

Hotspotanalyses voor het Deltaprogramma Zoetwater

Inhoudelijke rapportage



Hotspotanalyses voor het Deltaprogramma Zoetwater

Inhoudelijke rapportage

Marjolein Mens
Remi van der Wijk
Nienke Kramer
Joachim Hunink
Jurjen de Jong
Bernhard Becker
Peter Gijsbers
Corine ten Velden

11202240-004

Titel
Hotspotanalyses voor het Deltaprogramma Zoetwater

| | | | |
|----------------------|----------------|-----------------------|-----------------|
| Opdrachtgever | Project | Kenmerk | Pagina's |
| WVL | 11202240-004 | 11202240-004-ZWS-0001 | 135 |

Trefwoorden




Droogte, Nationaal Water Model, Landelijk Hydrologisch Model, waterverdeling, grondwater, Deltaprogramma Zoetwater, Knelpuntenanalyse Zoetwater, hotspotanalyse, Midden-rivieren, Noordzeekanaal, Amsterdam-Rijnkanaal, Rijn-Maasmonding, IJsselmeer, Twentekanalen, Maas en Hoge Zandgronden

Samenvatting

Dit rapport is een bundeling van zogenaamde hotspotanalyses en bedoeld voor inhoudelijk betrokkenen bij het Deltaprogramma Zoetwater. In het proces naar de Deltabeslissing Zoetwater in 2021, heeft het project 'Knelpuntenanalyse 2.0' de volgende doelen: herijken van de zoetwaterstrategie, verkennen van nut en noodzaak van aanvullende zoetwatermaatregelen, en een bijdrage leveren aan de onderbouwing van de afspraken over de waterbeschikbaarheid tussen rijk en regio. De 'hotspotanalyses', als onderdeel van het project Knelpuntenanalyse, dragen bij aan de eerste mijlpaal van het Deltaprogramma Zoetwater, namelijk: *eerste beeld bovenregionale knelpunten en aanvullende maatregelen*. Een hotspot is gedefinieerd als: een geografisch afgebakend gebied in het hoofd- of regionale watersysteem waar we nog zoetwaterknelpunten verwachten en waar een keus in de waterverdeling of -voorziening leidt tot een (potentieel) significante belangenafweging tussen gebruiksfuncties of gebieden. Het gaat om de volgende hotspots: Midden-rivieren, Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal, Rijn-Maasmonding, IJsselmeer, Twentekanalen, Maas en Hoge Zandgronden/grondwater. De resultaten zijn in meerdere werksessies met de regio (vertegenwoordigers van waterbeheerders en watergebruikers/sectoren) besproken. Dit heeft geleid tot een voorlopig overzicht van potentiële (bestuurlijke) keuzes die gemaakt moeten worden. Deze keuzes worden ook in dit rapport per hotspot samengevat.

Referenties

Mens, M., R. van der Wijk, N. Kramer, J. Hunink, B., J. de Jong, Becker, P. Gijsbers, C. ten Velden (2018) Hotspotanalyses voor het Deltaprogramma Zoetwater: Inhoudelijke rapportage. Deltares rapport 11202240-004-ZWS. Delft, mei 2018.

| Versie | Datum | Auteur | Paraaf | Review | Paraaf | Goedkeuring | Paraaf |
|--------|-----------|----------------|---|-----------------|---|-------------|---|
| | jun. 2018 | Marjolein Mens |  | Judith ter Maat |  | Gerard Blom |  |

Status
definitief

Samenvatting

In het proces naar de Deltabeslissing Zoetwater in 2021, heeft het project 'Knelpuntenanalyse 2.0' de volgende doelen: herijken van de zoetwaterstrategie, verkennen van nut en noodzaak van aanvullende zoetwatermaatregelen, en een bijdrage leveren aan de onderbouwing van de afspraken over de waterbeschikbaarheid tussen rijk en regio. De 'hotspotanalyses', als onderdeel van het project Knelpuntenanalyse, dragen bij aan de eerste mijlpaal van de Deltaprogramma Zoetwater, namelijk: *eerste beeld bovenregionale knelpunten en aanvullende maatregelen*. Een hotspot is gedefinieerd als: een geografisch afgebakend gebied in het hoofd- of regionale watersysteem waar we nog zoetwaterknelpunten verwachten en waar een keus in de waterverdeling of -voorziening leidt tot een (potentieel) significante belangenafweging tussen gebruiksfuncties of gebieden. **Dit rapport is een bundeling van de analyses die voor elke hotspot zijn uitgevoerd.** Het gaat om de volgende hotspots: Midden-rivieren, Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal, Rijn-Maasmonding, IJsselmeer, Twentekanal, Maas en Hoge Zandgronden. De resultaten zijn in meerdere werksessies met de regio (vertegenwoordigers van waterbeheerders en watergebruikers/sectoren) besproken. Dit heeft geleid tot een voorlopig overzicht van potentiële bestuurlijke keuzes die gemaakt moeten worden. Deze keuzes worden ook in dit rapport per hotspot samengevat.

Modelinstrumentarium

Alle hotspots (met uitzondering van de hotspot Maas) hebben gebruik gemaakt van de 100-jarige tijdreeks voor meteorologie en rivierafvoeren die in 2017 met het Nationaal Water Model (NWM) is doorgerekend, zodat de situatie in het watersysteem onder een range aan condities geanalyseerd kan worden. Aanvullend hierop zijn voor de hotspot Midden-rivieren verschillende waterverdelingsvarianten doorgerekend met behulp van Excel/Matlab (op basis van NWM-uitvoer). Om in deze hotspot uitspraken te kunnen doen voor scheepvaart, zijn waterstanden uit NWM vertaald in beschikbare vaardieptes met behulp van de tool LSM2BIVAS (De Jong, 2017). Voor de hotspot IJsselmeer/Twentekanal zijn aanvullend berekeningen uitgevoerd met de Quick Water Allocation Scan Tool (QWAST), die de afgelopen jaren speciaal voor het Deltaprogramma Zoetwater ontwikkeld is.

Midden-riviereengebied

Deze hotspot richtte zich op de waterverdeling op het kruispunt van Waal, Nederrijn, Lek, Amsterdam-Rijnkanaal Betuwepand en Noordpand. Er was behoefte aan inzicht in de gevolgen van verschillende waterverdelingsvarianten op de gebruiksfuncties drinkwater op de Lek en het ARK-Noordpand, scheepvaart op de Waal en het ARK-Betuwepand, en de regionale watervoorziening vanuit het ARK-Betuwepand en de Nederrijn. Voor deze analyse is gebruik gemaakt van NWM resultaten.

De varianten die zijn geanalyseerd sluiten aan bij de verwachte ontwikkelingen ten aanzien van: een grotere onttrekking om zoutindringing op het ARK-Noordpand tegen te gaan, een grotere afvoer over Hagestein om verzilting van de Lek tegen te gaan, het vaker en met grotere capaciteit inzetten van de Klimaatbestendige Wateraanvoer (KWA+) en toename van de regionale watervraag als gevolg van klimaatverandering en socio-economische ontwikkelingen. De varianten zijn in Excel geanalyseerd op basis van de NWM resultaten, door aan te nemen dat elke extra watervraag ten koste gaat van de Waalafvoer en opgeteld moet worden bij de afvoer door het ARK-Betuwepand. Voor analyse van effecten op de scheepvaart is LSM uitvoer vertaald naar vaardiepte met behulp van de tool LSM2BIVAS.

De extra watervraag aan het hoofdwatersysteem voor de KWA+, het zoet houden van de Lek en het zoet houden van ARK-Noordpand, komt naar verwachting minimaal overeen met de variant waarin minimaal 25 m³/s debiet over stuw Hagestein gaat en minimaal 25 m³/s debiet door het ARK-Noordpand bij Weesp stroomt. Als dit extra water uit de Waal wordt aangevoerd, zal dit volgens de berekeningen in de toekomst (Warm2050) minimaal eens in de 15 jaar leiden tot grote afvoeren door het Betuwepand, waardoor een deel van het scheepvaartverkeer in de problemen komt bij het passeren van de Prins Bernhardsluizen. Scheepvaart op de Waal zal in de toekomst (Warm2050) vaak (~eens in de 5 jaar) hinder ondervinden. Door de extra watervraag zal de waterstand bij locatie St. Andries op de Waal enkele centimeters dalen waardoor de beladingsgraad van de binnenvaart (verder) gereduceerd zal worden. De impact van sterke klimaatverandering (Warm2050) is echter groter en heeft een negatief effect van enkele decimeters op de vaardiepte op de Waal.

In gesprek met de regio zijn de volgende keuzes geformuleerd, die naar verwachting onder het Warm2050 scenario eens in de 5 jaar gemaakt moet worden:

- Extra wateraanvoer uit de Waal via het ARK-Betuwepand (met als gevolg negatieve effecten voor de scheepvaartsector).
- Minder water naar de Lek (effecten drinkwatersector).
- Minder water naar het ARK-Noordpand (effecten regionale watervoorziening, natuur, drinkwatersector).
- Meer water via sluis Driel (effect op IJsselafvoer).
- Minder regionale onttrekkingen vanuit het ARK-Betuwepand en vanuit de Nederrijn.

Rijn-Maasmonding

Deze hotspot richtte zich op het effect van klimaatverandering en inzet van zogenaamde stuurknoppen op de zoutindringing in de Rijn-Maasmonding. De analyse is uitgevoerd aan de hand van de 100-jarige chloridereeks zoals berekend met SOBEK-RE-NDB als onderdeel van het Nationaal Water Model, voor drie locaties: Krimpen aan den IJssel, Kinderdijk en Bernisse. Krimpen aan den IJssel en Kinderdijk dienen als proxy voor de Hollandse IJssel en Lek, waar een aantal (regionale) innamepunten ligt. Bernisse is een inlaat voor het Brielse Meer. Vanuit het Brielse Meer worden onder meer de Rotterdamse haven, Voorne-Putten en Delfland voorzien van zoet water.

