betekent dat de resultaten niet zullen afwijken van de resultaten weergegeven in dit rapport. In Tabel 4.1 worden de in WBI2017 ingebouwde instellingen (gelijk aan dit uit Deltares (2017)) voor de Kust weergegeven.

Tabel 4.1 Overzicht aanbevolen Hydra-Ring instellingen voor Kust (Deltares, 2017).

| Systeem                | Deel van systeem                                       | Waterstand | HBN       | Golfhoogte |
|------------------------|--------------------------------------------------------|------------|-----------|------------|
| Kust<br>(9-13, 15, 17) | Waddenzee, Westerschelde,<br>Hollandse Kust, Europoort | FDIR4-FBC  | FDIR4-FBC | FDIR4-FBC  |

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

*Op basis van de evaluatie uit voorgaande paragraaf adviseren we voor de bepaling van waterstand, golfhoogte en HBN de snelle rekentechniek FDIR4-FBC te gebruiken in de watersystemen Waddenzee, Hollandse Kust, Westerschelde en Europoort.*

#### 4.7 Rekentijden

De rekentijden van alle uitgevoerde berekeningen variëren enorm. Wanneer een FORM berekening niet convergeert, wordt overgestapt op Directional Sampling die veel meer rekentijd vergt. In onderstaande tabel is per type HB aangegeven wat de minimale en maximale rekentijd is en wat de mediaan is, gezien over alle locaties.

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

| Type Hydraulische Belasting | min  | max     | mediaan |
|-----------------------------|------|---------|---------|
| Locale waterstand           | 4 s  | 58 s    | 12 s    |
| HBN                         | 10 s | 3.9 uur | 33 min  |
| Golfhoogte                  | 2 s  | 3.7 uur | 8 s     |

Deze rekentijden zijn gemeten op het Amazon cluster. Op andere hardware kunnen deze tijden anders zijn. De genoemde rekentijden kunnen daarom slechts als indicatie beschouwd worden.

## 5 Conclusies en aanbevelingen

In deze studie zijn de Hydraulische Belastingniveaus (HBN) voor de harde keringen in het kustgebied afgeleid met Hydra-Ring. De HBN voor een locatie bestaat uit:

- Marginale statistiek van de lokale waterstand en significante golfhoogte. Deze worden afgeleid voor de eenvoudige toets en vormen direct input voor Ringtoets.
- Waterstanden (t.b.v. geotechnische toetssporen) en Hydraulische Belastingniveau (voor golfoverslag-gerelateerde toetssporen). Dit zijn referentiewaarden voor de HB die de toetsers uiteindelijk zelf met Ringtoets afleidt. De HBN's zijn bepaald met standaardinstellingen voor het dijkprofiel.

### 5.1 Conclusies

De resultaten zijn gecontroleerd aan de hand van verschilanalyses met WTI-2011 op representatieve (test)locaties, waarbij in de Hydra-Ring berekeningen geen kennisonzekerheden zijn verdisconteerd om een vergelijking met resultaten van Hydra-K (WTI-2011) mogelijk te maken. De conclusies hieruit zijn als volgt:

- De lokale waterstanden zoals berekend met Hydra-Ring komen vrij goed overeen met die berekend met Hydra-K. Op een aantal locaties lopen de verschillen op tot 0.2 m. Een deel van de verschillen kan verklaard worden door de toetspeilcorrecties in Hydra-K, die in Hydra-Ring ontbreken. Het resterende verschil kan verklaard worden door een fout in de door Hydra-Ring gebruikte statistiek van zeewaterstanden. Deze bevat een dubbeltelling van zeespiegelstijging.
- Ten aanzien van de HBN's zien we dat verschillen tussen de resultaten verkregen met Hydra-Ring enerzijds en Hydra-K anderzijds een vergelijkbaar patroon laten zien met de verschillen voor lokale waterstand, zij het dat de verschillen in HBN in absolute zin groter zijn, oplopend tot 0.5 m. Dubbeltelling van hoogwaterstijging verklaart grofweg 0.2 – 0.3 m van de geconstateerde verschillen in HBN. Ondanks dat dit nog niet is aangetoond lijkt alles er op te wijzen dat het resterende verschil wordt veroorzaakt door het verschil in correlatiemodel. Dit wordt ondersteund door de verschillen tussen Hydra-Zout en Hydra-K resultaten in HKV (2014). De effecten van de aangepaste windstatistiek zijn beperkt.
- De verschillen in golfhoogte bij een gegeven herhalingstijd zoals berekend met Hydra-K en Hydra-Ring vertonen hetzelfde patroon als de verschillen in HBN. Dat betekent dat verschillen in windstatistiek (in beperkte mate) en verschillen in correlatiemodel tussen wind en waterstand deze verschillen grotendeels veroorzaken. Verschillen zijn kleiner dan 0.2 m. Echter in de Westerschelde loopt dit op een aantal locaties op tot 0.4 m, waarbij Hydra-K lager uitvalt.

Het effect van het meenemen van model- en statistische onzekerheden in de probabilistische berekening op de Hydraulische Belastingen verschilt per type HB:

- Omdat statistische onzekerheden van zeewaterstanden beperkt zijn, is het effect hiervan op de lokale waterstand minder dan 0.15 m voor een herhalingstijd van 10.000 jaar.

- De onzekerheid van de golfhoogte bestaat voornamelijk uit SWAN modelonzekerheid. De golfhoogte neemt met ongeveer 20% toe wanneer deze onzekerheden als stochasten worden meegenomen.
- Ook voor het HBN draagt de modelonzekerheid van de golfhoogte en golfperiode veruit het meeste bij. In afgeschermd gebied met lage golfhoogtes en -periodes is het effect van meenemen van deze onzekerheden beperkt tot een aantal decimeters. In de meer open delen van de Waddenzee (Afsluitdijk, rondom Eemshaven) en Westerschelde (monding) neemt dit toe tot 0,7 – 1,5 m. Voor de Hollandse Kust is het effect in de orde van meters (met uitschieters tot 8 m). We kunnen beredeneren dat de veronderstelling van onafhankelijkheid van golfhoogte en golfperiode in de huidige implementatie leidt tot een verhoging van de oploophoogte van ongeveer 1/3 van de oploophoogte zonder onzekerheden. Omdat deze parameters in werkelijkheid wel degelijk afhankelijk zijn, zal het effect van onzekerheden lager uitkomen als deze afhankelijkheden wel worden verdisconteerd.

De resultaten van de lokale waterstand, HBN en golfhoogte zijn op iedere HB locatie bepaald. De resultaten zijn opgeslagen in Excel tabellen. De ruimtelijke verdelingen zijn gecontroleerd op logisch verloop en uitschieters:

- Door het opstuwende effect van de wind op het water zijn de maatgevende waterstanden hoger in de achter in de estuaria. Omdat de waterstanden worden bepaald door interpolatie tussen de meetstations waarop statistiek beschikbaar is, is het ruimtelijk verloop glad en worden geen uitschieters of verdachte waarden waargenomen.
- De hoogste golven treden op bij die locaties met de grootste strijklengte en grootste waterdiepte. Het ruimtelijk verloop van de golfhoogte ziet er realistisch uit. Hier zijn geen uitschieters of onbetrouwbare resultaten waargenomen.
- Het ruimtelijk beeld van het HBN vertoont, zoals te verwachten, sterke overeenkomsten met dat van de golfhoogte. Dat geldt voor alle regio's. De variaties in HBN zijn het gevolg van geometrische verschillen. Opgemerkt moet worden dat op 23 geïsoleerde locaties in de Waddenzee de berekening niet is geconvergeerd, in alle gevallen voor slechts 1 herhalingsstijd. Hydra-Ring geeft aan als de berekening niet is geconvergeerd. Om deze reden is het niet nodig deze locaties te verwijderen.

Hydra-Ring en Hydra-K resultaten zijn uitgebreid met elkaar vergeleken. Veranderingen als gevolg van aanpassingen in statistiek, het in rekening brengen van kennisonzekerheden en verschillen in de gehanteerde rekenmethoden (technieken, correlaties, etc.) zijn geduid. Hieruit trekken we de conclusie dat de afgeleide lokale waterstanden, HBN's en golfhoogtes betrouwbaar zijn.

## 5.2 Aanbevelingen

Uit deze studie komen een aantal aanbevelingen naar voren:

- De zeewaterstand statistiek bevat een dubbeltelling van de zeespiegelstijging. Aanbevolen wordt om deze in Hydra-Ring (en waarschijnlijk ook Hydra-Zout en Hydra-NL) aan te passen.

- In de huidige implementatie van modelonzekerheden in Hydra-Ring op de golfparameters worden golfhoogte en golfperiode onafhankelijk beschouwd. Dit leidt tot een fors effect van deze onzekerheden. Aanbevolen wordt na te gaan hoe de afhankelijkheid van deze parameters in de implementatie van modelonzekerheden in golfperiode en golfhoogte meegenomen kan worden.



## 6 Referenties

- Deltares (2009). Extreme wind statistics for the Hydraulic Boundary Conditions for the Dutch primary water defences. SBW-Belastingen: Phase 2 of subproject "Wind Modelling". Deltares report 1200264-005, September 2009 (S. Caires).
- Deltares (2010). Toets- en Rekenpeilen Kust en Estuaria ten behoeve van de HR2011. WTI-HRzout. Deltares rapport 1202341-002-HYE-0060, November 2010 (D. Dillingh, D. en J. de Lima Rego).
- Deltares (2011). Samenvatting van analyse slachtofferrisico's en maatschappelijke kosten-batenanalyse Waterveiligheid. Deltares rapport 1204144-005-ZWS-0002, Mei 2011.
- Deltares (2012). Achtergrondrapportage HR2011 voor zee en estuaria. Deltares rapport 1204143-002, maart 2012 (C. Gautier en J. Groeneweg).
- Deltares (2014). Hydra reference runs based on WTI2011. Deltares report 1209433-003-HYE-0002, December 2014 (A. Camarena Calderon and J. Morris)
- Deltares (2015). Modelonzekerheid Hydra-Ring. Wettelijk toetsinstrumentarium WBI-2017. Deltares rapport 1209433-008-HYE-0007, juni 2015 (E.H. Chbab en J. Groeneweg)
- Deltares (2016a). Hydraulische Belastingen 2017 voor Duinwaterkeringen. Deltares rapport 1220082-004-HYE-0003, maart 2016 (J. den Bieman).
- Deltares (2016b). Basisstochasten WBI-2017, Statistiek en statistische onzekerheid. Rapport Deltares 1209433-012-HYE-0007, januari 2016 (E.H. Chbab).
- Deltares (2016c). Hydraulische Belastingen Oosterschelde. Deltares rapport 1230087-006-HYE-0001, november 2016 (J. den Bieman).
- 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.
- Dillingh, D., de Haan, L., Helmers, R., Können, G.P., en van Malde J. (1993). De basispeilen langs de Nederlandse kust; statistisch onderzoek, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdenwateren /RIKZ, Report DGW-93,023.
- HKV (2010). Effect nieuwe windstatistiek op toetspeilen en benodigde kruinhoogten. HKV rapport PR1601.10. (C.P.M. Geerse en J.W. Verkaik).
- HKV (2014). Vergelijking Hydra-Zout en Hydra-K. Waterstanden en hydraulische belastingniveaus. HKV rapport PR2766.10 (M.T. Duits).

HKV (2016). Duiding verschillen Hydra-K en Hydra-NL. HKV Lijn in Water memo PR3244, d.d. 20 januari 2016 (M. Duits).

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

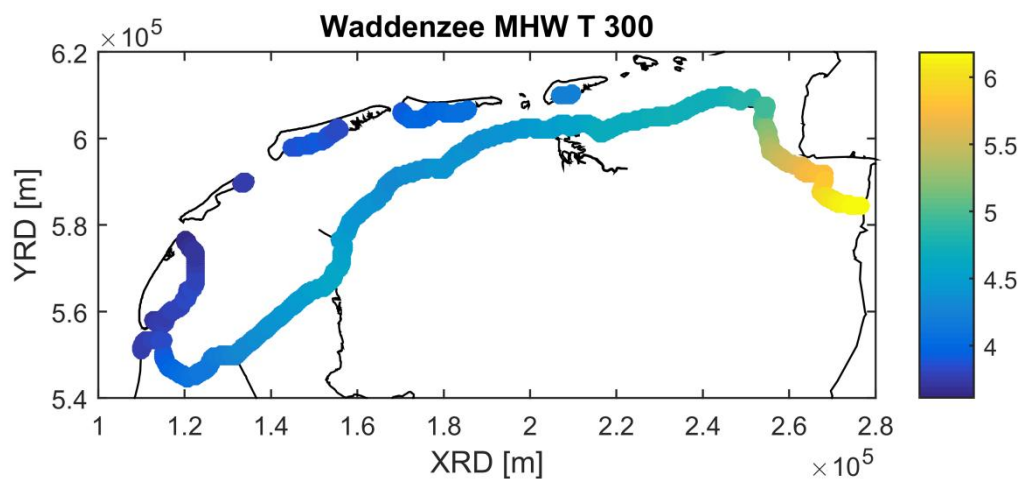
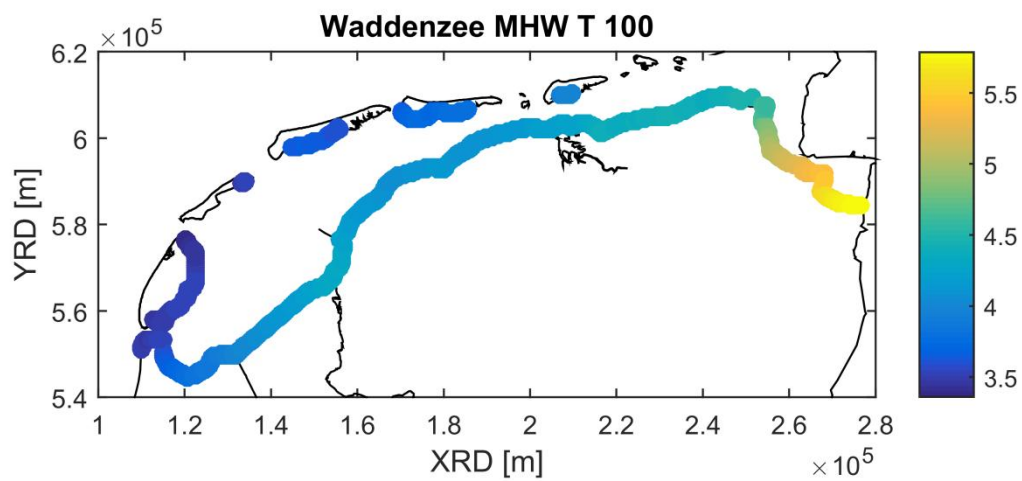
RWS/RIKZ (2006). Achtergrondrapport HR 2006 voor de Zee en Estuaria. Hydraulische Randvoorwaarden 2006. RWS RIKZ rapport 2006.029. Den Haag 2006.

