

Opdrachtgever: **Rijkswaterstaat WVL**

Kwaliteitscontrole basisprognose Veiligheid 2016

Kwaliteitscontrole van Nationaal Watermodel resultaten

LIJN IN WATER

Opdrachtgever: **Rijkswaterstaat WVL**

Kwaliteitscontrole basisprognose Veiligheid 2016

Kwaliteitscontrole van Nationaal Watermodel resultaten

LIJN IN WATER

Auteur T. Botterhuis

LIJN IN WATER

Inhoud

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Inleiding | 1 |
| 2 | Toekomstscenarios | 3 |
| 2.1 | Inleiding | 3 |
| 2.2 | Deltascenarios | 3 |
| 2.3 | KNMI'06 scenarios | 4 |
| 2.4 | KNMI'14 scenarios | 5 |
| 3 | Veranderingen modelinvoer | 9 |
| 3.1 | Inleiding | 9 |
| 3.2 | Statistiek wind | 9 |
| 3.3 | Statistiek zeewaterstand | 9 |
| 3.4 | Statistiek rivierafvoer | 11 |
| 3.5 | Schematisatie dijkprofielen | 16 |
| 4 | IJsselmeer | 19 |
| 4.1 | Overzicht modellen en uitgangspunten | 19 |
| 4.2 | Controle beschikbaarheid en kwaliteit van de gegevens | 19 |
| 4.3 | Verschillen t.o.v. Deltamodel in de Hydra-Zoet resultaten | 20 |
| 5 | Markermeer | 23 |
| 5.1 | Overzicht modellen en uitgangspunten | 23 |
| 5.2 | Controle beschikbaarheid en kwaliteit van de gegevens | 23 |
| 5.3 | Verschillen t.o.v. Deltamodel in de Hydra-Zoet resultaten | 24 |
| 6 | IJssel-Vechtdelta | 25 |
| 6.1 | Overzicht modellen en uitgangspunten | 25 |
| 6.2 | Controle beschikbaarheid en kwaliteit van de gegevens | 26 |
| 6.3 | Verschillen t.o.v. Deltamodel in de Waqua resultaten | 27 |
| 6.4 | Verschillen t.o.v. Deltamodel in de Hydra-Zoet resultaten | 28 |
| 6.5 | Klimaatverschillen | 32 |
| 7 | Rijn-Maasmonding | 35 |
| 7.1 | Overzicht modellen en uitgangspunten | 35 |
| 7.2 | Controle beschikbaarheid en kwaliteit van de gegevens | 37 |
| 7.3 | Verschillen t.o.v. Deltamodel in de Waqua resultaten | 37 |
| 7.4 | Verschillen t.o.v. Deltamodel in de Hydra-Zoet resultaten | 38 |
| 7.5 | Klimaatverschillen | 42 |
| 8 | Rijntakken | 45 |
| 8.1 | Overzicht modellen en uitgangspunten | 45 |
| 8.2 | Controle beschikbaarheid en kwaliteit van de gegevens | 46 |
| 8.3 | Verschillen t.o.v. Deltamodel in de Waqua resultaten | 47 |
| 8.4 | Verschillen t.o.v. Deltamodel in de Hydra-Zoet resultaten | 48 |
| 8.5 | Klimaatverschillen | 50 |
| 9 | Maas | 53 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 9.1 | Overzicht modellen en uitgangspunten..... | 53 |
| 9.2 | Controle beschikbaarheid en kwaliteit van de gegevens..... | 53 |
| 9.3 | Verschillen t.o.v. Deltamodel in de Waqua resultaten..... | 54 |
| 9.4 | Verschillen t.o.v. Deltamodel in de Hydra-Zoet resultaten | 55 |
| 9.5 | Klimaatverschillen | 55 |
| 10 | Systeemovergangen | 57 |
| 10.1 | Inleiding | 57 |
| 10.2 | IJssel | 57 |
| 10.3 | Lek | 58 |
| 10.4 | Waal | 59 |
| 10.5 | Maas | 60 |
| 11 | Conclusies en aanbevelingen | 63 |
| 11.1 | Conclusies..... | 63 |
| 11.2 | Aanbevelingen | 64 |
| 12 | Referenties | 65 |

1 Inleiding

Om beleidsbeslissingen in het Deltaprogramma te ondersteunen is het Deltamodel ontwikkeld in de periode 2012-2014. In het Deltamodel (DM) zijn verschillende modeltreinen aan elkaar gekoppeld waarbij randvoorwaarden, invoer en rekensoftware op elkaar zijn afgestemd tot een samenhangend geheel. Ter ondersteuning van het Deltaprogramma zijn met het DM de gevolgen doorgerekend van klimaatverandering volgens KNMI'06 scenario's (KNMI, 2006). Deze berekeningen heten de Basiscases, het nul-alternatief, van het Deltaprogramma. Nu de Delta-beslissingen zijn afgerond is het DM verder ontwikkeld en geschikt gemaakt voor een bredere toepassing onder de naam Nationaal Water Model (NWM). Voor het thema Waterveiligheid bestaat het NWM uit min of meer dezelfde modules als het DM voor het berekenen van effecten op de waterveiligheid. Belangrijke rekenmodules zijn Waqua, Sobek en Hydra-Zoet.

Het KNMI heeft in 2014 nieuwe klimaatscenario's opgeleverd (KNMI, 2014). Deze KNMI'14 scenario's beschrijven op basis van de nieuwste inzichten de potentiële klimaatverandering in Nederland en in het stroomgebied van de Rijn en de Maas. Met het NWM zijn nu de gevolgen berekend van deze KNMI'14 scenario's op de hoogwaterveiligheid van Nederland. Deze berekeningen heten de 'Basisprognoses Waterveiligheid 2016' en gelden als actuele bijstelling van de Basiscases. Wijzigingen t.o.v. KNMI'06 zijn:

- Aanpassingen statistiek van de rivierafvoer te Lobith, Borgharen en Olst op basis van GRADE en KNMI'14 scenario's.
- Aanpassingen van de statistiek van de zeewaterstand te Hoek van Holland op basis van KNMI'14 scenario's.

Deze rapportage beschrijft de kwaliteitscontrole van de 'Basisprognoses Waterveiligheid 2016'. Met de controle wordt beoogd in beeld te brengen in hoeverre gehanteerde uitgangspunten in het NWM worden vertaald naar plausibele modeluitkomsten. De prognoses bieden een doorkijk naar de veranderingen die Nederland in 2050 en 2085 te wachten staan volgens KNMI'14. De prognoses kunnen door allerlei beleidsprogramma's worden gebruikt voor het ijken van doelstellingen en het zo nodig bijstellen van beleid. De kwaliteitscontrole brengt in beeld waar de Basisprognoses wel en niet voor kunnen worden gebruikt.

In deze rapportage wordt een kwaliteitstoets voor het Nationaal Watermodel uitgevoerd. Dit gebeurt aan de hand van 4 niveaus:

1. controle van de beschikbaarheid en kwaliteit van de gegevens;
2. controle van de verschillen tussen de klimaatscenario's beschreven in hoofdstuk 2;
3. controle van de overgang tussen de verschillende watersystemen en
4. bepaling van de verschillen ten opzichte van de Basiscases.

De verschillen bespreken we per watersysteem:

1. IJsselmeer ,
2. Markermeer,
3. IJssel-Vechtdelta,
4. Rijn-Maasmonding,
5. Rijntakken en
6. Maas.

Hierna zal er nog een hoofdstuk gewijd worden aan de overgangsgebieden (bovenrivieren – benedenrivieren en bovenrivieren – Vecht-IJsseldelta). De rapportage sluit af met conclusies en aanbevelingen.

2 Toekomstscenarios

2.1 Inleiding

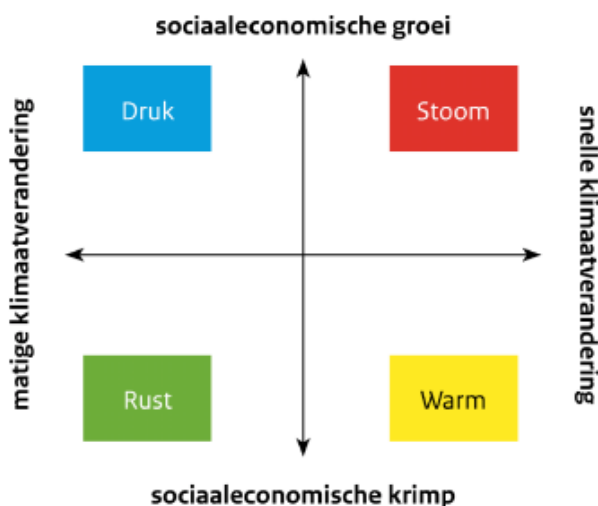
De Basiscases van het Deltaprogramma zijn doorgerekend met de klimaatverandering volgens de KNMI'06 scenarios (KNMI, 2006). De Basisprognoses Waterveiligheid 2016 zijn doorgerekend met de klimaatverandering volgens de nieuwe KNMI'14 scenarios (KNMI, 2014). De KNMI'14 scenarios beschrijven een minder sterke opwarming (en uitdroging) in de zomer en een hogere zeespiegelstijging t.o.v. de KNMI'06 scenarios. In dit hoofdstuk staan de kentallen van zowel KNMI'06 als de KNMI'14 scenarios.

2.2 Deltascenarios

We beginnen dit hoofdstuk met een korte inleiding over de Deltascenarios (Bruggeman et al, 2010). Bij de introductie van de Deltascenarios is gebruik gemaakt van de klimaatverandering volgens KNMI'06 scenarios. Met de update van klimaatscenarios in KNMI'14, is ook de beschreven klimaatverandering in de Deltascenarios aangepast.

De Deltascenarios zijn de vier mogelijke toekomstbeelden uit het Deltaprogramma: Druk, Stoom, Rust en Warm (Bruggeman et al, 2010). Deze toekomstbeelden geven niet alleen een indicatie van de mogelijke veranderingen in de fysische en sociaaleconomische omgevingsfactoren, maar ze tonen ook de mogelijke verschuivingen in het gebruik van ruimte, land en water als gevolg van de verwachte schaarste aan grondstoffen. De scenarios geven kwalitatieve en kwantitatieve informatie over klimaat, watersystemen, watergebruik en landgebruik. De kwalitatieve informatie bestaat uit verhaallijnen met landkaarten, die de achtergronden beschrijven en de samenhang in beeld brengen.

De kwantitatieve gegevens zijn weergegeven in de vorm van kentallen, waarmee de effecten van de klimaatverandering kunnen worden berekend. Rijkswaterstaat heeft met de kentallen



Figuur 1: Schematische weergave Delta-scenarios (bron: Bruggeman et al, 2012).

van KNMI'06 de Basiscases berekend (t.b.v. de Deltabeslissingen). Een schematische weergave van de 4 scenarios staat in Figuur 1. In de figuur is te zien dat de scenarios Rust en Druk dezelfde matige klimaatontwikkeling beschrijven. Het onderscheid tussen deze scenarios berust op het verschil in sociaaleconomische ontwikkeling. Dit onderscheid is voor de berekeningen van het thema Waterveiligheid niet van belang, daarom zijn de berekeningen van de scenarios Rust en Druk samen-gevoegd tot één berekening. Hetzelfde geldt voor de scenarios Warm en Stoom.

Een uitgebreide beschrijving van de verhaallijnen is te lezen in het eindrapport van de Deltascenarios (Bruggeman et al., 2010 of Bruggeman et al., 2013).

2.3 KNMI'06 scenarios

De klimaatverandering in de Basiscases is gebaseerd op KNMI'06 (KNMI,2006). De Basiscases bestaan uit twee scenario-berekeningen, namelijk scenario RD (Rust-Druk) en SW (Stoom-Warm). Elke scenarioberekening is gedefinieerd voor twee zichtjaren: 2050 en 2100. Het zichtjaar 2015 is in beide berekeningen hetzelfde, namelijk de referentie (de waargenomen, huidige klimaatontwikkeling vertaald naar het jaar 2015). Voor het doorrekenen van de klimaatontwikkeling volgens KNMI'06 is (dus) volstaan met vijf berekeningen:

1. Referentie 2015,
2. Rust en Druk 2050,
3. Rust en Druk 2100,
4. Stoom en Warm 2050 en
5. Stoom en Warm 2100.

KNMI'06 onderscheidt de scenarios G, G⁺, W en W⁺. In Bruggeman et al (2010) zijn de kentallen van Rust en Druk gelijk gesteld aan de ontwikkeling van de rivierafvoer en zeespiegelstijging volgens KNMI'06 scenario G. De kentallen van Stoom en Warm zijn gelijk aan KNMI'06 scenario W⁺. Daarmee zijn de gematigdste (c.q. G-scenario) en de extreemste (c.q. W⁺-scenario) klimaatontwikkeling gebruikt om het totale veld aan toekomstige ontwikkelingen te omspannen in de Deltascenarios. Tabel 1 geeft per berekening de kentallen van de rivierafvoer en het aftopniveau van de Rijn en de Maas (T=1250 jaar voor bedijkte Maas of Rijntakken en T=250 jaar voor onbedijkte Maas).

| KNMI'06 scenarios | Rijn | | Maas | | |
|------------------------------------|--|------------------------------------|---|--|------------------------------------|
| | Afvoer T = 1250 jaar (m ³ /s) | Aftopniveau (m ³ /s) | Afvoer T = 250 jaar (m ³ /s) | Afvoer T = 1250 jaar (m ³ /s) | Aftopniveau (m ³ /s) |
| Referentie 2015 | 16.000 | 16.500 | 3.275 | 3.800 | 4.600 |
| 2050G (Rust en Druk) | 16.500 | 16.500 | 3.317 | 3.900 | 4.600 |
| 2100G (Rust en Druk) | 17.000 | 17.000 | 3.394 | 4.000 | 4.600 |
| 2050W ⁺ (Stoom en Warm) | 17.000 | 17.000 | 3.612 | 4.200 | 4.600 |
| 2100W ⁺ (Stoom en Warm) | 18.000 | 18.000 | 3.950 | 4.600 | 4.600 |

Tabel 1: KNMI'06 kentallen van rivierafvoeren en fysisch maximum van de Rijn (Lobith) en de Maas (Borgharen).

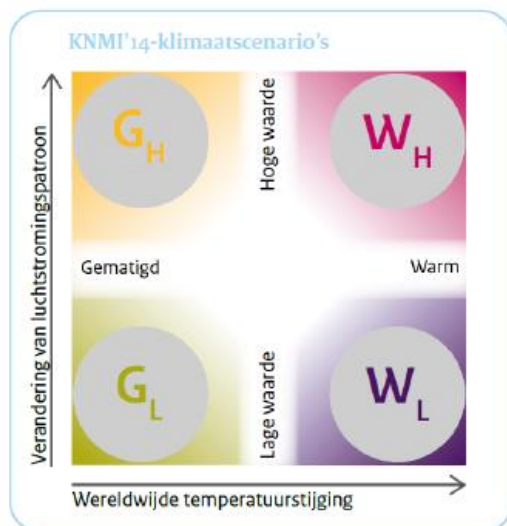
Tabel 2 geeft de kentallen van de absolute zeespiegelstijging volgens KNMI'06. Voor de referentie is uitgegaan van 7 cm zeespiegelstijging in de periode 1985-2015, conform de Thermometer Randvoorwaarden 2006 (De Deugd, 2007). Voor 2050 en 2100 is de zeespiegelstijging gehanteerd conform de KNMI '06 scenarios. Opgemerkt wordt dat de KNMI scenarios de absolute zeespiegelstijging t.o.v. 1990 geven. In de gecombineerde wind-zeewaterstandstatistiek is echter aangenomen dat deze zeespiegelstijging geldt t.o.v. 1985. In de vertaling van de KNMI'06 scenarios naar statistiek is dit verschil (de zeespiegelstijging over de periode 1985-1990) verwaarloosd.

| KNMI'06 scenarios | Noordzee |
|-------------------------------------|---|
| | Zeespiegelstijging t.o.v. 1985 ¹ (m) |
| 2015 (Referentie) | 0,07 |
| 2050 G (Rust en Druk) | 0,15 |
| 2100 G (Rust en Druk) | 0,35 |
| 2050 W ⁺ (Stoom en Warm) | 0,35 |
| 2100 W ⁺ (Stoom en Warm) | 0,85 |

Tabel 2: KNMI'06 kentallen van zeespiegelstijging van de Noordzee (Maasmond).

2.4 KNMI'14 scenarios

In 2014 heeft KNMI de klimaatscenario's geactualiseerd. Door het KNMI zijn in 2014 de wereldwijde IPCC inzichten uit 2013 (ICCP-CMIP5 scenarios) vertaald naar nieuwe klimaatscenario's voor Nederland. De nieuwe KNMI'14 scenario's zijn gebaseerd op waargenomen klimaatverandering en op recente berekeningen met wereldwijde klimaatmodellen van het IPCC, aangevuld met berekeningen met het klimaatmodel voor Europa van het KNMI. De Basisprognoses 2016 zijn doorberekend met een klimaatverandering die is gebaseerd op de kentallen van deze nieuwe klimaatscenario's. Net als in KNMI'06 bestaat KNMI'14 uit vier scenario's voor de toekomstige klimaatverandering. KNMI'06 onderscheidt de scenario's G, G⁺, W en W⁺. In KNMI'14 zijn deze scenario's vervangen door respectievelijk G_L, G_H, W_L en W_H (zie Figuur 2). Deze scenario's beschrijven vier hoekpunten. Binnen deze hoekpunten zal de klimaatverandering in Nederland zich waarschijnlijk voltrekken



Figuur 2: Schematische weergave KNMI'14 scenario's (bron: KNMI 2014).

In de voorgaande paragraaf is al vermeld dat de kentallen van Deltascenario's Rust en Druk gelijk zijn aan de ontwikkeling van de rivierafvoer en zeespiegelstijging volgens KNMI'06 scenario G. De kentallen van Stoom en Warm zijn gelijk aan KNMI'06 scenario W⁺. In de Basisprognoses zijn de kentallen van KNMI'06 scenario's G en W⁺ vervangen door de KNMI'14 kentallen van respectievelijk G_L en W_H. De relatie tussen de KNMI'06 en '14 scenario's is gegeven in Tabel 3.

¹ In het DM is uit gegaan van een getijreeks uit het jaar 1991 (randvoorwaarde hydraulische berekening) en windzeewaterstand statistiek uit het jaar 1985 (randvoorwaarde probabilistische berekening). Dit is een verschuiving van 1 en 5 jaar in respectievelijk de hydraulische en de probabilistische berekening ten opzichte van het zwaartepunt van de referentieperiode van de klimaatontwikkeling (1990). Hiervoor zou nog extra gecorrigeerd moeten worden met 0,2 cm of 5 cm (nl. 0,2 cm/jaar). Echter, dit is niet gedaan, zodat de getallen herkenbaar en traceerbaar zijn. Voor onderlinge vergelijkbaarheid tussen referentie en zichtjaren van KNMI'06 heeft deze keuze nauwelijks effect. Voor de vergelijking tussen KNMI'06 en KNMI'14 heeft dit wel effect.

| KNMI'14 | | KNMI'06 | | Delta scenarios ² |
|-----------|----------------|-----------|----------------|------------------------------|
| zichtjaar | scenario | zichtjaar | scenario | |
| 1995 | basisjaar | 1990 | basisjaar | Referentie 2015 |
| 2050 | G _L | 2050 | G | Druk en Rust |
| 2085 | G _L | 2100 | G | Druk en Rust |
| 2050 | W _H | 2050 | W ⁺ | Stoom en Warm |
| 2085 | W _H | 2100 | W ⁺ | Stoom en Warm |

Tabel 3: Relatie KNMI'14, '06 en Delta-scenarios

De KNMI'14 scenarios beschrijven de klimaatverandering voor de zichtjaren 2050 en 2085, terwijl de KNMI'06 scenarios de klimaatverandering voor de zichtjaren 2050 en 2100 beschrijven. De consequentie is dat er goed moet worden nagedacht over hoe de resultaten voor KNMI'06 met zichtjaar 2100 vergeleken kunnen worden met KNMI'14 voor zichtjaar 2085, want dat is niet 1-op-1 mogelijk. Daarnaast is ook het centrum (het basisjaar) van de periode uit klimaatstudie verschoven in de KNMI'14 scenario van 1990 naar 1995.

Het vaststellen van de ontwikkeling van het klimaat wordt bemoeilijkt door de natuurlijke variaties van het klimaat. Natuurlijke variaties zijn bijvoorbeeld dagelijkse variaties in de temperatuur of het spontaan voorkomen van langdurige kou in de winter. Zulke natuurlijke variaties verklaren waarom niet ieder jaar warmer is dan het jaar ervoor, ook al warmt het klimaat op. Hoe langer de periode waarvoor een gemiddelde wordt berekend, hoe kleiner de invloed van natuurlijke variaties op dit gemiddelde is. Voor het vaststellen van de ontwikkeling van het klimaat beschouwd het KNMI een periode van 30 jaar. Voor KNMI'14 zijn voor het huidige klimaatgemiddelde metingen gebruikt van de periode 1980 -2010. Het centrum van deze periode is 1995. Dit was 1990 voor KNMI'06. De laatste 5 jaar in de periode 1980-2010 waren nog niet beschikbaar bij het vaststellen van KNMI'06.

Voor de Rijn bij Lobith en de Maas bij Borgharen zijn de afvoeren bepaald met behulp van GRADE (Hunink en Hegnauer, 2015). Al vele jaren is er onderzoek gedaan naar een betere vertaling van het gedrag van het Rijn- en Maasstroomgebied dat leidt tot extreme rivierafvoeren. In het onderzoek de Generator of Rainfall and Discharge Extremes (GRADE) heeft men een op de fysica van het stroomgebied gebaseerde methode ontwikkeld (Hegnauer et al, 2010). Hiervoor heeft KNMI ook klimaat-kentallen ontwikkeld. Gevolg van het toepassen van deze nieuwe kennis is dat mede hierdoor de afvoerstatistiek van zowel de Rijn als de Maas aanzienlijk is bijgesteld. Tabel 4 geeft per berekening de KNMI'14 kentallen van de rivierafvoer en het aftopniveau van de Rijn bij Lobith en de Maas bij Borgharen (T=1250 jaar voor bedijkte Maas of Rijntakken en T=250 jaar voor onbedijkte Maas). Met de introductie van WBI-2017 per 1-1-2017 wordt GRADE ook toegepast in de berekening van de Hydraulische Belastingen (Chbab, en Eilander, 2016).

² De Deltascenarios bestaan uit 4 scenario's (weergegeven in Figuur 2.1). De scenarios Rust en Druk beschrijven dezelfde matige klimaatontwikkeling. Het onderscheid tussen deze scenarios berust op het verschil in sociaaleconomische ontwikkeling. Dit is voor de berekeningen van het thema Waterveiligheid niet van belang, daarom zijn de berekeningen van de scenarios Rust en Druk samengevoegd tot één berekening. Hetzelfde geldt voor de scenarios Warm en Stoom.

| KNMI'14 scenarios | Rijn | | Maas | | |
|-------------------------------------|--|------------------------------------|---|--|------------------------------------|
| | Afvoer T = 1250 jaar (m ³ /s) | Aftopniveau (m ³ /s) | Afvoer T = 250 jaar (m ³ /s) | Afvoer T = 1250 jaar (m ³ /s) | Aftopniveau (m ³ /s) |
| 2015 (Referentie) | 15.000 | 16.500 | 3.488 | 3.915 | 4.600 |
| 2050 G _L (Rust en Druk) | 16.620 | 16.500 | 3.940 | 4.450 | 4.600 |
| 2085 G _L (Rust en Druk) | 16.440 | 17.000 | 3.830 | 4.360 | 4.600 |
| 2050 W _H (Stoom en Warm) | 16.020 | 17.000 | 3.860 | 4.260 | 4.600 |
| 2085 W _H (Stoom en Warm) | 17.570 | 18.000 | 4.240 | 4.760 | 4.600 |

Tabel 4: KNMI'14 kentallen van rivierafvoeren en fysisch maximum van de Rijn (Lobith) en de Maas (Borgharen).

Onderstaande tabel geeft de kentallen van de absolute zeespiegelstijging. De KNMI'14 scenarios geven de absolute zeespiegelstijging t.o.v. 1995. Voor de referentie is uitgegaan van 4 cm zeespiegelstijging in de periode 1995-2015. De zeespiegelstijging voor 2050 en 2085 volgens KNMI '14 staat in Tabel 5. Net als bij de toepassing van de KNMI'06 scenarios is ook in de toepassing van KNMI'14 een fout gemaakt in vertaling van de zeespiegelstijging naar de statistiek van de zeewaterstanden. In de gecombineerde wind-zeewaterstandstatistiek geldt dat de zeespiegelstijging t.o.v. 1985 moet worden opgegeven. De zeespiegelstijging over de jaren 1985-1995 is in de statistiek van de zeewaterstand dus verwaarloosd. Deze 10 jaar is 2x zo groot als in de toepassing van KNMI'06, daarom is de zeespiegelstijging in de referentie van KNMI'14 bijna de helft van de waarde in de referentie van KNMI'06 (zie Tabel 2).

| KNMI'14 scenarios | Noordzee |
|-------------------------------------|---|
| | Zeespiegelstijging t.o.v. 1985 ³ (m) |
| 2015 (Referentie) | 0,04 |
| 2050 G _L (Rust en Druk) | 0,15 |
| 2085 G _L (Rust en Druk) | 0,25 |
| 2050 W _H (Stoom en Warm) | 0,40 |
| 2085 W _H (Stoom en Warm) | 0,80 |

Tabel 5: KNMI'14 kentallen van zeespiegelstijging van de Noordzee (Maasmond).

³ In het NWM wordt uit gegaan van een getijreeks uit het jaar 1991 (randvoorwaarde hydraulische berekening) en wind-zeewaterstand statistiek uit het jaar 1985 (randvoorwaarde probabilistische berekening). Dit is een verschuiving van 4 en 10 jaar in respectievelijk de hydraulische en de probabilistische berekening ten opzichte van het zwaartepunt van de referentieperiode van de klimaatontwikkeling (1995). Hiervoor zou nog extra gecorrigeerd moeten worden met 0,8 cm of 2 cm (nl. 0,2 cm/jaar). Echter, dit is niet gedaan, zodat de getallen herkenbaar en traceerbaar zijn. Voor onderlinge vergelijkbaarheid tussen referentie en zichtjaren van KNMI'14 heeft deze keuze geen effect. Voor de vergelijking tussen KNMI'14 en KNMI'06 heeft dit wel effect.

3 Veranderingen modelinvoer

3.1 Inleiding

De KNMI'14 scenarios beschrijven de klimaatverandering voor de zichtjaren 2050 en 2085, terwijl de KNMI'06 scenarios de klimaatverandering voor de zichtjaren 2050 en 2100 beschrijven. Dit maakt een 1-op-1 vergelijking lastig. In feite moet het berekende klimaateffect van KNMI'14 op de hydraulische belastingen in 2085 worden geëxtrapoleerd naar 2100. Vervolgens kan dit effect worden vergeleken met het berekende effect op basis van KNMI'06. Dit hebben we niet gedaan. Het is namelijk de vraag op welke wijze dit moet worden geëxtrapoleerd. In deze rapportage hebben we ervoor gekozen om het berekende klimaateffect uit de Basiscases tussen 2050 en 2100 te interpoleren tot het effect voor zichtjaar 2085. Dit geïnterpoleerde effect wordt vergeleken met het zichtjaar 2085 uit de Basisprognoses.

Gekozen is om het effect van de klimaatontwikkeling bij de vigerende normfrequenties te duiden. Op 1-1-2017 vervallen de huidige normen voor de waterveiligheid en daarmee de normfrequenties waarmee toe nu toe de overschrijdingskansen zijn berekend. Het is daarmee de vraag op basis van welke grootte het effect van de klimaatontwikkeling moet worden geïnterpoleerd. Op dit moment is de presentatie van de berekeningsresultaten nog gebaseerd op vigerende norm. In de loop van 2017 zal duidelijker zijn op welke wijze de resultaten van de berekeningen het best gepresenteerd kunnen worden om het klimaateffect op overstromingskansen te duiden. Een analyse op basis van overschrijdingskansen maakt een goede vergelijking met eerdere berekeningen mogelijk. Daarom is hierop de kwaliteitscontrole van de 'Basisprognoses Waterveiligheid 2016' gebaseerd.

In de volgende paragrafen worden kort alleen de verschillen in modelinvoer tussen de Basisprognoses van het NWM en de Basiscases van het DM beschreven. Het betreft de statistiek van enkele basisstochasten (zie Hunink en Hegnauer, 2015) en de schematisatie van dijkprofielen in de golfploopberekeningen (zie Kuijper, 2015). De overige invoer van de waterveiligheidsberekeningen is niet gewijzigd.