Bij langdurige verzilting van de *monding van de Hollandsche IJssel* gecombineerd met een watervraag uit de regio Midden-West-Nederland (Rijnland, Delfland, etc.) is inzet van de KWA nodig. Uit de analyse met SOBEK-NDB blijkt dat de monding van de Hollandsche IJssel in het huidige klimaat eens in de 10 à 20 jaar verzilt (drempelwaarde van 200 mg/l en een minimale duur van 7 à 14 aaneengesloten dagen). Uit de analyse voor het Warm2050 scenario volgt dat de monding eens in de ongeveer 5 jaar verzilt. Eens in de 10 à 20 jaar bedraagt daarbij de duur mogelijk maanden in plaats van enkele weken.

De *monding van de Lek (Kinderdijk)* is in het huidige klimaat zelden langdurig verzilt. Hierdoor is er op de Lek weinig ervaring met zoutindringing vanuit zee en zijn er weinig tot geen meetgegevens beschikbaar om het model te valideren. Verkennende modelberekeningen laten zien dat onder het Warm2050 scenario de monding van de Lek bij Kinderdijk ongeveer eens in de 5 à 10 jaar langdurig¹ verzilt raakt. Tijdens deze periodes zal het nodig zijn om voldoende afvoer over Hagestein te realiseren om verzilting van de Lek zelf te voorkomen en de inlaatpunten langs de Lek te kunnen blijven gebruiken.

¹¹ Tenminste enkele weken concentraties hoger dan 150 a 200 mg Cl/l (bandbreedte ivm onzekerheid) in de monding van de Lek, waarvan minimaal 7 dagen aaneengesloten verzilting, tijdens het zomerhalfjaar.

De verwachting is dat verzilting van de *monding van de Lek* (het advectieve deel van de Lek) – waar innamepunten liggen - hiermee niet voorkomen kan worden.

Langdurige verzilting bij *Bernisse* treedt op ten gevolge van nalevering vanuit het Haringvliet na het optreden van een achterwaartse verziltingsevent waarbij zout vanuit de Nieuwe Waterweg tot in het Haringvliet gekomen is. Het proces van nalevering kan niet goed met een 1D model gesimuleerd worden. Daarom is geanalyseerd hoe vaak achterwaartse verzilting samenvalt met een periode van langdurig lage Rijnafvoeren, waarbij de Haringvlietsluizen gesloten zijn. Op basis hiervan is geschat dat de kans op achterwaartse verzilting met nalevering (hele jaar) toe zal nemen van ongeveer eens in de 5 jaar (huidig klimaat) naar eens in de 3 à 4 jaar (Warm2050). In de toekomst, onder het Warm2050 scenario, kan dit ook in de zomerperiode gaan optreden.

De stuurknoppen (het sturen van water over de Lek via de stuw van Hagestein en het stopzetten van de onttrekking van water naar het Volkerak-Zoommeer) hebben een beperkte invloed op het zoet houden van de monding van de Lek en Hollandsche IJssel. De stuurknoppen kunnen wel een significant effect hebben op het zoet houden van de Lek zelf. Het effect van de stuurknoppen op *Bernisse* is niet onderzocht.

In gesprek met de regio zijn de volgende keuzes geformuleerd:

- Accepteren dat innamepunten (zowel regionale als drinkwaterinnamepunten) vaker en langer verzilten en/of de KWA vaker en langer inzetten voor de watervoorziening van West-Nederland (met negatieve effecten industrie, drinkwater en regionale watervoorziening langs de Lek);
- Aanvoeren van extra water vanuit de Waal via het ARK Betuwepand (met negatieve effecten voor scheepvaart) om een structurele oostelijke aanvoer voor de watervoorziening van West Nederland op te zetten;
- Inzetten van stuw Hagestein voor het zoet houden van de Lek (positieve effecten regionale watervoorziening en drinkwater) ten koste van de scheepvaart op de Waal;
- Vergaande maatregelen in de Nieuwe Waterweg door bijvoorbeeld sluisen te bouwen, om zoutindringing vanuit zee tegen te gaan (negatieve effecten voor de Rotterdamse haven en scheepvaart);
- Nieuwe innovatieve maatregelen om zoutindringing te beperken/voorkomen zoals bellenboten, pompschepen, gaten in de spiltingsdam en het aanpassen van de geometrie.

Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal

Deze hotspot richtte zich op het Amsterdam-Rijnkanaal (ARK) en Noordzeekanaal (NZK), als verbinder tussen het midden-rivierengebied en het IJsselmeer en overgang naar zee. De knelpunten als gevolg van zoutindringing via de Nieuwe Waterweg en Haringvlietsluizen, veranderende afvoeren over de Waal, de zoutindringing via het NZK en de beschikbare bufferschijf in het IJsselmeer zijn daaraan gekoppeld.

Om het zoutgehalte in het NZK/ARK op niveau van autonome ontwikkeling, in de situatie dat de nieuwe zeesluis bij IJmuiden operationeel is (verwacht in najaar 2019) en de Selectieve Onttrekking gerealiseerd is (verwacht in 2022), zal extra water aangevoerd moeten worden uit het Markermeer of de Waal. Uit de analyse van NWM-resultaten blijkt dat in het huidige klimaat bijna altijd voldoende water beschikbaar is. Eens in de 33 jaar is een afweging nodig, omdat de buffer in het IJsselmeer dan aangesproken wordt, ook zonder de extra wateraanvoer. De verwachting is dat dit beeld niet veel verandert onder de gematigde klimaatscenario's.

Als ervoor gekozen wordt om het extra water uit het Markermeer/IJsselmeer aan te voeren, zal onder extreme klimaatverandering (WARM) in 2050 vaker (~ 1:15 jaar) een afweging gemaakt moeten worden tussen de gebruikers van het IJsselmeer/Markermeer (extra wateraanvoer richting NZK wordt hier gezien als gebruiker). Een andere optie is om extra water uit de Waal aan te voeren, met negatieve effecten voor scheepvaart op de Waal.

In gesprek met de regio zijn de volgende keuzes geformuleerd:

- Extra watervraag NZK/ARK vanuit het IJssel-/Markermeer faciliteren (met negatieve effecten voor het huidige voorzieningsgebied van het IJsselmeergebied).
- Watervraag van het NZK/ARK vanuit de Waal faciliteren (met negatieve gevolgen voor de scheepvaart op de Waal)
- Bronmaatregelen om zoutindringing bij IJmuiden te verminderen zoals de bouw van een zoutvang bij de selectieve onttrekking om de effectiviteit van de onttrekking te vergroten of andere additionele maatregelen om zoutindringing verder tegen te gaan.

IJsselmeer/Twentekanalen

Deze hotspot richtte zich op het verkennen van de effecten van flexibel peilbeheer en het prioriteren van de inlaat Eefde (Twentekanalen). Hiervoor is QWAST ingezet in aanvulling op analyse van NWM-resultaten. Hieruit is het volgende geconcludeerd:

- Met huidig peilbeheer in Warm2050 scenario is er eens in de 33 jaar een bufferschijf van 20 cm nodig en treden watertekorten op in het IJsselmeergebied. In 5 van de 100 jaar (dus eens in de 20 jaar) is de uitzakking meer dan 10 cm en zijn de tekorten groter dan 5% van de watervraag.
- Met toepassing van flexibel peilbeheer in het IJsselmeer wordt de bufferruimte ten opzichte van huidig peilbeheer vergroot. Hierdoor kan de buffer door meer watervragers langer benut worden, maar alleen als het peil anticiperend opgezet kan worden naar -0,10 m NAP. Dit vraagt voldoende aanvoer uit de IJssel én een goed voorspellingssysteem.
- Met flexibel peilbeheer wordt de bufferschijf ongeveer even vaak gebruikt, maar worden de tekorten in 5 van de 100 jaar teruggedrongen met 2 procentpunt of meer.
- Hogere prioriteit inlaat Twentekanalen (bij Eefde) zorgt er in zeer droge jaren voor dat het watertekort in de IJssel-Vechtdelta vermindert, ook bij 10% hogere watervraag die voorzien wordt vanuit Twentekanalen. Voor de buffer IJsselmeer heeft dit geen of nauwelijks gevolgen. Tekorten in de andere deelgebieden van het IJsselmeergebied nemen hierdoor wel toe.

In gesprek met de regio is geconcludeerd dat er bij sterke klimaatverandering in 2050 (Warm2050) eens in de 20 jaar een regionale afweging nodig is tussen gebieden en functies die voor hun wateraanvoer afhankelijk zijn van het IJsselmeer.

Maas

Met behulp van een brainstormsessie en een literatuuronderzoek is in deze hotspot een verkennende inventarisatie gemaakt van toekomstige ontwikkelingen in het buitenland die invloed kunnen hebben op de afvoer van de Maas. Vervolgens is op basis van expert oordeel en in overleg met de regio een selectie gemaakt van de meest relevante ontwikkelingen.

De scheepvaart op de Maas is als belangrijke ontwikkeling geïdentificeerd. Meer scheepvaart kan leiden tot grotere schutverliezen en dus een hogere watervraag voor de scheepvaart die bij sterke klimaatverandering niet altijd beschikbaar is. Het beëindigen van de bruinkoolmijnbouw in Duitsland heeft een groot effect op de grondwaterdynamiek in het stroomgebied van de Roer. Beschikbare studies lijken aan te geven dat het effect op de afvoeren van de Maas en de Roer klein is. Het systeem is echter zeer complex en dynamisch. Als gevolg daarvan is het onduidelijk wat het gezamenlijke effect is van de ontwikkelingen (stoppen met drainage en met water vullen van de mijnen) op zowel grondwaterstroming als kwel en basisafvoer van de Roer. Bovendien is de Roer voor het peilbeheerste gebied van Waterschap Rivierenland ten zuiden van de Linge een belangrijke zoetwaterbron tijdens droge periodes. Meer onderzoek is nodig om het netto effect tijdens droogte te kwantificeren.