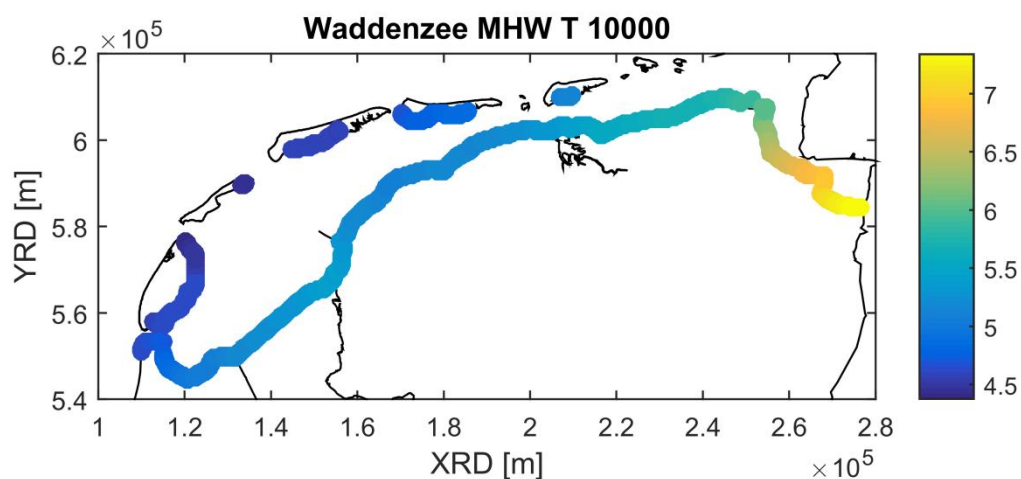
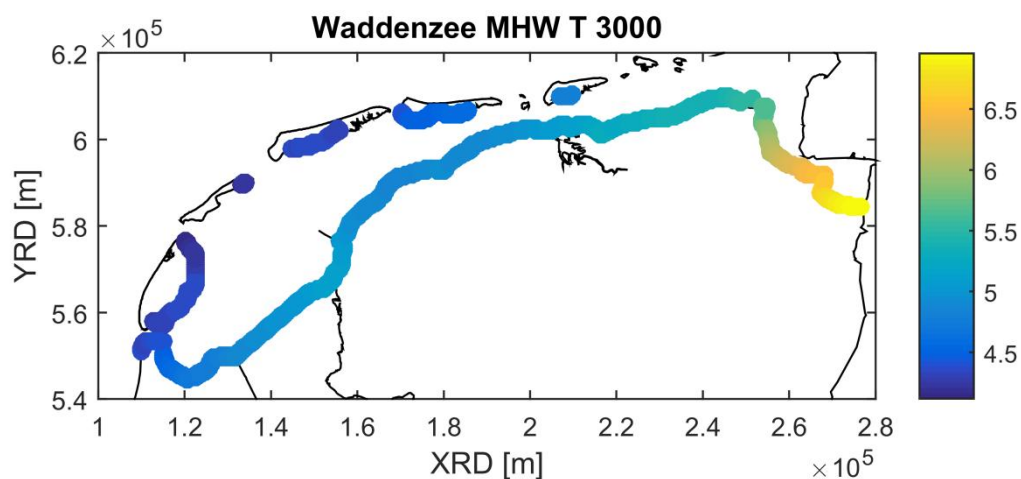
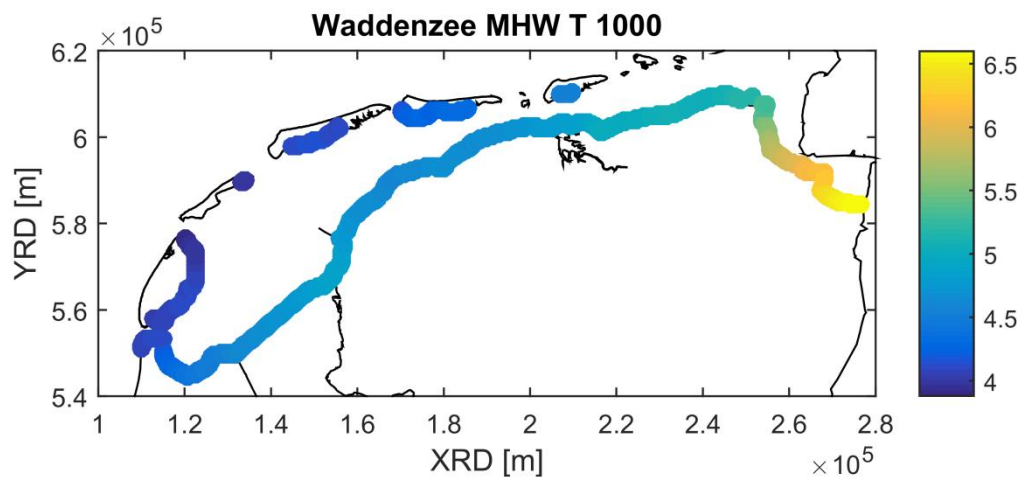
Vrouwenvelder, A.C.W.M., Steenbergen, H.M.G.M en Diermanse, F.L.M. (2003). Belastingmodellen Westerschelde en Waddenzee. Vergelijking Hydra-K en PC-Ring (inclusief resultaten aanvullende studie).

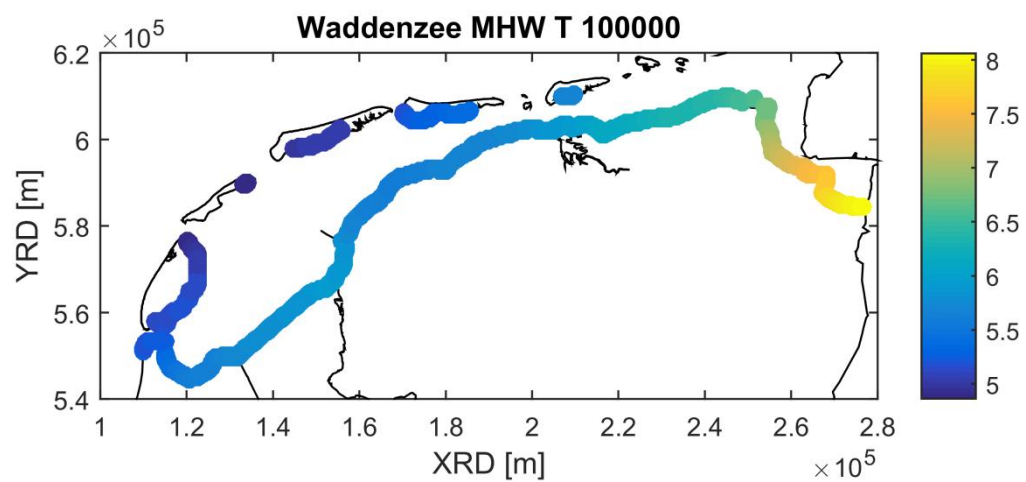
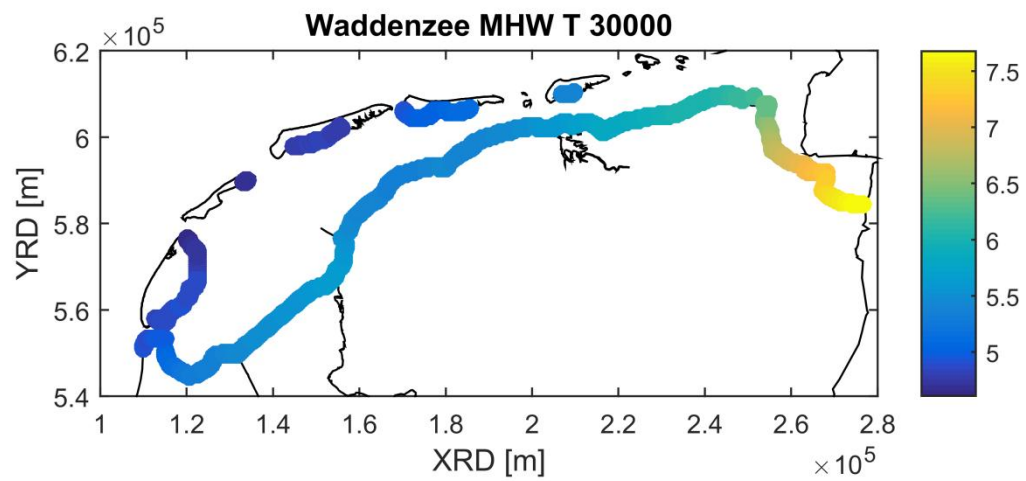
## A Ruimtelijke verdeling waterstanden

Voor de zeven verschillende herhalingstijden worden de ruimtelijke verdelingen van de waterstanden (in de figuren als MHW aangegeven) gegeven, daarbij onderscheid makend in de Waddenzee (incl. een deel van de regio Hollandse Kust Noord nabij Den Helder), Hollandse Kust en Westerschelde.

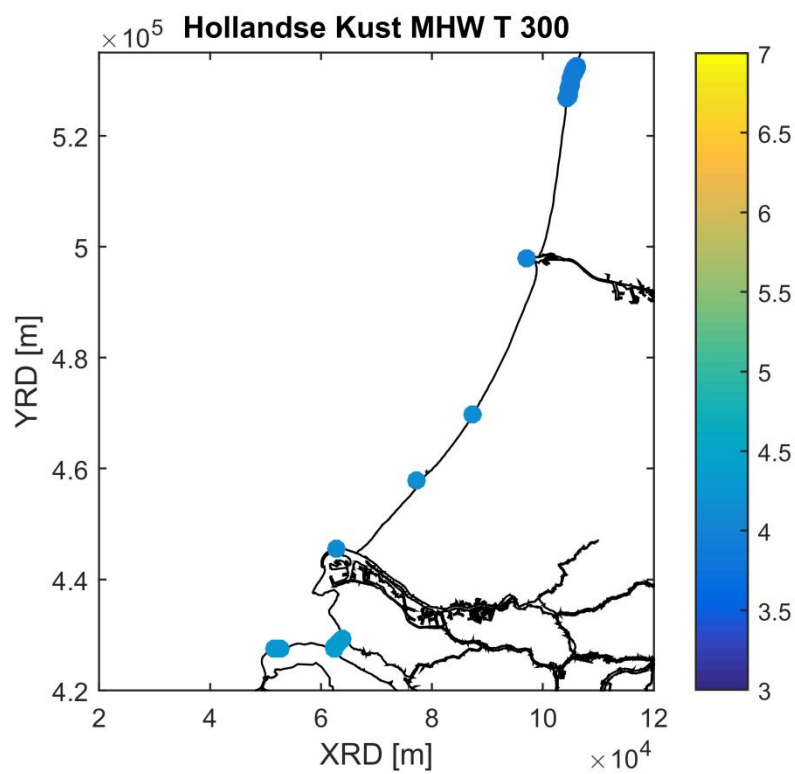
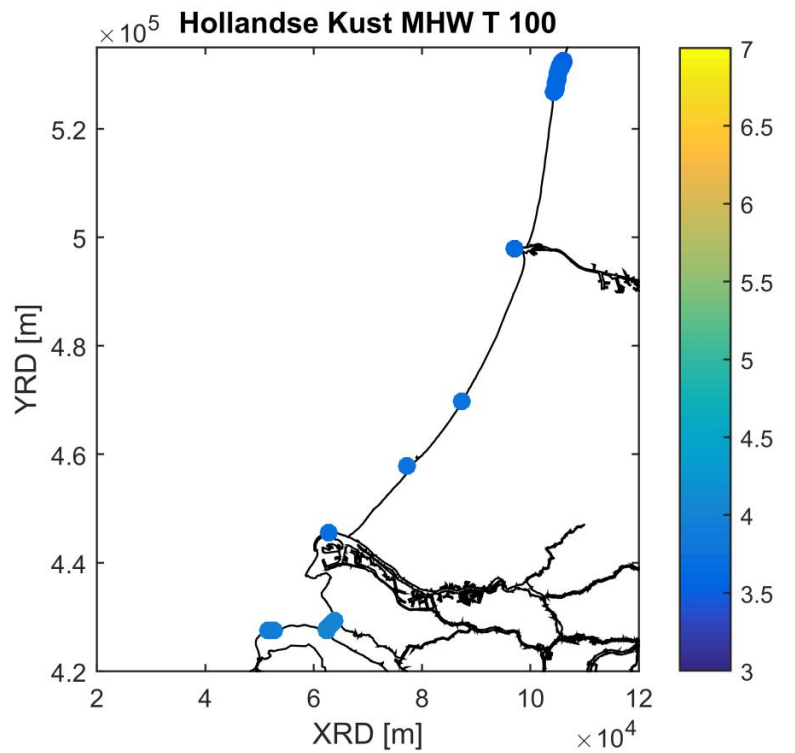
### A.1 Waddenzee

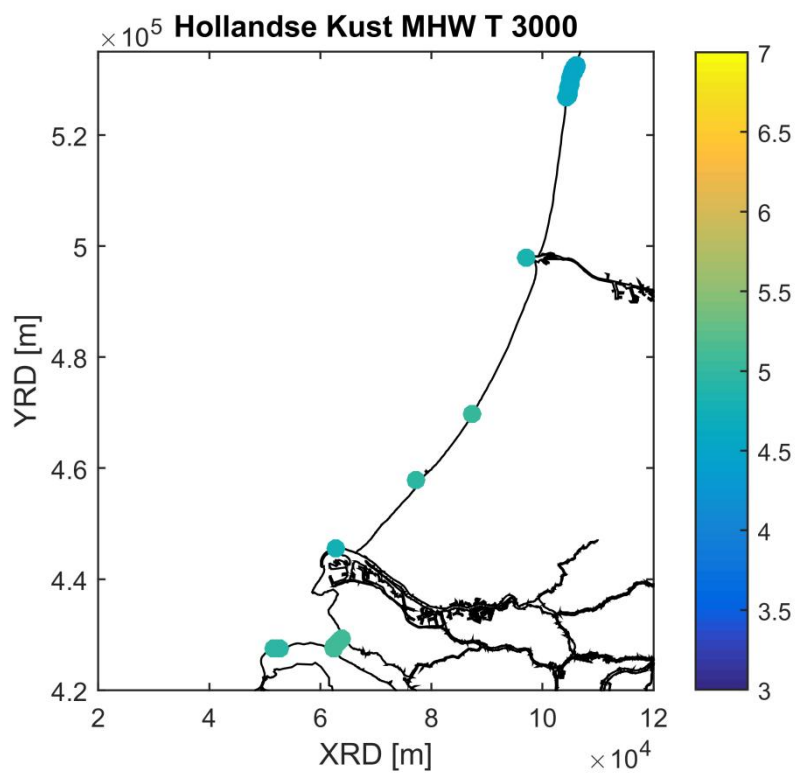
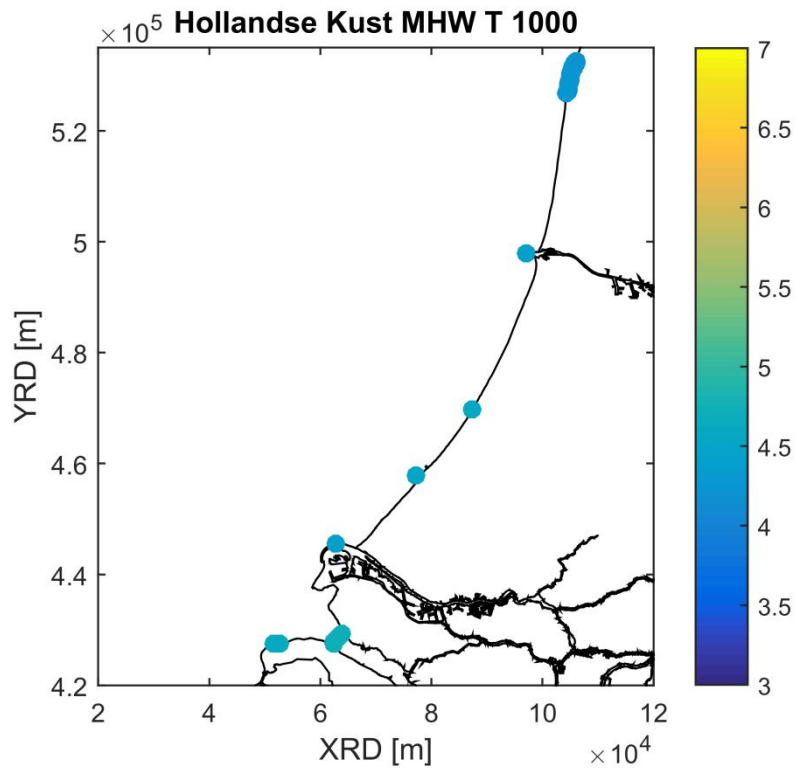