3.2 Statistiek wind

In Hunink en Hegnauer (2015) staat dat voor windsterkte de veranderingen volgens KNMI niet significant zijn (kleiner dan de natuurlijke variatie gemiddeld over de laatste 30 jaar). In de winter is de windsterkte 2.5% minder in het G_L scenario en tot 2.5% sterker in het in het W_H scenario. Buiten het winterseizoen zijn er voor de rest van het jaar geen veranderingen. Voor de berekeningen t.b.v. het thema Veiligheid is de statistiek van het huidige klimaat in de toekomstscenarios gebruikt.

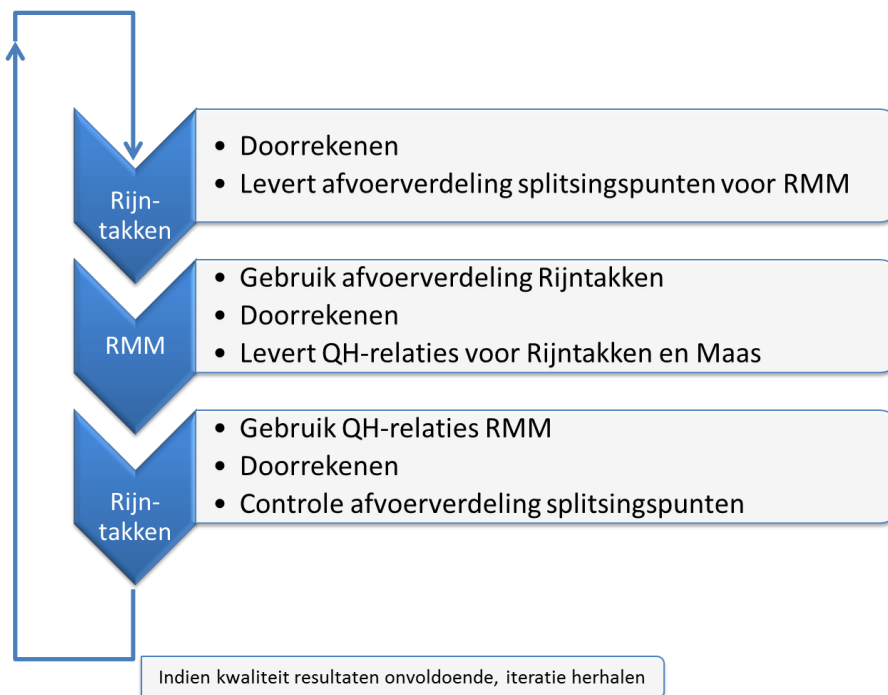
3.3 Statistiek zeewaterstand

In Tabel 6 is de zeespiegelstijging beschreven voor de twee klimaatscenarios in combinatie met twee zichtjaren en het basisjaar 2015.

| Deltascenarios | KNMI'14 scenarios | | KNMI'06 scenarios | |
|----------------|---------------------|------------------------------------|---------------------|------------------------------------|
| | Zichtjaar | Zeespiegelstijging t.o.v. 1985 (m) | Zichtjaar | Zeespiegelstijging t.o.v. 1985 (m) |
| Referentie | 2015 | 0,04 | 2015 | 0,07 |
| Rust en Druk | 2050 G _L | 0,15 | 2050 G | 0,15 |
| Rust en Druk | 2085 G _L | 0,25 | 2100 G | 0,35 |
| Stoom en Warm | 2050 W _H | 0,40 | 2050 W ⁺ | 0,35 |
| Stoom en Warm | 2085 W _H | 0,80 | 2100 W ⁺ | 0,85 |

Tabel 6: Zeespiegelstijging in de KNMI'14 en '06 scenarios (KNMI, 2014).

De zeespiegelstijging is enkel voor de Rijn-Maas Monding (RMM) direct gebruikt als invoer. Indirect worden de nieuwe waarden voor de zeespiegelstijging door vertaald naar nieuwe QH-relaties voor onderdelen Rijn en Maas. Het rekenwerk van het NWM is bedacht als een iteratief proces (Figuur 3). Omdat de randvoorwaarden van de Rijntakken invloed hebben op de resultaten van RMM (en omgekeerd) is dit belangrijk en moeten de deelsystemen in samenhang worden doorgerekend. Zowel voor de situatie met als zonder klimaatontwikkeling is deze samenhang van belang.



Figuur 3: Schets van het iteratieve proces dat gebruikt is in de berekeningen voor de Basisprognoses.

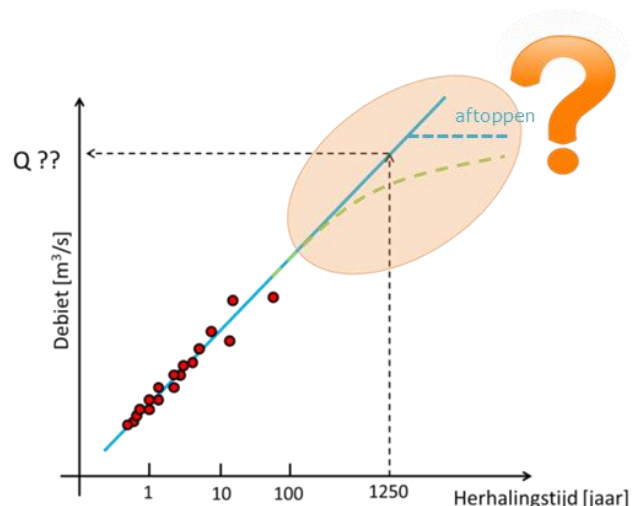
Voor het bereiken van landsdekkend coherente resultaten moet het volgende proces worden doorlopen (Figuur 3):

- Idealiter sluiten de resultaten van de Maas, de Rijntakken en de RMM naadloos op elkaar aan. Om dat te realiseren, worden een aantal stappen doorlopen. Allereerst, een Rijntakken-berekening bepaalt een representatieve afvoerverdeling op de splitsingspunten. Deze afvoerverdeling wordt als randvoorwaarde doorgegeven aan de RMM. Vervolgens is een RMM-berekening uitgevoerd met deze nieuwe afvoerverdeling. Dit levert QH-relaties op voor de benedenrand van de riviertakken Lek, Waal en Maas. Tot slot wordt een definitieve berekening van Rijntakken en Maas gemaakt met deze nieuwe QH-relaties. In principe wordt dit proces herhaald totdat de resultaten van de deelsystemen netjes aansluiten.

- Omwille van de beschikbare tijd zijn de berekeningen op de testomgeving van Deltares (T-omgeving) gebruikt om de afvoerverdeling en de QH-relaties vast te stellen. In feite zijn de eerste twee blokjes uit Figuur 3 daarmee overgeslagen in de berekeningen op de productie-omgeving van het NMDC (A/P-omgeving).
- Laatste stap is het koppelen van de rekenresultaten van de bovenrivieren (Maas en Rijntakken) met de resultaten van de delta's (RMM en IJVD). Deze stap (niet weergegeven in Figuur 3) wordt in hoofdstuk 10 gepresenteerd.

3.4 Statistiek rivierafvoer

Voor de Rijn bij Lobith en de Maas bij Borgharen zijn met GRADE (Hegnauer et al, 2014) nieuwe afvoerstatistieken afgeleid voor de KNMI'14 scenario's (Sperna Weiland et al., 2015). Hierbij is niet alleen gebruik gemaakt van nieuwe inzichten van het KNMI, ook is nieuwe kennis toegepast voor de vertaling van de scenario's van het KNMI naar rivierafvoer. In het verleden (WTI-2011, HR2006 en eerder) is de statistiek van Rijnafvoer altijd bepaald met extreme-waarden-statistiek in combinatie met metingen van de afvoer te Lobith en te Borgharen. Van relatief vaak voorkomende afvoeren zijn veel metingen beschikbaar, in het zeer extreme bereik weten we eigenlijk niet hoe het stroomgebied van de Rijn of Maas reageert op neerslag (zie figuur hieronder). In HR2006 zijn wiskundige technieken gebruikt om de relatie tussen gemeten afvoer (rode bolletjes) en de kans van voorkomen te extrapoleren naar zeer extreme herhalingsstijden (blauwe lijn). Veelal wordt de extrapolatie van de afvoeren in het extreme bereik van herhalingsstijden afgetopt om niet onrealistisch hoge rivierafvoeren te simuleren (onderbroken, blauwe lijn). Al vele jaren is er onderzoek gedaan naar een betere vertaling van het gedrag van de stroomgebieden dat leidt tot extreme rivierafvoeren (onderbroken, groene lijn). In het onderzoek de Generator of Rainfall and Discharge Extremes (GRADE) heeft men een op de fysica van de stroomgebieden gebaseerde methode ontwikkeld, waarmee voor vele jaren de neerslag-afvoer relatie kan worden gesimuleerd (Hegnauer et al., 2010).



Figuur 4: Schematische weergave afleiden afvoerstatistiek.

Door middel van een neerslaggenerator is de beschikbare neerslagdata (ruimtelijk verdeeld over beide stroomgebieden) verlengd. Met deze neerslagreeks is ook de lengte van de tijdreeks van de afvoer te Lobith en te Borgharen aanzienlijk verlengd door de neerslag-afvoerrelatie voor vele jaren te simuleren. Met een hydraulisch model van het gehele stroomgebied wordt de neerslag-afvoerrelatie vertaald naar de afvoer bij Lobith (Rijn) en Monsin (Maas), waarbij rekening wordt gehouden met overstromingen bovenstrooms. Nu is men ervan overtuigd dat de methode GRADE voldoende is ontwikkeld om te worden gebruikt voor het berekenen van de Hydraulische Randvoorwaarden. Deze methode wordt dan ook toegepast in WBI-2017 (Chbab en Eilander, 2016). Een belangrijke conclusie uit het GRADE onderzoek is dat het meenemen van overstromingen langs de Rijn in Duitsland een fors verlagend effect heeft op de frequenties van de afvoeren in het extreme bereik. Dit is dan ook te zien in de maatgevende afvoer in het referentie jaar 2015 (zie Tabel 1 en Tabel 4). Voor vertaling van de KNMI'14 scenario's naar de

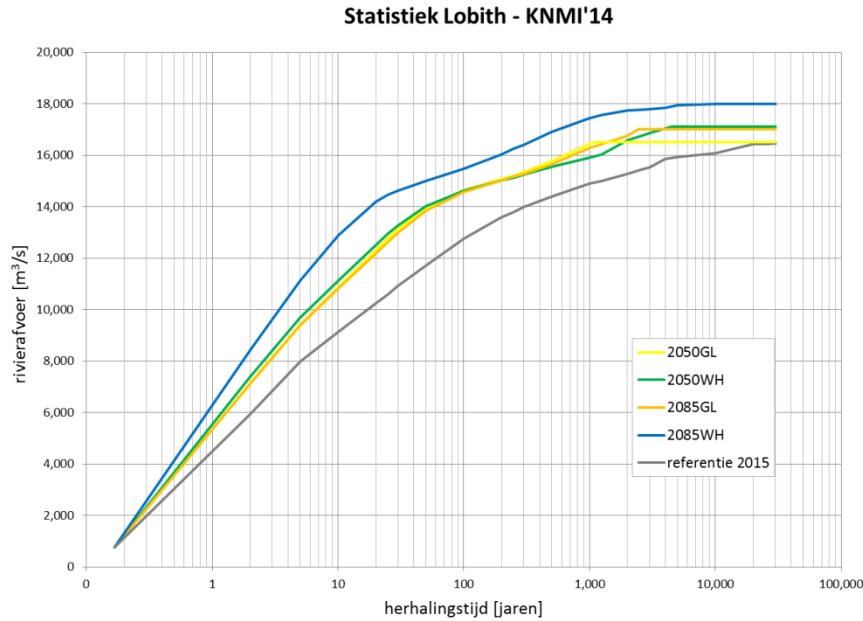
te verwachten extreme afvoer op de Maas is ook gebruik gemaakt van GRADE. Gebaseerd op GRADE is de verwachting dat de extreme rivierafvoeren op de Maas zullen toenemen. De ondergrens van de toekomstige Maasafvoer in de nieuwe scenario's (KNMI'14) is nagenoeg gelijk aan de bovengrens van de oude scenario's (KNMI'06).

Op dit moment loopt nog onderzoek naar de vertaling van de klimaat-scenario's naar rivierafvoeren. Met name de afname van de rivierafvoer in het scenario G_L is opmerkelijk. Voorlopig wordt dit als volgt verklaard. De toename van neerslag in de herfst in scenario G_L in combinatie met de verwachte ontwikkeling van de verdamping (toename in 2085 t.o.v. 2050 door temperatuurstijging) zorgt er voor dat de rivierafvoer in het scenario G_L afneemt tussen 2050 en 2085.

De afvoerstatistiek zoals toegepast binnen het NWM is gebaseerd op de GRADE resultaten uit Hegnauer (2016). Deze statistiek is invoer voor de berekening van Rijntakken, Maas, RMM en IJVD. De bepaling van de afvoerstatistiek volgt daarmee de methodiek welke binnen het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI) en het Ontwerp Instrumentarium (OI) is ontwikkeld (Den Bieman en Smale, 2015). Daarnaast heeft DG-RW besloten om de afvoeren bij Lobith af te toppen op 18.000 m³/s (Den Bieman en Smale, 2015). In de meest extreme situaties met inachtneming van hydraulische onzekerheden in de GRADE-analyse kan dit nog voorkomen. Langs de Maas wordt na de introductie van GRADE niet meer afgetopt (Den Bieman en Smale, 2015). Voor de Maas zijn onzekerheden in de GRADE-analyse (nog) niet in kaart gebracht. De Maas wordt daarom in het NWM (maar ook binnen het WBI en OI) doorgerekend met de afvoerstatistiek zonder hydraulische onzekerheden.

In Figuur 4, Figuur 5, Tabel 7 en Tabel 8 zijn de getallen voor de klimaatscenario's voor zichtjaren 2015, 2050 en 2085 van de afvoerstatistiek gepresenteerd zoals in de berekening van de Basisprognoses zijn toegepast. De methodiek is conform OI, maar in de Basisprognose wordt gebruik gemaakt van KNMI'14 scenario's (i.p.v. KNMI'06 scenario's). In de figuren en tabellen is te zien dat verschillende aftopniveaus zijn gehanteerd in de berekeningen van de Basisprognoses. Dit wijkt ook af van het OI. Ter illustratie van het verschil in afvoerstatistiek tussen de Basisprognoses en de Basiscases zijn in Figuur 6 en Figuur 7 vergelijkingen gemaakt tussen de frequentielijnen van Lobith en Borgharen, die gebruikt zijn in beide berekeningen. In beide figuren is te zien dat in het extreme bereik geen verschil tussen de lijnen is, door de keuze van het afvoerniveau waarbij de statistiek is afgetopt. In zichtjaar 2050 G

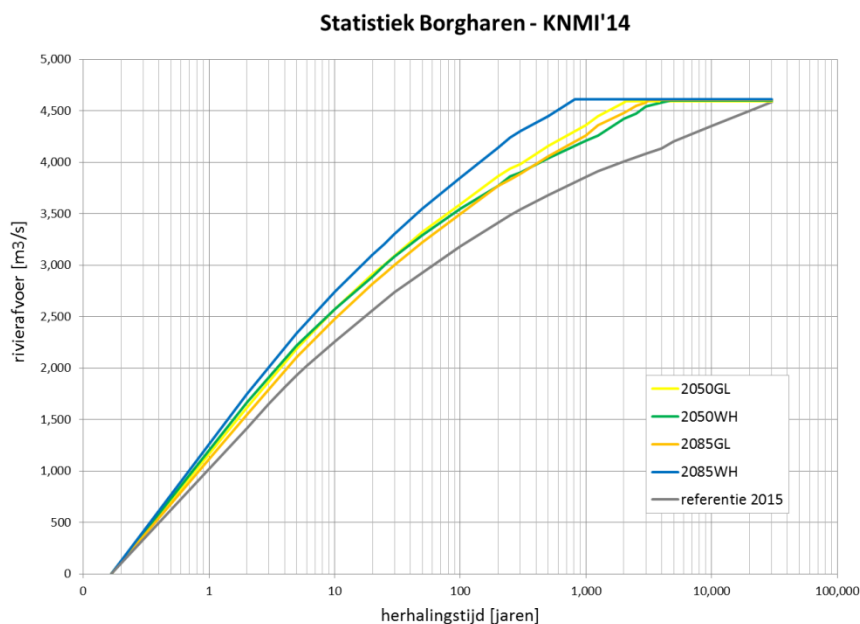
In de kwaliteitscontrole van de 'Basisprognoses Veiligheid 2016' zoomen we (zoals in de inleiding van dit hoofdstuk al aangegeven) in op de Hydraulische Belastingen bij de vigerende (overschrijdingskans-) normen. In Figuur 6 en Figuur 7 zijn deze aangegeven met een groene stippellijn. In Figuur 6 is te zien dat bij andere herhalingstijden de nieuwe statistiek boven de oude frequentielijn ligt, bij een herhalingstijd van 1250 jaar treden in de nieuwe statistiek lagere afvoeren op. Uitzondering hierop is zichtjaar 2050 van scenario G_L . In deze berekening is de 1/1250 jaar afvoer gelijk aan het aftopniveau (eq. 16.500 m³/s) en ook gelijk de waarde uit de Basiscases. In Figuur 7 is te zien dat zowel bij herhalingstijd 250 jaar (onbedijkte Maas) als bij herhalingstijd 1250 jaar (bedijkte Maas) de nieuwe statistiek boven de oude frequentielijn ligt. Alleen in zichtjaar 2085 van het scenario W_H wordt het aftopniveau overschreden bij een herhalingstijd van 1250 jaar. Gevolg is dat in deze scenarioberekening de 1/1250 jaar gelijk is aan de afvoer in de Basiscases. Hierbij merken we op dat dit geldt voor het jaar 2100 in de Basiscases (m.a.w. de afvoer is in scenario W_H van de Basisprognoses ook hoger).



Figuur 4: Afvoerstatistiek van de verschillende KNMI'14 scenarios voor zichtjaar 2050 en 2085 voor de Rijn (Lobith), met hydraulische onzekerheden in GRADE (bron: Hegnauer 2016).

| Afvoerstatistiek Lobith – KNMI'14 | | | | | |
|-----------------------------------|--------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| T | 2015 | 2050 _{GL} | 2050 _{WH} | 2085 _{GL} | 2085 _{WH} |
| 2 | 5.940 | 7.140 | 7.390 | 7.120 | 8.430 |
| 5 | 7.970 | 9.410 | 9.700 | 9.380 | 11.120 |
| 10 | 9.130 | 10.880 | 11.130 | 10.810 | 12.880 |
| 20 | 10.250 | 12.310 | 12.500 | 12.190 | 14.200 |
| 25 | 10.600 | 12.780 | 12.950 | 12.620 | 14.460 |
| 30 | 10.910 | 13.130 | 13.270 | 12.990 | 14.620 |
| 50 | 11.710 | 13.960 | 14.010 | 13.850 | 15.000 |
| 100 | 12.770 | 14.640 | 14.610 | 14.560 | 15.470 |
| 200 | 13.600 | 15.080 | 15.020 | 15.020 | 16.040 |
| 250 | 13.790 | 15.200 | 15.130 | 15.170 | 16.250 |
| 300 | 14.000 | 15.340 | 15.250 | 15.280 | 16.400 |
| 500 | 14.400 | 15.770 | 15.540 | 15.660 | 16.900 |
| 1000 | 14.890 | 16.440 | 15.900 | 16.290 | 17.440 |
| 1250 | 15.000 | 16.500 | 16.020 | 16.440 | 17.570 |
| 2000 | 15.280 | 16.500 | 16.580 | 16.770 | 17.740 |
| 2500 | 15.430 | 16.500 | 16.730 | 17.000 | 17.770 |
| 3000 | 15.520 | 16.500 | 16.860 | 17.000 | 17.790 |
| 4000 | 15.850 | 16.500 | 17.000 | 17.000 | 17.830 |
| 5000 | 15.940 | 16.500 | 17.000 | 17.000 | 17.930 |
| 10000 | 16.070 | 16.500 | 17.000 | 17.000 | 18.000 |
| 20000 | 16.430 | 16.500 | 17.000 | 17.000 | 18.000 |
| 25000 | 16.440 | 16.500 | 17.000 | 17.000 | 18.000 |
| 30000 | 16.450 | 16.500 | 17.000 | 17.000 | 18.000 |

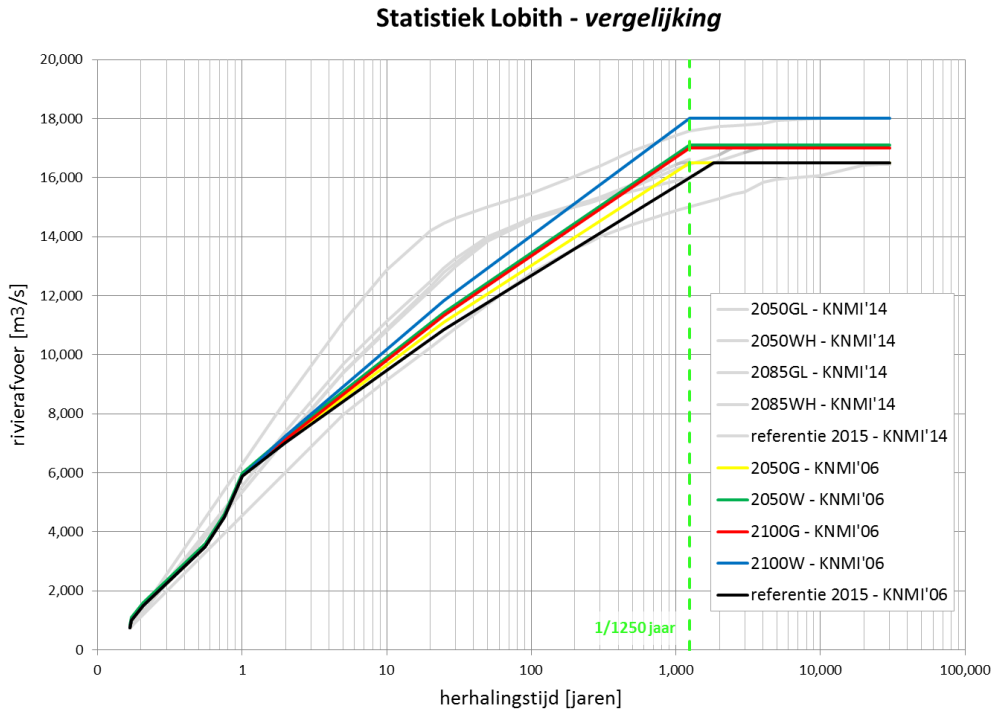
Tabel 7: Afvoeren voor specifieke herhalings tijden voor de verschillende KNMI'14 scenarios voor zichtjaar 2050 en 2085 voor de Rijn (Lobith), met hydraulische onzekerheden in GRADE (bron: Hegnauer 2016).



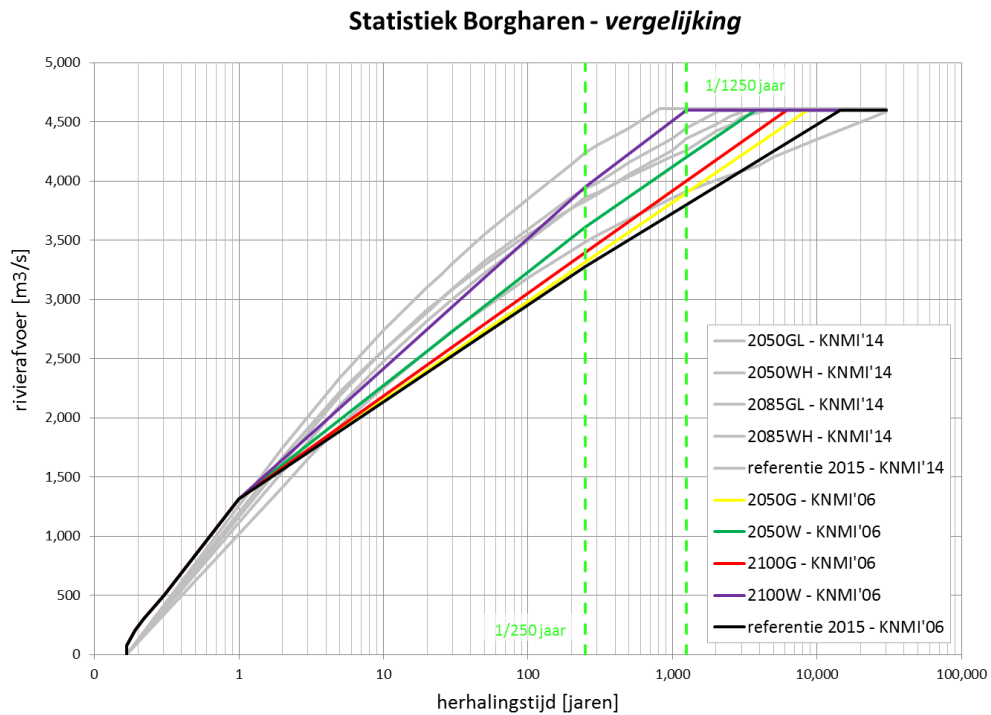
Figuur 5: Afvoerstatistiek van de verschillende KNMI'14 scenarios voor zichtjaar 2050 en 2085 voor de Maas (Borgharen), zonder hydraulische onzekerheden in GRADE (bron: Hegnauer 2016).

| Afvoerstatistiek Borgharen – KNMI'14 | | | | | |
|---|-------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| T | 2015 | 2050_{GL} | 2050_{WH} | 2085_{GL} | 2085_{WH} |
| 2 | 1.413 | 1.620 | 1.670 | 1.550 | 1.750 |
| 5 | 1.930 | 2.190 | 2.220 | 2.110 | 2.340 |
| 10 | 2.256 | 2.570 | 2.570 | 2.480 | 2.740 |
| 20 | 2.559 | 2.910 | 2.890 | 2.820 | 3.100 |
| 25 | - | 3.010 | 3.000 | 2.920 | 3.210 |
| 30 | 2.735 | 3.090 | 3.080 | 3.000 | 3.300 |
| 50 | 2.927 | 3.320 | 3.290 | 3.220 | 3.550 |
| 100 | 3.183 | 3.590 | 3.550 | 3.500 | 3.850 |
| 200 | - | 3.860 | 3.770 | 3.770 | 4.140 |
| 250 | 3.488 | 3.940 | 3.860 | 3.830 | 4.240 |
| 300 | 3.540 | 3.980 | 3.900 | 3.890 | 4.300 |
| 500 | 3.682 | 4.160 | 4.040 | 4.060 | 4.450 |
| 1000 | 3.855 | 4.360 | 4.210 | 4.260 | 4.600 |
| 1250 | 3.915 | 4.450 | 4.260 | 4.360 | 4.600 |
| 2000 | 4.007 | 4.580 | 4.420 | 4.480 | 4.600 |
| 2500 | - | 4.600 | 4.470 | 4.550 | 4.600 |
| 3000 | 4.082 | 4.600 | 4.540 | 4.580 | 4.600 |
| 4000 | 4.131 | 4.600 | 4.580 | 4.600 | 4.600 |
| 5000 | 4.203 | 4.600 | 4.600 | 4.600 | 4.600 |
| 10000 | 4.352 | 4.600 | 4.600 | 4.600 | 4.600 |
| 20000 | 4.501 | 4.600 | 4.600 | 4.600 | 4.600 |
| 25000 | - | 4.600 | 4.600 | 4.600 | 4.600 |
| 30000 | 4.588 | 4.600 | 4.600 | 4.600 | 4.600 |

Tabel 8: Afvoeren voor specifieke herhalings tijden voor de verschillende KNMI'14 scenarios voor zichtjaar 2050 en 2085 voor de Maas bij Borgharen, zonder hydraulische onzekerheden in GRADE (bron: Hegnauer 2016).



Figuur 6: Afvoerstatistiek van de verschillende KNMI'06 scenario's voor zichtjaar 2050 en 2100 voor de Rijn (Lobith), oude methodiek – in grijs de afvoerstatistiek van KNMI'14.



Figuur 7: Afvoerstatistiek van de verschillende KNMI'06 scenario's voor zichtjaar 2050 en 2100 voor de Maas (Borgharen), oude methodiek – in grijs de afvoerstatistiek van KNMI'14.

Een aanpassing van de afvoerstatistiek bij Lobith heeft ook effect op de afvoerstatistiek van de IJssel bij Olst. De statistiek bij Olst wordt gebruikt voor de NWM berekeningen van de IJVD. Een aanpassing bij Lobith dient 'doorvertaald' te worden naar een aanpassing bij Olst. De doorvertaling van de afvoerstatistiek van Lobith naar Olst is als volgt gedaan:

- Met het Rijntakkenmodel worden negen berekeningen (Q1 tot Q9) uitgevoerd.
- Voor deze 9 afvoergolven kan (op basis van de maximale afvoer in de golf) de kans van voorkomen worden bepaald o.b.v. afvoerstatistiek bij Lobith.
- Per afvoergolf wordt de maximale waarde van de afvoer bij Olst bepaald.
- Deze maximale afvoeren bij Olst krijgen dezelfde kans van voorkomen (herhalingstijd) als de corresponderende maximale afvoeren bij Lobith.