Andere relevante ontwikkelingen om in de gaten te houden zijn:

- Het nieuwe stuwmeerbeheer in Duitsland en het stuwmeerbeheer in de Ardennen;
- Sluiten van energiecentrales langs de Maas en zijrivieren.

Keuzes ten aanzien van het mogelijke scheepvaartknelpunt:

- Nieuwe besparingsvoorzieningen bij sluisen versus;
- Vaker hinder en schade scheepvaart.

Hoge Zandgronden/grondwater

Deze hotspot richtte zich op een analyse van het effect van Warm2050 scenario op de grondwaterdynamiek van de Hoge Zandgronden. Op basis van de analyse is het volgende geconcludeerd:

- Onder het Warm2050 scenario zal de dynamiek in het grondwatersysteem toenemen. Kort gezegd betekent dit hogere grondwaterstanden en hogere afvoeren in winter; lagere grondwaterstanden, lagere afvoeren, en minder kwel in de zomer en het najaar. Dit kan betekenen dat er meer beken droogvallen in de zomer, en de vraag voor peilbeheer toeneemt in de peilbeheerste gebieden.
- Er ligt een opgave om het watersysteem zo aan te passen dat negatieve gevolgen van die grotere dynamiek (o.a. voor landbouw en natuur) worden opgevangen en het grondwatersysteem wordt hersteld. Wateroverlast en watertekort maken beide deel uit van die opgave.
- Door stijging van de grondwaterstanden in enkele infiltratiegebieden zoals de Veluwe is *lokaal* mogelijk extra grondwatervoorraad beschikbaar. Doordat de verandering van het grondwatersysteem als gevolg van de scenario's ruimtelijk en in tijd verschilt, kan gebruik van deze extra voorraad wel zorgen voor nog lagere grondwaterstanden in overige gebieden, lagere afvoeren in de zomer en minder kwel in natuurgebieden
- Binnen voorliggend onderzoek was het niet mogelijk conclusies verder te detailleren naar regio's. Hiervoor is een gedetailleerder regionaal model nodig.

Inhoud

| | |
|---|-----------|
| Samenvatting | i |
| 1 Inleiding | 1 |
| 1.1 Hotspotanalyses in het Deltaprogramma Zoetwater | 1 |
| 1.2 Beschrijving proces | 2 |
| 1.3 Leeswijzer en doelgroep | 3 |
| 2 Modelinstrumentarium: NWM en QWAST | 5 |
| 2.1 Inleiding | 5 |
| 2.2 NWM | 5 |
| 2.2.1 Korte beschrijving NWM en 100-jarige reeks | 5 |
| 2.2.2 Uitgangspunten en belangrijke aannames ten aanzien van waterbeheersregels | 7 |
| 2.3 Kwaliteitsborging NWM | 8 |
| 2.3.1 Validatie en plausibiliteit | 9 |
| 2.3.2 Toepasbaarheid | 9 |
| 2.3.3 Inhoudelijke controles in het kader van KPA | 10 |
| 2.3.4 Inhoudelijke controles in het kader van Wabes | 10 |
| 2.4 QWAST | 10 |
| 2.4.1 Korte introductie QWAST | 10 |
| 2.4.2 QWAST-validatie | 11 |
| 2.5 Literatuur | 11 |
| 3 Hotspot Midden-rivieren | 13 |
| 3.1 Afbakening gebied en hotspotvragen | 13 |
| 3.2 Aanpak en indicatoren | 14 |
| 3.2.1 Waterbalansanalyse | 14 |
| 3.2.2 Analyse met Landelijk Sobek Model | 15 |
| 3.2.3 Drempelwaarden voor scheepvaart en regionale inlaten | 16 |
| 3.3 Resultaten | 19 |
| 3.3.1 Analyse scheepvaart Betuwepand (Bernhardsluizen) | 19 |
| 3.3.2 Scheepvaart op de Waal | 20 |
| 3.3.3 Regionale inlaat bij Tiel | 25 |
| 3.4 Conclusies en keuzes | 26 |
| 3.5 Literatuur | 27 |
| 4 Hotspot Rijn-Maasmonding | 29 |
| 4.1 Focus van de hotspot | 29 |
| 4.2 Aanpak | 29 |
| 4.3 Resultaten | 31 |
| 4.3.1 Krimpen aan den IJssel & Kinderdijk | 33 |
| 4.3.2 Bernisse-Brielse Meersysteem | 35 |
| 4.3.3 Kwalitatieve analyse van nalevering bij Bernisse | 35 |
| 4.3.4 Effect van stuurknoppen | 39 |
| 4.4 Conclusies en keuzes | 40 |
| 4.5 Literatuur | 41 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5 | Hotspot Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal | 43 |
| 5.1 | Afbakening gebied en hotspotvragen | 43 |
| 5.2 | Aanpak en uitgangspunten | 43 |
| 5.3 | Achtergrond informatie | 44 |
| 5.3.1 | Situatieschets ARK/NZK | 44 |
| 5.3.2 | Validatie LHM | 44 |
| 5.3.3 | Toelichting 25 m ³ /s bij Weesp | 45 |
| 5.3.4 | Toelichting 50 m ³ /s bij IJmuiden | 47 |
| 5.4 | Resultaten | 48 |
| 5.5 | Conclusies en keuzes | 50 |
| 5.6 | Literatuur | 50 |
| 6 | Hotspot IJsselmeer/Twentekanalen | 53 |
| 6.1 | Afbakening gebied en hotspotvragen | 53 |
| 6.2 | Aanpak | 54 |
| 6.2.1 | Analysestappen | 54 |
| 6.2.2 | Instellingen voor de QWAST-sommen | 55 |
| 6.2.3 | Indicatoren | 58 |
| 6.2.4 | Verificatie QWAST | 58 |
| 6.3 | Resultaten | 60 |
| 6.3.1 | Huidig peilbeheer: peiluitzakking en watertekorten op basis van LHM | 60 |
| 6.3.2 | Effect van flexibel peilbeheer op buffergebruik en watertekorten op basis van QWAST | 60 |
| 6.3.3 | Hogere prioriteit TK en hogere watervraag IJssel-Vechtdelta | 63 |
| 6.4 | Conclusies en keuzes | 65 |
| 6.5 | Literatuur | 66 |
| 7 | Hotspot Maas | 67 |
| 7.1 | Afbakening en hotspotvragen | 67 |
| 7.2 | Aanpak | 67 |
| 7.3 | Resultaten | 67 |
| 7.3.1 | Ontwikkelingen in de scheepvaart | 69 |
| 7.3.2 | Sluiten van de bruinkoolmijnen in Duitsland | 71 |
| 7.3.3 | Stuwmeerbeheer in Duitsland | 72 |
| 7.3.4 | Energietransitie | 72 |
| 7.4 | Conclusie | 73 |
| 7.5 | Literatuur | 73 |
| 8 | Hotspot Hoge Zandgronden/grondwater | 75 |
| 8.1 | Afbakening gebied en hotspotvragen | 75 |
| 8.2 | Aanpak | 75 |
| 8.2.1 | Gebruikte datasets en gehanteerde uitgangspunten | 75 |
| 8.2.2 | Methode analyse | 77 |
| 8.3 | Resultaten | 79 |
| 8.3.1 | Consequenties grondwatervoorraden | 79 |
| 8.3.2 | Effecten grondwaterdynamiek | 82 |
| 8.3.3 | Invloed herstelvermogen grondwatersysteem na droogte | 82 |
| 8.3.4 | Kwelzones | 82 |
| 8.3.5 | Verschillen grondwatervoeding oppervlaktewater | 83 |
| 8.4 | Conclusies | 85 |
| 8.5 | Literatuur | 86 |

Bijlage(n)

| | |
|--|------------|
| A Interpretatie van ontwerp peilbesluit flexibel peilbeheer | A-1 |
| A.1 Ontwerp peilbesluit | A-1 |
| A.2 Hoe is dit peilbesluit gemodelleerd in QWAST? | A-2 |
| B Bijlage grondwater | B-1 |
| B.1 Effect van Warm2050 op GVG, GLG en GHG (NWM som S0) | B-2 |
| B.2 Effect van Stoom2050 op GVG, GLG en GHG (NWM som S0) | B-13 |
| B.3 Verschil tussen Warm2050 en Stoom2050 (NWM S0 som) | B-24 |
| B.4 Effect van Warm2050(NWM S1 som) | B-33 |