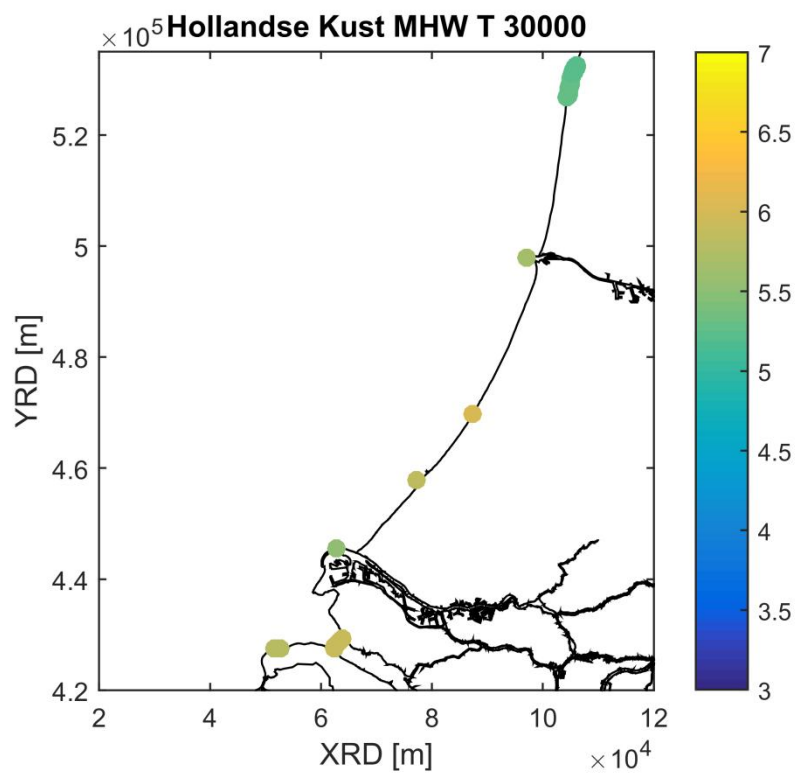
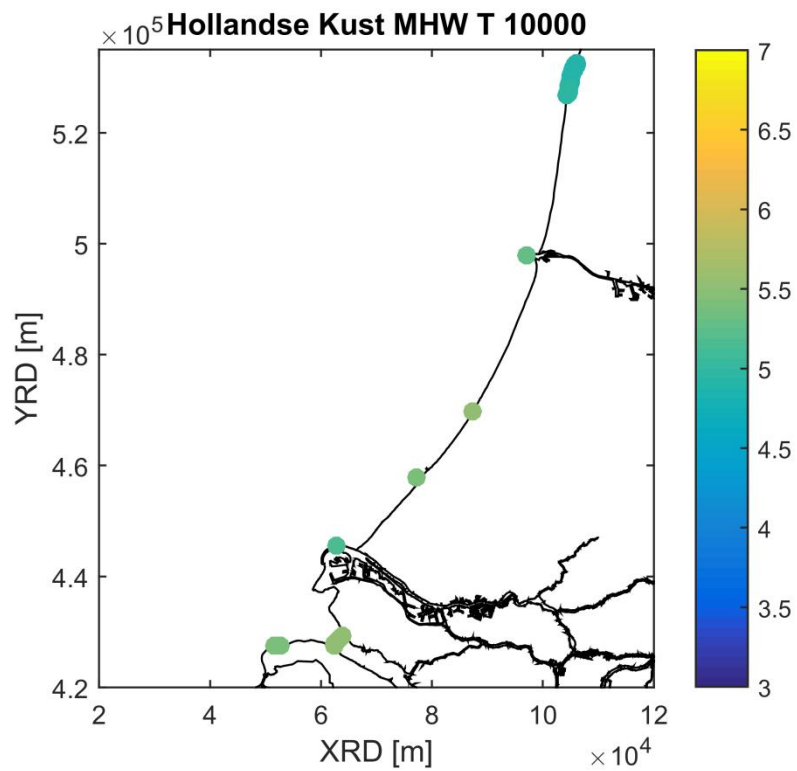


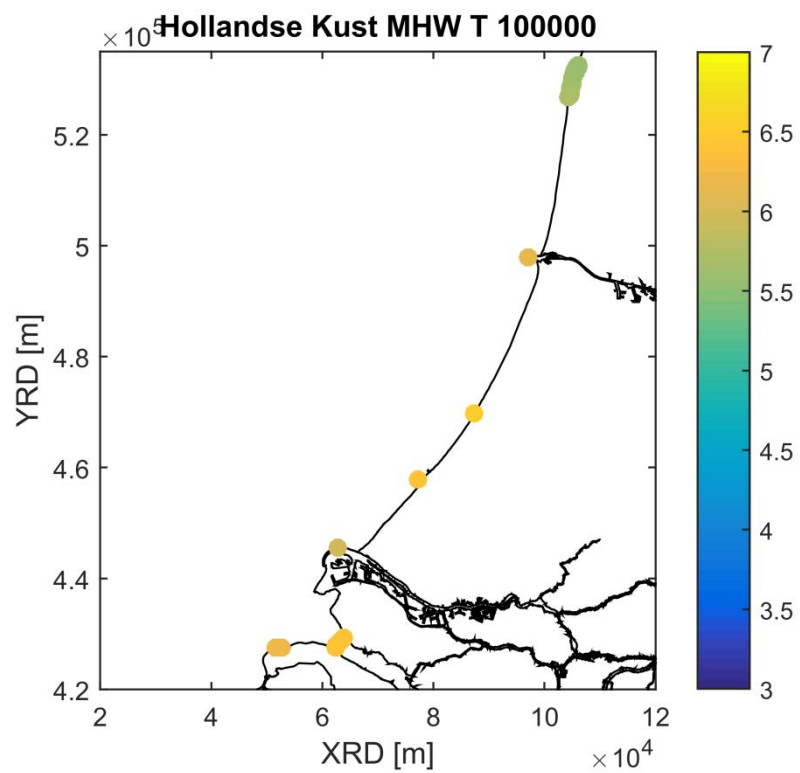


## A.2 Hollandse Kust

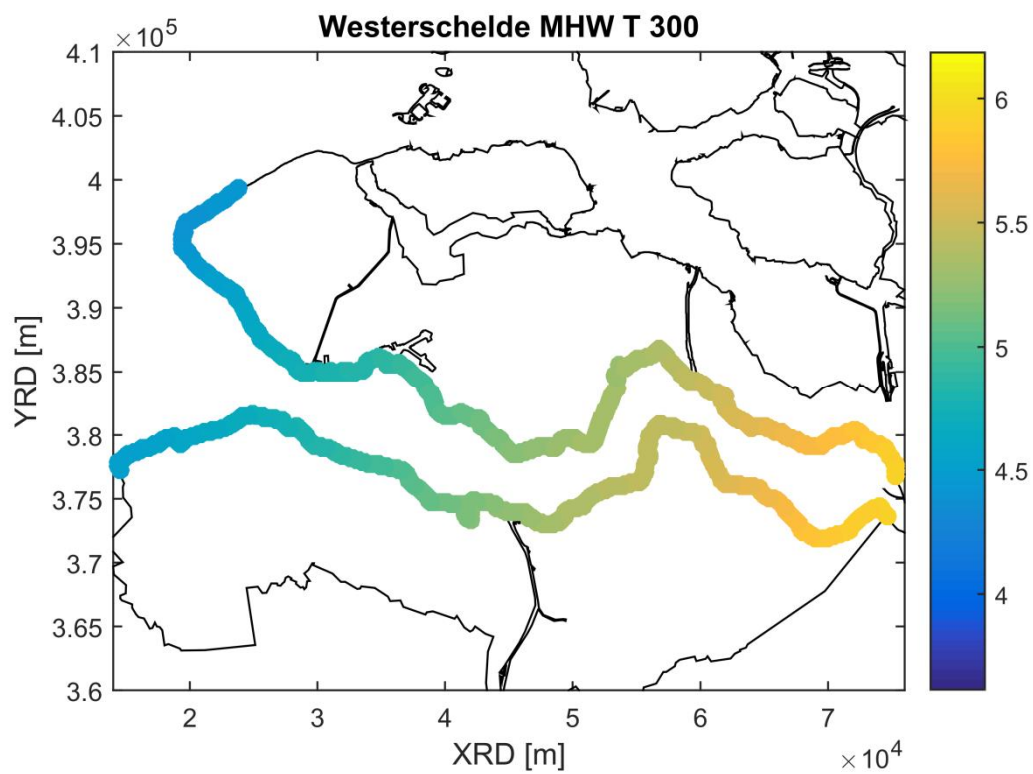
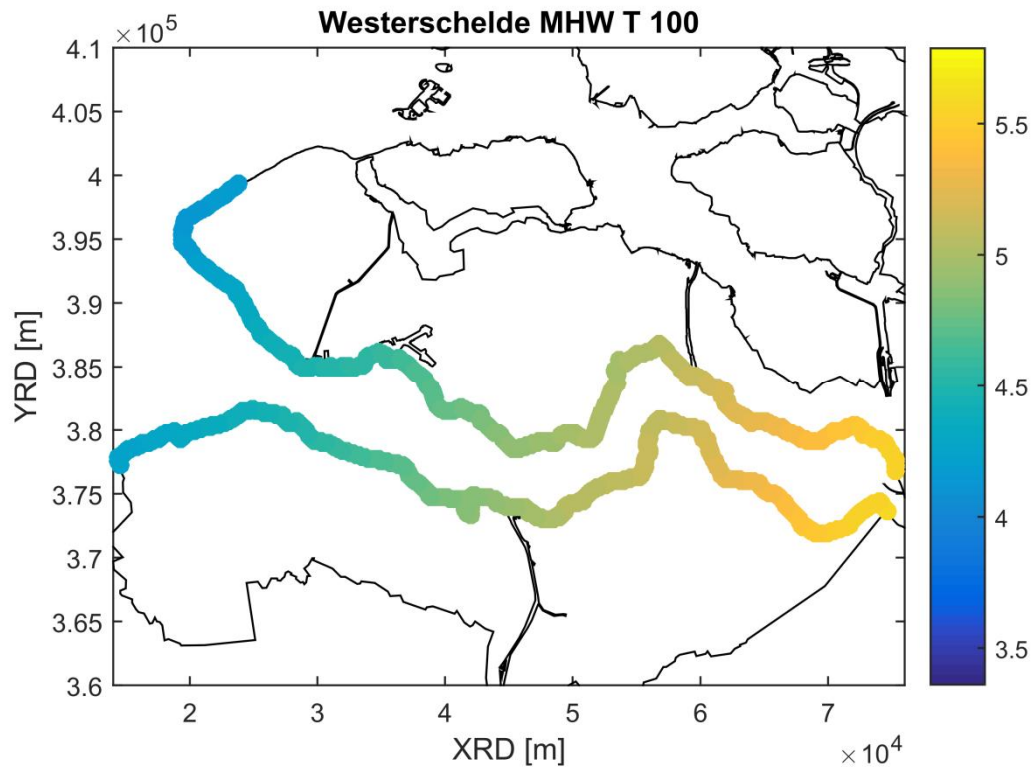


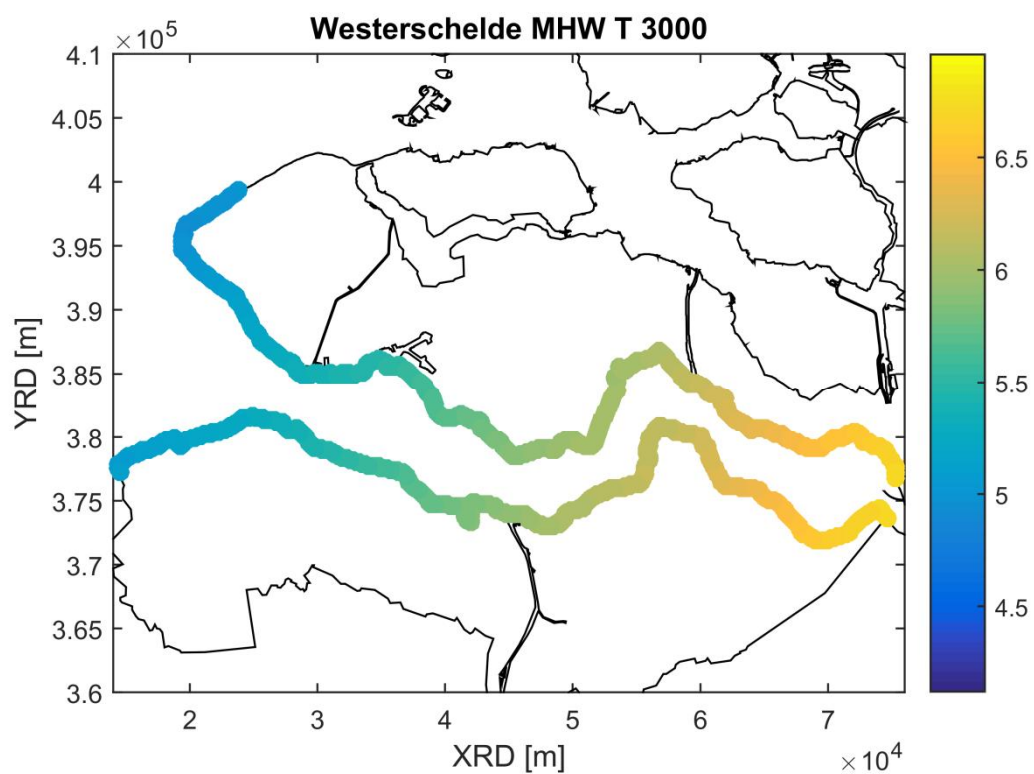
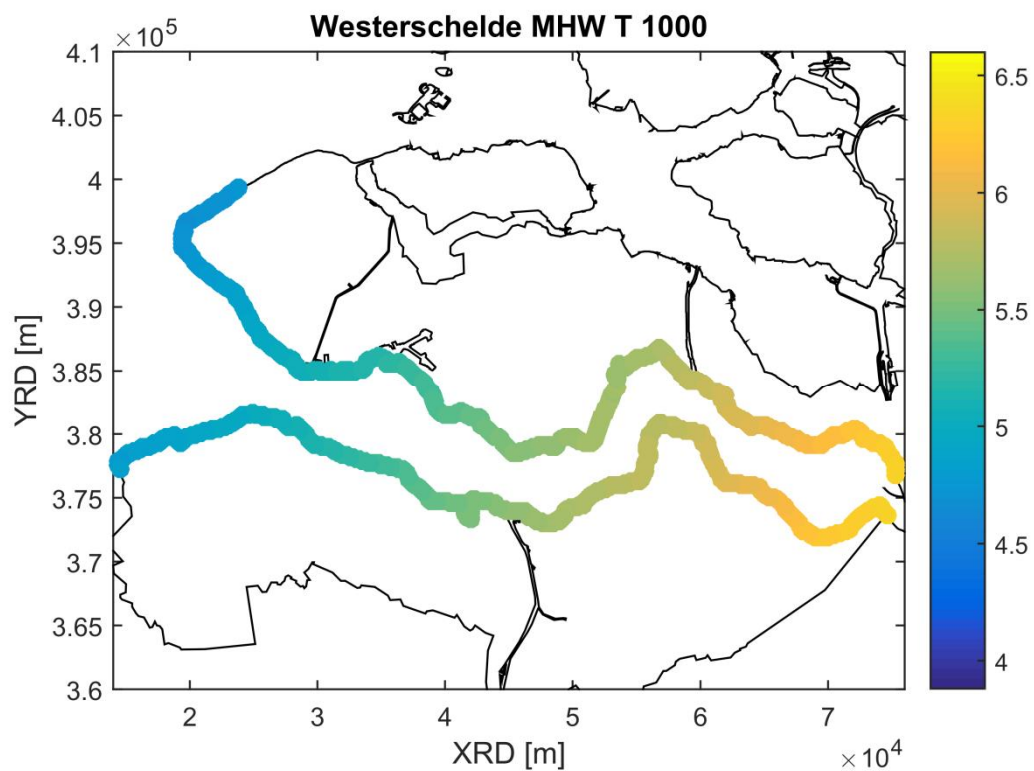