De afvoerstatistiek van het afvoerstation Dalfsen (Vecht) is niet veranderd. Hiervoor zijn (nog) geen nieuwe inzichten beschikbaar.

In de huidige versie van het NWM is alleen de afvoerstatistiek gewijzigd. Eigenlijk moet ook de golfvorm en -duur worden aangepast bij veranderende uitgangspunten. Het wordt aanbevolen in een later stadium nog eens goed naar deze aspecten te kijken.

3.5 Schematisatie dijkprofielen

De set dijkprofielen uit het DM zijn opgesteld in het kader van het project Waterveiligheid 21^{ste} eeuw WV21 (Kuijper, Stijnen en Van Velzen, 2011) en zijn sindsdien nog aangepast. De precieze herkomst van deze profielen is echter niet meer geheel traceerbaar. De indruk bestaat dat deze dijkprofielen langs veel trajecten te grof en onjuist is. Ten behoeve van het NWM zijn de dijkprofielen die beschikbaar zijn vanuit het project Veiligheid Nederland in Kaart (VNK2), omgezet naar Hydra-Zoet profielen en zijn deze gekoppeld aan de locaties in het NWM (Kuijper, 2015). Deze profielen vervangen de dijkprofielen uit het Deltamodel. Hiermee wordt een eenduidige set dijkprofielen geïntroduceerd, waarvan de herkomst helder is, en waarvan de kwaliteit is geborgd. Binnen VNK2 heeft immers een review plaatsgevonden op de geschematiseerde dijkprofielen.

Voor het merengebied en de IJssel- en Vechtdelta is nog een set profielen beschikbaar, opgesteld door het Watermanagementcentrum Nederland (WMCN). Deze WMCN-profielen zijn reeds opgesteld in het format voor Hydra-Zoet. Voor de meren en de IJssel-/Vechtdelta is de vraag welke profielen (VNK of WMCN) bij voorkeur gebruikt zouden moeten worden in het NWM. Daarom heeft Rijkswaterstaat in een eerder stadium gevraagd om ook deze WMCN-profielen te koppelen aan de locaties in het NWM, de resultaten te vergelijken met die op basis van de VNK-profielen en een advies uit te brengen over de te gebruiken profielen in dit gebied.

In Kuijper (2015) is beschreven dat het in sommige gevallen op basis van de ligging en de gekozen schematisatie van de kering lijkt, dat het VNK-profiel de beste optie en in andere gevallen het WMCN-profiel. Geen van beide set profielen is over het geheel genomen duidelijk beter of slechter. Lokaal kunnen grote verschillen in hydraulisch belastingniveau optreden (tot ca. meer dan ± 1 m) bij de keuze voor de ene of de andere set dijkprofielen, maar 'gemiddeld' geven ze hetzelfde resultaat. In veel gevallen is zonder nadere analyse niet uit te maken welke het beste is en is de keuze voor de een of de andere schematisatie van de kering (bijvoorbeeld wel of geen voorland) ook subjectief te noemen. Uit de resultaten en de analyse van de verschillen blijkt dus dat geen van beide sets (VNK of WMCN) duidelijk beter of slechter is. Daarom is gekozen om zoveel mogelijk uit te gaan van een en dezelfde set voor alle locaties in

het NWM, namelijk de *VNK-profielen*. Immers voor locaties langs de bovenrivieren en de Rijn-Maasmonding zijn *WMCN-profielen* niet beschikbaar. In de Basisprognoses is gerekend met de *VNK-profielen*.

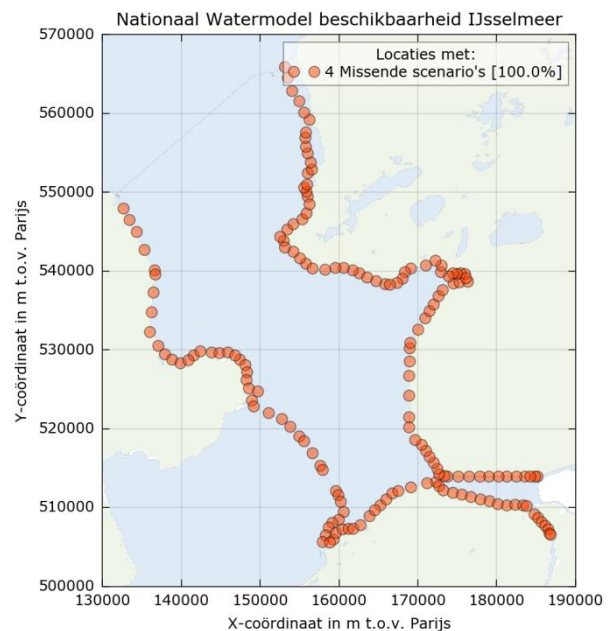
4 IJsselmeer

4.1 Overzicht modellen en uitgangspunten

Voor het IJsselmeer zijn geen scenario-berekeningen uitgevoerd, omdat wordt aangenomen dat de klimaatverandering geen significant effect heeft op de waterstanden of de hydraulisch belastingniveaus. Aangenomen is dat de statistiek van de wind niet significant verandert. Daarnaast is verondersteld dat door maatregelen, die de afvoercapaciteit naar de Waddenzee vergroten (bijv. aanpassing spuiregime of aanleg van pompcapaciteit), de statistiek van het meerpeil niet zal veranderen. Verandering van de rivierafvoer en zeewaterstand beïnvloeden daardoor de Hydraulische Belastingen langs het IJsselmeer nauwelijks. Naast het ontbreken van klimaatscenario's is er in het NWM met dezelfde onderliggende database fysica gerekend als in het DM, namelijk de databases van de Concept Randvoorwaarden 2011 (CR2011). Hierdoor zijn er geen verschillen in de database fysica en komen verschillen in de Hydra-resultaten geheel voort uit de (overige) invoer van de probabilistische berekening. Wel zijn de dijkprofielen veranderd, waarmee de golfploophoogte, het hydraulische belastingniveau (HBN), is berekend. In paragraaf 3.5 is al aangegeven dat de herkomst van de set dijkprofielen uit het DM niet meer geheel traceerbaar is en dat dat deze dijkprofielen langs veel trajecten te grof en onjuist zijn. Daarom zijn in het NWM de VNK-dijkprofielen opgenomen (Kuijper, 2015).

4.2 Controle beschikbaarheid en kwaliteit van de gegevens

In Figuur 8 is te zien voor welke locaties Hydra-resultaten beschikbaar zijn in het NWM. In de legenda (bovenaan in de figuur) staat aangegeven van hoeveel scenario-berekeningen uitvoerbestanden beschikbaar zijn (max. vijf) en het percentage locaties dat aanwezig is in de bestanden (100% is vijf maal het max. aantal locaties). Van één scenario-berekening (nl. Referentie 2015) zijn resultaten beschikbaar, dit komt overeen met de uitgangspunten. Immers verondersteld wordt dat de klimaatontwikkelingen niet van invloed zijn op de Hydraulische Belastingen.

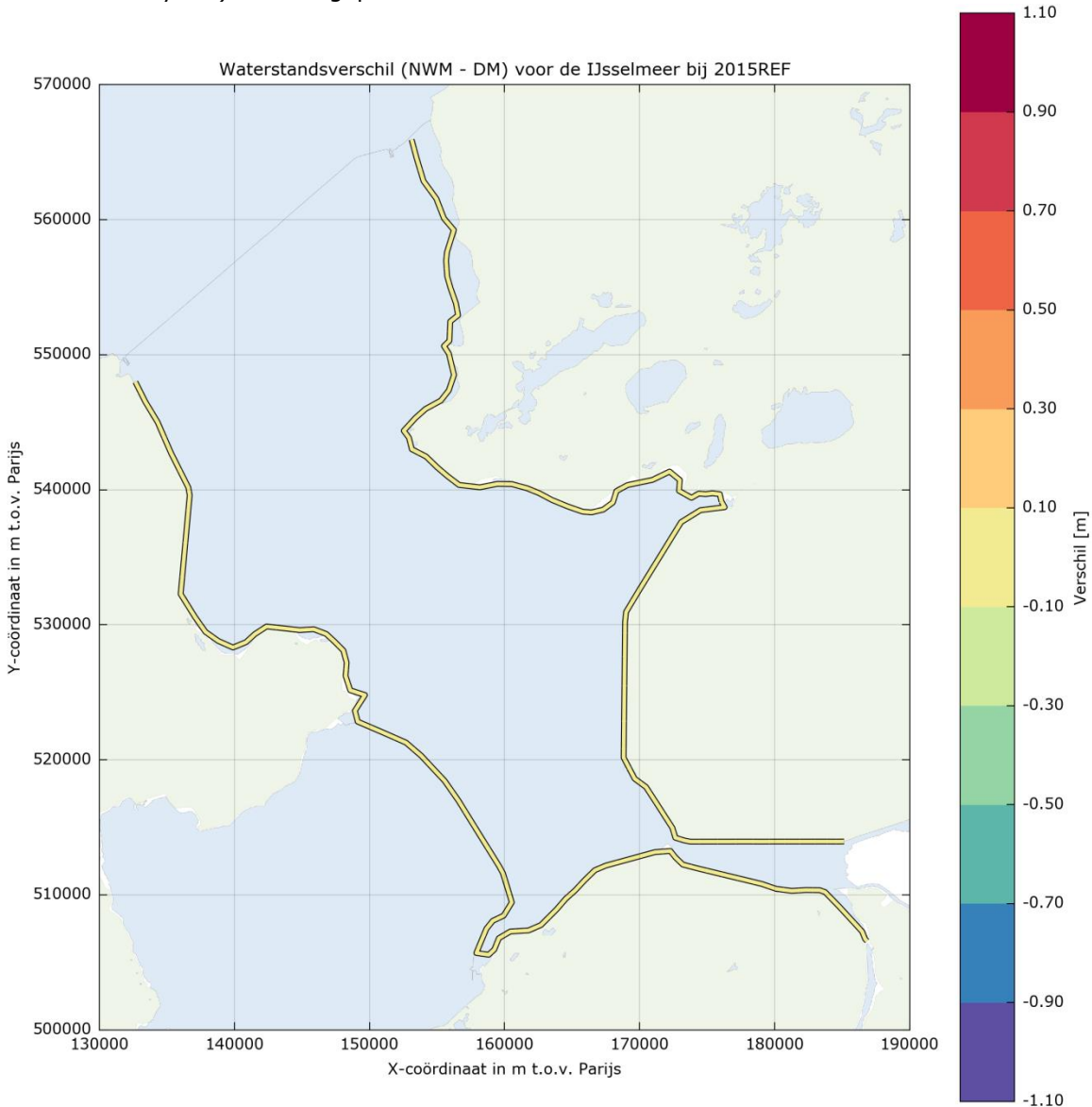


Figuur 8: Beschikbaarheid van Hydra-resultaten langs het IJsselmeer berekend met het NWM (in geëxporteerde NetCDF-bestanden):

- aantal scenarios met uitvoerbestanden van maximaal 5 scenario-berekeningen en
- aantal locaties met uitvoer als percentage van maximale aantal locaties.

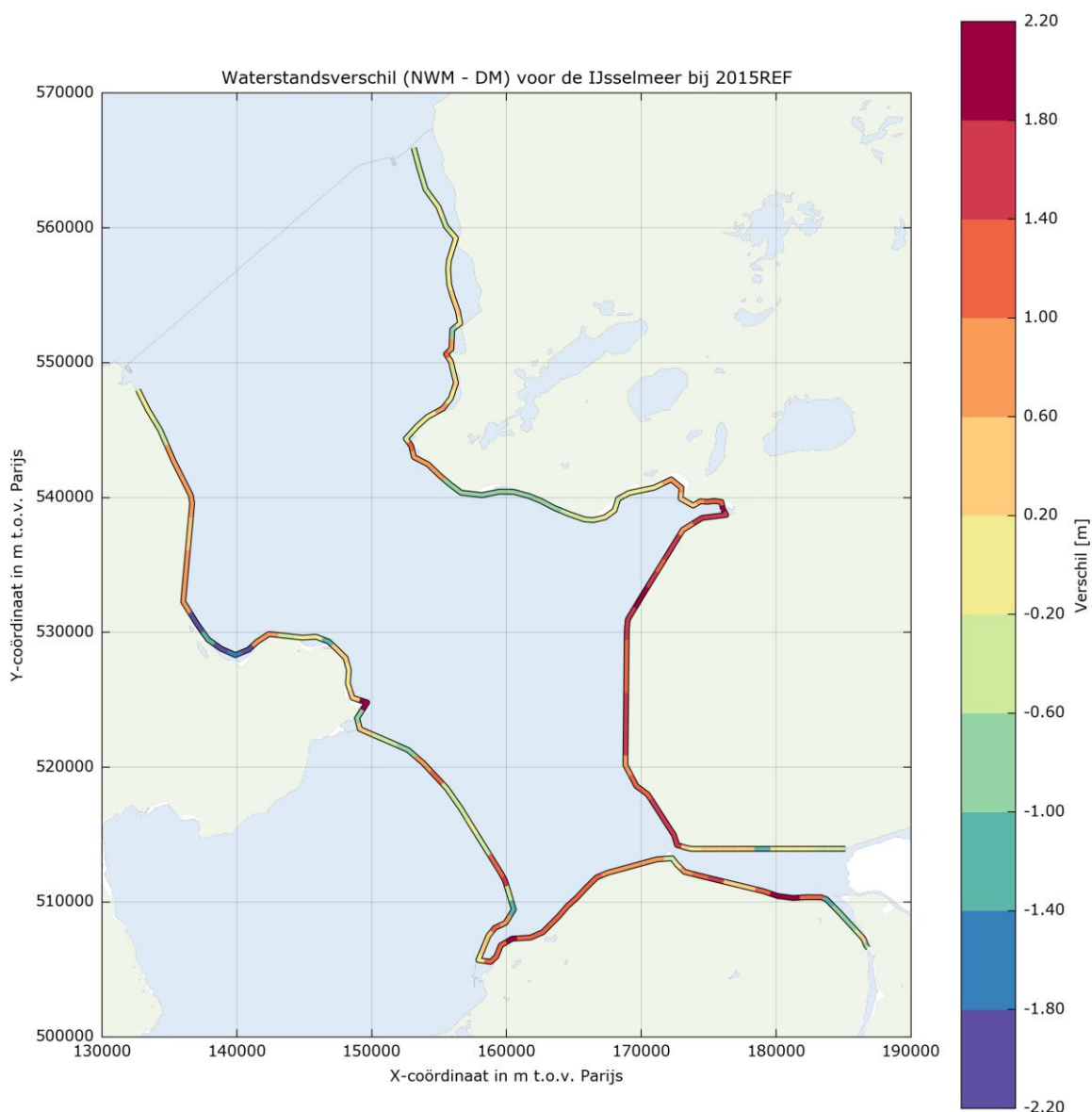
4.3 Verschillen t.o.v. Deltamodel in de Hydra-Zoet resultaten

De waterstandberekening van het NWM levert zoals verwacht geen verschil op met de berekening van het DM (zie Figuur 9). Immers de statistiek van wind en meerpeil zijn (net als de database fysica) niet aangepast.



Figuur 9: Verschillen in oeverwaterstand bij oeverlocaties langs het IJsselmeer tussen Basisprognoses en Basiscases voor referentie 2015.

In Figuur 10 is te zien dat als gevolg van de introductie van de set VNK-profielen aanzienlijke verschillen in het berekende belastingniveau langs het IJsselmeer ontstaan. Deze verschillen komen overigens overeen met de eerder geconstateerde gevolgen van het aanpassen van de dijkprofielen uit Kuijper (2015).



Figuur 10: Verschillen in hydraulisch belasting niveaus langs het IJsselmeer tussen Basisprognoses en Basiscases voor referentie 2015.

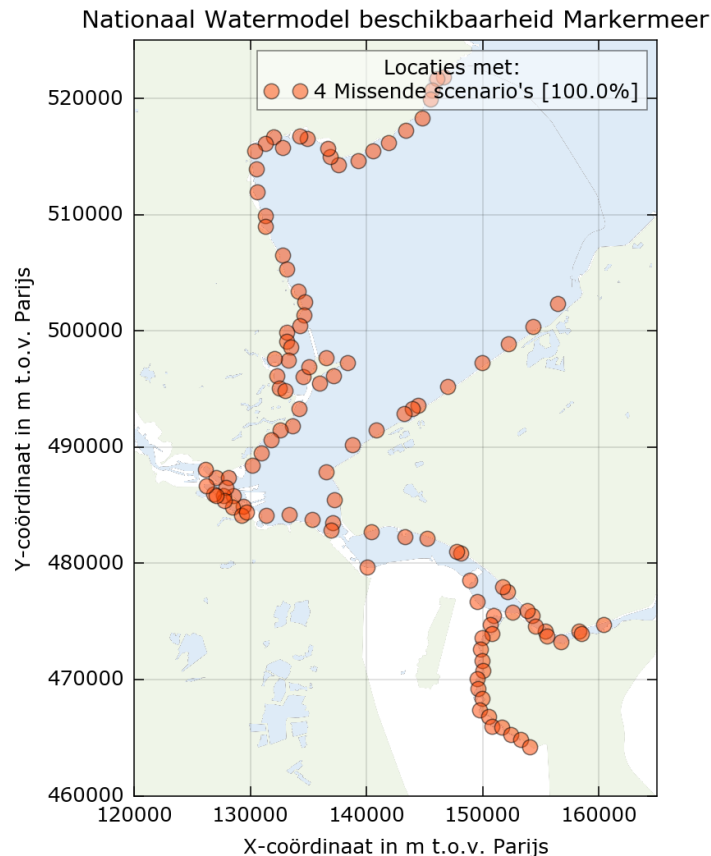
5 Markermeer

5.1 Overzicht modellen en uitgangspunten

Voor het Markermeer zijn (net zoals bij het IJsselmeer) geen klimaatscenario's doorgerekend, en is er met dezelfde database fysica gerekend, in dit geval de databases van de Hydraulische Randvoorwaarden 2006 (HR2006). Voor locaties langs het Markermeer is namelijk ook verondersteld dat door maatregelen die de afvoercapaciteit naar de Waddenzee vergroten, de statistiek van het meerpeil in de toekomst niet zal veranderen.

5.2 Controle beschikbaarheid en kwaliteit van de gegevens

In Figuur 11 is te zien dat voor dezelfde locaties in het NWM als in het DM Hydra-resultaten beschikbaar zijn. Overeenkomstig met de uitgangspunten zijn er slechts resultaten van één scenario beschikbaar.

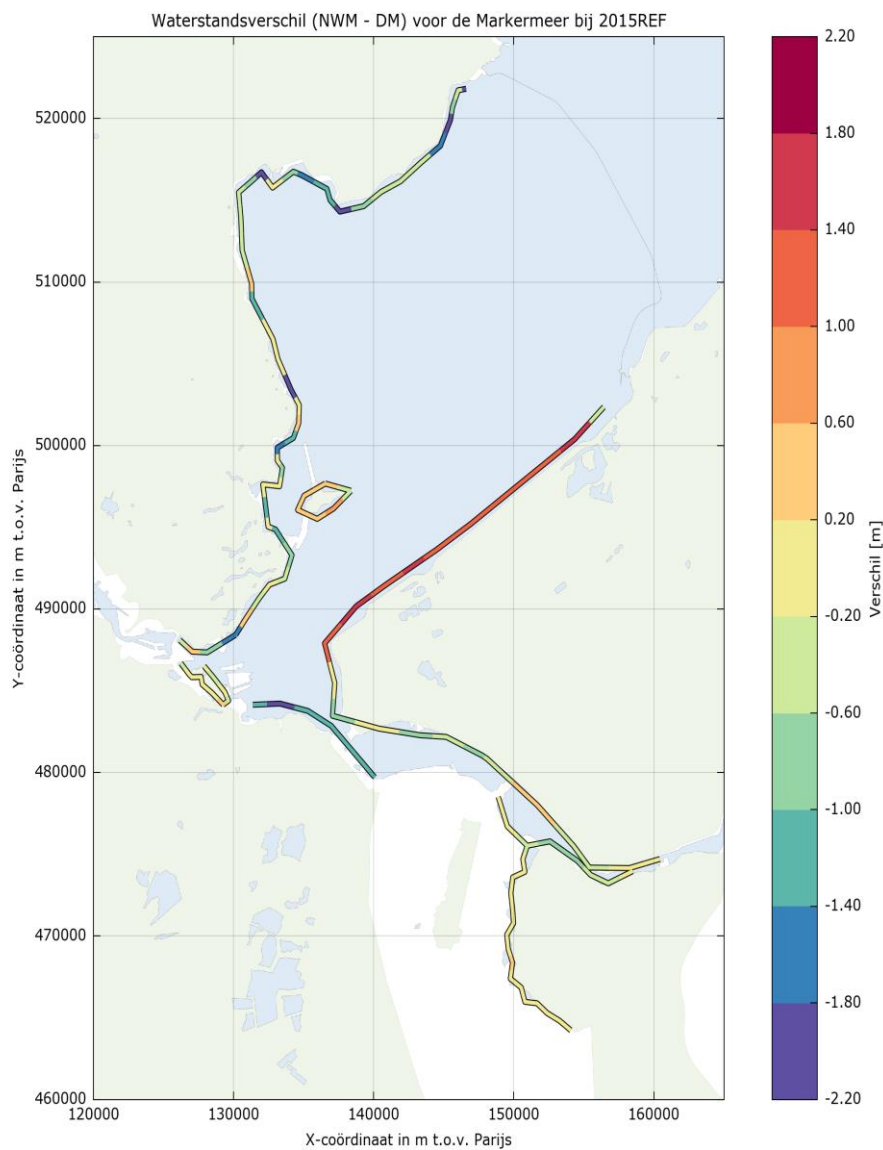


Figuur 11: Beschikbaarheid van Hydra-resultaten langs het Markermeer berekend met het NWM (in geëxporteerde NetCDF-bestanden):

- aantal scenarios met uitvoerbestanden van maximaal 5 scenario-berekeningen en
- aantal locaties met uitvoer als percentage van maximale aantal locaties.

5.3 Verschillen t.o.v. Deltamodel in de Hydra-Zoet resultaten

De waterstandberekening van het NWM levert zoals verwacht (en overeenkomstig met de resultaten van het IJsselmeer) geen verschil op met de berekening van het Deltamodel. Dit is logisch, omdat de statistiek van wind en meerpeil zijn (net als de database fysica) niet aangepast. In paragraaf 3.5 is aangegeven dat in het NWM een nieuwe set dijkprofielen is opgenomen (Kuijper, 2015). In Figuur 12 is te zien dat als gevolg van de introductie van deze nieuwe set profielen aanzienlijke verschillen in het berekende belastingniveau langs het Markermeer ontstaan. Net als langs het IJsselmeer komen deze verschillen overeen met de eerder geconstateerde gevolgen van het aanpassen van de dijkprofielen uit Kuijper (2015). In de figuur is duidelijk te zien dat voor de windgevoelige locaties langs Flevolands oever van het Markermeer aanzienlijk hogere belastingen (meer dan een meter) worden berekend. Langs Noord-Hollands oever kan het niveau lokaal behoorlijk dalen (anderhalve meter of meer).



Figuur 12: Verschillen in hydraulisch belasting niveaus langs het Markermeer tussen Basisprognoses en Basiscases voor referentie 2015.

6 IJssel-Vechtdelta

6.1 Overzicht modellen en uitgangspunten

Voor de IJssel-Vechtdelta zijn beide klimaatscenario's doorgerekend. Als gevolg van de klimaatontwikkeling zal de afvoer op de IJssel toenemen. De afvoer over de Vecht is niet aangepast, omdat hiervoor nog geen nieuwe inzichten beschikbaar zijn. De statistiek van de wind verandert niet. Door stijging van de zeespiegel zal het afvoeren van het waterbezwaar naar de Waddenzee worden bemoeilijkt. Zowel de Basiscases als de Basisprognoses geven inzicht in het effect van een veranderend klimaat voor 2050 en verder, onder de aanname dat het meerpeil (het IJsselmeer) tot 2100 niet stijgt. Aangenomen is dat de statistiek van het meerpeil niet zal veranderen, door maatregelen die de afvoercapaciteit naar de Waddenzee vergroten (bijv. aanpassing spuiregime of aanleg van pompcapaciteit).

Voor de IJssel-Vechtdelta wordt voor de berekeningen gebruik gemaakt van de 5e generatie Baseline en Simona schematisatie 'ijvd-dmref12_5v3' (Van Walsem, 2013). Deze schematisatie is gebaseerd op het voor WTI2011 gebruikte model (Chbab, 2012). Daaraan zijn vervolgens de Ruimte voor de Rivier-maatregelen aan toegevoegd. Er is uitgegaan van een beperkte zomerbedverdieping (SNIP3) en het uitvoeren van het Reevediep (fase 1). Er zijn geen aanvullende Ruimte voor de Rivier-maatregelen in de schematisatie opgenomen. In de rapportage van de Basiscases is deze schematisatie aangeduid met de code *S0* (Kuijper en Botterhuis, 2015). Bij afvoeren hoger dan 16.000 m³/s bij Lobith wordt de Lek ontzien, zoals al in het Nationaal Waterplan is genoemd. De afvoer boven de 16.000 m³/s wordt verdeeld over de Waal en IJssel. De kunstwerken op de splitsingspunten (Pannerdensch Kop en IJsselkop) zijn elk zichtjaar zo ingesteld dat bij de '1/1250 jaar afvoer' de beleidsmatige afvoerverdeling wordt gehandhaafd (zie Tabel 1). Bij andere afvoeren wordt hier beperkt van afgeweken. Verder wordt verondersteld dat de maximale afvoer te Lobith is begrensd (boven dit niveau stromen in Duitsland allerlei gebieden onder water).

De Hydraulische Belastingen in de IJssel-Vechtdelta worden deels bepaald door de hoeveelheid water die de rivieren afvoeren en deels door de waterstanden op het IJsselmeer. Daarnaast zijn de windsnelheid en de windrichting van invloed. Er zijn verschillende combinaties van rivierafvoeren en meerpeilen die tot dezelfde hoogwaterstand leiden: een zware storm met een lage afvoer, een hoge rivierafvoer met een minder zware storm, en allerlei combinaties daar tussen in. Deze combinaties hebben verschillende kansen van optreden. Bij het berekenen van de maatgevende hoogwaterstand is uitgegaan van de volgende (stochastische) variabelen, waarvan de statistiek bekend is:

- piekafvoer IJssel bij Olst en piekafvoer Vecht bij Dalfsen,
- IJsselmeerpeil t.o.v. NAP,
- windveld (snelheid en richting) boven het gebied (potentiële wind op 10 m hoogte) en
- beheersituatie (al dan niet correct functioneren) van de Ramspolkering.

Er is ook een aantal belangrijke variabelen dat niet als stochastisch is meegenomen, maar waarvoor de verwachtingswaarde is gekozen. De stormopzetduur is in de berekeningen 48 uur met een vast verloop.

Het instrumentarium Waqua berekent (als onderdeel van het NWM) voor de gehele IJVD de waterstanden die optreden als gevolg van verschillende combinaties van beheer, afvoer,

meerpeil en wind. Voor elke locatie in de IJssel-Vechtdelta wordt van elke combinatie de maximale waterstand weggeschreven in een database, de zogenaamde database-fysica. Het instrumentarium Hydra Zoet (als onderdeel van het NWM) berekent per locatie de statistiek van de waterstand en het hydraulisch belastingniveau uitgaande van de statistiek van bovenstaande stochasten en de database-fysica. Deze statistiek wijzigt afhankelijk van het gekozen zichtjaar in een klimaatscenario. De doorgerekende combinaties van beheer, afvoer, meerpeil en wind zijn voor elk zichtjaar en beide klimaatscenarios hetzelfde. Daarom wordt voor alle scenarioberekeningen dezelfde database-fysica gebruikt (eq. 1 set Waqua berekeningen).