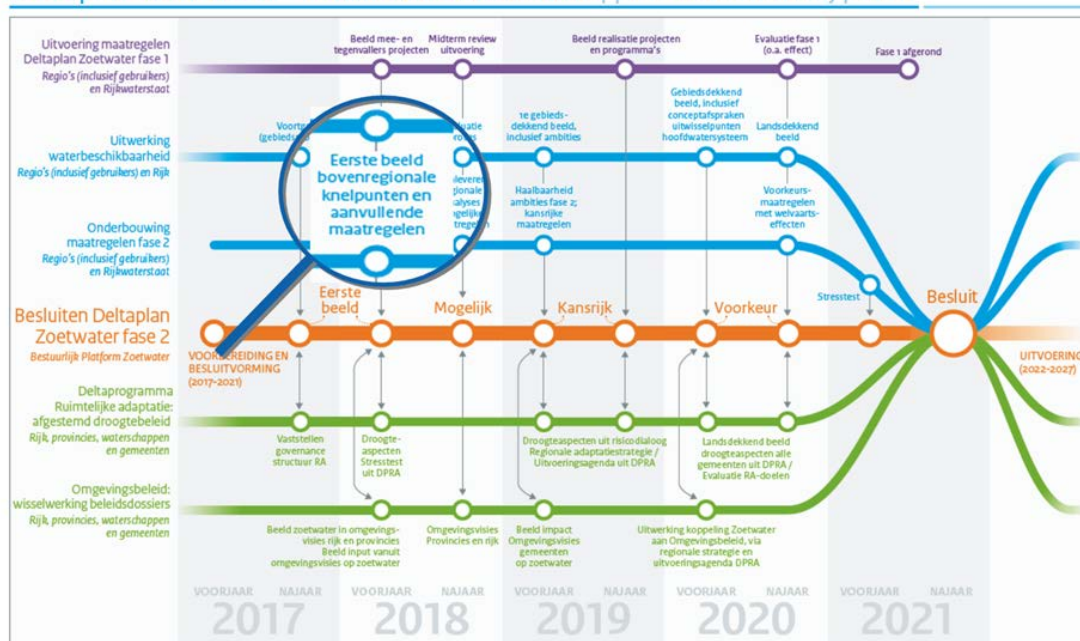
1 Inleiding

1.1 Hotspotanalyses in het Deltaprogramma Zoetwater

In 2015 zijn aan het eind van Deltaprogramma Fase 1 de Deltabeslissingen genomen. Onderdeel van de deltabeslissingen zijn maatregelenpakketten die afgesproken zijn voor het op orde houden van de zoetwatervoorziening in Nederland, ook in de toekomst. Aan het eind van Fase I van het Deltaprogramma zijn er nieuwe klimaat- en socio-economische scenario's uitgekomen, en zijn een aantal systeemingenrepen gepland of uitgevoerd (zoals nieuwe zeesluis IJmuiden en verdieping Nieuwe Waterweg). Voor het Deltaprogramma Zoetwater was dit voldoende aanleiding om in 2016 RWS/MVL en Deltares opdracht te geven voor het uitvoeren van een nieuwe knelpuntenanalyse ('KPA2.0') met als doelen: verkennen van nut en noodzaak van additionele zoetwatermaatregelen, herijken van de zoetwaterstrategie en een bijdrage te leveren aan de onderbouwing van de afspraken over de waterbeschikbaarheid. De 'hotspotanalyses', als onderdeel van het project Knelpuntenanalyse, dragen bij aan de eerste mijlpaal in het Deltaplan Zoetwater, zoals weergegeven in de Routekaart Zoetwater (Figuur 1.1): *eerste beeld bovenregionale knelpunten en aanvullende maatregelen*.

Een hotspot is gedefinieerd als een geografisch afgebakend gebied in het hoofd- of regionale watersysteem waar we nog zoetwaterknelpunten verwachten en waar een keus in de waterverdeling of -voorziening leidt tot een (potentieel) significante belangenafweging tussen gebruiksfuncties of gebieden. In de hotspotanalyses zijn verkenningen uitgevoerd om knelpunten en de keuzes in beeld te krijgen. Dit rapport is een bundeling van de analyses die voor elke hotspot zijn uitgevoerd. Tevens is in dit rapport een apart hoofdstuk opgenomen waarin het modelinstrumentarium wordt toegelicht.

Deltaplan Zoetwater - Routekaart naar fase 2 | producten en mijlpalen

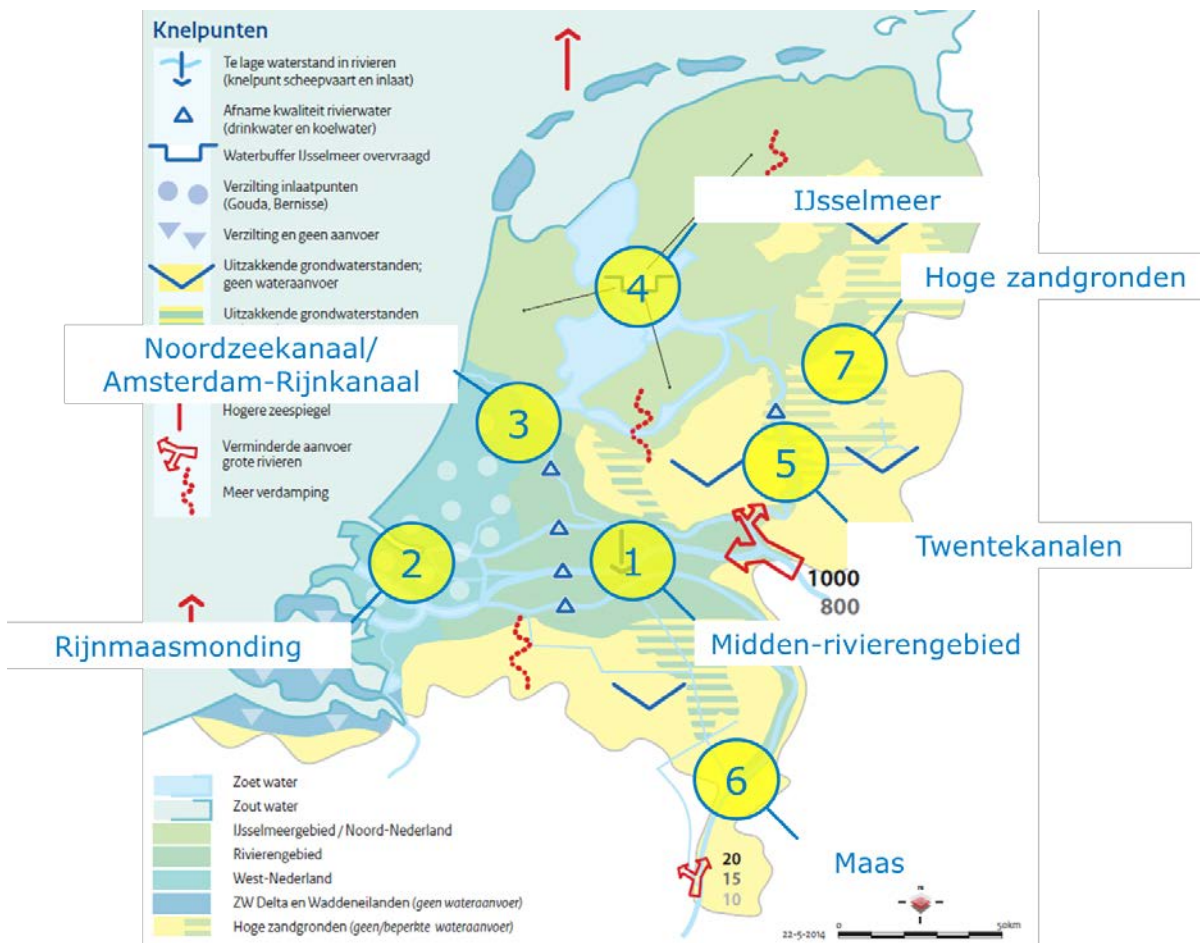


Figuur 1.1 Routekaart van het Deltaprogramma Zoetwater

1.2 Beschrijving proces

Tijdens een van de werksessies zoetwater in 2016 zijn de eerste ideeën voor mogelijke hotspots geopperd (inclusief openstaande kennisvragen). Vervolgens zijn deze aangescherpt in de regiobijeenkomsten van november 2016. Hieruit zijn een zevental hotspots geselecteerd (Figuur 1.2): Midden-rivieren, Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal, Rijn-Maasmonding, IJsselmeer, Twentekanaal, Maas en Hoge Zandgronden. In een later stadium is besloten om de hotspots IJsselmeer en Twentekanaal samen te voegen om recht te doen aan de sterke relatie tussen de twee hotspots. Ook is de naam van hotspot Hoge Zandgronden veranderd in 'Grondwater'.

Op 27 juni 2017 zijn de eerste resultaten besproken van de hotspots Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal, IJsselmeer/Twentekanaal en Maas. Het doel was om de kennisbehoefte verder aan te scherpen. In de regioronde van oktober/november 2017 zijn alle hotspots behalve grondwater besproken. De hotspot grondwater is uitgebreid besproken op de werksessie Zoetwater van 23 januari 2018. Op basis van de regiorondes zijn een aantal zaken verder uitgezocht en aangescherpt. Voorlopige conclusies zijn in de werksessies Zoetwater van het Deltaprogramma Zoetwater op 23 januari en 20 februari 2018 besproken om tot de hoofdbodschappen voor het Bestuurlijk Platform Zoetwater (BPZ) te komen. De hoofdbodschappen zijn vervolgens voorgelegd aan het BPZ van 8 maart 2018.



Figuur 1.2 Overzicht van de hotspots binnen het Deltaprogramma Zoetwater

1.3 Leeswijzer en doelgroep

Dit rapport is een bundeling van de hotspotanalyses en bedoeld voor inhoudelijk betrokkenen bij het Deltaprogramma Zoetwater. Elke hotspot wordt in een apart hoofdstuk behandeld (Hoofdstuk 3 t/m 8). Daarnaast is een apart hoofdstuk gewijd (Hoofdstuk 2) aan het gebruikte modelinstrumentarium (NWM en QWAST), inclusief de stappen die zijn genomen in het kader van kwaliteitsborging.