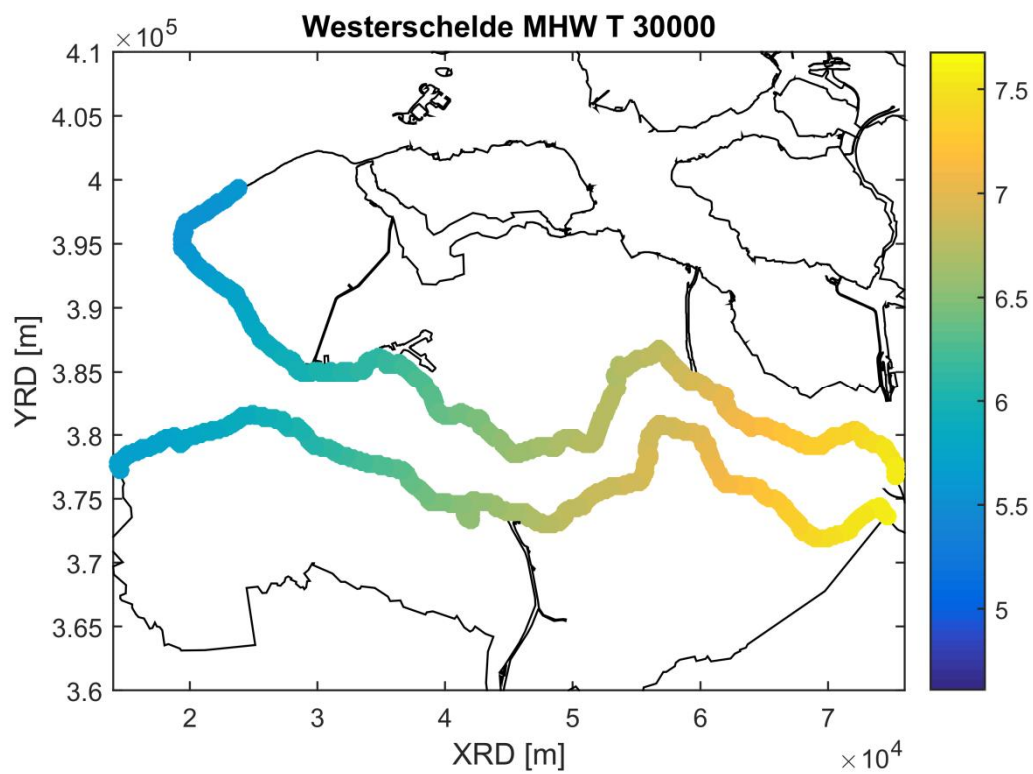
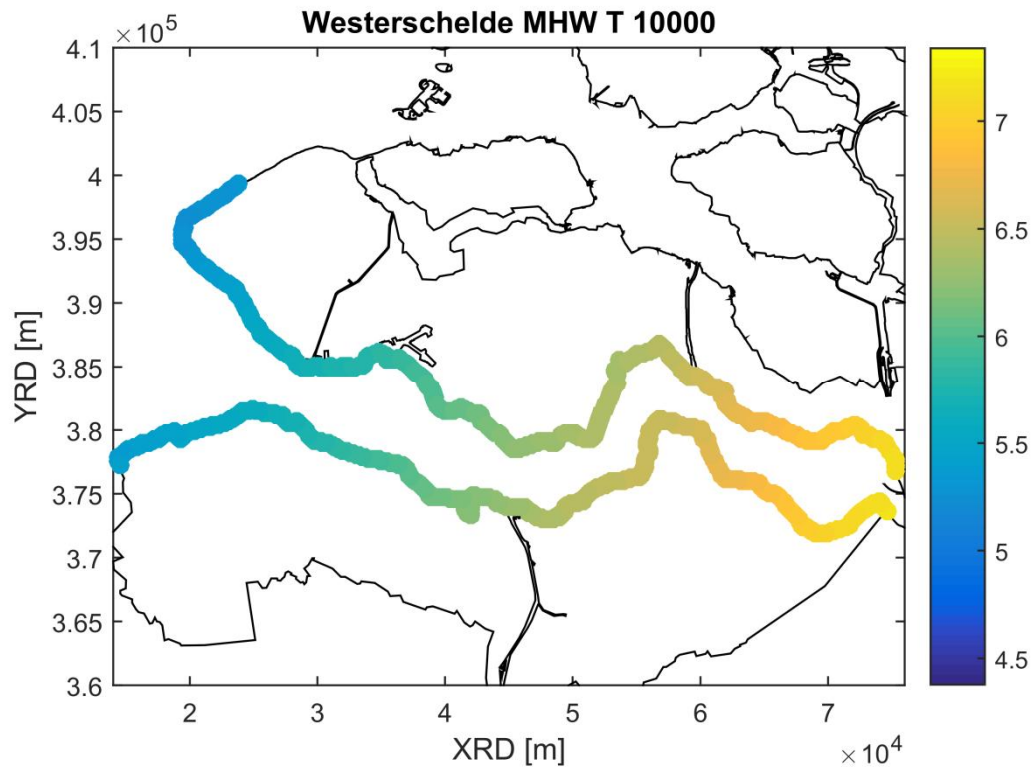


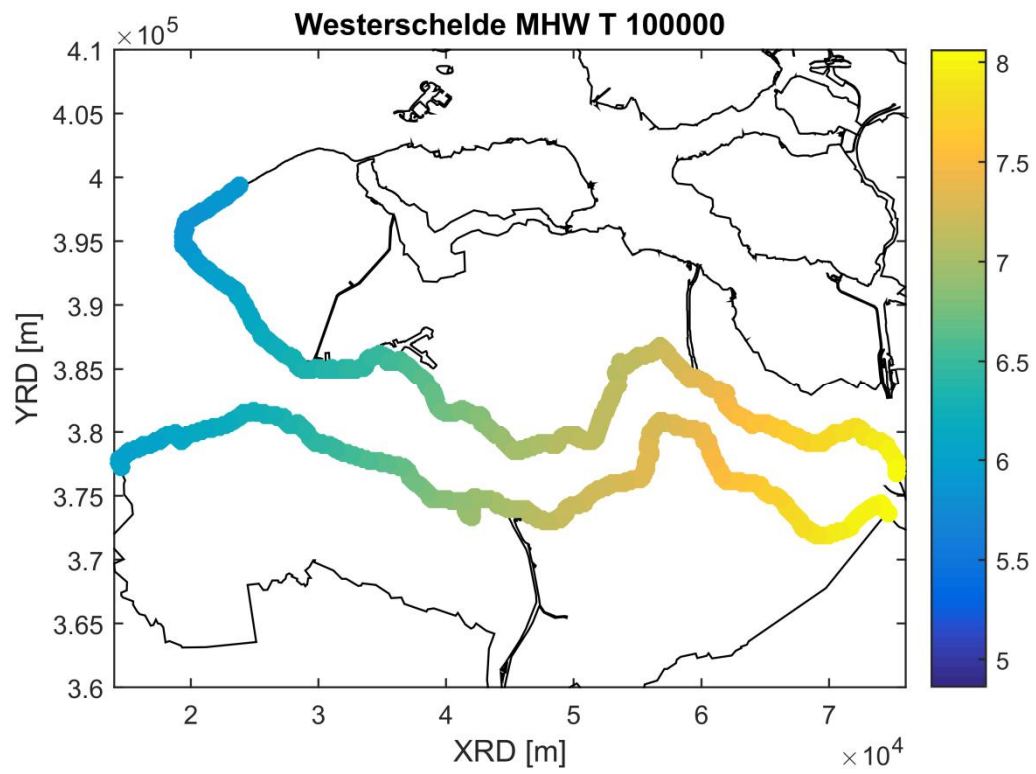


### **A.3 Westerschelde**







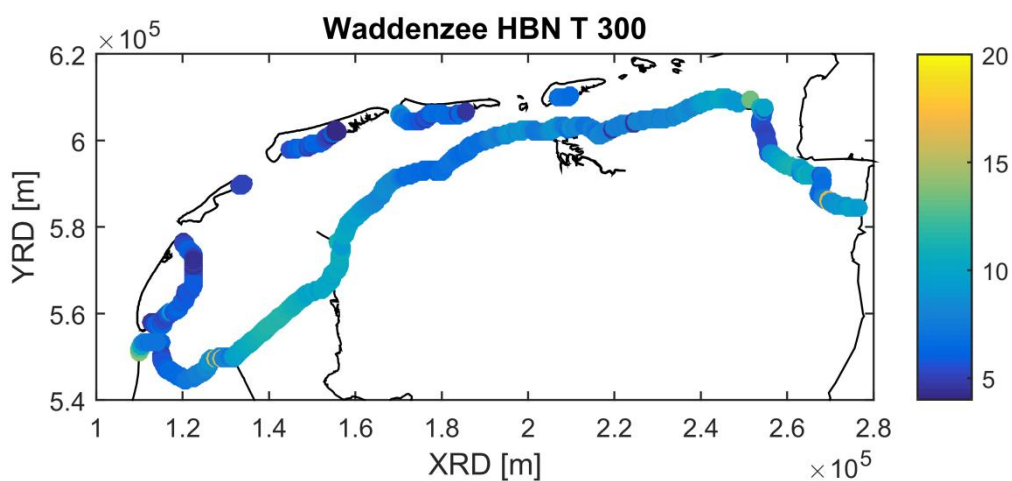
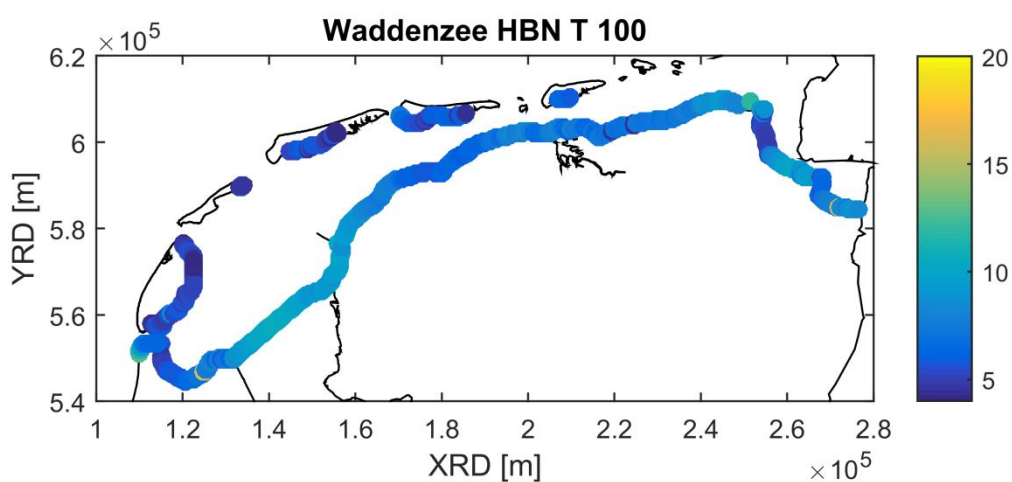


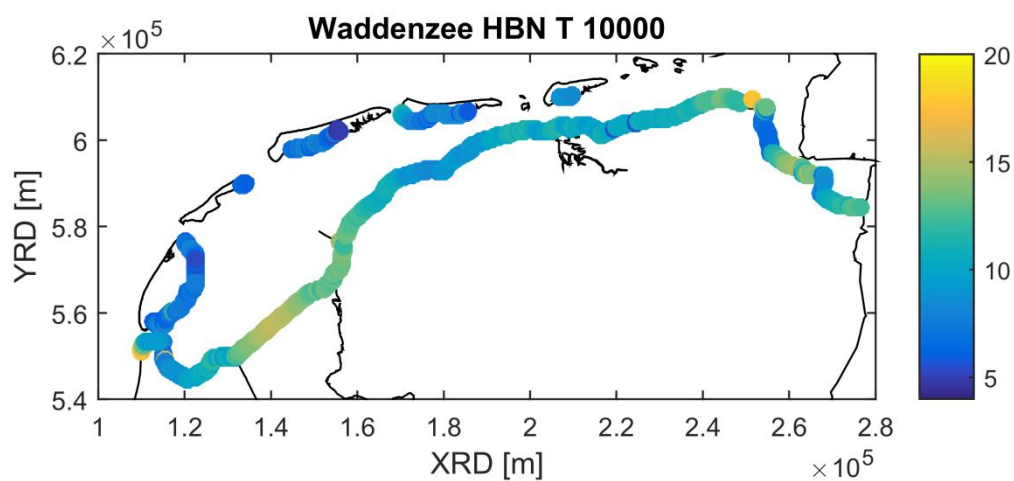
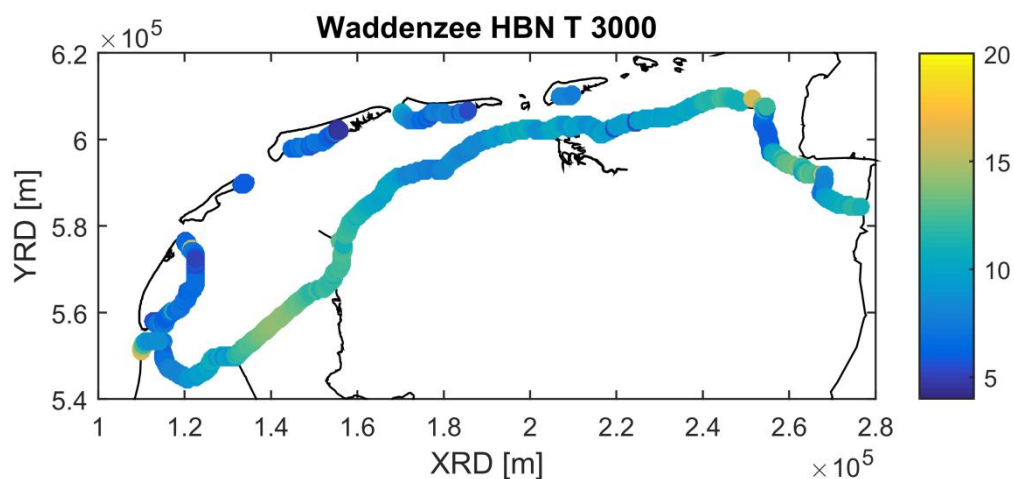
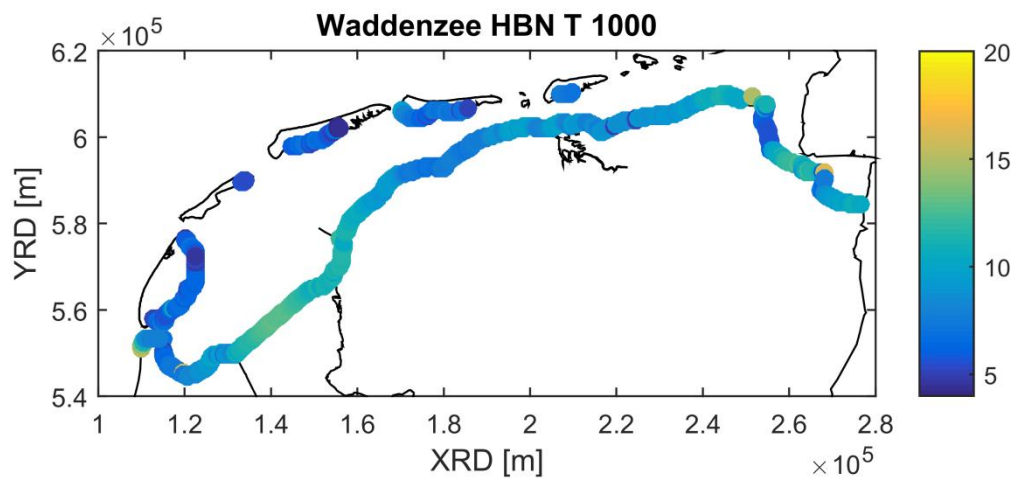