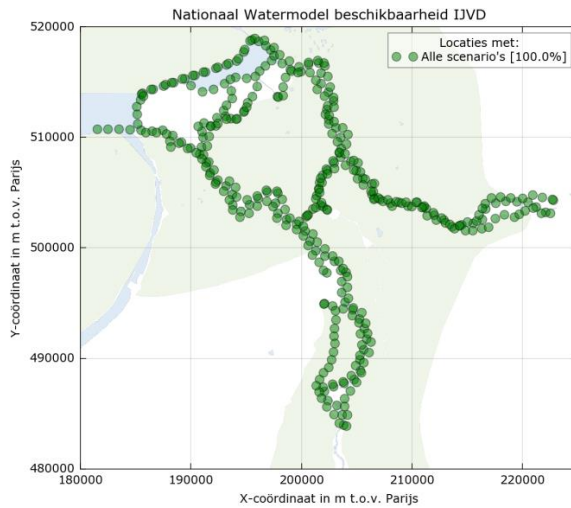
Het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI), dat de Hydraulische Belastingen voor het toetsen van dijken levert, bestaat uit 7800 combinaties van de bovengenoemde (stochastische) variabelen (Paarlberg en Agtersloot, 2015c). Voor beleidsanalyses is een vereenvoudigde aanpak ontwikkeld en geïmplementeerd in het NWM. Deze bestaat uit 1025 combinaties, gebaseerd op 9 afvoerniveaus, 5 meerpeilen, 4 windrichtingen, 6 windsnelheden en 2 situaties van de Ramspolkering (wel/niet functionerend). Hierbij geldt:

- Windsnelheid 0 m/s hoeft voor slechts één windrichting te worden doorgerekend (de richting doet dan immers niet ter zake), en ook voor slechts één toestand van de kering omdat zonder wind de kering nooit hoeft te sluiten.
- De aanname is, dat voor de Vecht-IJsseldelta geen bedreigende situaties kunnen ontstaan voor *oostelijke* richtingen (NNO t/m ZZW); de waterstanden in de Hydra-database voor deze richtingen zijn ontleend aan de som voor windsnelheid 0 m/s. In de vereenvoudigde aanpak is daarnaast windrichting N ook als een oostelijke richting behandeld.
- Van de *westelijke* richtingen zijn alleen ZW, WZW, WNW en NNW doorgerekend. De berekende waterstanden voor richting WNW worden ook gebruikt bij richting W en NW.

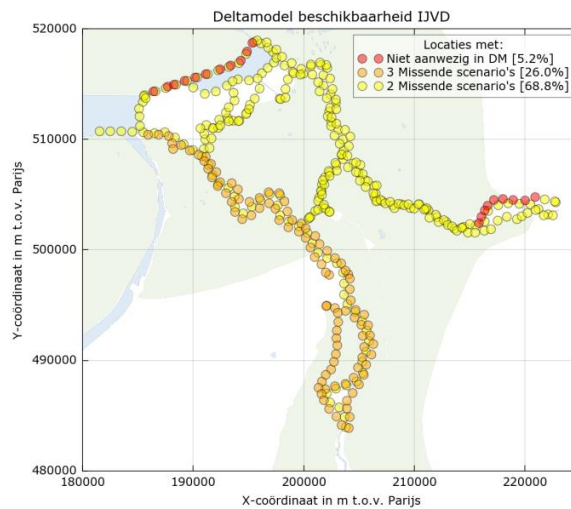
Voor meer informatie over de combinaties die zijn gebruikt in het NWM en DM verwijzen we naar (Geerse en Duits, 2012).

6.2 Controle beschikbaarheid en kwaliteit van de gegevens

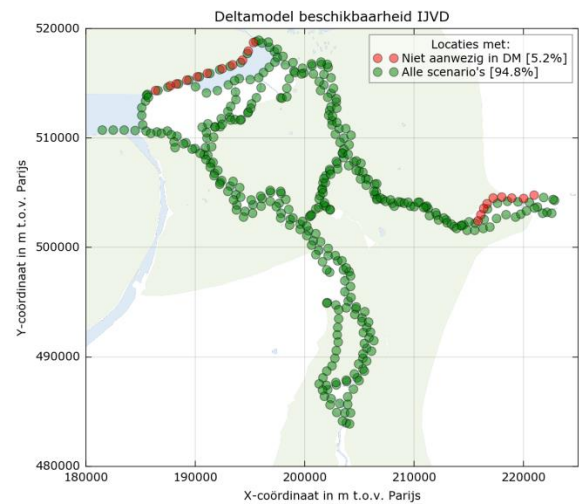
De berekeningen van het NWM leveren een volledige set gegevens voor alle locaties in de IJVD (zie volgende figuur). Voor het DM ontbreken wel een aantal gegevens. In de geëxporteerde NetCDF-bestanden ontbreken locaties voor verschillende Hydra-berekeningen. Dit is natuurlijk niet van invloed op de kwaliteit van het NWM. De export van de werkmappen van de Hydra-berekeningen naar de OpenDAP-server van het NMDC biedt de mogelijkheid om een nagenoeg ook een volledige set van gegevens voor het DM te maken (zie Figuur 13). Hierdoor kan er toch een goede vergelijking worden gemaakt tussen Basisprognoses en Basiscases.



a) NWM beschikbaarheid in geëxporteerde NetCDF-bestanden



b) DM beschikbaarheid in geëxporteerde NetCDF-bestanden



c) DM beschikbaarheid na correctie met Hydra-Zoet export op OpenDAP-server

Figuur 13: Beschikbaarheid van Hydra-resultaten langs de IJssel-Vechtdelta berekend met het NWM en het DM (in geëxporteerde NetCDF-bestanden en na correctie met Hydra-Zoet export op OpenDAP-server):

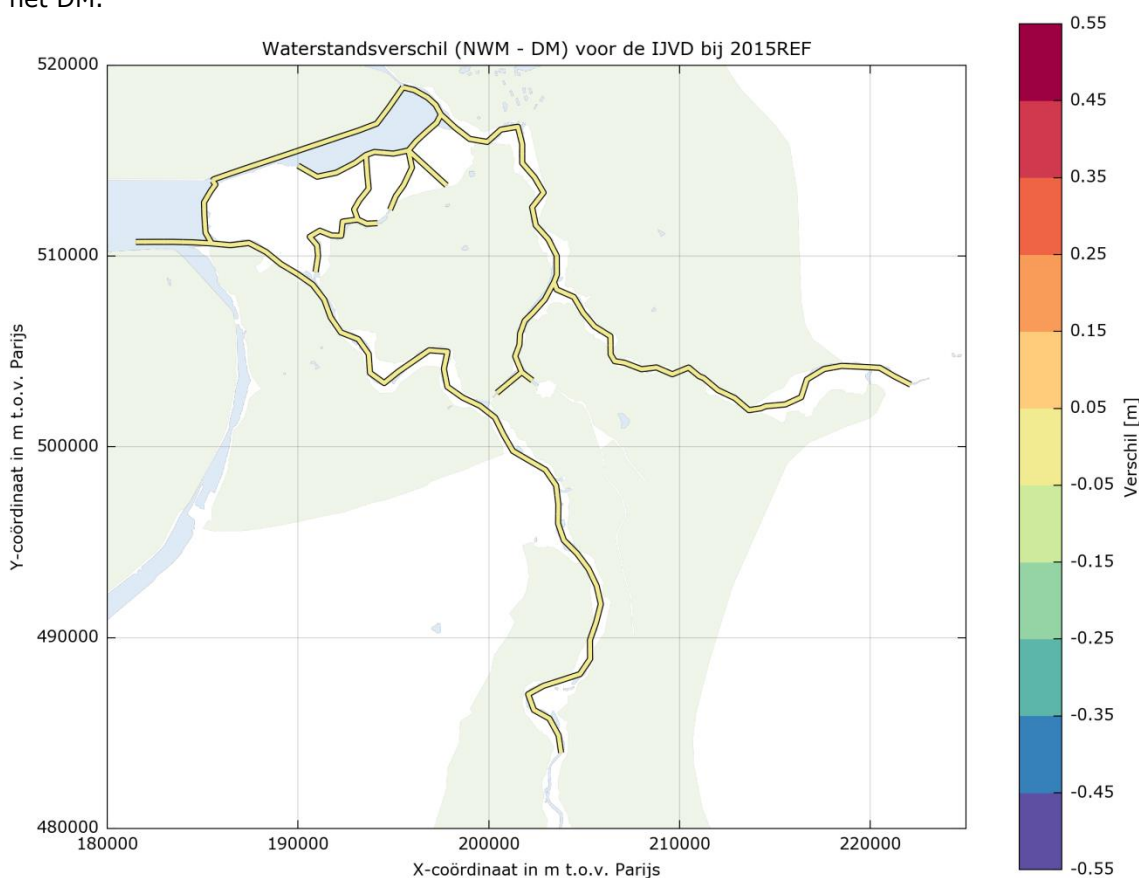
- aantal scenarios met uitvoerbestanden van maximaal 5 scenario-berekeningen en
- aantal locaties met uitvoer als percentage van maximale aantal locaties.

6.3 Verschillen t.o.v. Deltamodel in de Waqua resultaten

Met de S0-schematisatie van IJVD (zie paragraaf 6.1) is 1 set van 1025 Waqua berekeningen uitgevoerd. Deze set, waarin allerlei stormen, rivierafvoeren en meerpeilen zijn gecombineerd, omspannt alle mogelijke combinaties die de waterveiligheid van de IJVD bedreigen. Aangenomen is dat de instellingen op modelranden en/of van kunstwerken, bijvoorbeeld de inzet van de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld of het Reevediep, niet afhankelijk zijn van het zichtjaar dat wordt doorgerekend, daarom is 1 set voor alle zichtjaren voldoende. In Figuur 14 is te zien dat de Waqua berekening uit het NWM gelijk is aan de berekening uit het DM. De verschillen in de databases fysica van NWM en DM zijn getoond bij:

- IJsselafvoer: 2.601 m³/s,
- Vechtafvoer: 850 m³/s,
- Windsnelheid: 37 m/s,
- Windrichting: 292,5 graden,
- Kering-situatie Ramspol: gesloten en
- IJsselmeerpeil: 1,3 m+NAP.

Voor meerdere combinaties is dezelfde vergelijking gemaakt. Op basis hiervan concluderen we dat dat in de Basiscases (DM) en de Basisprognoses (NWM) dezelfde as- en oeverlocaties, dezelfde schematisatie *S0* en dezelfde 1025 combinaties van de stochasten zijn doorgerekend. Hierdoor is (conform verwachting) de database-fysica uit het NWM gelijk aan deze database uit het DM.

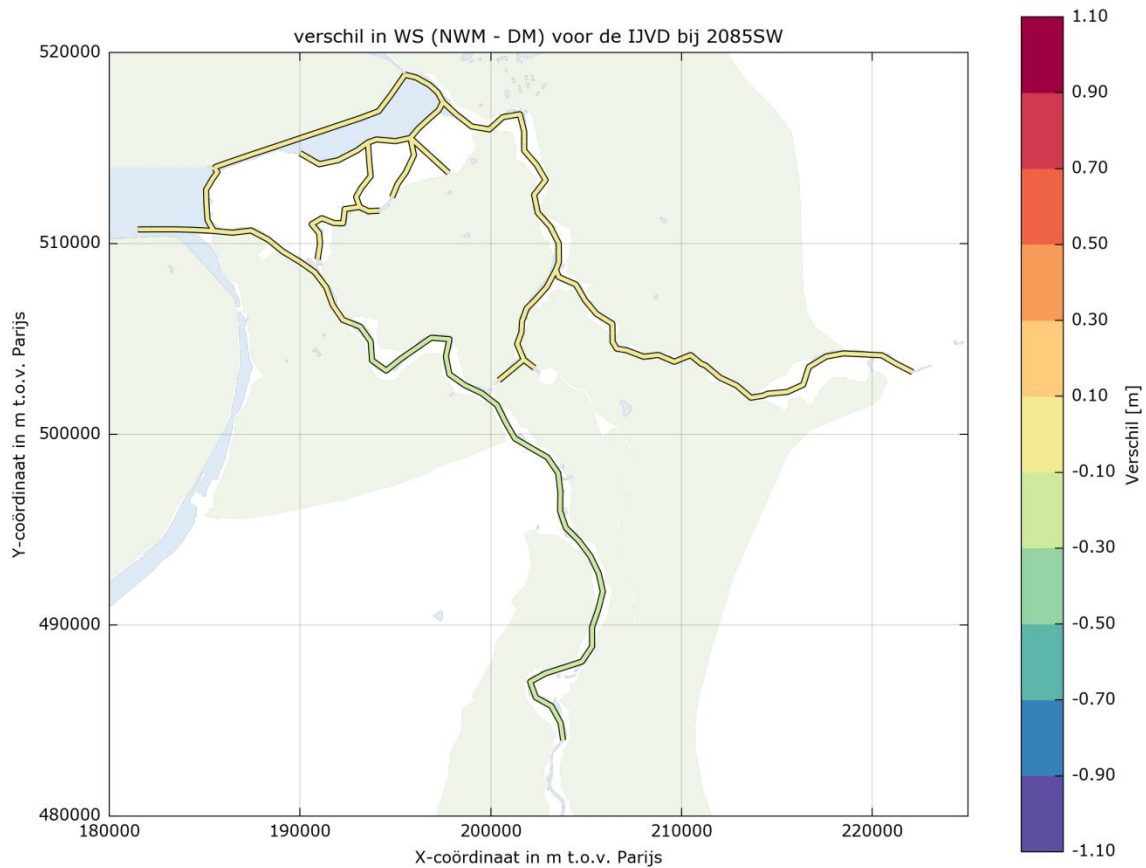


Figuur 14: Verschillen in database fysica, as-locaties langs de IJssel-Vechtdelta tussen Basisprognoses en Basiscases voor referentie 2015.

6.4 Verschillen t.o.v. Deltamodel in de Hydra-Zoet resultaten

In deze paragraaf staat een vergelijking tussen de resultaten van de Hydra-Zoet berekening uit het DM en het NWM. Figuur 15 toont het verschil tussen de Basiscases en de Basisprognoses voor Stoom-Warm 2085. De waterstanden langs de IJssel tot het Reevediep zijn in de NWM Hydra-berekening bij de norm wat lager dan in de DM berekening (maximaal 0,21 m). Dit is mede het gevolg van de aanpassing van de rivierafvoer door de update van de klimaatverandering met de toepassing van KNMI'14 in de Basisprognoses. Een belangrijker oorzaak van dit verschil is de aanpassing van de methode voor de bepaling van de statistiek van de rivierafvoer, namelijk GRADE (Hunink en Hegnauer, 2015). In Tabel 7 is te zien dat in de

nieuwe GRADE-statistiek van de rivierafvoer $16.440 \text{ m}^3/\text{s}$ is te Lobith bij een herhalingsjijd van 1/1250 jaar voor scenario Stoom en Warm in 2085. In het DM werd (omgerekend/ geïnterpooleerd) voor dit zichtjaar nog een afvoer van $17.700 \text{ m}^3/\text{s}$ gehanteerd. Een lagere afvoer op de Bovenrijn te Lobith leidt ook tot een lagere afvoer op de IJssel. Deze afname in waterstanden is dus logisch. Langs de Vecht, het Zwarte Water, het Zwarte Meer en de monding van de IJssel treden geen waterstandverschillen op. Dit is conform verwachting immers de statistiek van de stochasten Vechtafvoer, het IJsselmeerpeil en wind zijn niet aangepast.

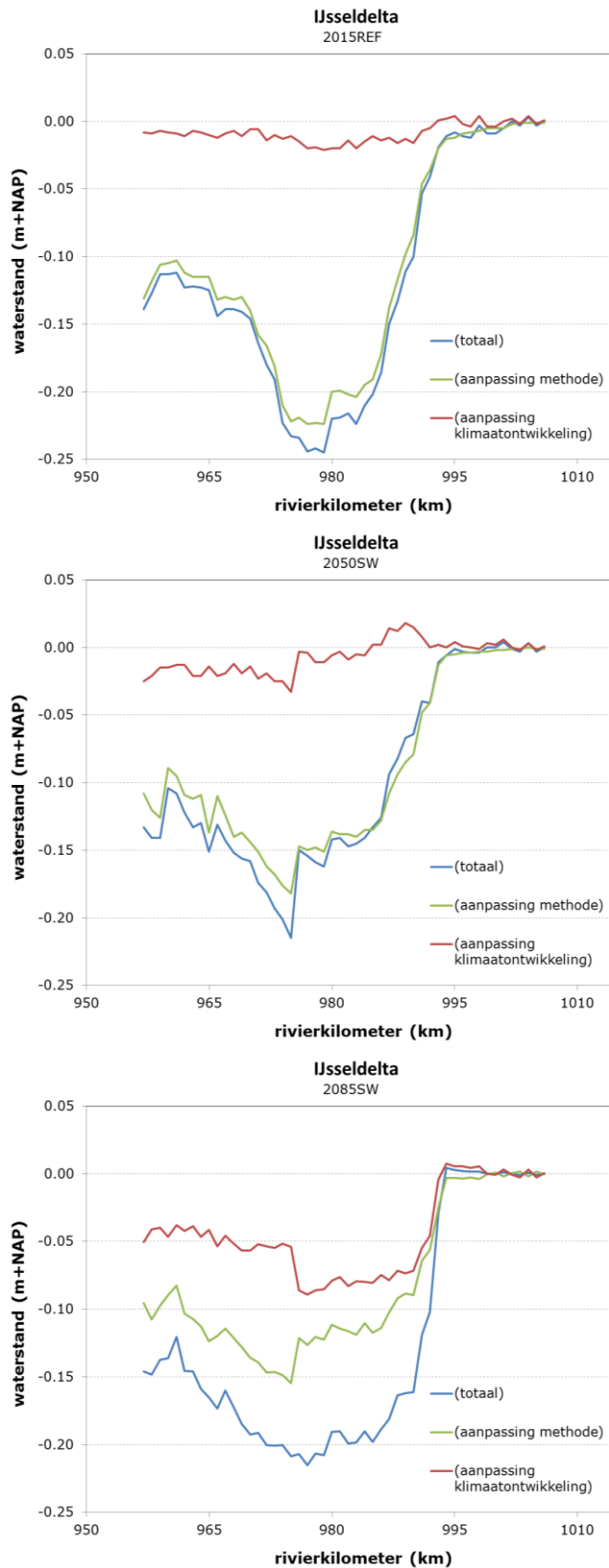


Figuur 15: Verschillen in as-waterstand langs de IJssel-Vechtdelta tussen Basisprognoses en Basiscases voor Stoom-Warm 2085.

Figuur 16 laat in drie grafieken, één voor elk zichtjaar van scenario Stoom-Warm, zien wat het effect is van de aanpassing van de klimaatontwikkeling door KNMI'14 en de aanpassing van de methode waarmee de statistiek van de rivierafvoer is bepaald (GRADE). Op kilometer 975 verandert de gebruikte norm van 1.250 naar 2.000 jaar, daarom zit hier een sprong in de resultaten. Verder is in de figuren te zien dat het effect van KNMI'14 aanzienlijk kleiner is dan het effect van GRADE. Ten behoeve van het OI heeft Rijkswaterstaat in 2015 (Buiteveld, 2015) resultaten van de GRADE analyse op basis van KNMI'06 scenario W^+ gepubliceerd. Op dezelfde wijze als de KNMI'14 kentallen zijn in Buiteveld (2015) de kentallen van KNMI'06 W^+ vertaald in afvoerstatistiek van de Rijn te Lobith en de Maas te Borgharen. Deze getallen laten zich goed vergelijken met de kentallen van KNMI'14 (Basisprognoses). Het verschil tussen beide berust op de aanpassing van de KNMI-scenarios als gevolg van nieuwe inzichten van het IPCC. Buiten het DM om, maar met dezelfde database-fysica zijn de Basiscases herberekend met de afvoerstatistiek van Buiteveld (2015): GRADE i.c.m. KNMI'06. De donkerrode lijn toont het verschil tussen de Basisprognoses en de resultaten van deze herberekening. Alleen in zichtjaar 2085 is het effect van KNMI'14 meer dan enkele centimeters.

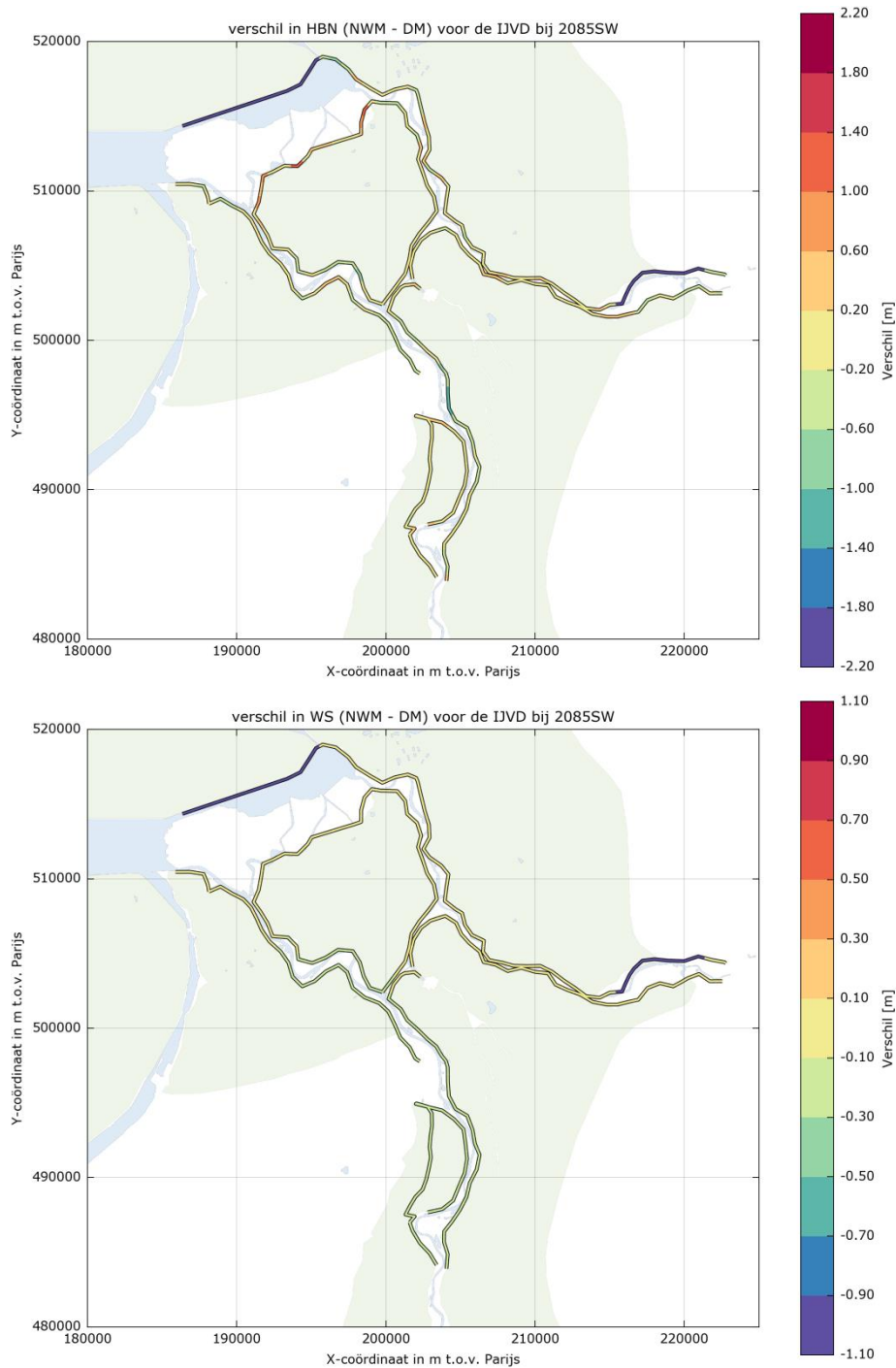
Het effect van de aanpassing van de methode is groter, namelijk 0,15 – 0,20 m. Dit effect is bepaald door de resultaten van de Basiscases (KNMI'06 en oude methode statistiek) te vergelijken met de resultaten van de herberekening (KNMI'06 en GRADE methode).

Het moge duidelijk zijn dat deze analyse alleen voor de IJsseldelta is uitgevoerd, omdat voor de Vechtdelta geen nieuwe statistiek beschikbaar is. Ook neemt het verschil tussen de lijnen in de grafieken benedenstrooms richting IJsselmeer af, omdat aangenomen is dat de statistiek van het meerpeil de komende eeuw niet zal wijzigen.



Figuur 16: Verschil tussen Basisprognoses en Basiscases in waterstand bij de norm langs de IJsseldelta voor scenario Stoom en Warm.

De hydraulisch belasting niveaus nemen hier en daar met een aantal decimeter af of toe, zoals de bovenste kaart in Figuur 17 laat zien. Dit is het gevolg van de introductie van de nieuwe set VNK dijkprofielen. Net als langs het IJssel- en Markermeer komen deze verschillen overigens overeen met de eerder geconstateerde gevolgen van het aanpassen van de dijkprofielen uit Kuijper (2015). In de figuur is te zien dat langs de Vecht en de IJssel de verschillen beperkt zijn (minder dan 30 cm), maar voor de windgevoelige locaties van Mastenbroek (dijkkring 10 langs het Zwarte Meer) kunnen de verschillen aanzienlijk zijn (meer dan een meter). Het effect van de aangepaste dijkprofielen langs de Noordoostpolder is niet duidelijk, omdat deze gegevens ontbreken in de NetCDF van het Deltamodel.

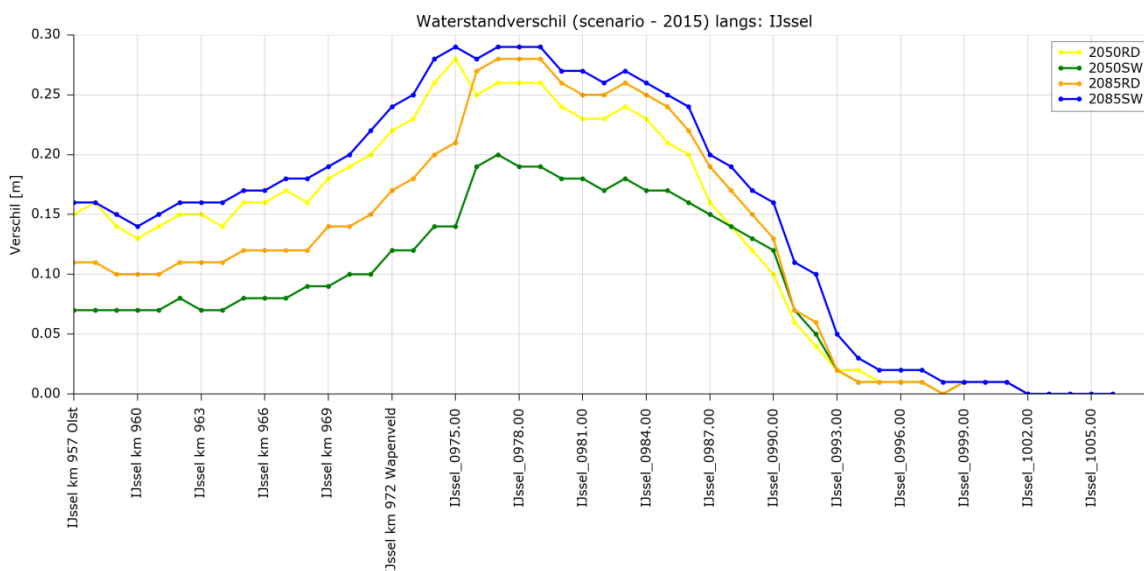


Figuur 17: *Verschillen in hydraulisch belasting niveaus en waterstanden langs de IJssel-Vechtdelta tussen Basisprognoses en Basiscases voor Stoom-Warm 2085. De paarsblauwe kleur langs de IJssel komt voort uit het ontbreken van de DM-gegevens voor die locaties.*

6.5 Klimaatverschillen

In Figuur 18 en Figuur 19 worden voor respectievelijk de IJssel- en de Vechtdelta de effecten van klimaatontwikkeling volgens KNMI'14 getoond voor de vigerende normfrequentie (geldig tot 1-1-2017). Voor de figuren zijn alleen resultaten van de vijf scenarioberekeningen van de Basisprognoses gebruikt. Het verschil tussen de Referentie 2015 en de scenarios Rust-Druk en Stoom-Warm wordt getoond (allen gebaseerd op KNMI'14). Op de bovenrand van de IJssel bij Olst is de volgorde van het effect conform de grootte van de Rijnafvoer te Olst bij een herhalingstijd van 1.250 jaar volgens Tabel 7. Op kilometer 975 verspringt de norm van 1.250 jaar naar 2.000 jaar. In de figuur is te zien dat benedenstrooms van deze locatie de waterstand in het zichtjaar 2085 van scenario Rust-Druk (conform de verwachting) hoger is dan de waterstand in 2050 jaar. Bovenstrooms van deze locatie is de waterstand in zichtjaar 2050 hoger. De Rijnafvoer 1/1250 jaar is 16.500 m³/s in het zichtjaar 2050 en in het zichtjaar 2085 is de afvoer bij deze herhalingstijd bijna 500 m³/s lager (nl. 16.020 m³/s). Bij de herhalingstijd 2.000 jaar is de afvoer in zichtjaar 2085 80 m³/s hoger.