2 Modelinstrumentarium: NWM en QWAST

2.1 Inleiding

Alle hotspots (met uitzondering van de hotspot Maas) hebben gebruik gemaakt van de 100-jarige reeks die in 2017 met het Nationaal Water Model (NWM) is doorgerekend. De invoer en uitkomsten van deze berekeningen zijn geanalyseerd en geïnterpreteerd om zo de gestelde kennisvragen - zo ver mogelijk kwantitatief - te kunnen beantwoorden. Aanvullend hierop zijn voor de hotspot Midden-rivieren verschillende waterverdelingsvarianten doorgerekend met behulp van Excel/Matlab (op basis van NWM-uitvoer). Om in deze hotspot uitspraken te kunnen doen voor scheepvaart, zijn waterstanden uit NWM vertaald in beschikbare vaardieptes met behulp van de tool LSM2BIVAS² (De Jong, 2017). Voor de gecombineerde hotspot IJsselmeer/Twentekanalen zijn aanvullend berekeningen uitgevoerd met de Quick Water Allocation Scan Tool (QWAST). QWAST is een snelle variant van NWM, speciaal ontwikkeld voor DPZW, waarin hydrologische processen vereenvoudigd zijn weergegeven. Op basis van watervraag uit NWM, berekent QWAST de waterverdeling in de belangrijkste netwerktakken. Zie verder 2.4.

Dit hoofdstuk beschrijft de stappen die de afgelopen jaren in verschillende projecten zijn uitgevoerd ten behoeve van kwaliteitsborging van het NWM. Onder kwaliteitsborging worden alle stappen verstaan die ervoor zorgen dat de uitvoer van het NWM-instrumentarium met vertrouwen ingezet kan worden voor het gewenste doel. We maken hierbij onderscheid naar modelvalidatie/modelverificatie (hoe goed presteert het model in vergelijking met metingen of een ander model), plausibiliteitscheck (technische controles) en toepasbaarheidstoets (de manier waarop modeluitvoer wordt geaggregeerd zodat het geschikt is om de kennisvragen die voortkomen uit het beleidsproces te beantwoorden).

Ook voor QWAST zijn stappen doorlopen ten behoeve van kwaliteitsborging. De referentieberekening van QWAST reproduceert resultaten van NWM en is daarop gevalideerd. Dit is vastgelegd in een validatiedocument (Gijsbers en Ten Velde, 2016). Sindsdien is een aantal wijzigingen doorgevoerd in de QWAST-schematisatie omdat tijdens de toepassing in de hotspotanalyse bleek dat QWAST op sommige punten verbeterd moest of kon worden. Ten behoeve van de hotspotanalyses is vervolgens een extra verificatie uitgevoerd. Hieruit bleek dat de tool toepasbaar is voor de hotspot IJsselmeer/Twentekanalen. Dit is verder beschreven in Hoofdstuk 6. Voor het vervolgproces van DPZW, waaronder de landelijke maatregelverkenning, moet QWAST verder ontwikkeld worden. De verwachting is dat met een paar wijzigingen in de software het toepassingsbereik vergroot kan worden.

2.2 NWM

2.2.1 Korte beschrijving NWM en 100-jarige reeks

Het Nationaal Water Model (NWM), de opvolger van het Deltamodel, is een permanent beleidsanalytisch instrumentarium voor Waterveiligheid, Waterverdeling en Waterkwaliteit.

² LSM2BIVAS wordt gebruikt om LSM uitvoer (waterstanden) te vertalen in BIVAS invoer (vaardieptes) die geschikt is voor vervolganalyse met BIVAS, het RWS-model voor BinnenVAart Simulatie. Vaardieptes geven een betere indicatie voor scheepvaartbeperkingen als gevolg van verminderde diepgang.

Het NWM voor waterverdeling (kortweg NWM-zoet) bestaat uit verschillende aan elkaar gekoppelde deelmodellen die bij elkaar gebracht en ontsloten zijn in het programma Delft-FEWS.

Het gaat om het Landelijk Hydrologisch Model (LHM), het Landelijk Sobek Model (LSM), het Landelijk Temperatuur Model (LTM) en het Sobek-model van het Noordelijk Deltabekken (Sobek-NDB). Zie ook <https://publicwiki.deltares.nl/display/NW/Zoetwater>.

Het **LHM** is het geïntegreerd landsdekkende grond- en oppervlaktewater model van Nederland. Het model is ontwikkeld door Rijkswaterstaat, Deltares, STOWA, PBL en Alterra en wordt beheerd door het NHI consortium. LHM is opgebouwd uit 4 gekoppelde modellen:

- MODFLOW grondwaterstroming voor de verzadigde zone;
- MetaSWAP grondwaterstroming voor de onverzadigde zone;
- MOZART waterbalansbenadering voor het regionale oppervlaktewater;
- Distributiemodel (DM) waterbalansbenadering voor het landelijke waterverdelingsnetwerk.

LSM simuleert de hydrodynamica van het oppervlaktewaterverdelingsnetwerk op dagbasis en houdt daarbij rekening met afmetingen van de watergang, bodemruwheden, peilverschillen, regelwerken, etc. (in tegenstelling tot DM dat zich richt op waterbalansen en simuleren van waterverdeling). LSM is afgesteld op een zo realistisch mogelijke simulatie van de waterstanden, en pas in tweede instantie op afvoeren. LSM uitvoer dient bovendien als invoer voor LTM en Sobek-RE-NDB. Het **LTM** maakt het mogelijk om de watertemperatuur van het oppervlaktewater van de grote Nederlandse rivieren door te rekenen. Met **SobekRE-NDB** kan de externe verzilting in de Rijn-Maasmonding worden gesimuleerd.

In 2017 zijn in opdracht van Rijkswaterstaat-WVL en Deltaprogramma Zoetwater de volgende berekeningen uitgevoerd, allemaal voor een 100-jarige reeks:

| NWM code | Situatie/scenario | beheer |
|-------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Ref2015 S1 | Huidig klimaat en landgebruik | Huidig beheer |
| Warm2050 S1 | Deltascenario Warm2050 | Huidig beheer |
| Ref2015 S2 | Huidig klimaat en landgebruik | Met DPZW fase 1 maatregelen |
| Warm2050 S2 | Deltascenario Warm 2050 | Met DPZW fase 1 maatregelen |

In de zogenaamde S2 berekeningen is aangenomen dat de maatregelen die aan het eind van Deltaprogramma Fase 1 zijn afgesproken voor 2021 zijn geïmplementeerd. Het gaat dan om de maatregelen die redelijkerwijs in het instrumentarium konden worden ingebouwd: uitbreiding van de capaciteit van de Klimaatbestendige Wateraanvoer ('KWA+'), de invoering van flexibel IJsselmeerpeil en de uitbreiding van de capaciteit van inlaat Roode Vaart. Details over hoe deze maatregelen zijn ingebouwd in NWM zijn te vinden in Snippen et al. (2016). Aanstane veranderingen in het zoetwatersysteem die niet geïmplementeerd zijn door de waterbeheerder en/of door de Deltabeslissingen, maar in gang gezet zijn door economische ontwikkelingen (zgn. systeemingrepen), zoals verdieping Nieuwe Waterweg om de haven van Rotterdam beter bereikbaar te maken, zijn om modeltechnische redenen niet in de modelschematisaties verwerkt. De hydrologische effecten van de DPZW fase 1 maatregelen evenals de effecten op landbouwschade zijn beschreven in Mens et al. (2018).

De invoerreeksen en randvoorwaarden voor de 100-jarige reeksen (Ref2015 en Warm2050) zijn gebaseerd op historische metingen uit de periode 1911-2011 en het Deltascenario Warm2050. Modelinvoer voor de huidige situatie en de vertaling hiervan in lijn met Deltascenario Warm2050 staan beschreven in Hunink et al. (2013), Kroon et al. (2015), Hunink en Hegnauer (2016), Kramer en Mens (2016) en Wesselius et al. (2017). Het gaat om klimatologische en hydrologische randvoorwaarden (zoals neerslag/verdamping, zeewaterstanden, rivierafvoeren, peilen hoofdwatersysteem, watertemperatuur), en 'socio-economische' randvoorwaarden (zoals landgebruik, verhardingsgraad, bodemdaling, onttrekkingen oppervlaktewater/grondwater en warmtelozingen). Een eerste analyse en duiding van de NWM-resultaten in het licht van de Knelpuntenanalyse en een vergelijking met de Basisprognoses 2015 is gedocumenteerd in Mens et al. (2018).

Met dezelfde NWM-uitvoer is in het kader van KPP LT Zoetwater, ten behoeve van het RWS-project WABES, ook een trendanalyse uitgevoerd. Het doel hiervan was om meer inzicht te krijgen in mogelijke trends in de invoerreeks van NWM en de gevolgen hiervan voor de (interpretatie van de) uitvoerreeks. Deze resultaten zijn van belang voor DPZW en gedocumenteerd in Kramer (2017).

Recente inzichten geven aan dat de zeespiegelstijging mogelijk versneld kan gaan optreden. Het effect hiervan op waterbeheer wordt op dit moment verkend (Haasnoot et al., in voorbereiding). In die studie wordt ook aandacht besteed aan de effecten van versnelde zeespiegelstijging op zoetwatervoorziening.