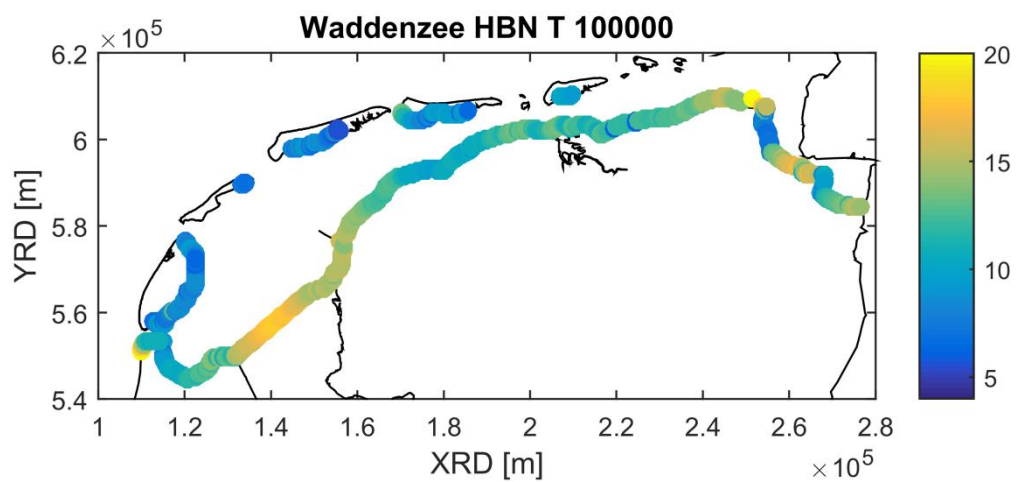
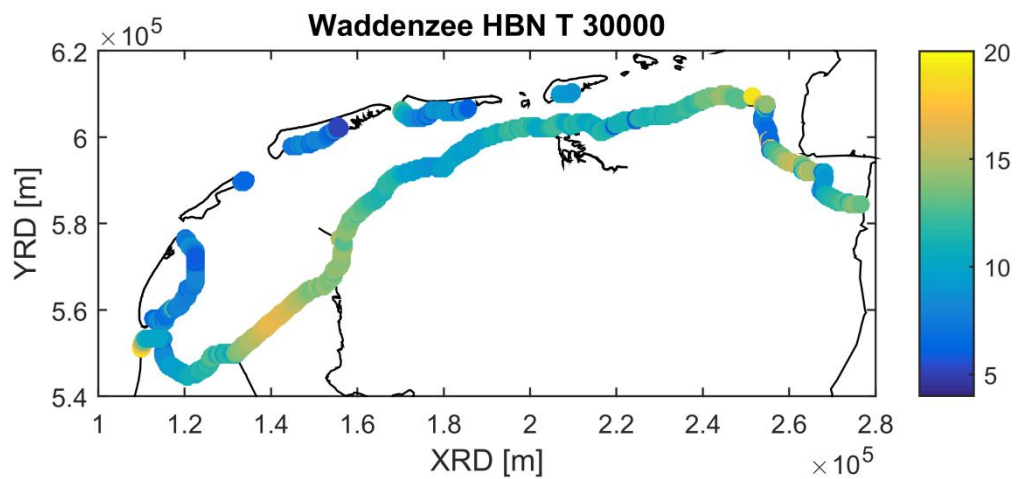
## B Ruimtelijke verdeling HBN

Voor de zeven verschillende herhalingstijden worden de ruimtelijke verdelingen van het Hydraulisch Belastingniveau gegeven, daarbij onderscheid makend in de Waddenzee (incl. een deel van de regio Hollandse Kust Noord nabij Den Helder), Hollandse Kust en Westerschelde.

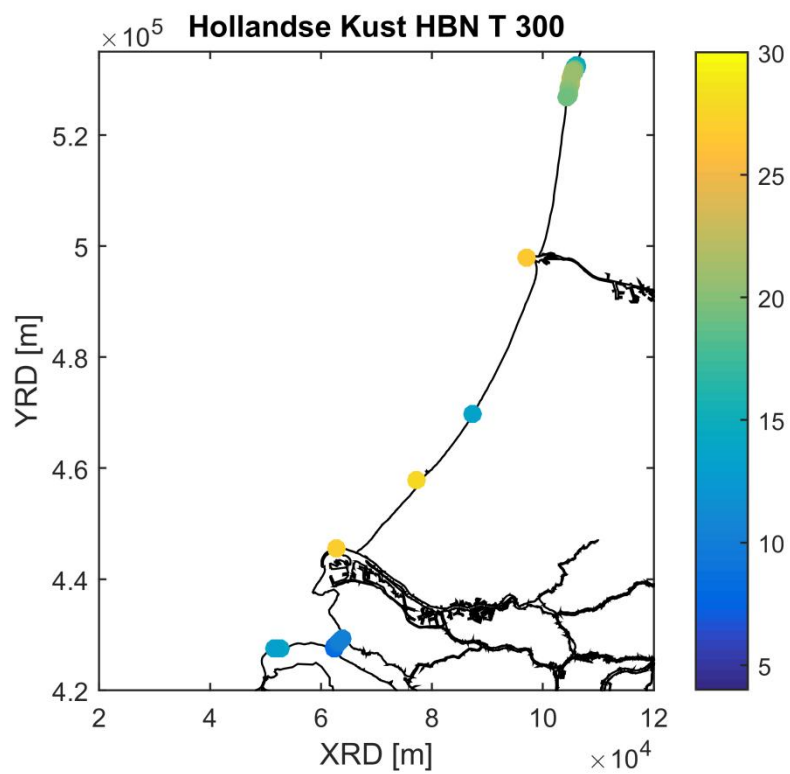
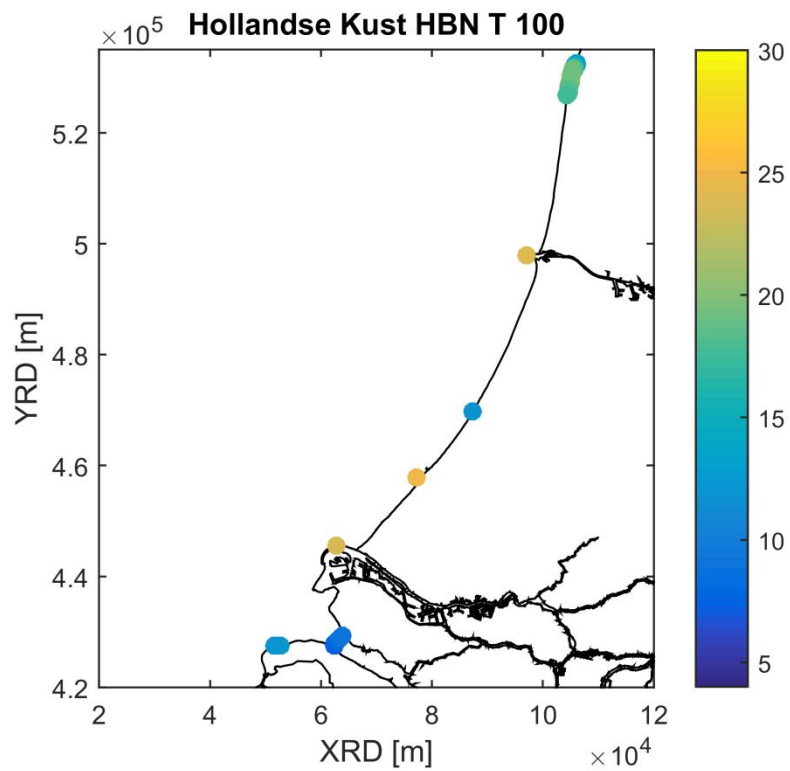
### B.1 Waddenzee

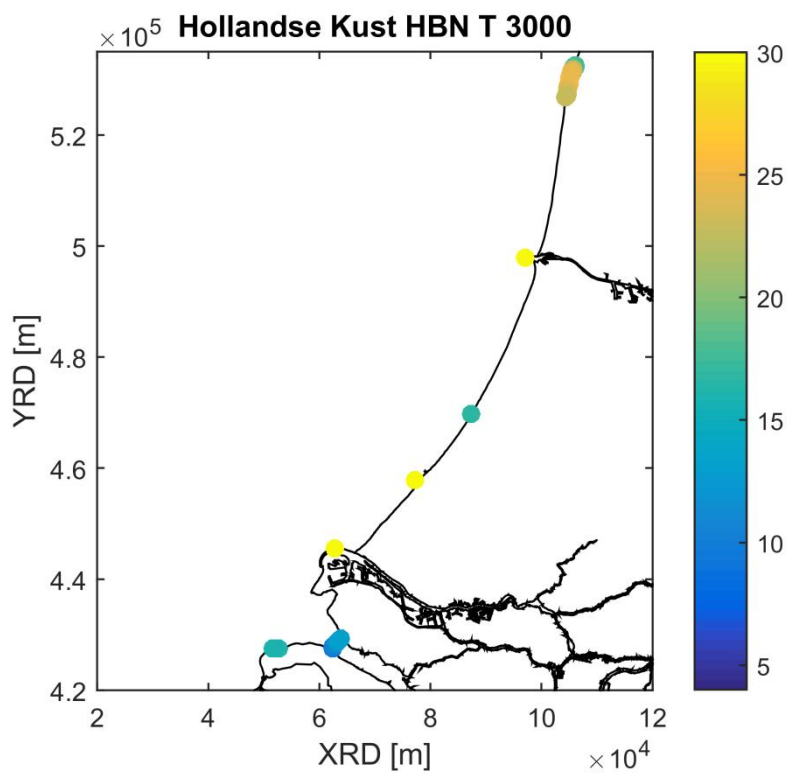
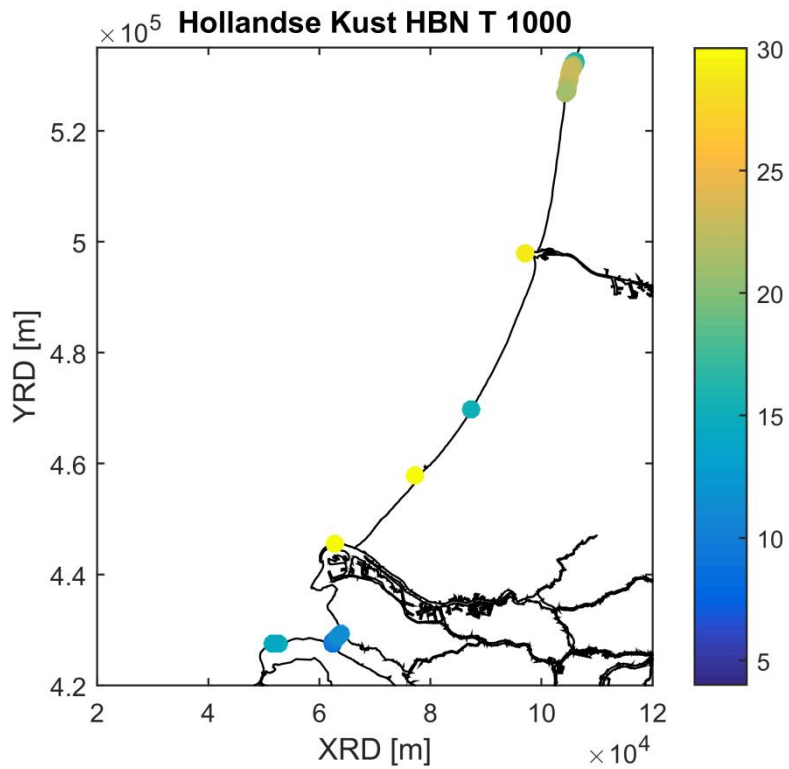


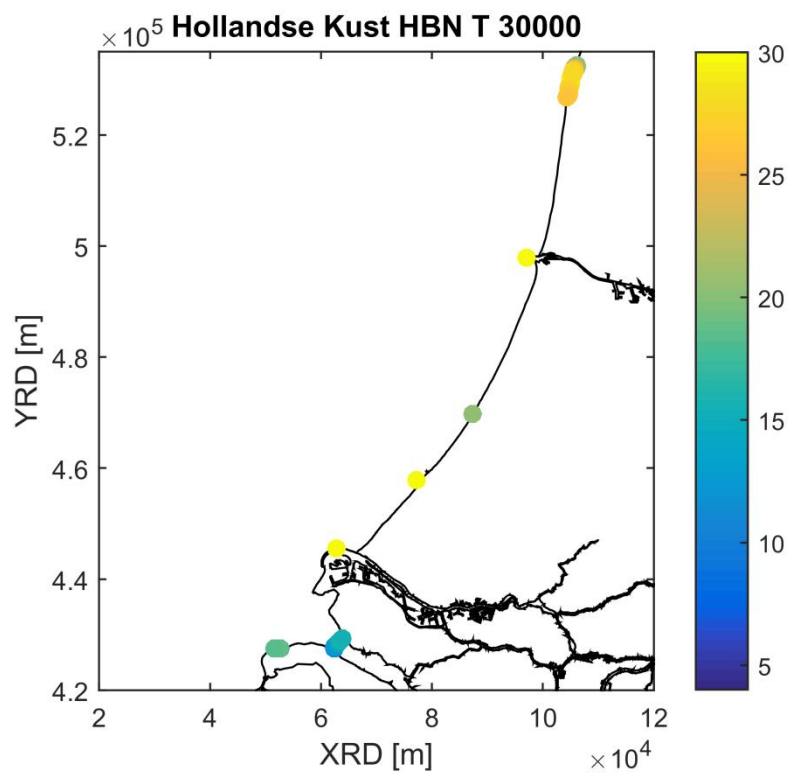
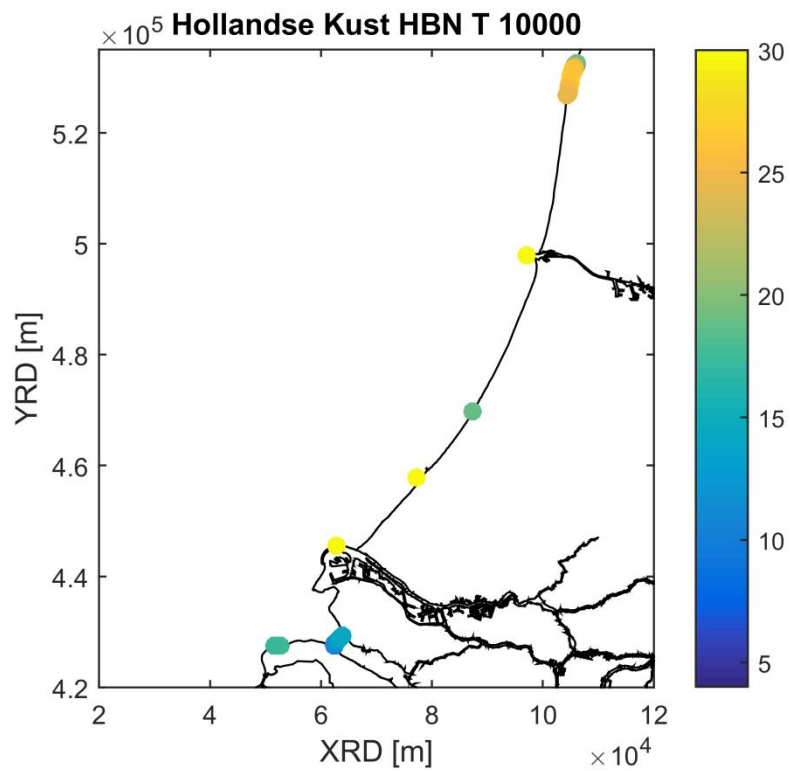