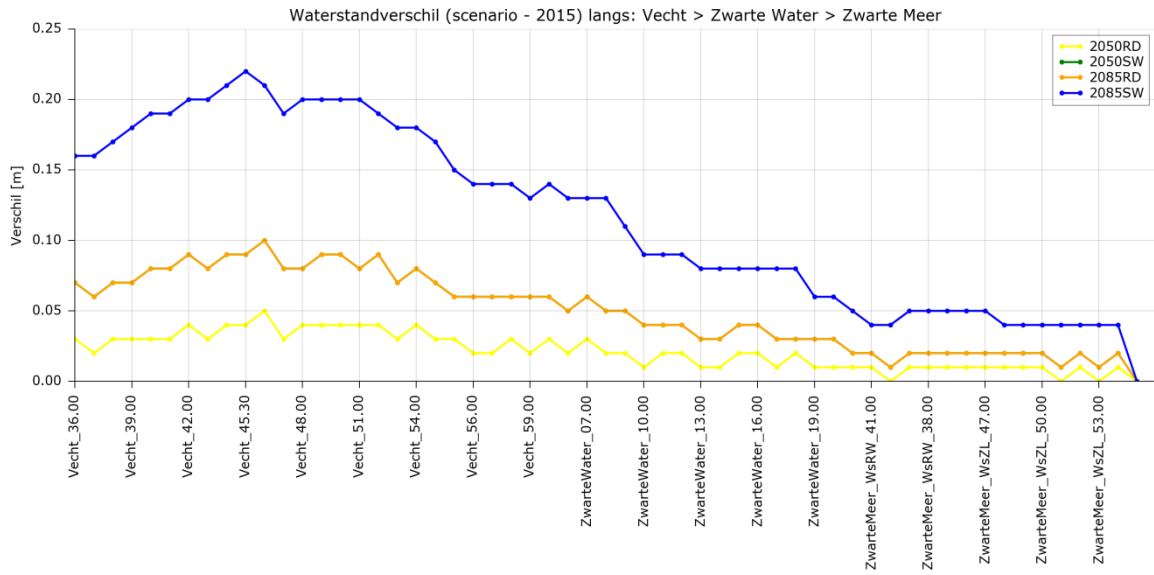
De verschillende klimaatscenario's laten een bult in het waterstandseffect zien rond rivierkilometer 980, waar de verschillen oplopen tot 3 decimeter. De inzet van de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld heeft een duidelijk effect op de mate waarin de toename van de afvoer in de statistiek doorwerkt in de waterstanden. Mogelijk is dit een onbedoeld neveneffect van de discretisatie van de stochast IJsselaflow in de hydraulische berekeningen in negen afvoerniveaus. Hier is al eerder op ingegaan in Botterhuis et al (2016). Het is verstandig om na te gaan of de inzetfrequentie van de hoogwatergeul en het Reevediep mag toenemen als gevolg van de klimaatontwikkeling (dan wel het afvoerniveau waarbij de maatregel wordt ingezet). Daarnaast mag het aantal afvoerniveaus in de doorgerekende combinaties van rivierafvoer, meerpeil en storm geen invloed hebben op het berekende klimaateffect.



Figuur 18: Effect van de klimaatontwikkeling in waterstand bij de norm langs de IJsseldelta berekend met het NWM voor twee klimaatscenario's.

Ook op de bovenrand van de Vecht nabij Dalfsen is de volgorde van de verschillen langs de Vecht gelijk aan de toename van de maatgevende afvoer bij een herhalingstijd van 1250 jaar. Zichtjaren 2050SW en 2085RD hebben dezelfde afvoerstatistiek en dus hetzelfde klimaateffect. Immers de statistiek van het meerpeil wijzigt niet als gevolg van klimaatontwikkeling. Daarom

neemt zowel in de IJssel- als in de Vechtdelta het effect van het klimaat af richting het IJsselmeer.



Figuur 19: Effect van de klimaatontwikkeling in waterstand bij de norm langs de Vechtdelta berekend met het NWM voor twee klimaatscenario's.

Let op! De resultaten van scenarioberekening 2050SW valt langs de Vecht samen met het resultaat van 2085RD. Daarom is deze lijn niet te zien in de figuur.

7 Rijn-Maasmonding

7.1 Overzicht modellen en uitgangspunten

Zowel de hoeveelheid water die de rivieren afvoeren als de waterstanden op zee, bepalen de waterstanden in de RMM. Daarnaast zijn de windsnelheid en de windrichting van invloed. Verschillende combinaties van rivierafvoeren en zeewaterstanden leiden tot hoge waterstanden: een zware storm met een lage afvoer, een hoge rivierafvoer met een minder zware storm, en allerlei combinaties daar tussenin. Deze combinaties hebben verschillende kansen van optreden. Een zeer zware storm (11 Bft) met een hoge rivierafvoer heeft bijvoorbeeld een veel kleinere kans van optreden dan een 'gewone' storm (8 Bft) met diezelfde rivierafvoer. Als gevolg van de klimaatontwikkeling zal de afvoer op de Maas en de Rijntakken toenemen en zal de zeespiegel stijgen. De statistiek van rivierafvoer en de zeewaterstand zal dus wijzigen door de ontwikkeling van het klimaat. Zoals eerder aangegeven, is aangenomen dat de statistiek van de wind niet significant verandert.

Vanaf de start van het Deltaprogramma in 2009/2010 zijn berekeningen gemaakt om het effect van de ontwikkeling van het klimaat en mogelijk strategieën in de RMM te bepalen. De hydraulische berekeningen zijn gemaakt met het model Sobek-RMM-ReferentieDPRD2015 (Van Walsem, 2013). Dit Sobek-RE model is gebaseerd op het voor WTI-2011 gebruikte model (Slootjes et al., 2011). Daaraan zijn Ruimte voor de Rivier-maatregelen toegevoegd, zoals bijvoorbeeld Noordwaard, Avelingen en Volkerrak-Zoommeer. Bij afvoeren hoger dan 16.000 m³/s bij Lobith wordt de Lek ontzien, zoals al in het Nationaal Waterplan is genoemd. De afvoer boven de 16.000 m³/s is verdeeld over de Waal en IJssel. Verondersteld wordt dat de maximale afvoer te Lobith is begrensd (boven dit niveau stromen in Duitsland allerlei gebieden onder water). In de rapportage van de Basiscases is deze schematisatie aangeduid met de code *S0* (Botterhuis en Stijnen, 2014b).

Beide klimaatscenario's zijn doorgerekend, zowel met Sobek als met Hydra Zoet zijn vijf scenario-berekeningen gemaakt. Bij het berekenen is uitgegaan van de volgende (stochastische) variabelen, waarvan de statistiek bekend is:

- piekafvoer Rijn bij Lobith en piekafvoer Maas bij Lith;
- zeewaterstand bij Maasmond t.o.v. NAP;
- windveld (snelheid en richting) boven het gebied (potentiële wind op 10 m hoogte) en
- beheersituatie (al dan niet correct functioneren) van de Europoortkering (Maeslant- en Hartelkering i.c.m. het dijklichaam daar tussenin).

Er is ook een aantal belangrijke variabelen dat niet als stochastisch is meegenomen, maar waarvoor de verwachtingswaarde is gekozen. De stormopzetduur is in de berekeningen 35 uur ten opzichte van de nullijn met een vast verloop. Ook het stormverloop in de berekeningen is vast. Afvoergolven hebben een vaste golfvorm, en worden afgetopt op een vaste wijze.

Het instrumentarium Sobek-RE berekent (als onderdeel van het NWM) voor het gehele gebied de waterstanden die optreden als gevolg van verschillende combinaties van beheer, afvoer, zeewaterstand en wind. Voor elke locatie in de Rijn-Maasmonding wordt van elke combinatie de maximale waterstand weggeschreven in een database, de zogenaamde database-fysica. Het instrumentarium Hydra Zoet (als onderdeel van het NWM) berekent per locatie de statistiek van de waterstand en het hydraulisch belastingniveau uitgaande van de statistiek van bovenstaande stochasten en de database-fysica. Deze statistiek wijzigt afhankelijk van het gekozen zichtjaar in een klimaatscenario.

De bovenrand van de Sobek-RE berekeningen wordt overgenomen uit de berekeningen met het Rijntakken model (zie paragraaf 3.3). Uitgangspunt in de Basiscases was dat per zichtjaar de beleidsmatige afvoerverdeling over de Rijntakken bij de eens per 1250 jaar afvoer wordt gehandhaafd door een aanpassing van de kunstwerken Pannerdensche Overlaat en de Hondsbroeksche Pleij in het Waqua model van de Rijntakken. Zodoende wijzigt de instelling van deze kunstwerken elk zichtjaar, omdat deze ontwerpafvoer per zichtjaar verandert als gevolg van klimaatontwikkeling. In elke scenarioberekening is een unieke database-fysica opgesteld in zowel de Basiscases als de Basisprognoses. Ondanks dat in de Basisprognoses de afvoerstatistiek is gewijzigd t.o.v. de Basiscases, zijn in de berekeningen wel dezelfde instellingen van deze kunstwerken gehanteerd (zie paragraaf 8.3). Bijvoorbeeld, in berekening Rust-Druk 2050 uit de Basiscases en Rust-Druk 2050 in de Basisprognoses zijn de Pannerdensche Overlaat en de Hondsbroeksche Pleij in het Waqua model hetzelfde ingesteld. Deze instellingen zijn overgenomen uit een Excel-sheet die is opgesteld door Martin Scholten: "Toepassing voor Deltamodel van 9 afvoergolven voor Maas en Rijn en NDB en IJVD AfverdWaqua vxx.xls".

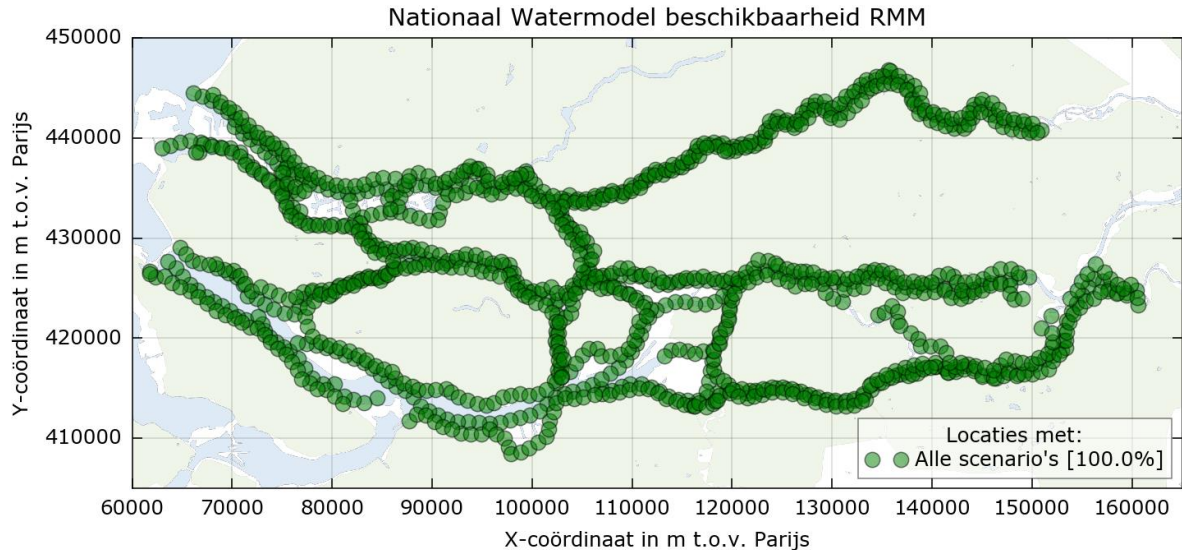
Het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI), dat de Hydraulische Belastingen voor het toetsen van dijken levert, bestaat uit 9750 combinaties van de bovengenoemde (stochastische) variabelen (Paarlberg en Agtersloot, 2015d). Voor beleidsanalyses is een vereenvoudigde aanpak ontwikkeld en geïmplementeerd in het NWM. Deze bestaat uit 108 combinaties, gebaseerd op 9 afvoerniveaus, 6 stormniveaus met gekoppelde windsnelheid en 2 situaties van de Europoortkering (open of dicht). Hierbij geldt:

- Windsnelheid 0 m/s hoeft voor slechts één windrichting te worden doorgerekend (de richting doet dan immers niet ter zake), en ook voor slechts één toestand van de kering, omdat zonder wind de kering nooit hoeft te sluiten.
- De aanname is, dat voor de RMM geen bedreigende situaties kunnen ontstaan voor *oostelijke* richtingen (NNO t/m ZZW); de waterstanden in de Hydra-database voor deze richtingen zijn ontleend aan de som voor windsnelheid 0 m/s.
- Van de *westelijke* richtingen is alleen WNW doorgerekend. Een belangrijke aanname daarbij is dat de waterstand als het gevolg van de andere westelijke windrichtingen afgeleid kan worden van deze berekening.

Voor meer informatie over de combinaties die zijn gebruikt in het NWM en DM verwijzen we naar (Geerse en Duits, 2012).

7.2 Controle beschikbaarheid en kwaliteit van de gegevens

In Figuur 20 is te zien dat de beschikbaarheid van gegevens in het NWN volledig is. Voor alle doorgerekende combinaties is in de databases voor alle locaties een waterstand aanwezig. Voor alle locaties is van alle frequenties in de NetCDF-bestanden een waterstand en hydraulisch belastingniveau aanwezig.



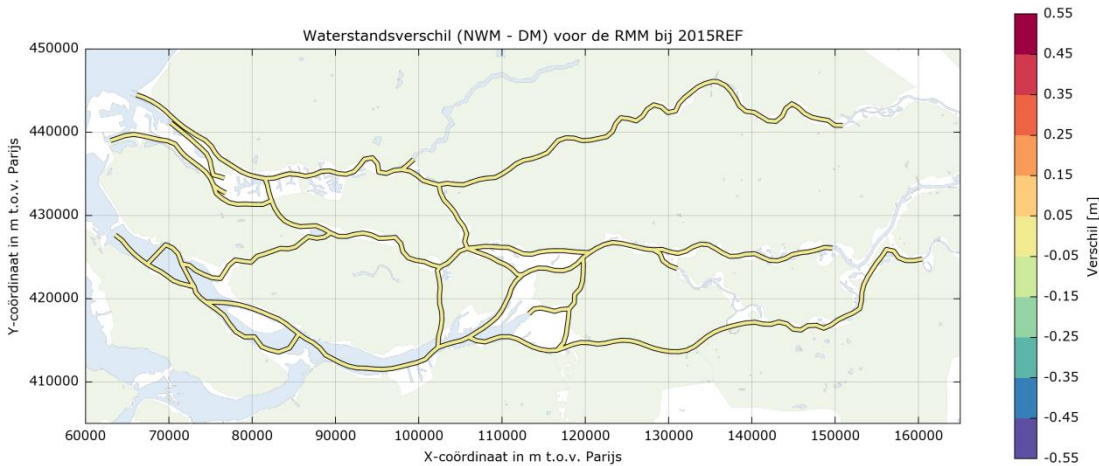
Figuur 20: Beschikbaarheid van Hydra- resultaten langs de Rijn-Maasmonding berekend met het NWM (in geëxporteerde NetCDF-bestanden):

- aantal scenarios met uitvoerbestanden van maximaal 5 scenario-berekeningen en
- aantal locaties met uitvoer als percentage van maximale aantal locaties.

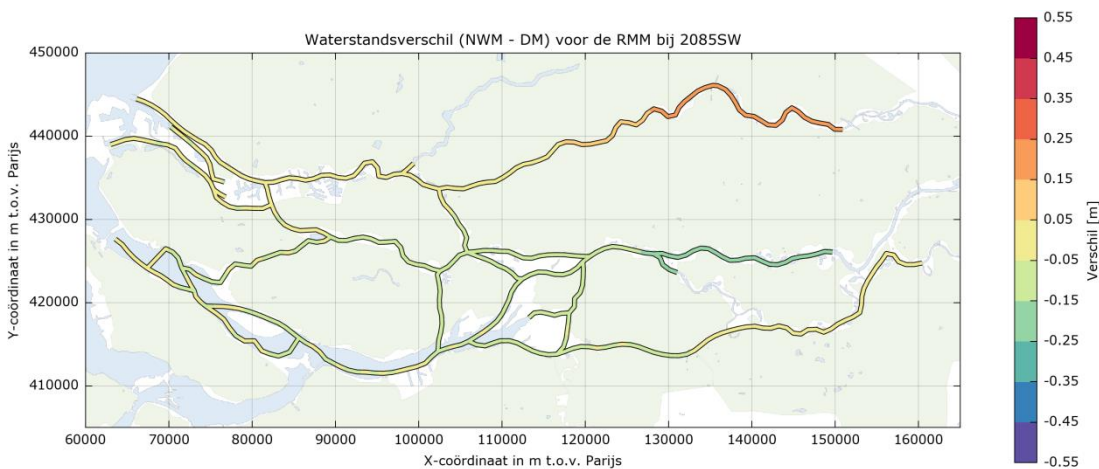
7.3 Verschillen t.o.v. Deltamodel in de Waqua resultaten

Met de *S0*-schematisatie van RMM (zie paragraaf 7.1) zijn voor alle zichtjaren aparte Sobek berekeningen uitgevoerd. Deze sommen, waarin allerlei stormen, rivierafvoeren en zeewaterstanden zijn gecombineerd, omspannen alle mogelijke combinaties. Aangenomen is dat de instellingen op modelranden, zeewaterstand en rivierafvoer, afhankelijk zijn van het zichtjaar dat wordt doorgerekend. Naast de wijziging van de instellingen van de kunstwerken op de splitsingspunten (zie paragraaf 7.1), is de vulling van het Haringvliet voorgaand aan een storm afhankelijk van het zichtjaar (nl. afhankelijk van de zeespiegelstijging). In Figuur 21 is te zien dat de hydraulische berekening van het NWM voor bijna alle locaties nagenoeg gelijk is aan de berekening van het DM voor de Referentie 2015. De verschillen in de database fysica zijn geanalyseerd bij:

- Afvoer: 16.000 m³/s
- Windsnelheid: 31,79 m/s
- Windrichting: 292,5 graden
- Keringsituatie Europoort: open
- Zeewaterstand: 4,5 m+NAP



Figuur 21: Verschillen in database fysica, as-locaties langs de Rijn-Maasmond tussen Basisprognoses en Basiscases voor referentie 2015.



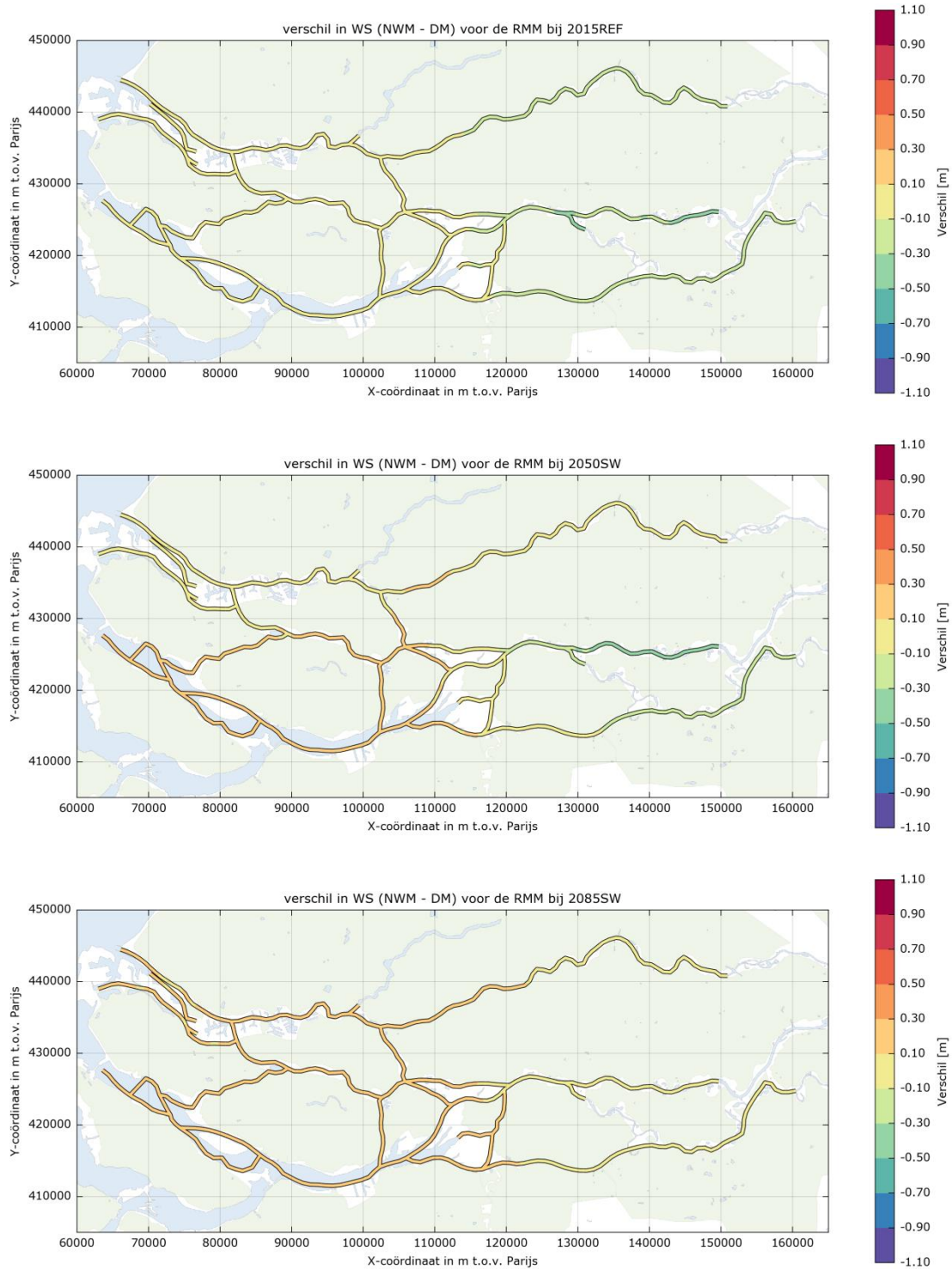
Figuur 22: Verschillen in database fysica, as-locaties langs de Rijn-Maasmond tussen Basisprognoses en Basiscases voor SW2085.

In Figuur 22 is te zien dat de hydraulische berekening van het NWM op Waal en de Lek afwijkt van de berekening van het DM voor Stoom-Warm 2085. In de NWM berekening is een andere afvoerverdeling opgelegd. In de DM berekening is (overeenkomstig met de uitgangspunten) de afvoerverdeling opgelegd, waarbij voor $Q_{Lobith} = 18.000 \text{ m}^3/\text{s}$ de beleidsmatige afvoerverdeling wordt gehandhaafd (afvoerverdeling van SW2100). In de NWM berekening is hier (per ongeluk) van afgeweken. De afvoerverdeling is opgelegd, waarbij voor $Q_{Lobith} = 16.000 \text{ m}^3/\text{s}$ de beleidsmatige afvoerverdeling wordt gehandhaafd (afvoerverdeling van REF2015). Uit analyse van de andere scenarioberekeningen blijkt dat in alle NWM berekeningen van de RMM de afvoerverdeling van Referentie 2015 is toegepast. Dit is een fout, omdat in de NWM berekeningen van de Rijntakken wel per scenarioberekening de afvoerverdeling verschilt (paragraaf 8.3).

7.4 Verschillen t.o.v. Deltamodel in de Hydra-Zoet resultaten

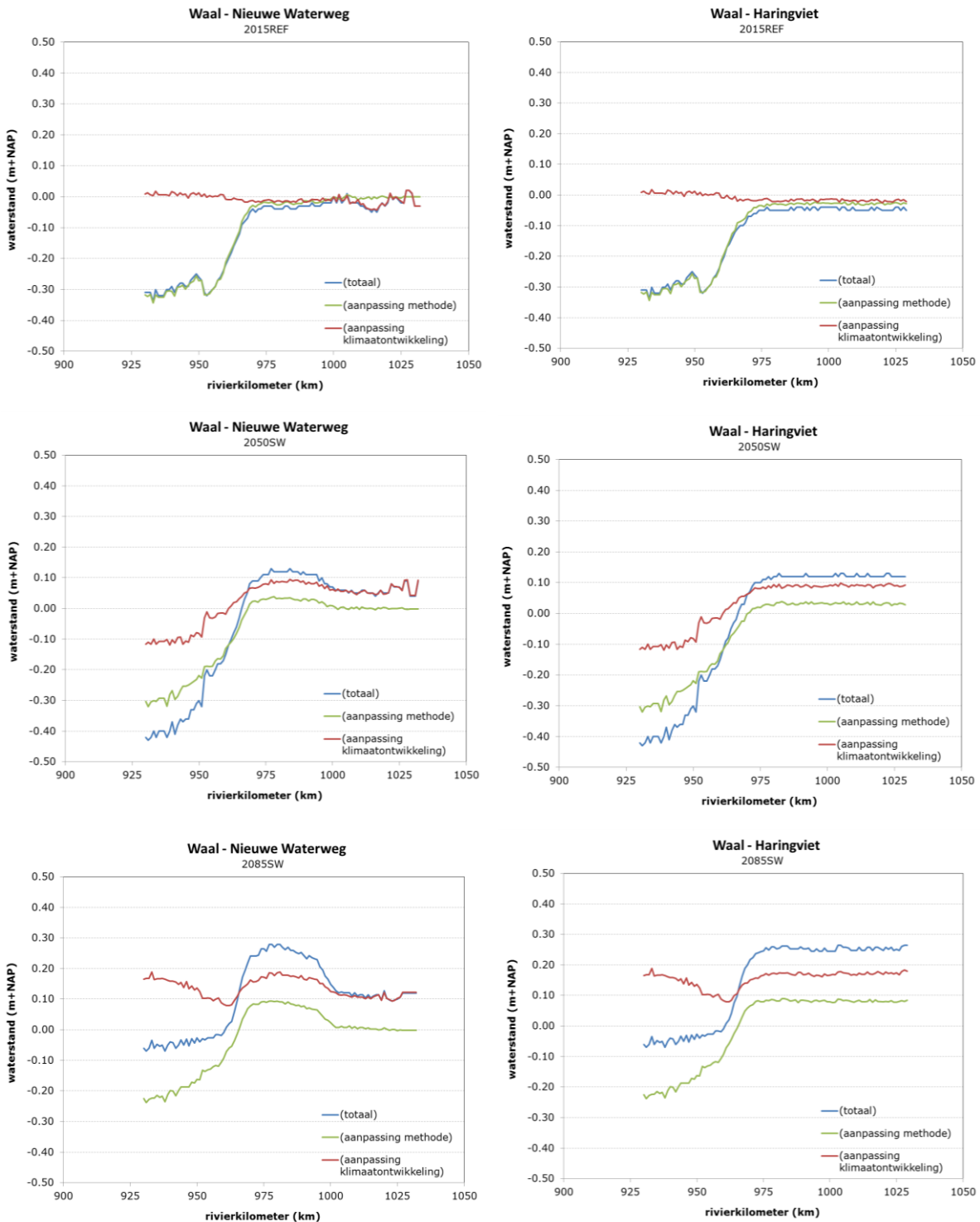
De verschillen in as-waterstand bij de norm worden goed geïllustreerd in Figuur 23. De verschillen worden veroorzaakt door verschillen in de statistiek van de rivierafvoer te Lobith, de statistiek van de zeewaterstand en de 'verkeerde' afvoerverdeling (zie voorgaande paragraaf). *In de toelichting op de verschillen proberen de gevolgen van de afvoerverdeling (omdat deze*

bepert zijn) enigszins buitenbeschouwing te laten. Op de benedenloop van de Lek, Waal en Maas (het riviergedomineerde gedeelte van de RMM) daalt de waterstand met enkele decimeters in 2015. In 2050 daalt de waterstand ook op de Waal en de Maas. Op de Lek wordt in de Basisprognoses min of meer dezelfde waterstand uitgerekend als in de Basiscases. In 2085 is de daling op de Waal nog zeer beperkt. Op de Lek en de Maas is er in 2085 nog nauwelijks verschil tussen de Basisprognoses en de Basiscases.



Figuur 23: *Verschillen in as-waterstand langs de Rijn-Maasmonding tussen Basisprognoses en Basiscases voor Stoom-Warm (zichtjaren 2015, 2050 en 2085).*

Verder benedenstrooms wordt het verschil in zeespiegelstijging zichtbaar in de verschillen tussen het resultaat van de Basisprognoses en de Basiscases. Dit verschil is ongeveer 0,1 m. Op Haringvliet en in het overgangsgedebied tussen zee- en riviergedomineerd zijn de verschillen het grootst. De oorzaak hiervan proberen we met de grafieken in Figuur 24 uit te leggen. De figuur laat in drie grafieken, één voor elk zichtjaar van scenario Stoom-Warm, zien wat het effect is van de aanpassing van de klimaatontwikkeling door KNMI'14 en de aanpassing van de methode waarmee de statistiek van de rivierafvoer is bepaald (GRADE).