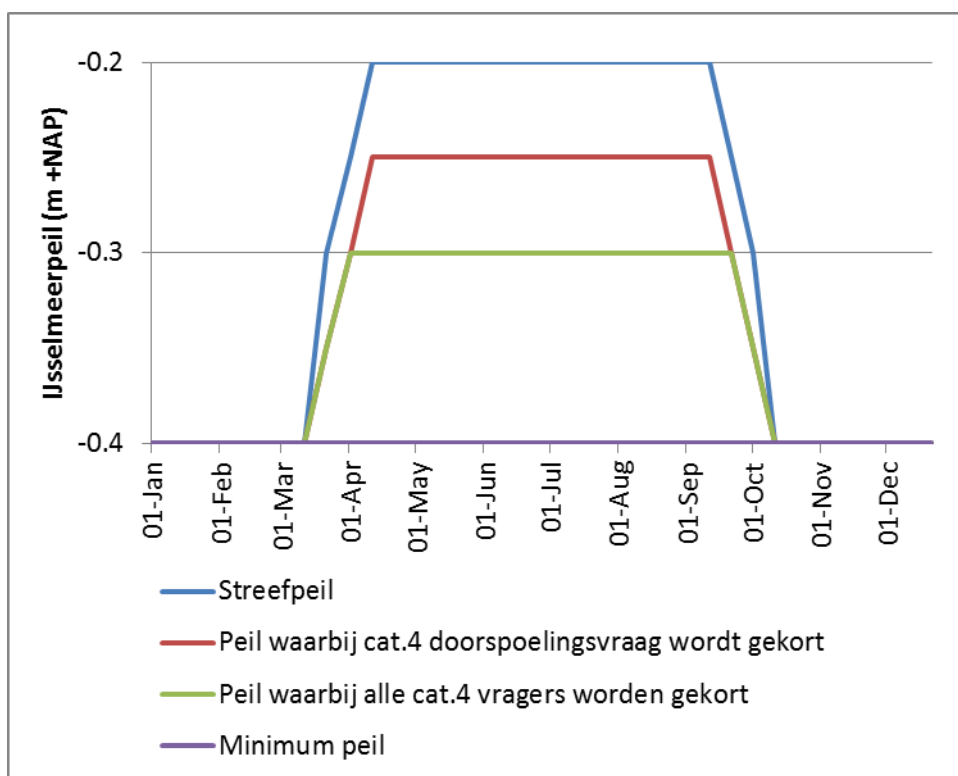
2.2.2 Uitgangspunten en belangrijke aannames ten aanzien van waterbeheersregels

Voor interpretatie van de resultaten is het belangrijk om uitgangspunten en aannames in de modellen in gedachten te houden en ook modelconcepten iets nader toe te lichten op een aantal punten.

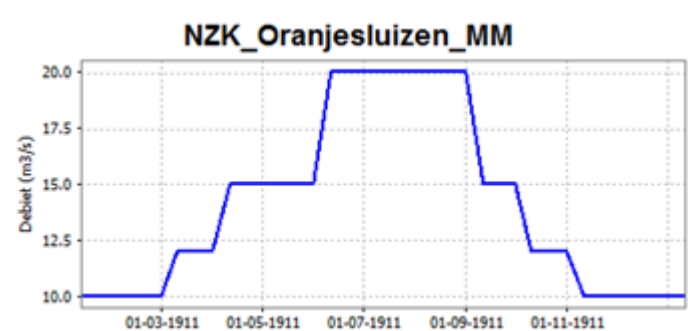
Het **huidige peilbeheer van het IJsselmeer** wordt in LHM/DM als volgt opgelegd: een zomerstreefpeil van -0.20 m NAP, een winterstreefpeil van -0.40 m NAP en prioritering volgens Figuur 2.1. Met de prioriteringsregels worden de afspraken tussen waterbeheerders over de waterverdeling tijdens zeer droge periodes en een situatie van waterschaarstenagebootst. Naarmate het IJsselmeerpeil lager wordt krijgt oppervlaktewaterpeilbeheer van het IJsselmeer/Markermeer een hogere prioriteit ten opzichte van de andere vragers (zoals doorspoelen, beregenen, industrie). Bij het minimum peil (-0.40 m NAP) wordt al het beschikbare water gebruikt om te voorkomen dat het peil verder uitzakt ten gevolge van verdamping, en worden alle andere gebruikers gekort, in de veronderstelling dat verder uitzakking de veiligheid (o.m. stabiliteit van dijken, funderingen) in gevaar brengt c.q. onomkeerbare schade oplevert. Voor meer uitleg over de modellering wordt verwezen naar Hoogewoud et al. (2014).

In het Amsterdam-Rijnkanaal wordt in LHM/DM gestuurd op een minimum debiet van 10 m³/s bij Weesp. Volgens de huidige inzichten is een hoger debiet nodig om zoutindringing vanuit het Noordzeekanaal tegen te gaan.

De doorspoelvraag van het Noordzeekanaal (via Oranjesluizen uit Markermeer) varieert in de tijd tussen 10 en 20 m³/s (Figuur 2.2). Hier zijn de recente inzichten dat er meestal minder water wordt ingelaten.



Figuur 2.1 Streefpeil IJsselmeer en vertaling verdringingsreeks in LHM/DM volgens huidig peilbeheer. Categorie 4 watervragers betreft 'overige vragers' en is de laagste prioriteit van de verdringingsreeks. Cat. 1 (onomkeerbare schade), Cat. 2 (nutsvoorziening) en Cat. 3 (kleinschalig hoogwaardig gebruik) worden gedeeltelijk gekort zodra de inlaatcapaciteit afneemt en geheel gekort zodra het minimum peil wordt bereikt.



Figuur 2.2 Watervraag (doorspoelvraag) Noordzeekanaal zoals gemodelleerd in LHM/DM

2.3 Kwaliteitsborging NWM

In deze paragraaf volgt een overzicht van de stappen die zijn uitgevoerd in het kader van de kwaliteitsborging van NWM. Het gaat specifiek om de NWM versie waarin de volgende versies van deelmodellen zijn opgenomen:

- LHM versie 3.02;
- LSM versie 1.2;
- SobekRE-NDB (NWM variant³ van de officiële SobekRE-NDB versie 1.1.0).

³ Omdat deze variant niet is opgenomen in een B&O programma, is hier geen versienr. aan gekoppeld

2.3.1 Validatie en plausibiliteit

De deelmodellen binnen NWM zijn in aparte ontwikkeltrajecten gevalideerd (met uitzondering van LTM – niet gebruikt in deze rapportage). De meest recente validatie van LHM (versie 3.0) is gerapporteerd in Hoogewoud et al. (2013). Sindsdien zijn er wel wijzigingen doorgevoerd, maar is geen volledige validatie uitgevoerd. Prinsen en Wesselius (2015) beschrijven de validatie van LSM1.3. Dit is een latere versie dan die in NWM is opgenomen, maar die inhoudelijk vrijwel niet afwijkt van LSM1.2. In dit validatiedocument wordt het volgende geconcludeerd (letterlijk overgenomen):

- Het LSM 1.3 is gedraaid voor het hydrologische jaar 2003 met laterale debieten op basis van een berekening voor de periode 1996-2006 met de meest recente versie van NHI (NHI versie 3.02 van najaar 2014). Hierbij zijn de met NHI berekende districtslozingen en –onttrekkingen in Sobek als lateraal debiet per decade opgedrukt. De rivierafvoeren en meteorologie (neerslag op en verdamping van open water) zijn in LSM wel op dagbasis opgegeven, en getijrandvoorwaarden zijn veelal op uurbasis opgegeven.
- De resultaten zijn voor droogtetoepassingen plausibel als gekeken wordt naar de hoofdkranen in de Rijkswateren en de belangrijke regionale aanvoer- en afvoerlocaties. Er zijn wel verbeterpunten in LSM geconstateerd, zoals de verdeling van de NHI districtslozingen en onttrekkingen over de laterale debietlocaties in LSM die bv. in Zuiderzeeland beter kan. Ook is al aanvullende informatie beschikbaar (zoals extra regionale modellen, of nieuwere versies van regionale modellen) die nog niet in LSM 1.3 is opgenomen.

NWM gaat in principe uit van gevalideerde deelmodellen en draagt zorg voor een betrouwbare koppeling van de modellen onderling en met een consistente set invoerdata. Binnen het NWM-project worden daarom voornamelijk technische testen uitgevoerd, om te controleren of data en modellen goed gekoppeld zijn, en de data goed door de modellentrein komt. De testen vinden plaats volgens een speciaal hiervoor ontwikkeld testprotocol. Voor details verwijzen we naar de NWM website.

2.3.2 Toepasbaarheid

De toepasbaarheid van LHM (de landelijke toepassing van NHI) voor de vorige fase van het Deltaprogramma-Zoetwater (DPZW) is destijds beoordeeld in een aparte rapportage (Marchand en De Lange, 2013), mede op basis van de hierboven aangehaalde toetsingsrapportage van Hoogewoud et al. (2013).

Marchand en De Lange (2013) concludeerden het volgende:

- De berekening van de waterverdeling binnen het landelijk hoofdwatersysteem is plausibel, ook in droge perioden;
- De variatie in de debieten in de tijd, met name tijdens de droge zomers van 2003 en 2006, wordt goed berekend
- Het instrument is adequaat voor het doorrekenen van klimaatscenario's
- Het instrument is geschikt voor het op hoofdlijnen doorrekenen van gevolgen van maatregelen.

Sindsdien is er een aantal verbeteringen van LHM doorgevoerd (zie www.nhi.nu). Er is daarom geen reden om aan te nemen dat de toepasbaarheid van LHM voor DPZW veranderd is.

2.3.3 Inhoudelijke controles in het kader van KPA

In het kader van de Knelpuntenanalyse is de voor dit project relevante NWM-uitvoer vergeleken met de NWM-berekeningen die in 2016 zijn uitgevoerd aan de hand van de 26-jarige reeks (1981-2006), beter bekend als Basisprognoses 2016 (Snippen et al., 2016). De vergelijking wordt beschreven in Mens et al. (2018). Hieruit bleek dat de geconstateerde verschillen gering zijn (maximaal 3 procent) en te verklaren zijn door verschillen in initiële condities en verschillen in de gebruikte meteo en chloride randvoorwaarden. De verschillende initiële condities kunnen vooral op de hoge zandgronden enkele jaren doorwerken.

Binnen een aantal hotspotanalyses zijn de modeluitkomsten nader gevalideerd (met metingen) of geverifieerd. Het gaat om validatie van SobekRE-NDB binnen de hotspotanalyse Rijn-Maasmonding (H4) en verificatie van LSM-light binnen de hotspotanalyse Midden-rivieren (H3). Dit wordt in de betreffende hoofdstukken verder toegelicht.