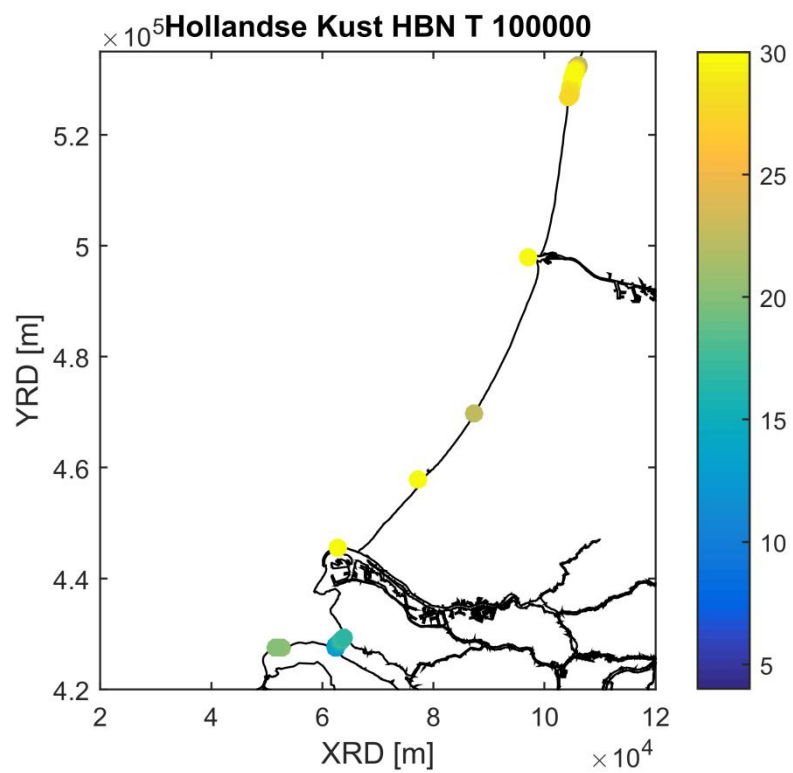


## B.2 Hollandse Kust

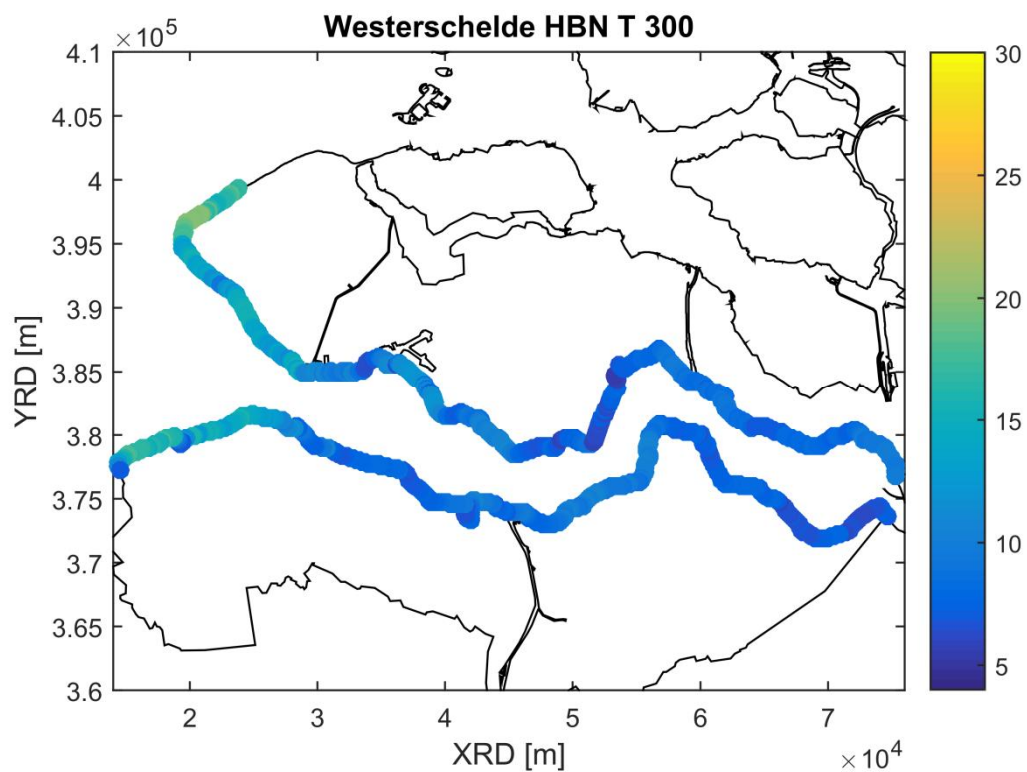
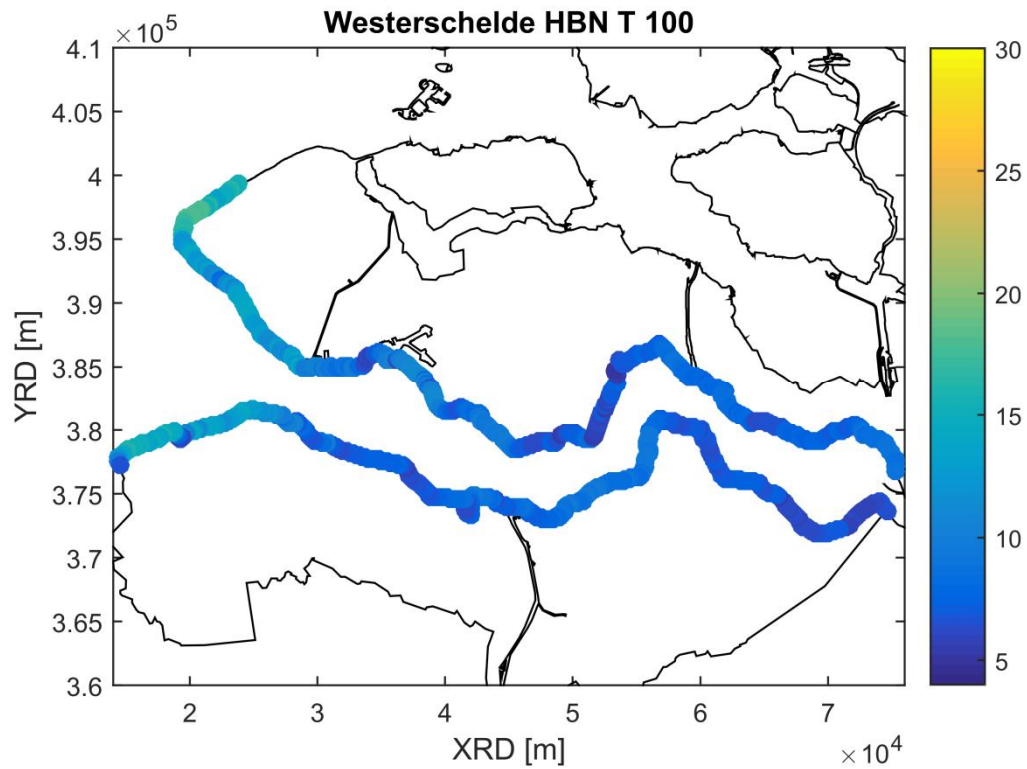


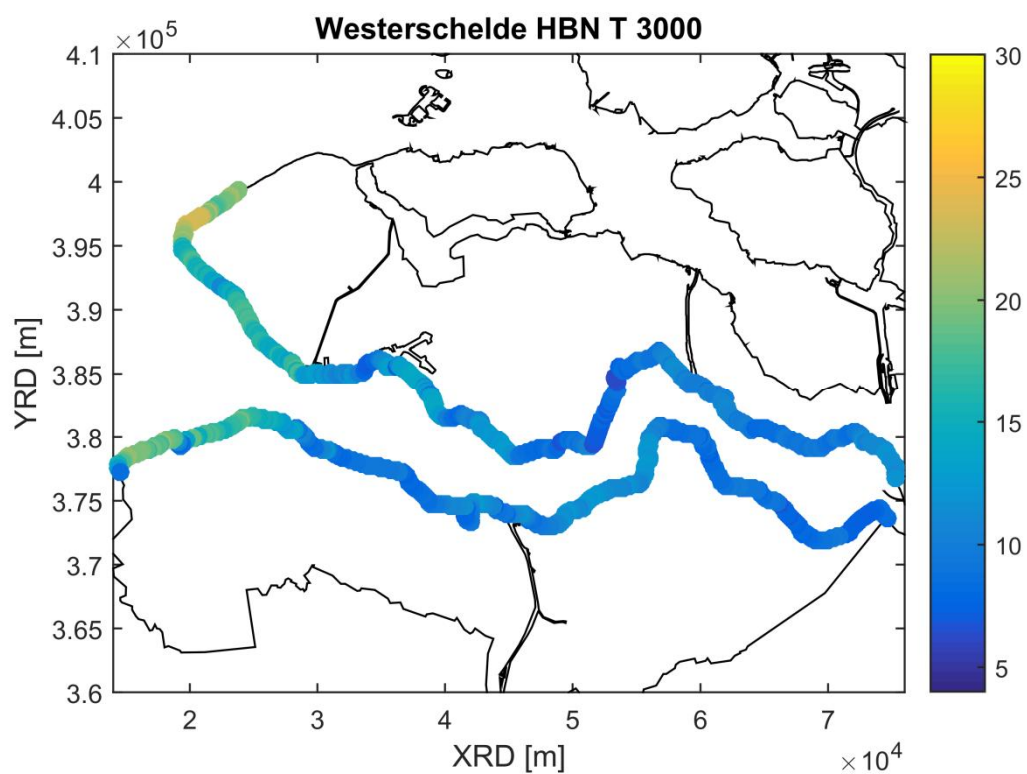
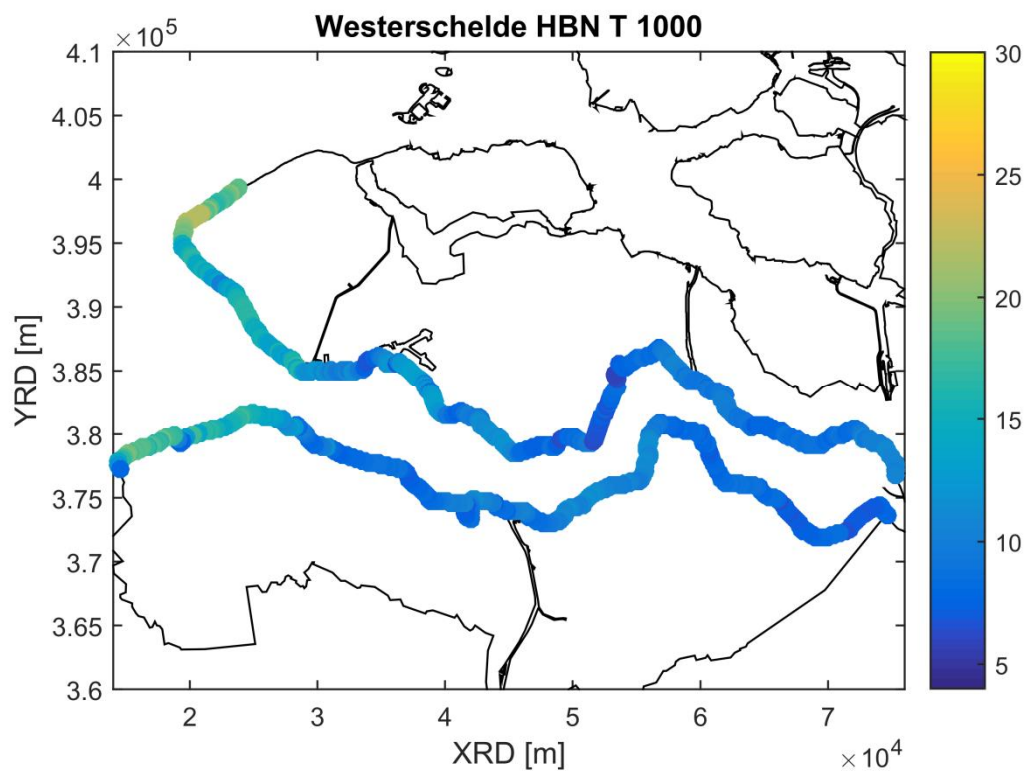