Figuur 24: Verschil tussen Basisprognoses en Basiscases in waterstand bij de norm langs twee trajecten in de Rijn-Maasmonding voor scenario Stoom en Warm.

Buiten het DM om, maar met dezelfde database-fysica zijn de Basiscases herberekend met de afvoerstatistiek van Buiteveld (2015): GRADE i.c.m. KNMI'06. De donkerrode lijn toont het verschil tussen de Basisprognoses en de resultaten van deze herberekening. De groene lijn toont het effect van de aanpassing van de methode waarmee de statistiek van de rivierafvoer is vastgesteld. Dit effect is bepaald door de resultaten van de Basiscases (KNMI'06 en oude methode statistiek) te vergelijken met de resultaten van de herberekening (KNMI'06 en GRADE methode). De blauwe lijn toont het totale verschil, dat ook in Figuur 23 is getoond.

We verklaren eerst het verloop van de rode lijn. In zichtjaar 2015 is nauwelijks verschil tussen de resultaten van KNMI'14 en KNMI'06. Het verschil in de geprognosteerde zeespiegelstijging is gering, het verschil in afvoerstatistiek is beperkt en in dit zichtjaar is geen verschil in afvoerverdeling. In 2050 is de zeespiegelstijging iets groter en in 2050 ontstaat door de afwijkende afvoerverdeling een lagere waterstand op de benedenloop van de rivieren (in de Basisprognoses wordt meer water over de Lek afgevoerd). In 2085 is de zeespiegelstijging in de Basisprognoses 0,1 m groter, de Rijnaafvoer is ruim 750 m³/s hoger en verschilt de afvoerverdeling ook.

De groene lijn laat zien dat de waterstanden op het Haringvliet en in het overgangsgebied stijgen in 2050 en 2085. De waterstanden op de riviertakken dalen alle zichtjaren. Door introductie van de GRADE methode neemt de kans af op zeer extreme afvoeren (afvoer te Lobith groter dan 14.000 m³/s, zie ook Figuur 6). De kans op afvoeren tussen 8.000 en 14.000 m³/s nemen door de nieuwe methode toe in de zichtjaren 2050 en 2085 (zie ook Figuur 6). Het zijn deze (iets minder extreme) afvoeren die bepalend zijn voor de waterstanden bij de vigerende norm op het Haringvliet en in het overgangsgebied. Immers de invloed van de zee gecombineerd met iets minder extreme afvoeren zijn hier maatgevend. Aanpassing van de methode leidt op het Haringvliet en in het overgangsgebied tot een verhoging van enkele centimeters in 2050 tot maximaal 0,1 m in 2085.

De blauwe lijn is de resultante van de rode en groene lijn. Te zien is dat in 2015 het verschil tussen de Basisprognoses en de Basiscases volledig gedomineerd wordt door de aanpassing van de methode. In 2050 is de aanpassing van de methode ook dominant, maar bepalen de gewijzigde stijging van de zeespiegel en het toepassen van de 'verkeerde' afvoerverdeling ook in belangrijke mate het verschil tussen de Basisprognoses en de Basiscases. In 2085 bepalen de introductie van KNMI'14 en GRADE in gelijke mate het verschil tussen de berekening van het NWM en het DM.

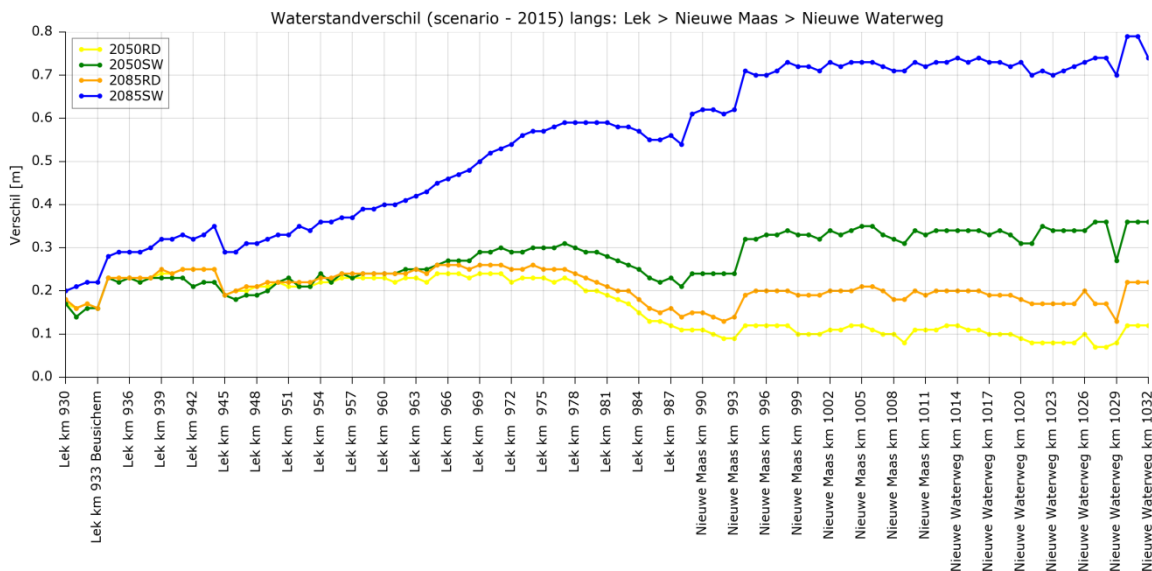
Let op! In het NWM (net als in het DM) wordt alleen Rijndominant gerekend. Dat wil zeggen dat verondersteld wordt dat gebeurtenissen, waarin de afvoer van de Rijn extreem is, bepalender zijn voor de statistiek van de hydraulische belastingen, dan gebeurtenissen waarin de afvoer van de Maas extreem is. Op de bovenrand wordt gerekend met een extreme Rijnaafvoer en een daarbij optredende gemiddelde Maas afvoer (50% percentiel). De statistiek te Lobith bepaald de kans op deze randvoorwaarden. Daarom wordt in de uitleg ook alleen naar de verandering van de statistiek te Lobith verwezen.

7.5 Klimaatverschillen

In Figuur 25, Figuur 26 en Figuur 27 worden langs drie trajecten in de Rijn-Maasmonding de effecten van klimaatontwikkeling volgens KNMI'14 getoond voor de vigerende normfrequentie (geldig tot 1-1-2017). Voor de figuren zijn alleen resultaten van de vijf scenarioberekeningen van de Basisprognoses gebruikt. Het verschil tussen de Referentie 2015 en de scenarios Rust-Druk en Stoom-Warm wordt getoond (allen gebaseerd op KNMI'14).

Langs de Nederrijn-Lek (Figuur 25) tot km 965 is het mogelijk om het effect van het klimaat in de zichtjaren 2050RD, 2050SW en 2085RD te beperken door de maatregel Ontzien Nederrijn-Lek. In de figuur stijgt de waterstand met 0,2 m t.o.v. de Referentie 2015. In de bovenste kaart van Figuur 23 is te zien dat de waterstand langs de Lek in de Referentie van de Basisprognoses 0,2 m lager is dan de waterstand in de Referentie van de Basiscases. De waterstand in de zichtjaren 2050RD, 2050SW en 2085RD is dus gelijk aan de waterstand in de Referentie van de Basiscases (gelijk aan de HR2006). Eerder is al aangegeven (paragraaf 7.3) dat in de Basisprognose in de zichtjaren 2050 en 2085 met een 'verkeerde' afvoerverdeling is gerekend. In WBI-2017 is ook voor een instelling van de kunstwerken op de splitsingspunten die afwijkt van de Referentie uit de Basiscases: bij een afvoer te Lobith groter dan 17.000 m³/s is het ontzien van de Lek niet te handhaven (blijkt uit nader onderzoek naar deze kunstwerken). In zichtjaar 2085SW neemt ook de waterstand bovenstrooms van km 960 toe. In dit zichtjaar is de afvoer te Lobith groter dan 17.500 m³/s.

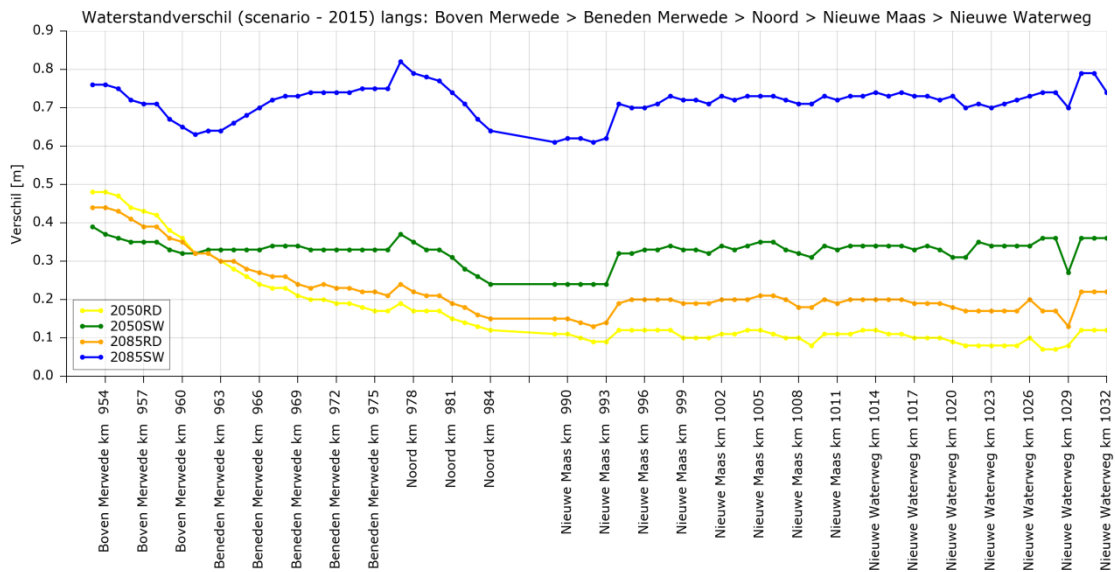
Verder benedenstrooms langs de Lek, Nieuwe Maas en Nieuwe Waterweg werkt de stijging van de zeespiegel door in de waterstanden. Langs de Nieuwe Waterweg (ter hoogte van de Maeslantkering) is de stijging van de waterstand gelijk aan 70-80% van de stijging van de zeespiegel.



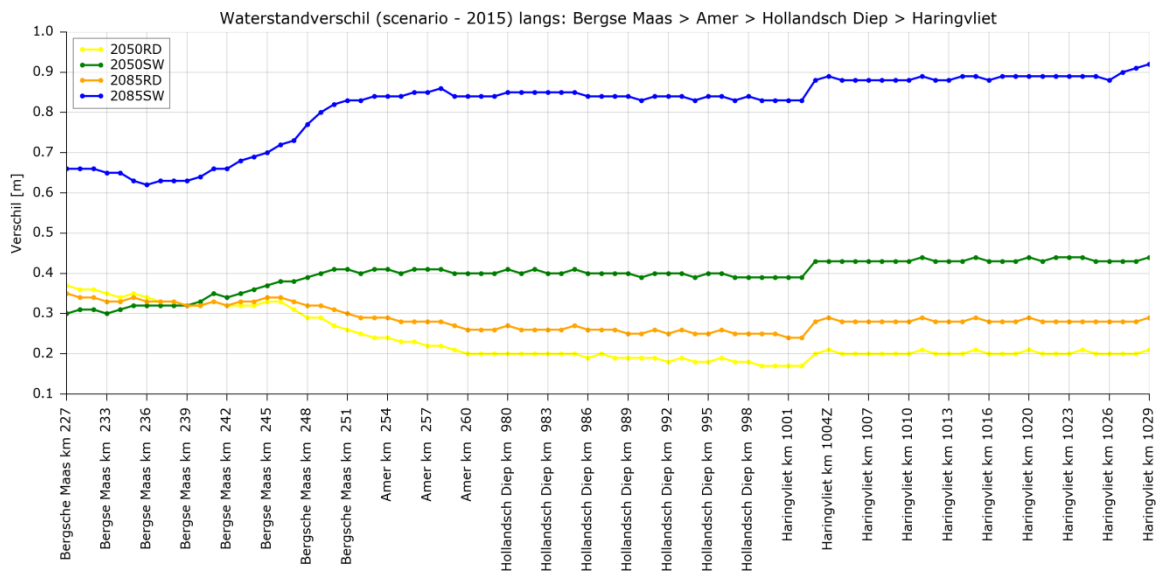
Figuur 25: Effect van de klimaatontwikkeling in waterstand bij de norm langs het traject Lek – Nieuwe Waterweg berekend met het NWM voor twee klimaatscenarios.

Langs de Waal (Figuur 26) is het effect van de klimaatontwikkeling op de waterstand het gevolg van een toename van de rivierafvoer en de zee­water­stand. De verschillijnen van zichtjaren 2050RD en 2085RD kruisen elkaar. In zichtjaar 2050RD is de toename van de afvoer groter, in zichtjaar 2085RD is de toename van de zee­water­stand groter. Langs de Maas (Figuur 27)

kruizen deze lijnen nabij km 235. Op het Haringvliet is de stijging van de waterstand niet alleen het gevolg van de zeespiegelstijging ook de toename van de rivierafvoer in 2050 en 2085 zorgt voor een toename van de waterstand.



Figuur 26: Effect van de klimaatontwikkeling in waterstand bij de norm langs het traject Waal – Haringvliet berekend met het NWM voor twee klimaatscenarios.



Figuur 27: Effect van de klimaatontwikkeling in waterstand bij de norm langs het traject Maas – Haringvliet berekend met het NWM voor twee klimaatscenarios.

Let op! De sprongen in de waterstand bij km 945 langs de Lek, 995 km langs de Nieuwe Maas, km 977 Beneden Merwede en km 1003 langs het Haringvliet worden veroorzaakt door een andere normfrequentie. Bij een andere herhalingstijd is het effect van het klimaat (logischerwijs) anders.

8 Rijntakken

8.1 Overzicht modellen en uitgangspunten

Als gevolg van de klimaatontwikkeling zal de afvoer op de Rijn toenemen en zal de zeespiegel stijgen. Door de toename van de afvoer verandert ieder zichtjaar de afvoerstatistiek (paragraaf 3.4) en de afvoerverdeling over de Rijntakken (paragraaf 3.4). De Nederrijn-Lek wordt ook in het extreme bereik ontzien. Door de stijging van de zeespiegel zal de waterstand op de Lek en de Waal toenemen. Deze stijging is verwerkt in de Qh-relaties die op de benedenrand van de Rijntakken worden opgelegd (paragraaf 3.3). Door maatregelen die de afvoercapaciteit naar de Waddenzee vergroten (bijv. aanpassing spuiregime of aanleg van pompcapaciteit), is aangenomen dat de waterstand op het IJsselmeer niet zal veranderen. Hierdoor werkt de stijging van de zeespiegel ook niet door op de IJssel (de benedenrand van deze Rijntak is daarom niet aangepast). Zoals eerder aangegeven, is aangenomen dat de statistiek van de wind niet significant verandert. Alle zichtjaren van beide klimaatscenario's zijn doorgerekend met de modellering van de Rijntakken.

Bij het doorrekenen van de Basisprognoses is er voor gekozen om dezelfde schematisatie van de Rijntakken uit de Basiscases door te rekenen. De hydraulische berekeningen van de Rijntakken zijn uitgevoerd met het 5e generatie Baseline en Simona model rijndmref12_5v1 (Van Walsem, 2013). Dit model bevat een bodemopname van het jaar 2011 met daarbij gevoegd de maatregelen van Ruimte voor de Rivier, zoals opgenomen in de Pakkettoets 2011 (zie voor meer details Van Walsem, 2013). In de rapportages van de Basiscases (Botterhuis en Stijnen, 2014a) is deze schematisatie aangeduid met de code *S0*. *Let op, in deze schematisatie is de verouderde situatie met grote zomerbedverdieping (SNIP2A) wel opgenomen, de maatregel Reevediep (bypass Kampen) niet.* Hierdoor sluiten de berekeningen van de IJVD en de Rijntakken (eq. IJssel) minder goed op elkaar aan. Voor het doorrekenen van de voorkeursstrategie van Deelprogramma Rivieren (DP-R) is een aangepast model van de referentie doorgerekend (Botterhuis en Stijnen, 2015). Deze aangepaste schematisatie is identiek aan Referentie 2015, maar met actualisatie van de situatie bij Kampen. Deze schematisatie is aangeduid met de code *S10* (en wijkt alleen op de benedenloop van de IJssel af van *S0*).

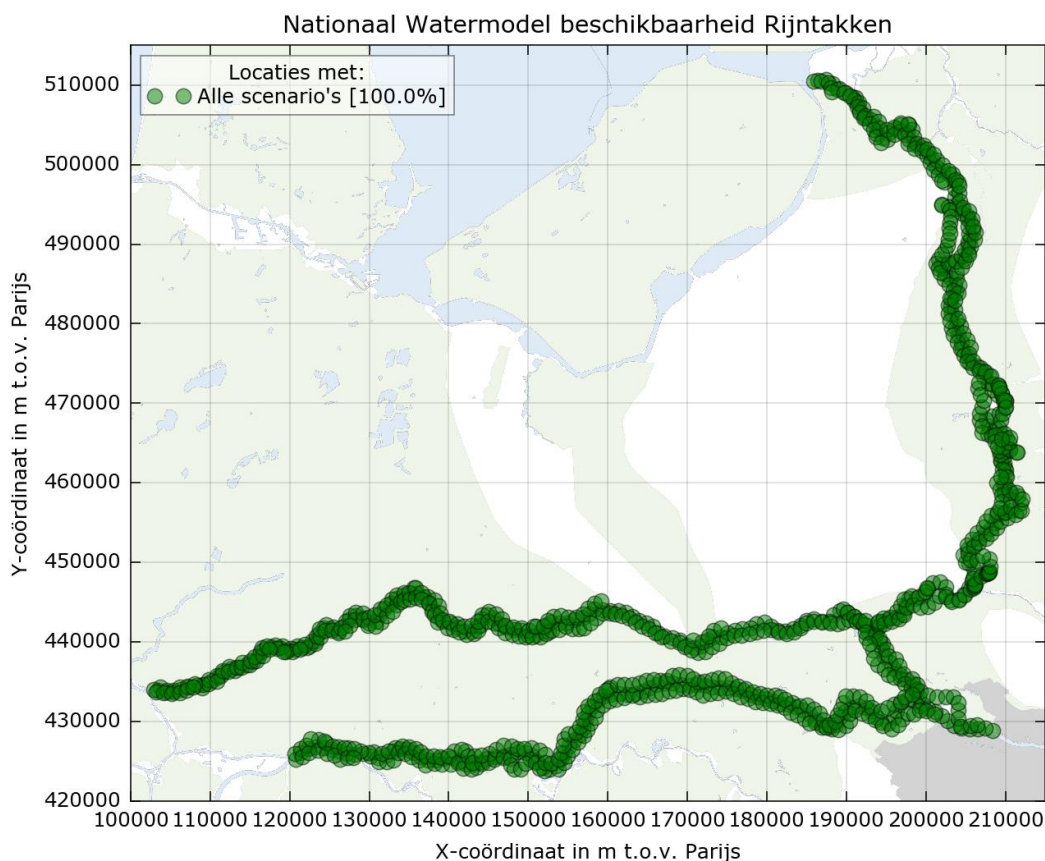
Het instrumentarium Waqua berekent (als onderdeel van het NWM) voor alle Rijntakken de waterstanden die optreden als gevolg van verschillende afvoergolven. Deze golven hebben een vaste vorm. Voor elke locatie langs de Rijntakken wordt van elke afvoergolf de maximale waterstand weggeschreven in een database, de zogenaamde database-fysica. Bij het berekenen van de maatgevende hoogwaterstand worden de golven geschaald op basis van de piekafvoer van de Rijn bij Lobith. Deze piekafvoer is een stochastische variabele in de berekening, net als het windveld (snelheid en richting) boven het gebied (potentiële wind op 10 m hoogte). Het instrumentarium Hydra Zoet (als onderdeel van het NWM) berekent per locatie de statistiek van de waterstand en het hydraulisch belastingniveau uitgaande van de statistiek van de stochasten (afvoer en wind) en de database-fysica. Deze statistiek wijzigt afhankelijk van het gekozen zichtjaar in een klimaatscenario.

Uitgangspunt in de Basiscases was dat per zichtjaar de beleidsmatige afvoerverdeling (en/of de maatregel Ontzien Nederrijn-Lek) over de Rijntakken bij de eens per 1250 jaar afvoer wordt gehandhaafd door een aanpassing van de kunstwerken Pannerdensch Overlaat en de

Hondsbroeksche Pleij in het Waqua model van de Rijntakken. Zodoende wijzigt de instelling van deze kunstwerken elk zichtjaar, omdat deze ontwerpafvoer per zichtjaar verandert als gevolg van klimaatontwikkeling. In elke scenarioberekening is een unieke database-fysica opgesteld in zowel de Basiscases als de Basisprognoses. Ondanks dat in de Basisprognoses de afvoerstatistiek is gewijzigd t.o.v. de Basiscases, zijn in de berekeningen wel dezelfde instellingen van de kunstwerken gehanteerd. Bijvoorbeeld, in berekening RD2050 uit de Basiscases en RD2050 in de Basisprognoses zijn de Pannerdensche Overlaat en de Hondsbroeksche Pleij in het Waqua model hetzelfde ingesteld. Deze instellingen zijn overgenomen uit een Excel-sheet die is opgesteld door Martin Scholten: "Toepassing voor Deltamodel van 9 afvoergolven voor Maas en Rijn en NDB en IJVD AfverdWaqua vxx.xls".

8.2 Controle beschikbaarheid en kwaliteit van de gegevens

De databeschikbaarheid voor de Rijntakken wordt gepresenteerd door de beschikbare hydralocaties te vergelijken met die in het Deltamodel. Figuur 28 laat zien dat voor de Rijntakken alle DM locaties ook in het Nationaal Watermodel aanwezig zijn, voor 4 van de 5 scenarios (*scenario 2050 Stoom-Warm ontbreekt nog*). Dit komt overeen met de verwachting.

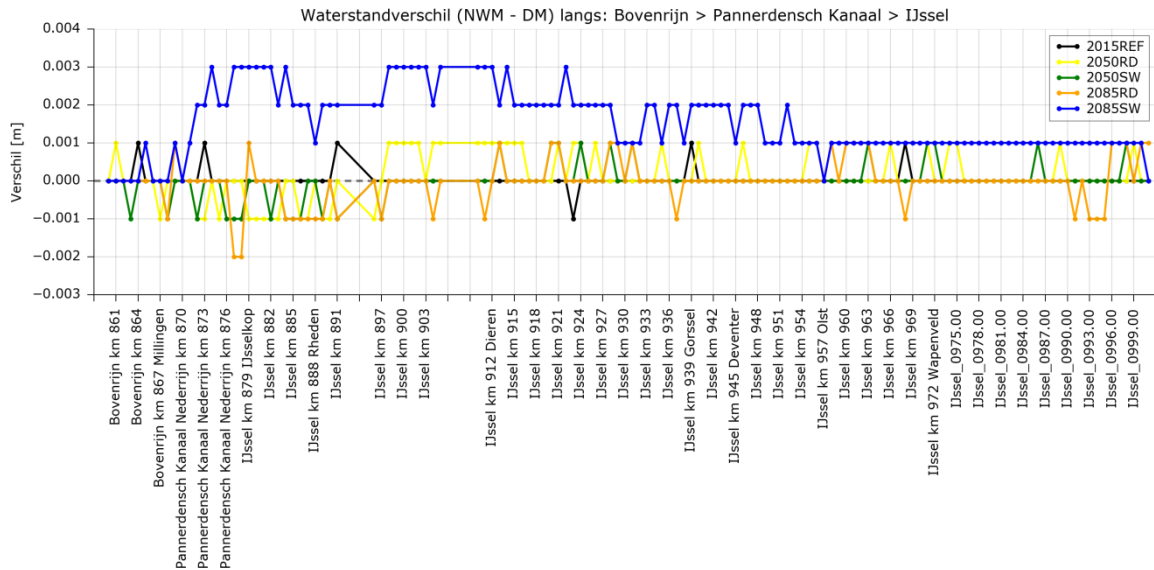


Figuur 28: Beschikbaarheid van Hydra-resultaten langs de Rijntakken berekend met het NWM (in geëxporteerde NetCDF-bestanden):

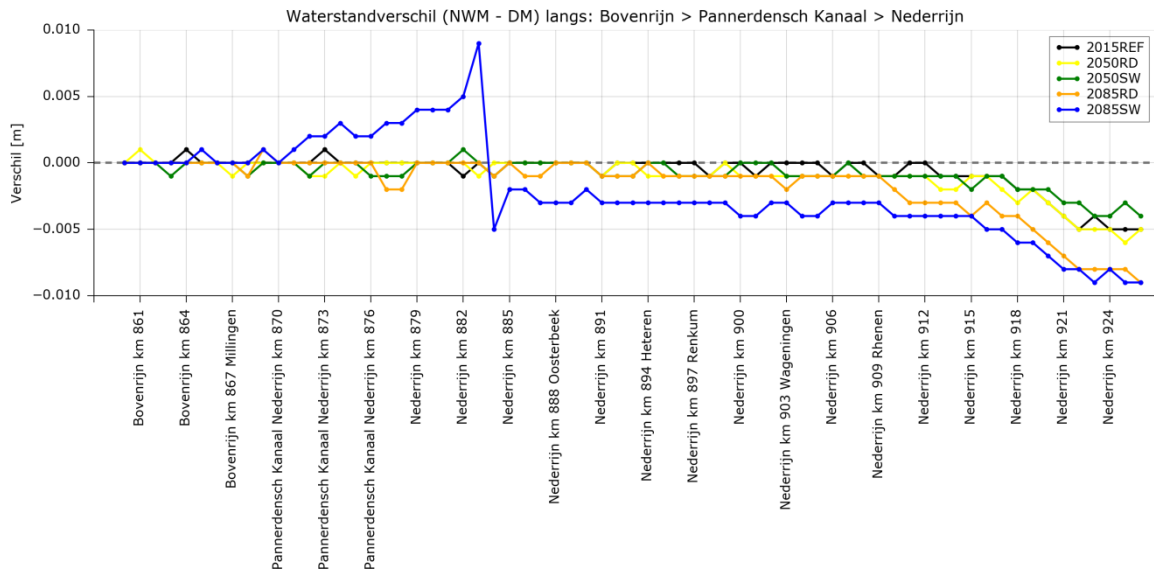
- aantal scenarios met uitvoerbestanden van maximaal 5 scenario-berekeningen en
- aantal locaties met uitvoer als percentage van maximale aantal locaties.

8.3 Verschillen t.o.v. Deltamodel in de Waqua resultaten

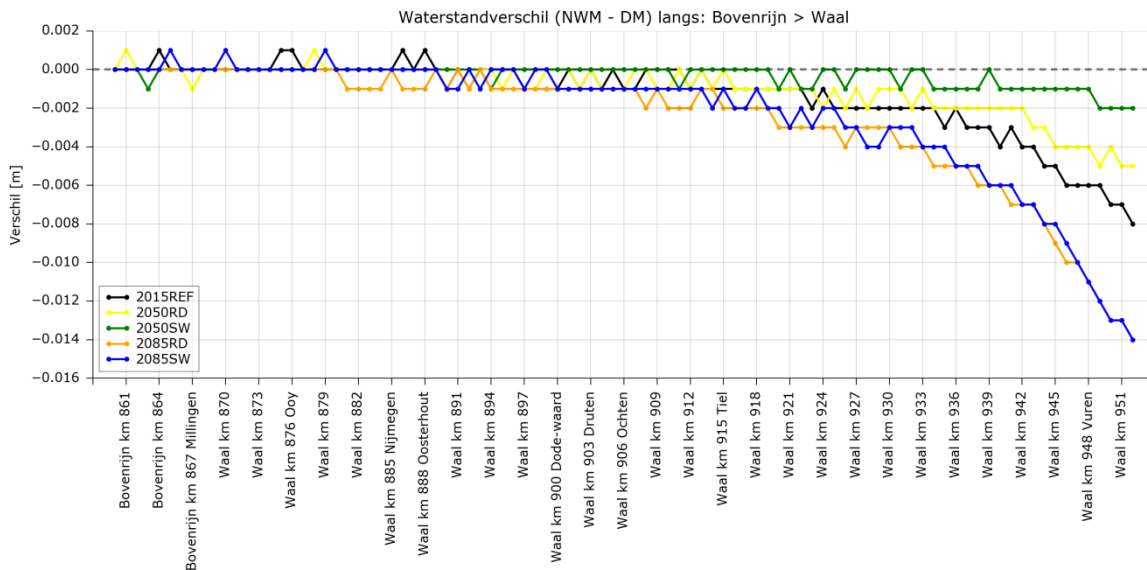
Om de verschillen tussen DM en NWM in de Hydra resultaten goed te kunnen verklaren is het belangrijk dat eerst de verschillen in de onderliggende database fysica duidelijk zijn. Voor de vijf scenarioberekeningen zijn verschillende databases aangemaakt als resultaat van de Waqua-berekeningen. Immers voor elke combinatie van zichtjaar en scenario is een andere instelling van de verdeelkunstwerken bij de Pannerdensch Kop en de IJsselkap gehanteerd (zie paragraaf 8.1. Vergelijking van alle afvoerniveaus (Q1 t/m Q9) levert een overvloed aan informatie. Voor de Rijntakken is gekozen om de resultaten met een afvoer van 16.000 m³/s te vergelijken.