2.3.4 Inhoudelijke controles in het kader van Wabes

In het kader van het WABES-project, dat gebruik maakt van dezelfde NWM-resultaten, zijn in 2016 en 2017 de resultaten van de statistische nabewerking en de onderliggende NWM resultaten gedeeld met de gebruikers bij de zogenaamde regioessies. Aan de gebruikers is de vraag gesteld of de gegeven informatie, zoals de duurlijnen, een nuttig, plausibel beeld geven en of de informatie te verklaren is aan hand van de kennis over het (water)beheer. De gebruikers hebben hun bevindingen en vragen teruggekoppeld met Rijkswaterstaat. Dit heeft zowel geleid tot het afvallen van (parameters op) locaties als tot de wens naar informatie voor nieuwe locaties.

De invoerbestanden van de statistische nabewerkingstool ('Wabestool') zijn volledig doorlopen op niet-reële uitkomsten, zoals niet geloofwaardige hoge watertemperaturen, extreme, onrealistische (variaties, trends, sprongen in) waterstanden en debieten. Zie verder Korving en Versteeg (2018). De resultaten van de statistische nabewerkingstool zijn steekproefsgewijs in detail doorlopen.

De modelinvoer van het NWM (randvoorwaarden rivierafvoer en zeewaterstand) is eerst visueel gecontroleerd en daarna zijn met behulp van een eenvoudige waterbalans de aanvoeren naar de regio's gecontroleerd. Over het algemeen laten de controles zien dat de resultaten van het NWM realistisch zijn, met uitzondering van de regionale aanvoeren. Ondanks de geconstateerde afwijkingen zijn deze regionale locaties wel opgenomen in de resultaten op de Wabes-website. In de eerstvolgende update van de Wabestool en Wabeswebsite zal hier aandacht aan worden besteed.

2.4 QWAST

2.4.1 Korte introductie QWAST

De Quick Water Allocation Scanning Tool (QWAST) is een snel rekenend waterverdelingsinstrument van het hoofdwatersysteem in Nederland dat gevoed wordt met dezelfde randvoorwaarden als het National Water Model en de door dit model berekende watervragen.

QWAST is in 2016 door Deltares ontwikkeld op basis van RTC-Tools (softwarepakket voor het maken van waterverdelingsmodellen) en Delft-FEWS (softwarepakket voor het maken van een gebruikersschil voor gegevensbeheer, voor- en nabewerking en visualisatie).

In 2017 is dit instrument verder ontwikkeld en gevalideerd met het oog op toepassing in de Knelpuntenanalyse voor het Deltaprogramma Zoetwater.

QWAST heeft in dit project als doel om snel en verkennend inzicht te geven in de bovenregionale waterhuishoudkundige gevolgen van mogelijk te nemen (combinaties van) waterhuishoudkundige maatregelen onder verschillende scenario's (d.w.z. klimaat- en socio-economische ontwikkelingen). De QWAST maakt het mogelijk om knelpunten en potentiële knelpunten te scannen om zo kansrijke maatregelen te trechteren. De kansrijke maatregelen komen daarna in aanmerking voor het in meer detail doorrekenen met het complexe Nationaal Water Model (NWM).

2.4.2 QWAST-validatie

Op basis van de QWAST-validatie die in 2017 is uitgevoerd is het volgende geconcludeerd (Gijsbers en Ten Velden, 2017):

- QWAST is geschikt voor de ondersteuning van beleidsanalyse en bovenregionale afwegingen, als verkennend modelinstrument (voor bijv. trechtering van potentiële maatregelen) voor Deltaprogramma Zoetwater.
- QWAST berekent vergelijkbare responses en trends als het Landelijk Hydrologisch Model, waarbij de resultaten m.b.t. waterparameters zoals waterstanden en debieten over het algemeen iets sterker fluctueren dan het LHM.
- In absolute termen treden regelmatig significante afwijkingen van enkele kubieke meters op tussen QWAST en LHM. Deze afwijkingen vormen in de huidige fase van het beleidsproces (verkennend, trechtering van potentiële naar kansrijke maatregelen) nog geen probleem, maar voor de vervolgfase wordt aangeraden om de aanbevelingen uit hoofdstuk 5 van het validatiedocument te implementeren om het modelgedrag te verbeteren.
- Ook met deze modelverbeteringen moet niet verwacht worden dat de absolute uitkomsten van QWAST (debieten en waterstanden) een detailniveau en betrouwbaarheid hebben die rechtstreekse doorvertaling naar welvaarteffecten rechtvaardigt. Inzet van NWM blijft hiervoor noodzakelijk.
- QWAST kan ingezet worden om een waterhuishoudkundige afweging te maken, maar vertaling naar NWM kan voor regio's met meerdere aanvoerroutes resulteren in een andere waterverdeling met debietsverschillen van enkele m³/s.
- QWAST is niet bedoeld voor dimensionering van maatregelen met het oog op ontwerp.

2.5 Literatuur

De Jong, J.S. (2017). Effectmodule Droogte-Scheepvaart - Resultaten 2017. Deltares memo 11200558-013-ZWS-0001

Hoogewoud et al. (2014) Veranderingsrapportage NHI 3.02. Beschrijving van de veranderingen in NHI 3.02. Deltares rapport 1209264-002.

Hunink, J.C., A. Veldhuizen, G. Prinsen, J. Oosterwijk, G. Oude Essink (2013) Deltascenario's 2012: NHI modelinvoer, technische achtergrond rapportage. Deltares rapport 12053-000-BGS-0003.

Hunink, J., Hegnauer, M. (2016) Update Deltascenario's Nationaal Water Model. Deltares rapport 1220056-000-ZWS-0015.

Korving, J.L. en R.P. Versteeg (2018) Uitwerking methodiek waterbeschikbaarheid hoofdwatersysteem fase 2: Eindrapport statistische nabewerkingstool. Witteveen+Bos/HKV rapport RW1929-249/18-000.298.

Kramer (2017) KPP - Lange termijn Zoetwatervoorziening: Analyse 100-jarige reeks. Deltares rapport 11200590-000.

Kramer en Mens (2016) Methode voor het afleiden van een 100-jarige toekomstige afvoerreeks voor Lobith en Monsin. Deltares memo 1230078-000-BGS-0001.

Kroon, T., G. Prinsen, J. Hunink, M. Visser en H. van den Boogaard (2015) 100 Jaar reeks LHM en LSM; beschrijving van de invoer. Deltares rapport 1220108-000-BGS-0005.

Mens, M., G. Prinsen, J. Hunink, D. Bachmann, E. Snippen, J. Delsman (2018) Knelpuntenanalyse voor het Deltaprogramma Zoetwater 2017: analyse van de 100-jarige NWM-reeks. Deltares rapport 11202240-000-ZWS-0001.

Wesselius, CM., Boderie, P., Kramer, N. (2017) Deltascenario's: de randvoorwaarden voor de 100-jarige reeks. Deltares rapport 11200554-000-ZWS-0011

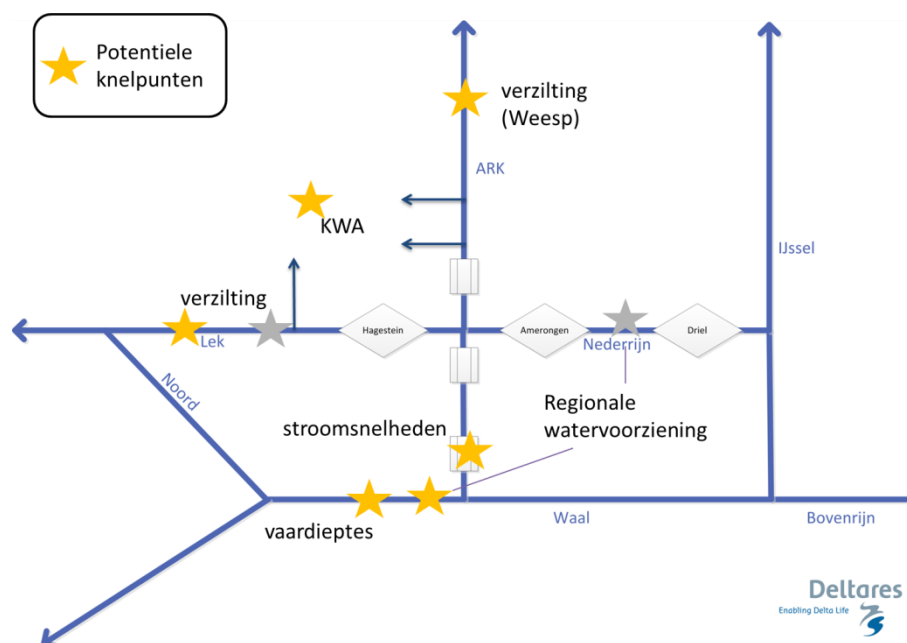
3 Hotspot Midden-rivieren

3.1 Afbakening gebied en hotspotvragen

Deze hotspotanalyse richt zich op het kruispunt van Waal, Nederrijn, Lek, Amsterdam-Rijnkanaal (ARK)-Betuwepand. Er is behoefte aan meer inzicht in de waterverdeling (varianten) van het midden-rivierengebied en de gevolgen voor de gebruiksfuncties: drinkwater op de Lek en het ARK-Noordpand, scheepvaart op de Waal en de regionale watervoorziening vanuit ARK-Betuwepand, Nederrijn pand Amerongen-Driel en pand Hagestein-Amerongen.