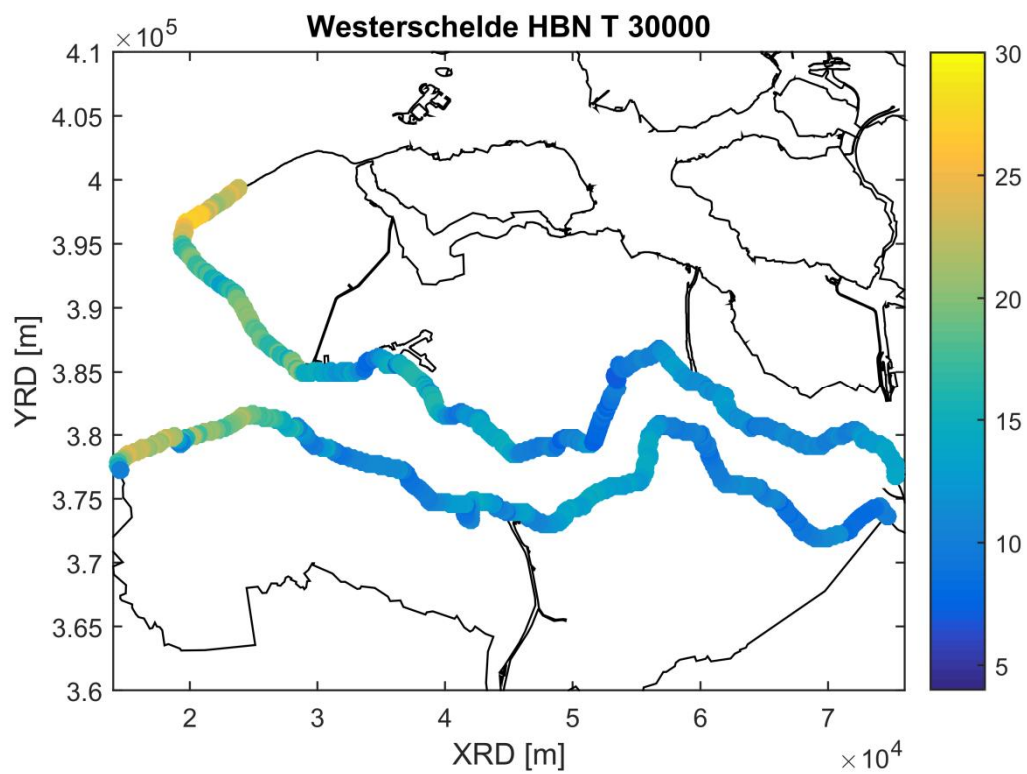
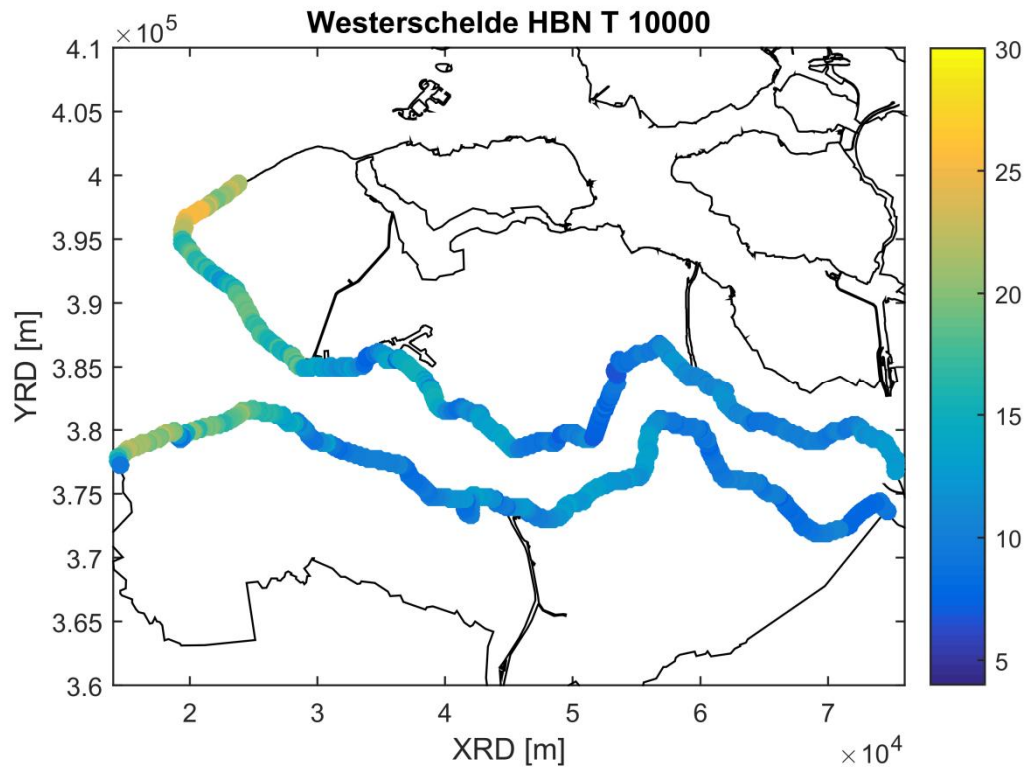


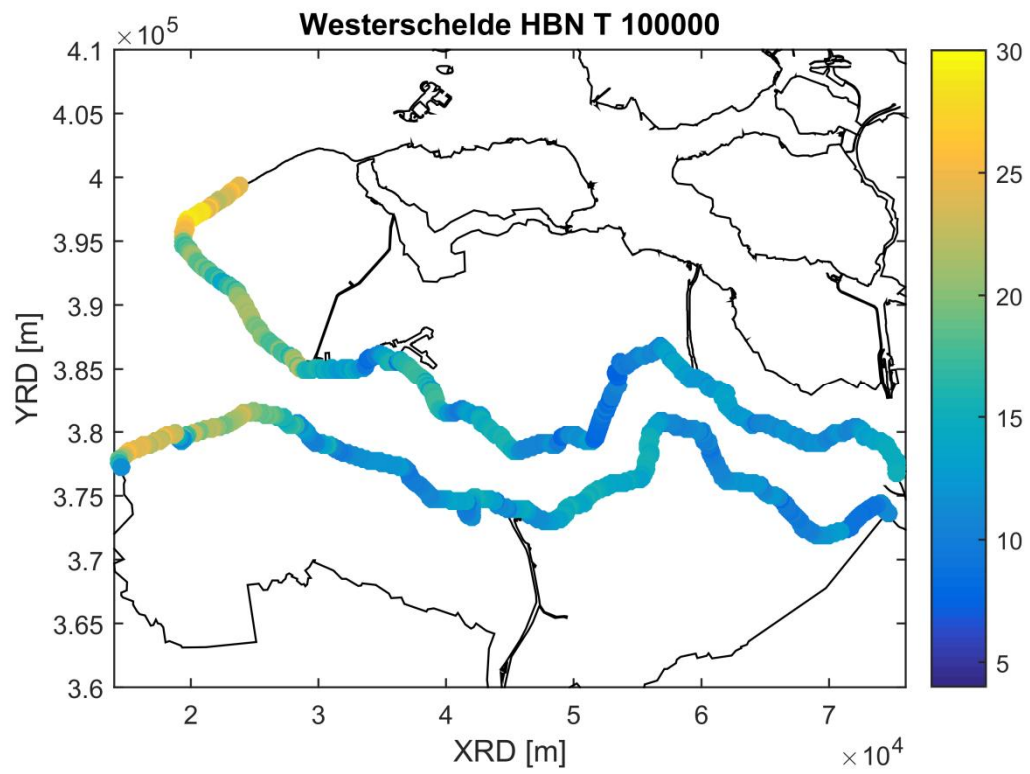


### **B.3 Westerschelde**







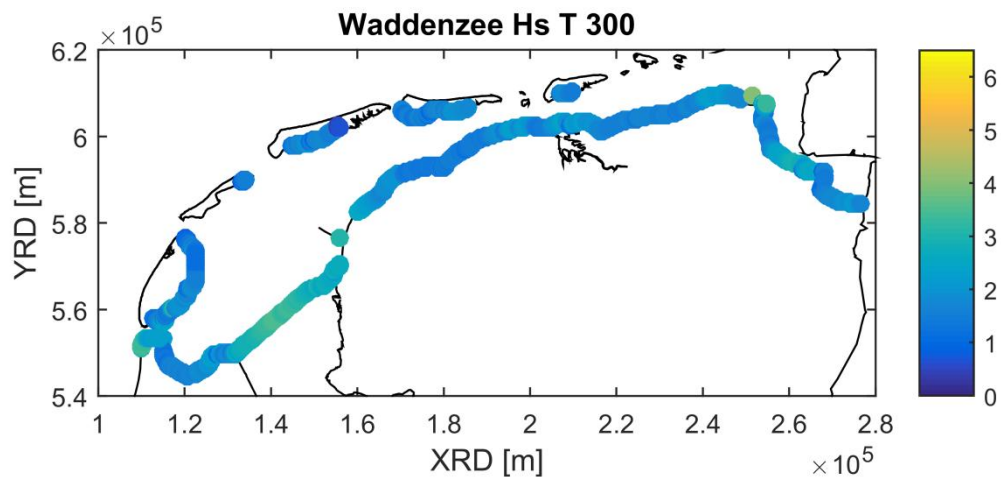
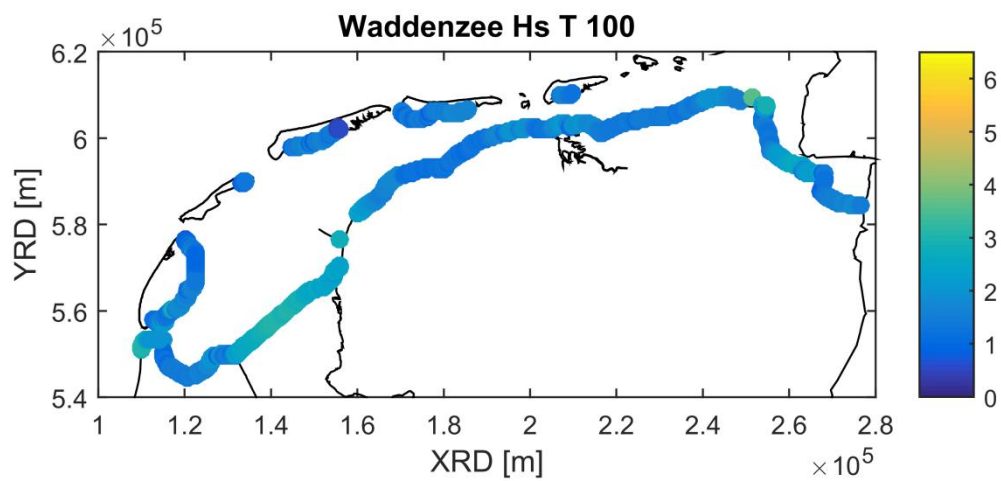


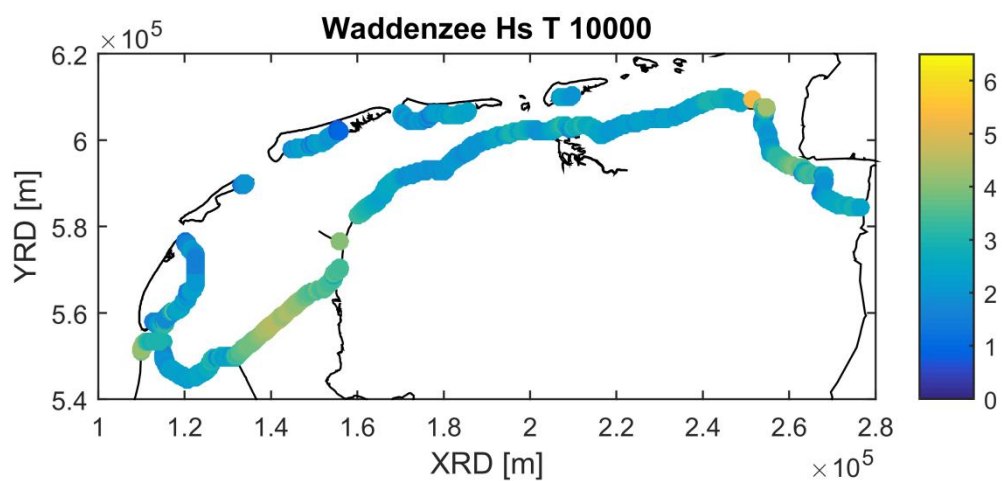
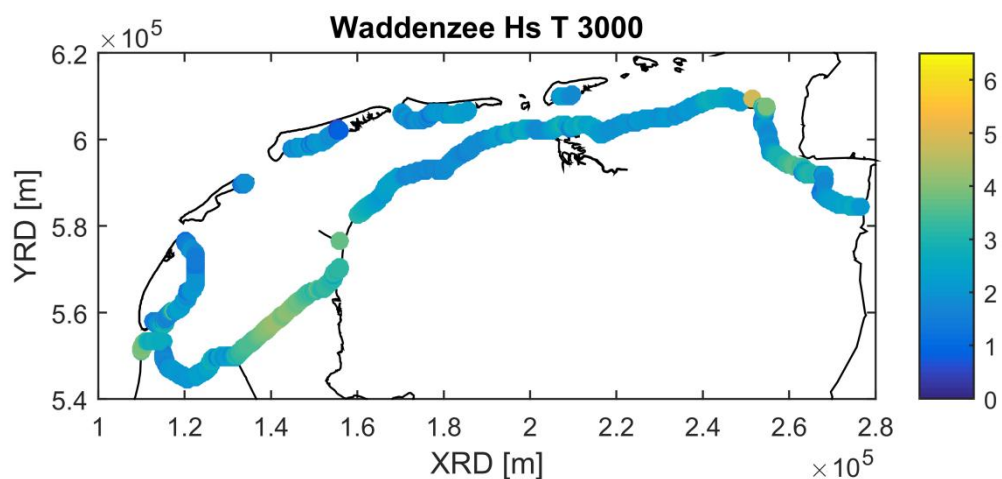
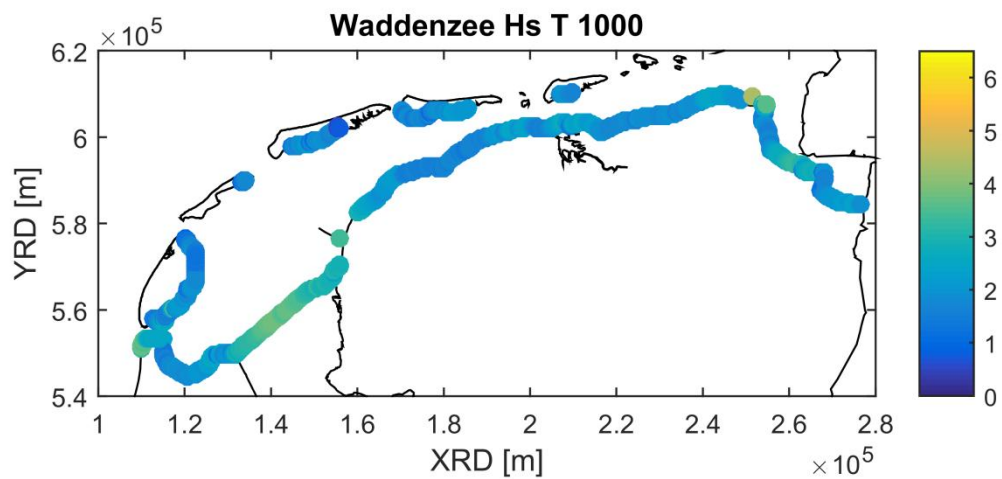


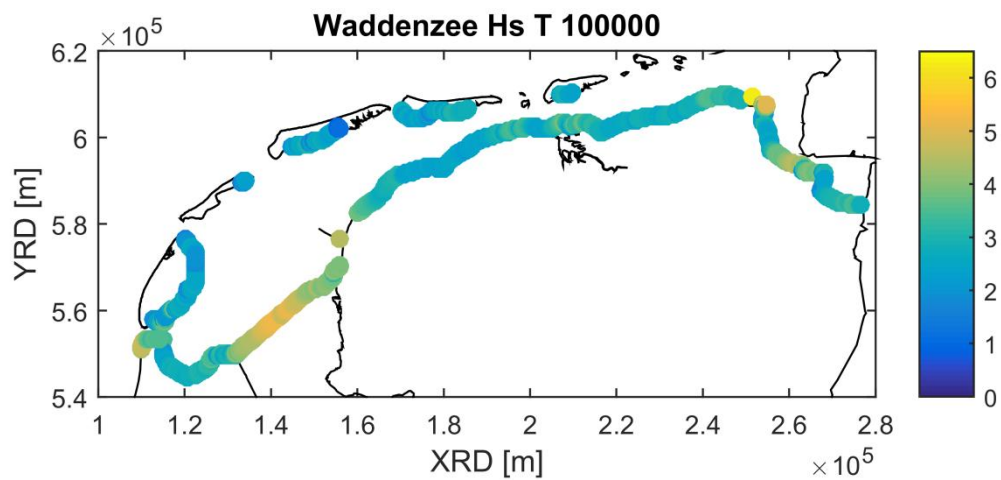
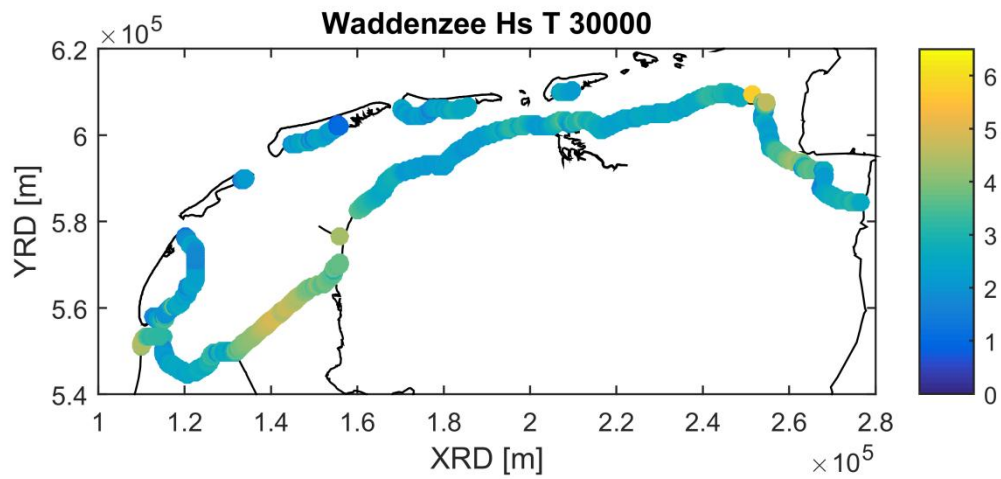
## C Ruimtelijke verdeling golfhoogtes

Voor de zeven verschillende herhalingstijden worden de ruimtelijke verdelingen van de significante golfhoogte gegeven, daarbij onderscheid makend in de Waddenzee (incl. een deel van de regio Hollandse Kust Noord nabij Den Helder), Hollandse Kust en Westerschelde.