Figuur 29: Verschillen in database fysica, as-locaties bij 1/1250 jaar te Lobith, voor het traject Bovenrijn – Pannerdensch Kanaal – IJssel.



Figuur 30: Verschillen in database fysica, as-locaties bij 1/1250 jaar te Lobith, voor het traject Bovenrijn – Pannerdensch Kanaal – Nederrijn.

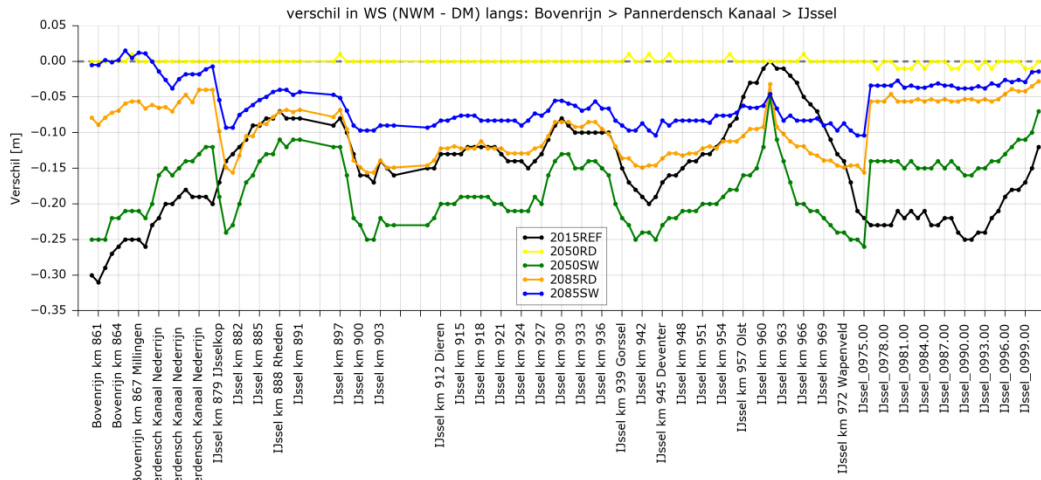


Figuur 31: Verschillen in database fysica, as-locaties bij 1/1250 jaar te Lobith, voor het traject Bovenrijn – Waal.

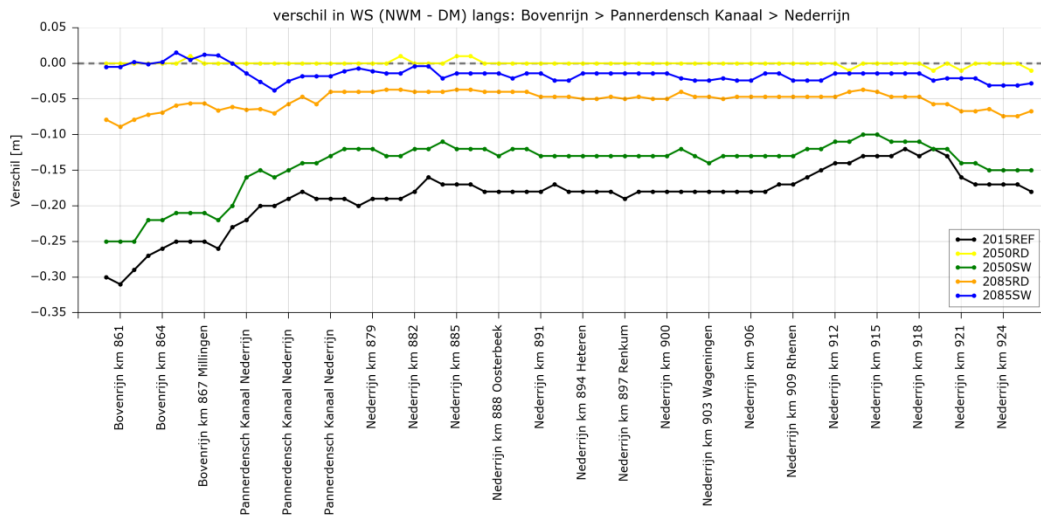
De verschillen in de waterstanden in de database zijn voor bijna alle berekeningen minimaal. Figuur 29, Figuur 30 en Figuur 31 geven dat aan. Richting de benedenstroomse rand treden kleine verschillen op, door een kleine afwijking in de geïmplementeerde klimaatscenario's. Immers de benedenrand van het Rijntakken model wordt overgenomen uit de RMM berekening (zie paragraaf 3.3).

8.4 Verschillen t.o.v. Deltamodel in de Hydra-Zoet resultaten

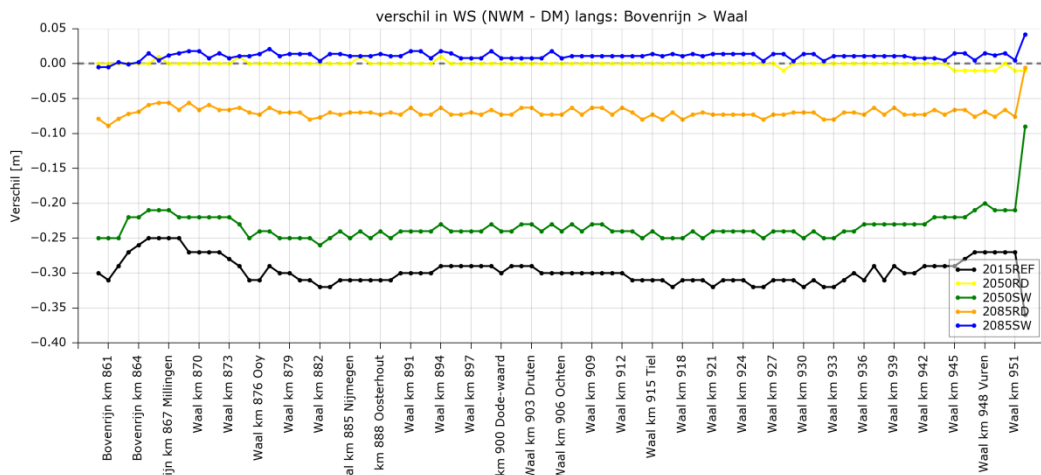
De Hydra-resultaten tonen substantieel meer verschillen dan de onderliggende resultaten in de database fysica, waaruit afgeleid kan worden dat deze voortkomen uit verschillende tussen de Hydra-berekeningen in het NWM en het Deltamodel. Figuur 32, Figuur 33 en Figuur 34 laten de verschillen zien. Deze verschillen zijn wat lastig te duiden. Naast de verandering in afvoerstatistiek, is het waterstandverlagend effect van de Ruimte voor de Rivier maatregelen anders bij herhalingstijd 1250 jaar.



Figuur 32: Verschillen in as-waterstand bij de norm, voor het traject Bovenrijn – Pannerdensch Kanaal – IJssel.



Figuur 33: Verschillen in as-waterstand bij de norm, voor het traject Bovenrijn – Pannerdensch Kanaal – Nederrijn.

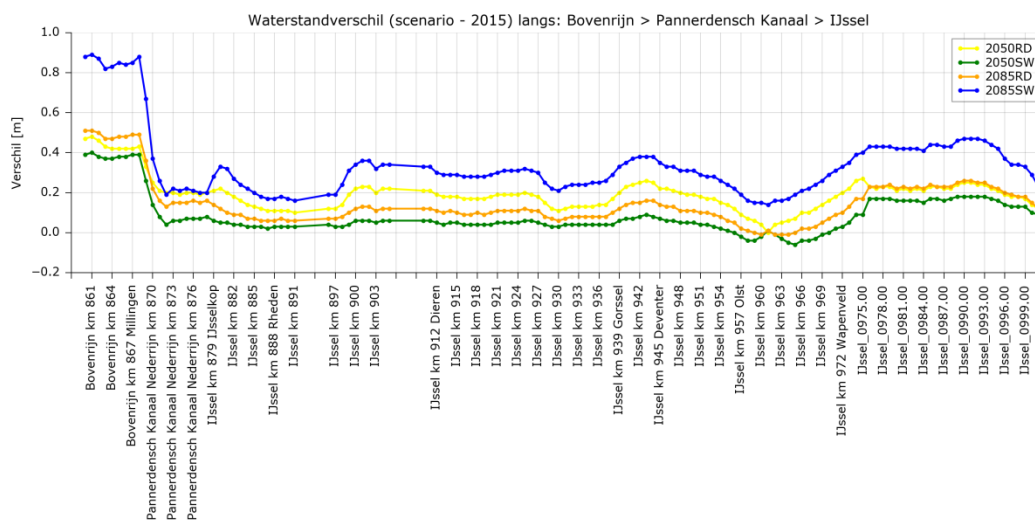


Figuur 34: Verschillen in as-waterstand bij de norm, voor het traject Bovenrijn – Waal.

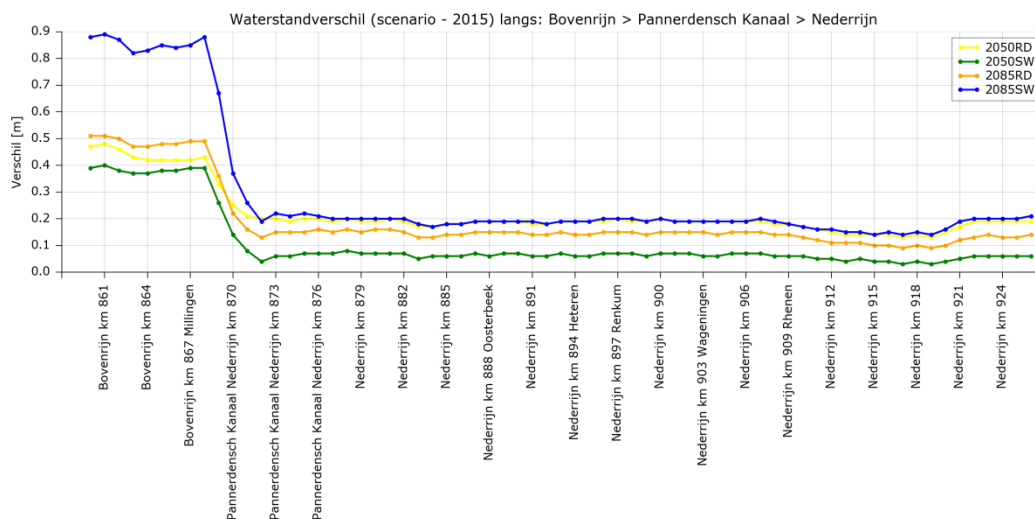
8.5 Klimaatverschillen

De verschillen in de klimaatscenario's zouden in principe voort moeten komen uit verhoogde rivierafvoer en verhoogde zeewaterstanden, omdat voor het doorrekenen dezelfde schematisatie is gebruikt. Figuur 35 laat de waterstandsverschillen zien voor het traject Bovenrijn – Pannerdensch Kanaal – IJssel. Figuur 36 laat de verschillen zien voor het traject Bovenrijn – Pannerdensch Kanaal – Nederrijn. Figuur 37 voor het traject Bovenrijn – Waal. Op de Rijntakken komt het verschil in waterstand voort uit verhoogde rivierafvoer. De verwachting is dus dat 2050 RD een lichte toename laat zien, 2085 RD en 2050 SW een middelmatige en 2085 SW een grote. Dit komt overeen met de figuren. In alle klimaatscenario's is de toename van de afvoer op de Waal groter dan op het Pannerdensch Kanaal, waardoor hier de waterstandsverschillen groter zijn.

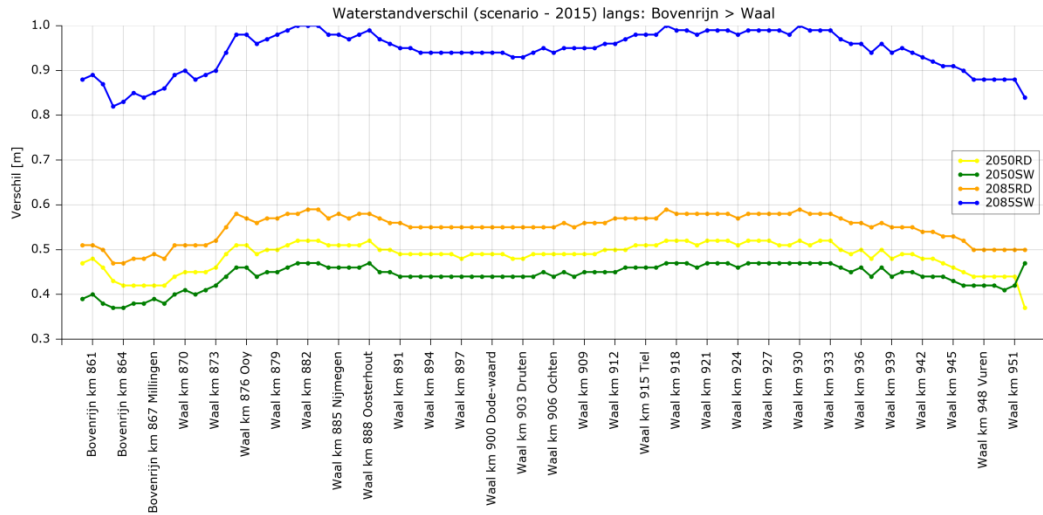
De klimaatontwikkeling heeft tot gevolg dat er nauwelijks een stijging van de waterstand op de Nederrijn-Lek optreedt. Op de Waal is de stijging van de waterstand ongeveer 2x zo groot als op de IJssel.



Figuur 35: Verschillen in waterstand bij de norm ten opzichte van 2015, voor de verschillende klimaatscenario's. Traject: Bovenrijn – Pannerdensch Kanaal – IJssel.



Figuur 36: Verschillen in waterstand bij de norm ten opzichte van 2015, voor de verschillende klimaatscenario's. Traject: Bovenrijn – Pannerdensch Kanaal – Nederrijn.



Figuur 37: Verschillen in waterstand bij de norm ten opzichte van 2015, voor de verschillende klimaatscenario's. Traject: Bovenrijn – Waal.

9 Maas

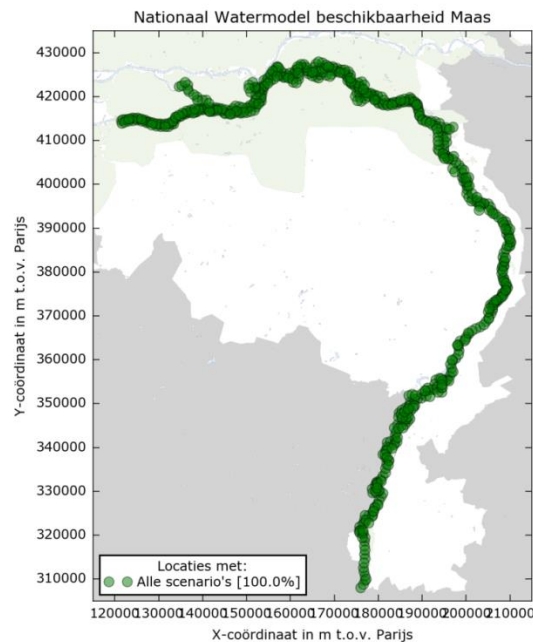
9.1 Overzicht modellen en uitgangspunten

Als gevolg van de klimaatontwikkeling zal de afvoer op de Maas toenemen en zal de zeespiegel stijgen. Door de toename van de afvoer verandert ieder zichtjaar de afvoerstatistiek (paragraaf 3.4). Door de stijging van de zeespiegel zal de waterstand op de benedenloop van de Maas toenemen. Deze stijging is verwerkt in de Qh-relaties die op de benedenrand van het Waqua model worden opgelegd (paragraaf 3.3). Zoals eerder aangegeven, is aangenomen dat de statistiek van de wind niet significant verandert. Alle zichtjaren van beide klimaatscenario's zijn doorberekend met de modellering van de Maas.

Bij het doorrekenen van de Basisprognoses is er voor gekozen om dezelfde schematisatie van de Maas uit de Basiscases door te rekenen. Voor de Maas wordt voor de hydraulische berekeningen gebruik gemaakt van het 5e generatie Baseline en Simona model maas-dmref12_5v1 (Van Walsem, 2013). Het model bevat een bodemopname van het jaar 2011 met daarbij gevoegd de maatregelen van de Maaswerken (zie voor meer details Van Walsem, 2013). Let op, in deze schematisatie is aangenomen dat de kaden langs de Maas in Limburg kunnen overstroomd. In de rapportages van de Basiscases is deze schematisatie aangeduid met de code S0 (Botterhuis en Stijnen, 2014a).

9.2 Controle beschikbaarheid en kwaliteit van de gegevens

De gegevens voor de Maas zijn compleet. In de Waqua- en de Hydra-resultaten zijn alle locaties uit het DM en de NWM-uitvoer aanwezig.

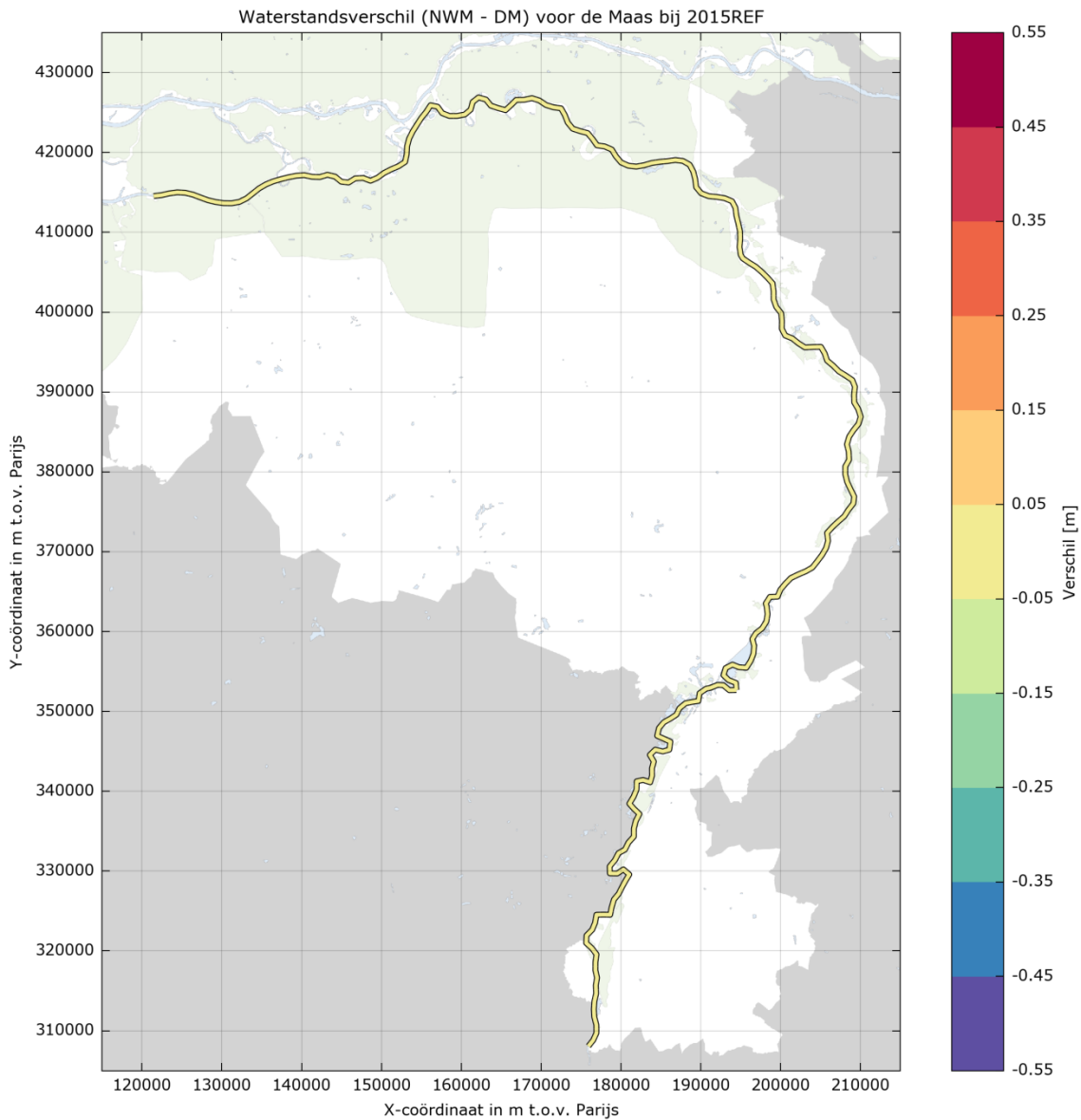


Figuur 38: Beschikbaarheid van Hydra-resultaten langs de Rijntakken berekend met het NWM (in geëxporteerde NetCDF-bestanden):

- aantal scenarios met uitvoerbestanden van maximaal 5 scenario-berekeningen en
- aantal locaties met uitvoer als percentage van maximale aantal locaties.

9.3 Verschillen t.o.v. Deltamodel in de Waqua resultaten

Voor de afvoer-gedomineerde Maas is gekozen om de waterstanden bij een afvoerniveau van 4600 m³/s te vergelijken. De waterstandsverschillen die de verschillende WAQUA-modellen geven zijn erg klein (orde centimeters), zoals te zien is in Figuur 39. Langs de Grensmaas treden op enkel locaties iets grotere verschillen op vanwege numerieke effect. Bij het doorrekenen van de Basiscases is hier eerder naar gekeken, destijds waren deze pieken in de verschillen te voorkomen door de tijdstap aanzienlijk te verkleinen. Omdat dan de doorlooptijd van de berekeningen zou toenemen, is hier van afgezien.

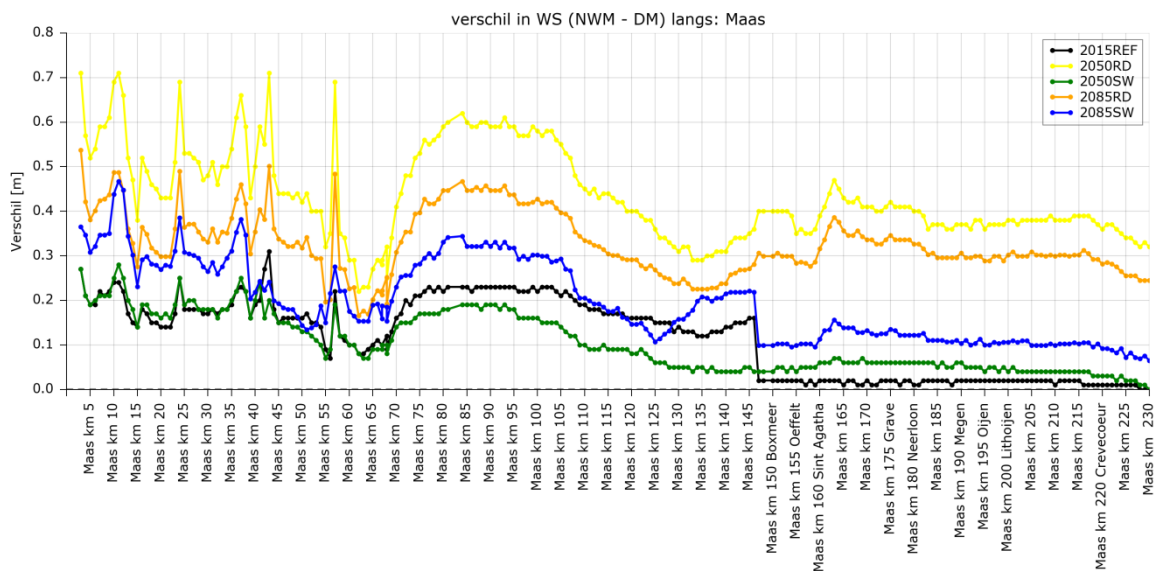


Figuur 39: Verschillen in database fysica, as-locaties langs de Maas tussen Basisprognoses en Basiscases voor referentie 2015.

9.4 Verschillen t.o.v. Deltamodel in de Hydra-Zoet resultaten

De Hydra-resultaten laten grote verschillen zien in waterstanden bij de norm, zoals duidelijk te zien in Figuur 40. Deze verschillen zijn het grootst bij de Rust-Druk scenarios, omdat deze veel kleinere klimaatverschillen geven in het DM. Met andere woorden, in het DM nemen de waterstanden ten gevolge van de Rust-Druk scenarios veel minder sterk toe dan in het NWM.

In de figuur is duidelijk te zien dat ter hoogte van Boxmeer een sprong in de normfrequentie optreedt. Bovenstrooms van deze locatie wordt eens per 250 jaar gehanteerd, benedenstrooms eens per 1250 jaar. De verschillen tussen de zichtjaren in de rivierafvoer kunnen eens per 250 jaar anders zijn dan eens per 1250 jaar. Dit blijkt ook uit een vergelijking van Tabel 8 met de statistiek toegepast bij de basiscases.

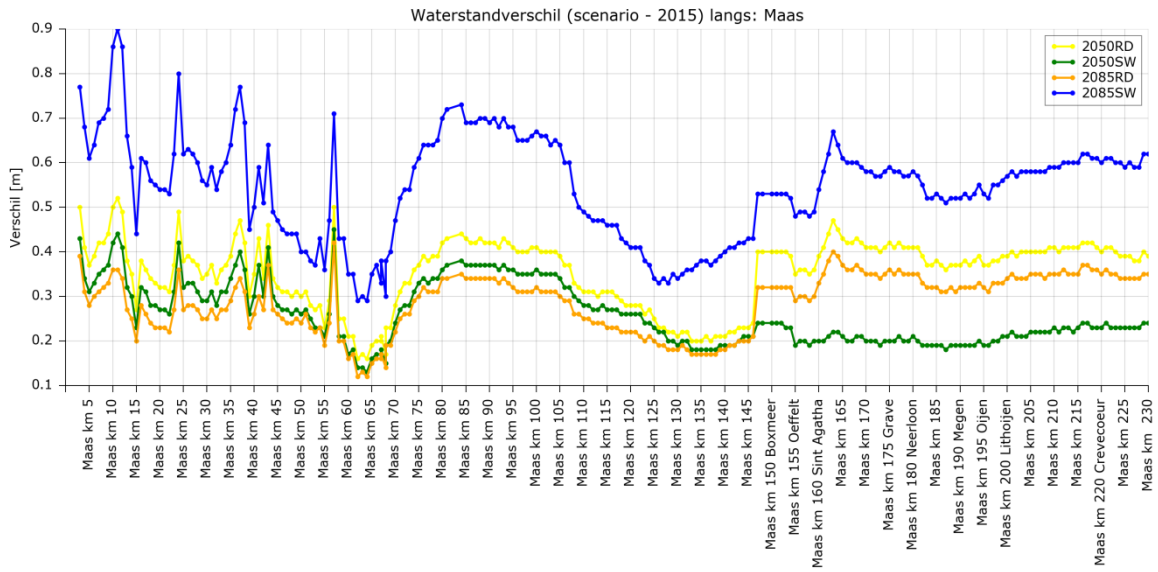


Figuur 40: Verschillen in as-waterstand bij de norm langs de Maas, voor de verschillende klimaatscenarios.

Let op! Ter hoogte van km 205 is bij het uitlezen van beide berekeningen een andere normfrequentie gehanteerd.

9.5 Klimaatverschillen

Op de Maas komt (net als op de Rijntakken) het verschil in waterstand voort uit verhoogde rivierafvoer. De verwachting is dus dat 2050RD een lichte toename laat zien, 2085RD en 2050SW een middelmatige en 2085SW een grote. Dit is niet het geval; in Tabel 8 is te zien dat eens per 250 jaar de afvoer volgens 2050SW hoger is dan in zichtjaar 2085RD, eens per 1250 jaar is dit andersom. De statistiek van 2050RD en 2085SW geeft aan dat in deze scenarios de afvoer hoger is dan in beide ander zichtjaren. Ook dat komt overeen met de figuur.



Figuur 41: Verschillen in waterstand bij de norm ten opzichte van 2015, voor de verschillende klimaatscenario's langs de Maas.

Let op! Ter hoogte van km 205 is bij het uitlezen van beide berekeningen een andere normfrequentie gehanteerd.

10 Systeemovergangen

10.1 Inleiding

De grens waar het bovenrivierengebied (Maas, Waal, Nederrijn-Lek en IJssel) overgaat in de Delta's (Rijn-Maasmonding en IJsseldelta) is niet hard en afhankelijk van het gebruikte criterium (waterstand of hydraulisch belastingniveau). In de praktijk worden grenzen aangehouden, zoals is weergegeven in onderstaande tabel. Deze grenzen zijn gebaseerd op waterstanden. De grenzen kunnen enkele tot tientallen kilometers stroomopwaarts verplaatsen door klimaatontwikkeling. In dit hoofdstuk analyseren we of de NWM berekeningen voor het bovenrivierengebied goed aansluiten op de modellen van de Rijn- Maasmonding en de Vecht-IJsseldelta.

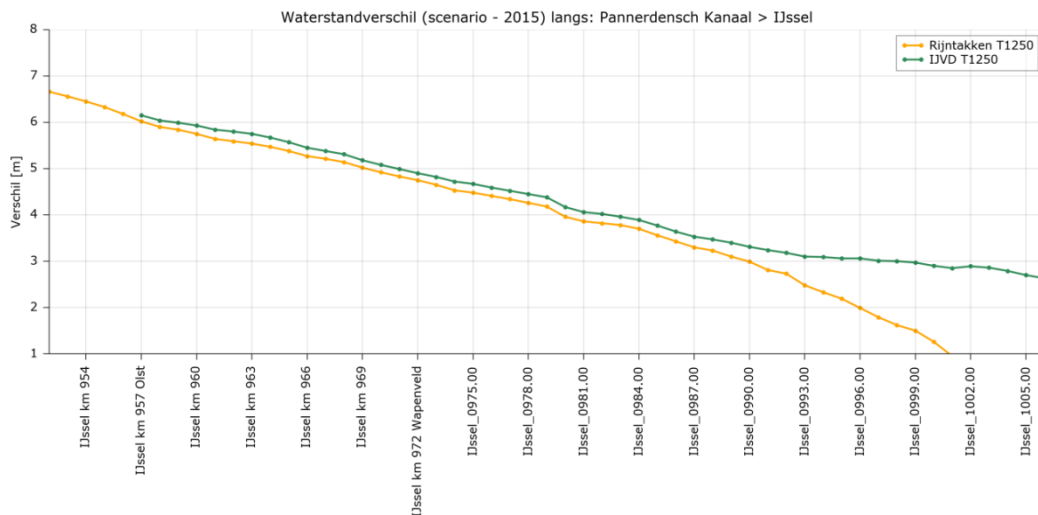
| Grenzen tussen het Beneden- en Bovenrivierengebied | |
|--|--|
| Waterlichaam | Locatie |
| IJssel ^a | Rechteroever : km 981 (Spooldersluis) |
| | Linkeroever : km 972 (Wapenveld) |
| Waal | Rechteroever : km 955 (Gorinchem) |
| | Linkeroever : km 951 (Slot Loevestein) |
| Nederrijn-Lek | Rechteroever : km 949 (Lekkanaal) |
| | Linkeroever : km 943 (Diefdijk) |
| Maas | Rechteroever : km 229 (Andelse Maas) |
| | Linkeroever : km 235 (Waalwijk) |

Tabel 9: Grenzen tussen watersystemen in rivierkilometers.

10.2 IJssel

In Figuur 42 wordt de waterstand langs de IJssel getoond van een NWM berekening van de Rijntakken en van de IJssel-Vechtdelta. Verwacht mag worden dat vanaf km 980 (nabij Zwolle) en verder bovenstrooms het verschil tussen beide berekeningen verdwijnt, omdat verder bovenstrooms alleen de grootte van de rivierafvoer van invloed is op de waterstand. De benedenrand van de Rijntakken berekening (nabij Ketelbrug) is een QH-relatie, waardoor benedenstrooms van km 980 wezenlijk andere processen worden doorgerekend. Naast rivierafvoer wordt in de IJsseldelta namelijk ook gerekend met een variërend meerpeil en een variërende wind als stochasten. De verschillen benedenstrooms van km 980 zijn conform verwachting.

Let op! in het Rijntakken model is een andere schematisatie van de maatregel Bypass Kampen opgenomen dan in het IJVD model. Dit levert ook verschillen, maar is hier niet van belang.



Figuur 42: Vergelijking tussen waterstanden van de Rijntakken en de IJssel-Vechtdelta berekend met het NWM voor de referentie langs de IJssel.

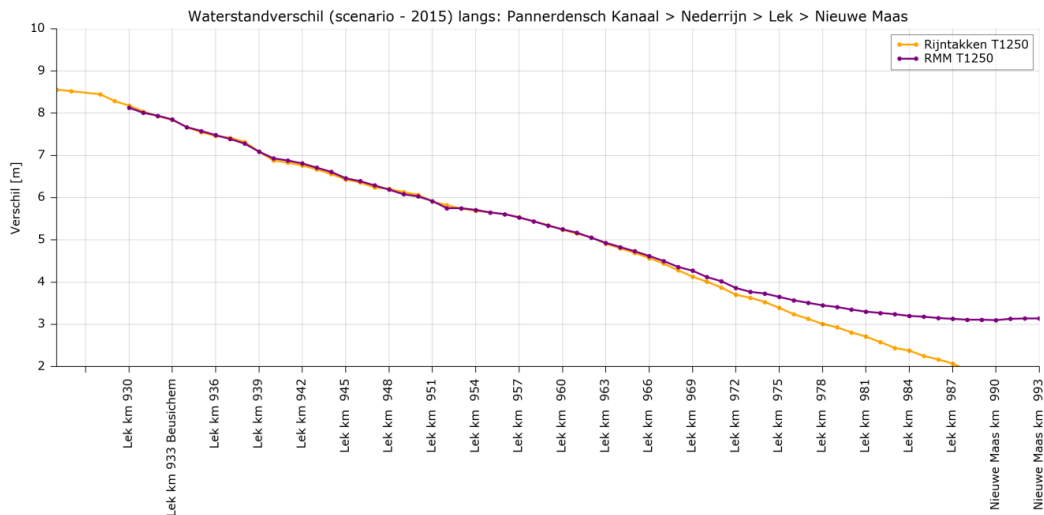
Eerder is geconstateerd dat op de IJssel (bovenstrooms van km 980) verschillen ontstaan tussen de watersystemen Rijntakken en IJssel-Vechtdelta door het verschil in discretisatie van de stochast rivierafvoer (Botterhuis et al, 2016; Botterhuis en Stijnen, 2015). Op de Rijntakken is namelijk een andere discretisatie van de afvoer doorgerekend dan in de IJsseldelta. Door deze verschillen ontstaat een verschil in het effect van Ruimte voor de Rivier maatregelen. Omdat er al een verschil ter hoogte van Olst optreedt, lijkt hoofdoorzaak voor deze verschillen te liggen in de afvoerstatistiek voor Rijntakken en IJssel-Vechtdelta. Voor een betere aansluiting tussen de watersystemen Rijntakken en IJVD raden we aan de afvoerstatistiek bij Olst aan te passen. Voor een goede aansluiting zou in de afvoerstatistiek ook het effect van de maatregel 'ontzien Nederrijn/Lek' moeten worden opgenomen als knik in het verloop van de afvoerstatistiek. Dit effect is immers wel opgenomen in de berekeningen van de Rijntakken en volgt uit de simulatie van de afvoerverdeling van het Rijntakken model.

Let op! Er is nu voor gekozen om de statistische correlatie tussen Rijn en Vecht te gebruiken zoals in WTI2011 is toegepast. Het lijkt aannemelijk dat deze relatie zal moeten wijzigen door toepassing van de GRADE statistiek voor de IJssel. We verwachten namelijk dat door overstromingen in het Rijnstroomgebied de afvoerstatistiek zal wijzigen. Mogelijk dat door nieuwe inzichten in overstromingen in het Vechtstroomgebied ook de statistiek van de afvoer op de Vecht gaat wijzigen. Dan is het aannemelijk dat ook de statistische correlatie tussen IJssel- en Vechtafvoer zal wijzigen. Mogelijk dat ook de correlatie tussen meerpeil en IJsselaflow verandert door de GRADE analyse (dit is in de berekeningen buiten beschouwing gelaten).

10.3 Lek

Tijdens het afleiden van de basiscases is een procedure bedacht, waarbij met een RMM berekening de QH-relaties voor de Rijntakken berekening worden afgeleid. Deze QH-relaties worden dan gebruikt voor een Rijntakken berekening, waarmee een update van het debiet voor de bovenrand van de RMM wordt berekend. In deze update is een juiste simulatie van de afvoerverdeling over de Rijntakken opgenomen. Mocht daar aanleiding voor zijn, dan wordt nog een keer met een RMM berekening (met aangepaste bovenrand) de QH-relaties opnieuw bepaald.

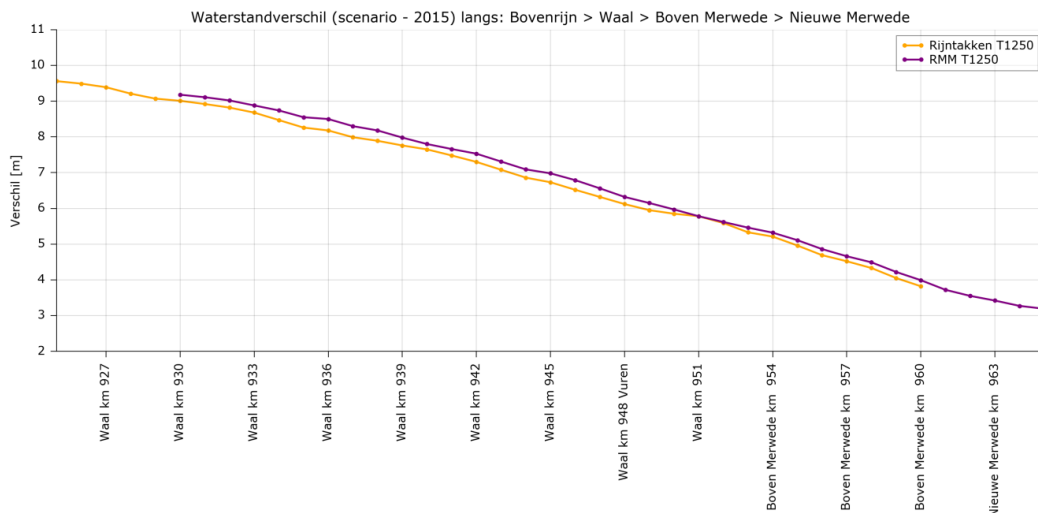
In Figuur 43 wordt de waterstand langs de Nederrijn-Lek getoond van een NWM berekening van de Rijntakken en van de Rijn-Maasmonding. Ook voor deze systeemovergang geldt dat verwacht mag worden dat vanaf km 970 – 980 (nabij Schoonhoven) en verder bovenstrooms het verschil tussen beide berekeningen verdwijnt, omdat verder bovenstrooms alleen de grootte van de rivierafvoer van invloed is op de waterstand. Net als bij de IJssel is de benedenrand een QH-relatie, waardoor benedenstrooms van km 970 wezenlijk andere processen worden doorgerekend. Naast rivierafvoer wordt in de Rijn-Maasmonding ook gerekend met een variërende zeewaterstand en een variërende wind. De gevonden verschillen zijn conform verwachting. Bovenstrooms van km 970 zijn de verschillen op de Nederrijn-Lek tussen de watersystemen Rijntakken en RMM beperkt. Ook dit is conform verwachting.



Figuur 43: Vergelijking tussen waterstanden van de Rijntakken en de Rijn-Maasmonding berekend met het NWM voor de referentie langs de Lek.

10.4 Waal

Op de *Waal* zijn de verschillen tussen de watersystemen Rijntakken en RMM groter dan op de Nederrijn-Lek (zie @@). Door de dominantie van de rivierafvoer zouden beide systemen (Rijntakken en RMM) goed moeten aansluiten op de Waal. Verondersteld wordt dat in de Rijntakken berekening bovenstrooms van Gorinchem (km 950) diverse Ruimte voor de Rivier (RvR) maatregelen de waterstand verlagen. Deze maatregelen zijn niet in de modellering van RMM opgenomen. Alleen de RvR maatregelen benedenstrooms van Gorinchem zijn in de RMM berekening aanwezig. De verschillen in Figuur 44 lijken dan ook conform verwachting.



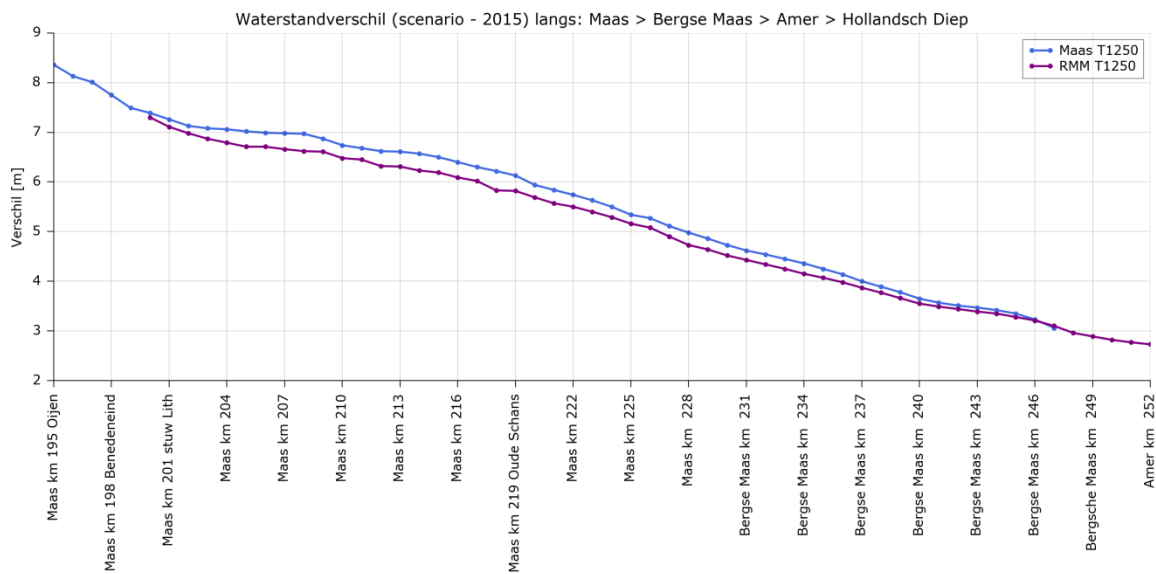
Figuur 44: Vergelijking tussen waterstanden van de Rijntakken en de Rijn-Maasmonding berekend met het NWM voor de referentie langs de Waal.

10.5 Maas

Om de systemen RMM en Maas goed op elkaar aan te sluiten zou in de Hydra-Zoet berekeningen van RMM voor locaties langs de Maas moeten worden gerekend met statistiek van Lith (Botterhuis et al, 2016). Om praktische redenen is gekozen voor 1 set berekeningen. In de hydraulische berekeningen is gerekend met een Rijndominante relatie tussen de Rijn- en Maasafvoer. In de probabilistische berekeningen is (logischerwijs) gekozen voor statistiek van de afvoer te Lobith.

Eerder is door De Deugd een 1-op-1 relatie tussen Rijn en Maas afvoer afgeleid (Chbab, 2016). Deze relatie tussen de Rijn- en Maasafvoer geeft kleine verschillen in berekende waterstanden op de Bergsche Maas en Hollandsch Diep (enkele centimeters). Het is dan ook mogelijk om per locatie te kiezen voor Rijn- of Maasstatistiek. Het aantal berekeningen hoeft dan niet toe te nemen, maar de overgang tussen beide systemen op de Maas (bovenstrooms van km 240) is dan toch vloeiender.

Let op! Er is nu voor gekozen om de statistische correlatie tussen Rijn en Maas te gebruiken zoals in WTI2011 is toegepast. Het lijkt overigens aannemelijk dat deze relatie zal moeten wijzigen door toepassing van de GRADE statistiek. We verwachten dat door overstromingen in het Rijn- en Maasstroomgebied de afvoerstatistiek zal wijzigen. Het lijkt logisch dat daardoor ook de statistische correlatie tussen Rijn en Maas afvoer zal wijzigen. Immers, als de extreme Rijnafvoeren aanzienlijk afnemen, dan zal de tegelijkertijd optredende Maasafvoer mogelijk niet in gelijke mate wijzigen.



Figuur 45: Vergelijking tussen waterstanden van de Maas en de Rijn-Maasmonding berekend met het NWM voor de referentie langs de Maas.

11 Conclusies en aanbevelingen

11.1 Conclusies

Op basis van de uitgevoerde kwaliteitscontrole van het Nationaal Watermodel (NWM) zijn de volgende conclusies opgesteld:

- Voor de watersystemen IJssel- en Markermeer is geen effect van de klimaatontwikkeling op de hydraulische belastingniveaus berekend. Omdat door maatregelen die de afvoercapaciteit naar de Waddenzee vergroten, de statistiek van het meerpeil in de toekomst niet zal veranderen.
- Voor de watersystemen Rijnakkers, Maas, IJssel-Vechtdelta en de Rijn-Maasmonding is het effect van de klimaatontwikkeling berekend. Gegeven de geconstateerde uitgangspunten zijn voor de meeste berekeningen geen significante afwijkingen van de verwachte uitkomsten geconstateerd:
 - de aanpassing van de methode waarmee de statistiek van de Rijn- en Maasafvoer heeft een significant effect
 - de aanpassing van de klimaatontwikkeling (verschil KNMI'14 en KNMI'06) heeft een beperkt effect.
- De uitkomsten van de Basisprognoses 2016 van het NWM zijn geverifieerd aan de uitkomsten de Basiscases van het Deltamodel (DM). Afgezien van drie berekeningen (zie volgende punt) zijn geen onverklaarbare verschillen tussen Basisprognoses en –cases geconstateerd.
- Voor de toepassing KNMI'14 i.p.v. KNMI'06 voor de waterveiligheid berekeningen van het NWM is alleen de statistiek van de zeewaterstand te Maasmond, de rivierafvoer te Lobith, Borgharen en Olst aangepast in de berekeningen van het NWM. De statistiek de wind zijn niet gewijzigd.
- Voor het afleiden van de statistiek van de afvoer voor KNMI'14 is een andere methode gebruikt dan destijds voor de KNMI'06 scenario's. Gevolg is dat het verschil van de Basisprognoses met de Basiscases van het DM niet exclusief wordt veroorzaakt door aanpassing van de klimaatscenario's.
- De rivierafvoer neemt in zichtjaar 2050 van scenario G_L meer toe, dan in 2085. Dit is wel afhankelijk van de herhalingstijd, bij zeer extreme herhalingstijden is de toename in 2085 groter.
- De dijkprofielen in het NWM zijn t.o.v. het DM aangepast. Hiermee wordt een eenduidige set dijkprofielen geïntroduceerd, waarvan de herkomst helder is, en waarvan de kwaliteit is geborgd. Binnen VNK2 heeft immers een review plaatsgevonden op de geschematiseerde dijkprofielen.
- Als gevolg van de gewijzigde set dijkprofielen is het verschil in hydraulisch belastingniveau niet meer exclusief veroorzaakt door aanpassing van de klimaatscenario's.

11.2 Aanbevelingen

De volgende aanbevelingen zijn opgesteld:

- Ga na op welke wijze de uitkomsten gebruikt mogen worden van deze berekeningen met de *S0* schematisaties van de verschillende watersystemen. Schrijf dit als oplegnotitie op bij deze rapportage.
- Ga na of inderdaad alleen wijzing van de afvoerstatistiek een correcte implementatie is van scenario's KNMI'14.
- Voor de langere termijn ga na op welke wijze de discretisatie van de basisstochasten het effect van het klimaat op de hydraulische belastingen kan beïnvloeden.
- Voor de langere termijn ga na op welke wijze het effect van klimaatontwikkeling kan worden gepresenteerd als is overgestapt op de normering geldig vanaf 1-1-2017 (overstromingskans).

Disclaimer

In de huidige versie van het NWM is alleen de afvoerstatistiek gewijzigd. Eigenlijk moeten ook de golfvorm en -duur worden aangepast bij veranderende uitgangspunten (en eventueel ook de correlatie tussen Rijn en Maasafvoer).

12 Referenties

[Botterhuis en Stijnen, 2014a]

T. Botterhuis en J. Stijnen, *Variant Landelijke Samenhang, MHW- en HBN-berekeningen Deltamodel*. HKV-PR2799.10 rapportage, Lelystad mei 2014.

[Botterhuis en Stijnen, 2014b]

T. Botterhuis en J. Stijnen, *Basiscases en strategieën DP-RD met het Deltamodel 1.1, MHW- en HBN-berekeningen Rijn-Maasmonding*. HKV-PR2799.20 rapportage, Lelystad juli 2014.

[Botterhuis en Stijnen, 2015]

T. Botterhuis en J. Stijnen, *Voorkeursstrategie Rivieren, MHW-berekeningen Deltamodel*. HKV-PR2910.10 rapportage, Lelystad september 2015.

[Botterhuis et al, 2016]

T. Botterhuis, G. Pleijter en J. Stijnen, (2016) *Analyse overgangen bovenrivieren / benedenrivieren*. HKV-PR3343.10 rapportage, Lelystad mei 2016.

[Bruggeman et al., 2010]

W. Bruggeman, S. Hommes, A. te Linde en R. ten Brugge, *Deltamodel 2010, Deltascenarios voor robuustheidsanalyse van maatregelen voor zoetwatervoorziening en veiligheid*. Deltares, Delft december 2010.

[Bruggeman et al., 2013]

W. Bruggeman en E. Dammers en coauteurs, *Deltascenario's voor 2050 en 2100, Nadere uitwerking 2012-2013*. Deltares, Delft april 2013.

Buiteveld (2015). Oplevering OI2015 (voorlopig) ZONDER aftoppen, email van 24 maart 2015 gericht aan Robert Vos (WVL).

[Chbab en Eilander, 2016]

E.H. Chbab, en D. Eilander, *Basisstochasten WTI-2017. Statistiek en statistische onzekerheid*. Deltares rapport 1209433-012-HYE-007. Delft januari 2016.

[Chbab, 2012]

E.H. Chbab, *Achtergrondrapportage WTI-2011 hydraulische belasting voor de Vechtdelta*. Deltares rapport 1204143-003-ZWS-0025. Delft juli 2012.

[De Deugd, 2007]

H. de Deugd, *Waterloopkundige berekeningen TMR 2006, Benedenrivierengebied, Beschrijving van de waterloopkundige methode*. RWS RIZA rapport 2007.017, Rijkswaterstaat, Rotterdam april 2007.

[Den Bieman en Smale, 2015]

J. den Bieman en A. Smale, *Werkwijze bepaling hydraulische ontwerprandvoorwaarden, OI2014 versie 3, voor HWBP 2015 projecten*. Deltares rapport 1210420-000-HYE-0007, Delft juli 2015.

[Hegnauer et al., 2010]

M. Hegnauer, J.J. Beersma, H.F.P. Van den Boogaard, T.A. Buishand, R.H. Passchier, *Generator of Rainfall and Discharge Extremes (GRADE) for the Rhine and Meuse basins: Final report of GRADE 2.0*. Deltares report 1209424-004-ZWS-0018, Delft, 2014.

[Hegnauer, 2016]

M. Hegnauer, *Afvoerstatistieken o.b.v. KNMI'14 scenarios*. Deltares memo 1230045-002-ZWS-0001, Delft 3 maart 2016.

[Hunink en Hegnauer, 2015]

J. Hunink en M. Hegnauer, *Update Deltascenarios Nationaal Water Model*, Deltares rapport 1220056-000-ZWS-0015, Delft augustus 2015.

[KNMI, 2006]

KNMI, *Klimaat in de 21^e eeuw, Vier scenario's voor Nederland*, KNMI, De Bilt, mei 2006

[KNMI, 2014]

KNMI, *KNMI'14-klimaatscenario's voor Nederland; Leidraad voor professionals in klimaatadaptatie*, KNMI, De Bilt 2014.

[Kuijper, Stijnen en Van Velzen, 2011]

B. Kuijper, J. Stijnen en E. van Velzen, *Overstromingskansen – Informatie ten behoeve van het project Waterveiligheid 21e eeuw*. Deltares, Delft 2011.

[Kuijper en Botterhuis, 2015]

B. Kuijper en T. Botterhuis, *Basiscases en strategieën DPIJ met het Deltamodel 1.1, MHW- en HBN-berekeningen IJssel-Vechtdelta*. HKV-PR2799.20 rapportage, Lelystad december 2015.

[Kuijper, 2015]

B. Kuijper, *Genereren dwarsprofielen NWM, Beschrijving werkzaamheden en resultaten*. HKV-PR2984.40 memorandum, Lelystad augustus 2015.

[Paarlberg en Agtersloot, 2015a]

A.J. Paarlberg en R.C. Agtersloot, *WAQUA Productieberekeningen Bovenrivieren Maas, Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017*, Deltares rapport 1220082-001-HYE-0012, Delft december 2015.

[Paarlberg en Agtersloot, 2015b]

A.J. Paarlberg en R.C. Agtersloot, *WAQUA Productieberekeningen Bovenrivieren Rijntakken, Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017*, Deltares rapport 1220082-001-HYE-0013, Delft december 2015.

[Paarlberg en Agtersloot, 2015c]

A.J. Paarlberg en R.C. Agtersloot, *WAQUA Productieberekeningen IJssel-Vechtdelta, Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017*, Deltares rapport 1220082-001-HYE-0014, Delft december 2015.

[Paarlberg en Agtersloot, 2015d]

A.J. Paarlberg en R.C. Agtersloot, *WAQUA Productieberekeningen Rijn-Maasmonding, Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017*, Deltares rapport 1220082-001-HYE-0015, Delft december 2015.

[Slootjes et al., 2011]

N. Slootjes, A. Jeuken, T. Botterhuis en Q. Gao, 2011, *Resultaten MHW berekening t.b.v.*,

probleemanalyse en verkenning hoekpunten. Voor het Deltaprogramma Rijnmond-Drechtsteden, Deltares en HKV LIJN IN WATER, Lelystad, In opdracht van: Deltaprogramma Rijnmond-Drechtsteden.

[Van Walsem, 2013]

T. van Walsem, *Hydraulische modellen gebruikt voor veiligheidsanalyse Deltamodel 1.1; referentie 2015 en zichtjaren 2050 en 2100*. RWS, december 2013.

| KNMI'14 scenarios | Rijn | | Maas | | |
|-------------------------------------|--|------------------------------------|---|--|------------------------------------|
| | Afvoer T = 1250 jaar (m ³ /s) | Aftopniveau (m ³ /s) | Afvoer T = 250 jaar (m ³ /s) | Afvoer T = 1250 jaar (m ³ /s) | Aftopniveau (m ³ /s) |
| 2015 (Referentie) | 14.974 | 16.500 | 3.520 | 3.914 | 4.600 |
| 2050 W ⁺ (Stoom en Warm) | 15.945 | 17.000 | 3.800 | 4.247 | 4.600 |
| 2100 W ⁺ (Stoom en Warm) | 17.191 | 18.000 | 4.284 | 4.788 | 4.600 |

Tabel 10: KNMI'06 kentallen van rivierafvoeren en fysisch maximum van de Rijn (Lobith) en de Maas (Borgharen).

| KNMI'14 scenarios | Rijn | | Maas | | |
|-------------------------------------|--|------------------------------------|---|--|------------------------------------|
| | Afvoer T = 1250 jaar (m ³ /s) | Aftopniveau (m ³ /s) | Afvoer T = 250 jaar (m ³ /s) | Afvoer T = 1250 jaar (m ³ /s) | Aftopniveau (m ³ /s) |
| 2015 (Referentie) | 15.000 | 16.500 | 3.488 | 3.915 | 4.600 |
| 2050 G _L (Rust en Druk) | 16.620 | 16.500 | 3.940 | 4.450 | 4.600 |
| 2085 G _L (Rust en Druk) | 16.440 | 17.000 | 3.830 | 4.360 | 4.600 |
| 2050 W _H (Stoom en Warm) | 16.020 | 17.000 | 3.860 | 4.260 | 4.600 |
| 2085 W _H (Stoom en Warm) | 17.570 | 18.000 | 4.240 | 4.760 | 4.600 |



HKV Lijn in water BV

Postbus 2120
8203 AC Lelystad

Botter 11-29
8232 JN Lelystad

0320 29 42 42
info@hkv.nl
www.hkv.nl