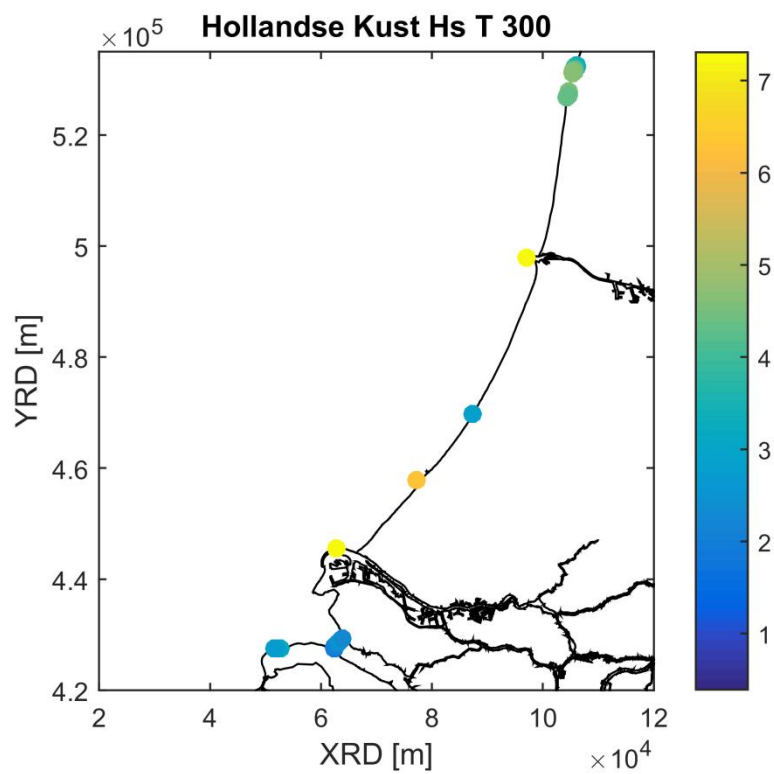
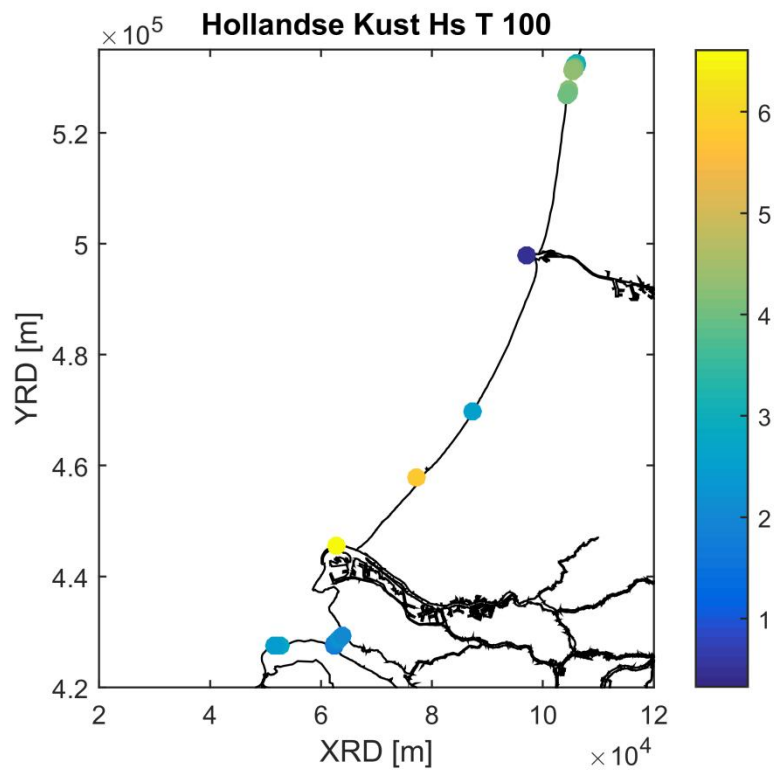
### C.1 Waddenzee

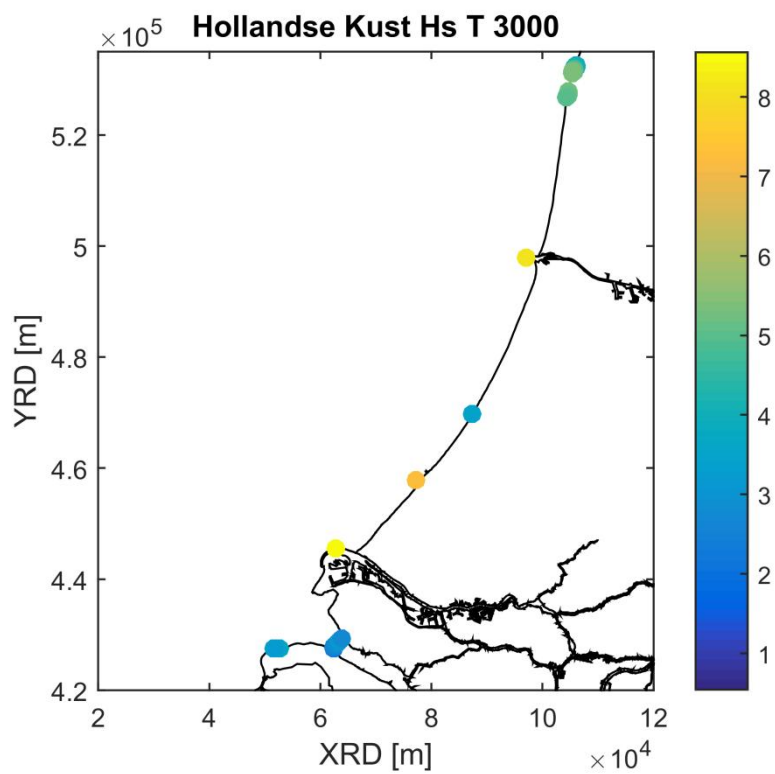
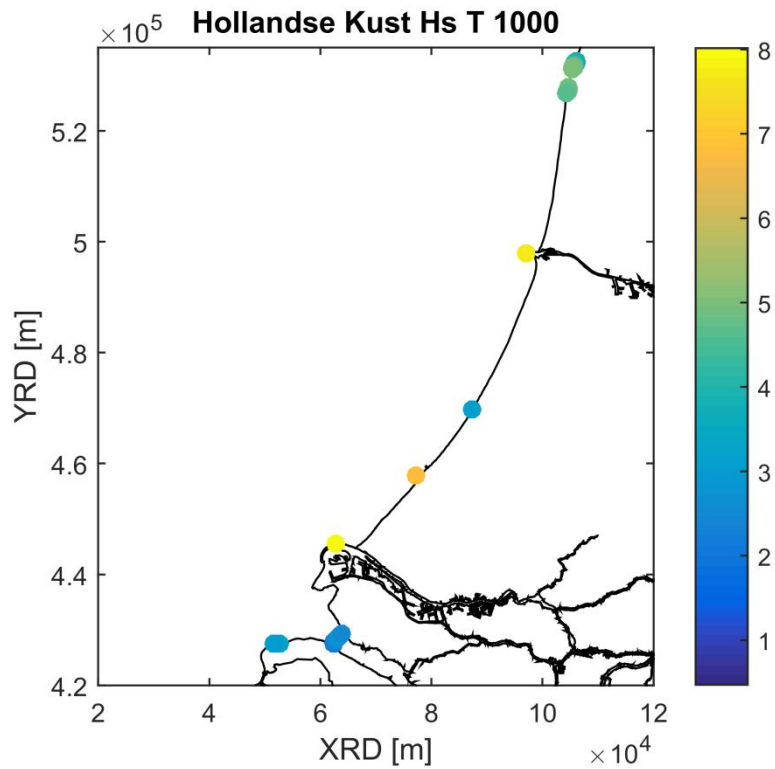


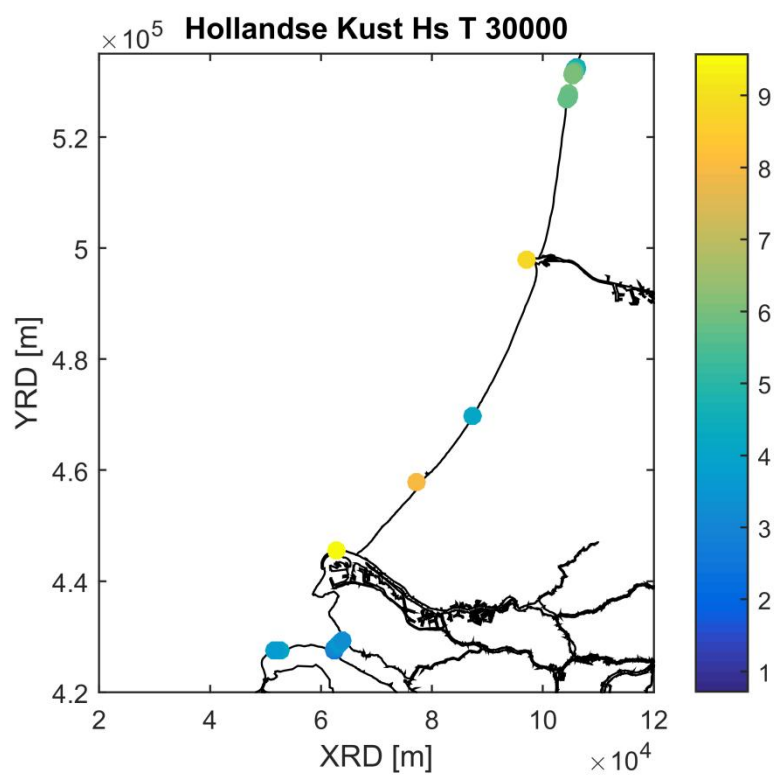
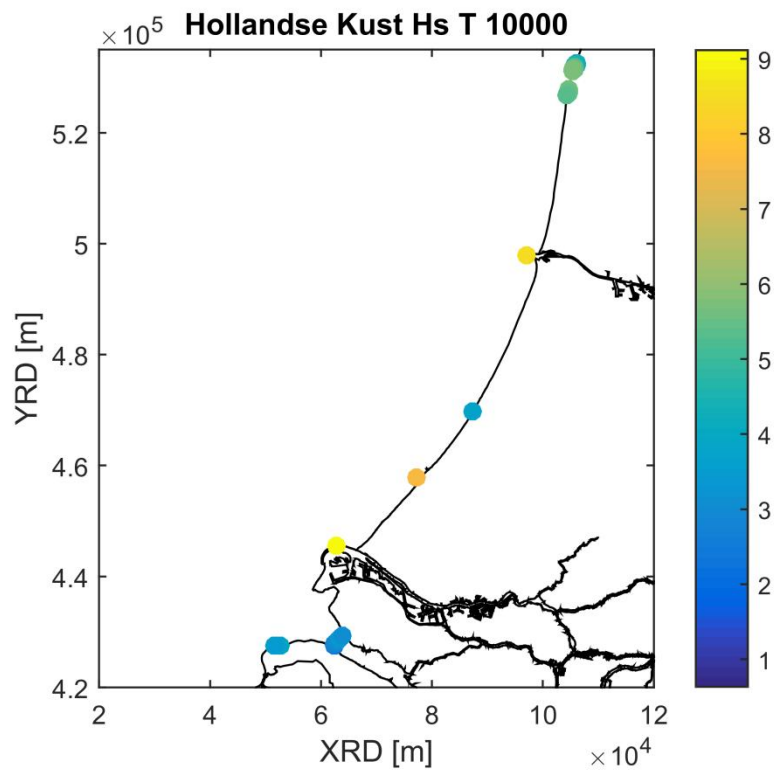


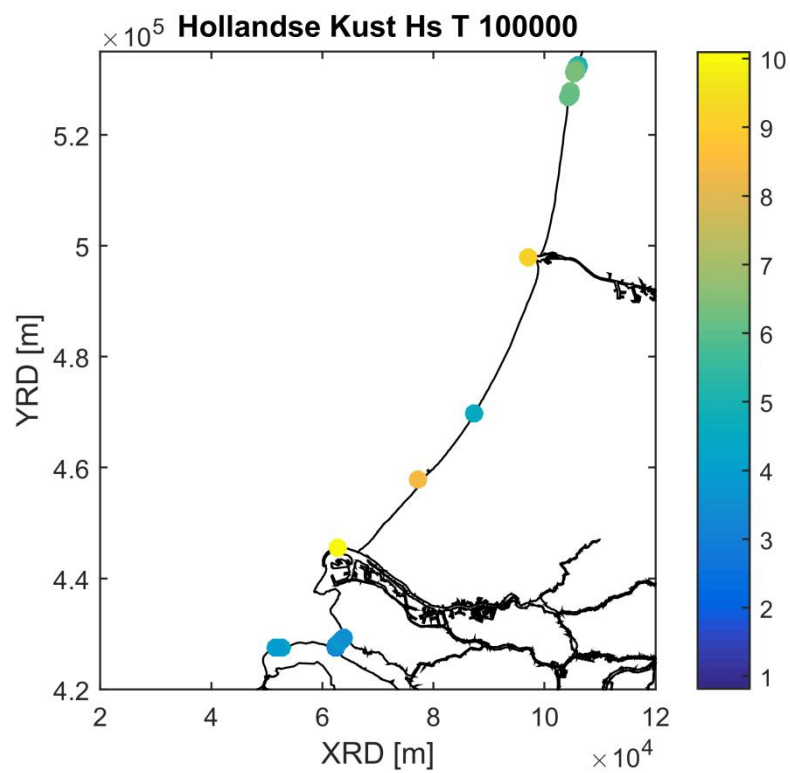


## C.2 Hollandse Kust









### **C.3 Westerschelde**