Het gaat om een potentiële afweging tussen (zie ook Figuur 3.1):

- Meer water aflaten bij Hagestein ten behoeve van het tegengaan van het risico op verzilting van de Lek, ten gunste van drinkwaterinnamepunten en regionale innamepunten langs de Lek;
- Meer water aflaten bij de Irenesluizen ten behoeve van tegengaan van het risico op verzilting van de overgang Amsterdam-Rijnkanaal naar Noordzeekanaal (ARK-NZK) en het functioneren van de selectieve onttrekking (zie Hoofdstuk 5) bij de nieuwe zeesluis IJmuiden, ten gunste van drinkwater- en industriewaterinnamepunten en regionale innamepunten;
- Behouden van voldoende vaardiepte op de Waal voor de scheepvaart op de route Europoort-Ruhrgebied;
- Behouden van voldoende afvoer over de Waal om zoutindringing in de Rijn-Maasmonding te beperken (zie hotspot RMM) en vaardiepte beperkingen op de Waal te voorkomen;
- Voorzien in de regionale watervraag vanuit stuwpanden Amerongen-Driel; Hagestein-Amerongen en ARK-Betuwepand.



Figuur 3.1 Schematisatie van het hotspotgebied met indicatie van locatie en aard van potentiële knelpunten. De grijze sterren zijn niet in deze hotspotanalyse behandeld.

3.2 Aanpak en indicatoren

3.2.1 Waterbalansanalyse

De analyse richt zich op de waterbalans van het midden-rivierengebied tijdens droge perioden, waarin het ARK-Betuwepand in open verbinding staat met de Waal doordat de Bernhardsluizen in die situatie open staan. De hoofdvraag is hoe de waterbalans beïnvloed wordt als de knelpunten op de Lek en op het ARK-Noordpand voorkomen worden door een minimum zoetwaterdebiet te garanderen. Enerzijds is berekend hoeveel water er extra nodig is uit de Waal (via het ARK-Betuwepand) om aan deze extra vragen te voldoen. Anderzijds zijn de gevolgen voor scheepvaart en regionale inlaten gekwantificeerd. Bij scheepvaart gaat het om de langere duur van onderschrijven van vaardieptes op de Waal, en om grotere stroomsnelheden door de Prins Bernhardsluizen als gevolg van de vergrote debieten door het ARK-Betuwepand.

De analyses zijn gebaseerd op de 100-jarige NWM-reeks (zie Hoofdstuk 2). Voor de waterbalans-analyse gaat het specifiek om uitvoer van het DistributieModel (DM) van de 'S2-run' (dus: met de aanname dat de maatregelen DPZW-fase1 zijn geïmplementeerd in het watersysteem). Dit waterbalansmodel rekent met een tijdstap van decades (~ 10 dagen). In het DM (S2) is verder het huidige beheer opgenomen, inclusief de onttrekkingen bij de regionale inlaten. Vanaf nu wordt deze referentiesom 'HB2015' (Huidig Beheer 2015) genoemd. De regionale onttrekkingen worden in NWM dynamisch berekend op basis van onder andere neerslag, verdamping en landgebruik.

Voor het doorrekenen van enkele varianten zijn de resultaten voor HB2015 ingeladen in Excel. Hierbij is gebruik gemaakt van de modeltakken in het DM zoals weergegeven in Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Balanstermen van hotspot Midden-rivieren die in Excel zijn overgenomen. Vetgedrukt is aangegeven hoe in de tekst naar de locaties wordt verwezen.

| IN/UIT | Beschrijving | DM-tak |
|--------|---|--------|
| IN | Nederrijn thv Amerongen | 6004 |
| IN | ARK-Betuwapand thv Pr. Bernhardsluizen | 6105 |
| UIT | Lek thv Hagestein | 6009 |
| UIT | ARK-Noordpand thv Weesp | 6016 |

In Excel zijn diverse varianten doorgerekend waarbij ten opzichte van het HB2015 een verhoging plaatsvindt van afvoer bij:

- Hagestein: ten behoeve van tegengaan risico verzilting van de Lek, ten gunste van drinkwaterinnamepunten en regionale innamepunten langs de Lek;
- Weesp: ten behoeve van tegengaan van het risico op verzilting van de overgang Amsterdam-Rijnkanaal – Noordzeekanaal (ARK-NZK) en het functioneren selectieve onttrekking (SO) bij de nieuwe zeesluis IJmuiden, ten gunste van drinkwater- en industriewaterinnamepunten en regionale innamepunten.

De varianten staan weergegeven in Tabel 3.2. Hierbij gelden de volgende aannamen:

- De benodigde extra afvoer voor ARK-Noordpand en/of Lek wordt aangevoerd via ARK-Betuwapand;
- De inzet van de Klimaatbestendige Wateraanvoer (KWA+; 15 m³/s) is niet aangepast ten opzichte van HB2015 (maar verschilt wel tussen Ref2015 – huidig klimaat- en Deltascenario Warm2050);
- De regionale inlaathoeveelheden zijn niet aangepast;
- De genoemde minimum debieten gelden enkel in het zomerhalfjaar;
- Een eventueel watertekort op de Nederrijn bovenstreams van Amerongen wordt niet beschouwd.

Tabel 3.2 Varianten van het minimale debiet bij de modelranden. HB2015 (Huidig Beheer 2015) is de referentie en komt overeen met NWM-som S2. H25mW25 gaat uit van 25 m³/s bij de monding van Lek, terwijl H25W25 uitgaat van 25 m³/s bij Hagestein.

| Minimale debiet | Variant ID | | | | |
|-------------------------|------------|-------|--------|----------|--------|
| | HB2015 | H0W25 | H25W25 | H25mW25 | H50W25 |
| Hagestein [m3/s] | 0 | 0 | 25 | 25mondig | 50 |
| Weesp [m3/s] | 10 | 25 | 25 | 25 | 25 |

3.2.2 Analyse met Landelijk Sobek Model

In het DM wordt de afvoerverdeling berekend, maar is het niet mogelijk om uitvoer te genereren van de waterstanden. Daarom is voor de analyse van waterstanden (relevant voor scheepvaart) gebruik gemaakt van het Landelijk SOBEK Model (LSM). Deze uitvoer is vervolgens gebruikt voor het afleiden van QH-relaties, het berekenen van vaardiepten op de Waal en het analyseren van waterstand bij regionale inlaten. Deze bevat daarnaast ook een hogere temporele resolutie door gebruik te maken van dag-basis ten opzichte van de decade-basis van het DM.

In het LSM wordt de waterverdeling bepaald door een combinatie van regels bij kunstwerken en door hydraulica. Hierbij wordt de waterverdeling die in DM berekend wordt zoveel mogelijk benaderd.

Er kunnen echter verschillen in de waterverdeling optreden tussen het DM en LSM, omdat bijvoorbeeld streefwaarden van stuwpeilen anders niet gehandhaafd kunnen worden. Er is geen analyse uitgevoerd om deze verschillen tussen de modellen te kwantificeren. Wel is eerder al een validatie op metingen (waterstand en afvoer) uitgevoerd voor het LSM (Prinsen en Wesselius, 2015).

Er is gebruik gemaakt van de NWM-sommen REF2015S1 en W2050S1. Dit betekent dat in de resultaten de maatregel uitbreiding capaciteit KWA (KWA+) niet is meegenomen (in tegenstelling tot de waterbalansanalyse in de vorige paragraaf). De invloed hiervan op de conclusies is naar verwachting heel klein, omdat naar het onderlinge effect tussen de varianten is gekeken.

De waterdieptes die berekend worden door het LSM worden vertaald naar vaardieptes met de tool LSM2BIVAS. In deze tool is meegenomen dat niet de gehele waterdiepte in de 1D-modellering gebruikt kan worden voor de scheepvaart. Op basis van de dwarsprofielen in het LSM wordt de benodigde correctie (in meters) bepaald; op die manier wordt de beschikbare vaardiepte afgeleid.

3.2.3 Drempelwaarden voor scheepvaart en regionale inlaten

Door de onttrekking van water door het ARK-Betuwapand aan de Waal zijn er nadelige gevolgen voor de scheepvaart en inlaten. De volgende componenten worden bekeken:

- Beperkingen voor de scheepvaart door hoge stroomsnelheden in het ARK-Betuwapand;
- Beperkingen voor de scheepvaart door lagere waterstanden bij St. Andries;
- Beperkingen door het droogvallen van regionale inlaten.

Beperkingen voor de scheepvaart door hoge stroomsnelheden in het ARK-Betuwapand

Wanneer de afvoer in het ARK-Betuwapand toeneemt, kunnen de stroomsnelheden te hoog worden waardoor het voor scheepvaart gevaarlijk wordt om de Prins Bernhardsluizen te passeren. Op basis van de resultaten uit de waterbalansanalyse wordt een inschatting gemaakt hoe vaak verschillende afvoeren voorkomen. Dit wordt gecombineerd met de resultaten uit ARCADIS (2017), waarin is gekeken naar de consequenties van deze afvoeren voor de scheepvaart.

ARCADIS (2017) concludeert het volgende wanneer beide kolken van de Bernhardsluizen geopend zijn:

- 1 Bij 25 m³/s aanvoer door ARK-Betuwapand is er voor het grootste deel van het scheepvaartverkeer geen sprake van een knelpunt. Mogelijk dat de grootste categorie beladen schepen niet meer stroomopwaarts (van zuid naar noord) kunnen passeren.
- 2 Bij 50 m³/s aanvoer is er voor een deel van het scheepvaartverkeer sprake van een knelpunt. De grootste beladen schepen kunnen niet meer stroomopwaarts passeren.
- 3 Bij 75 m³/s kunnen de grootste schepen alleen leeg passeren. Voor de grootste lege schepen wordt passeren moeilijk in combinatie met lage afvoer bij Lobith (600 - 800 m³/s). Wellicht kunnen ook bij het stroomafwaarts passeren knelpunten ontstaan doordat de netto vaarsnelheid hoog wordt.
- 4 Bij 100 m³/s kunnen ook cat. Vb schepen alleen nog gebruik maken van de grotere oostelijke sluis als dit samenvalt met een lage afvoer bij Lobith (600 – 800 m³/s). Ook bij het stroomafwaarts passeren kunnen knelpunten ontstaan doordat de netto vaarsnelheid hoog wordt.

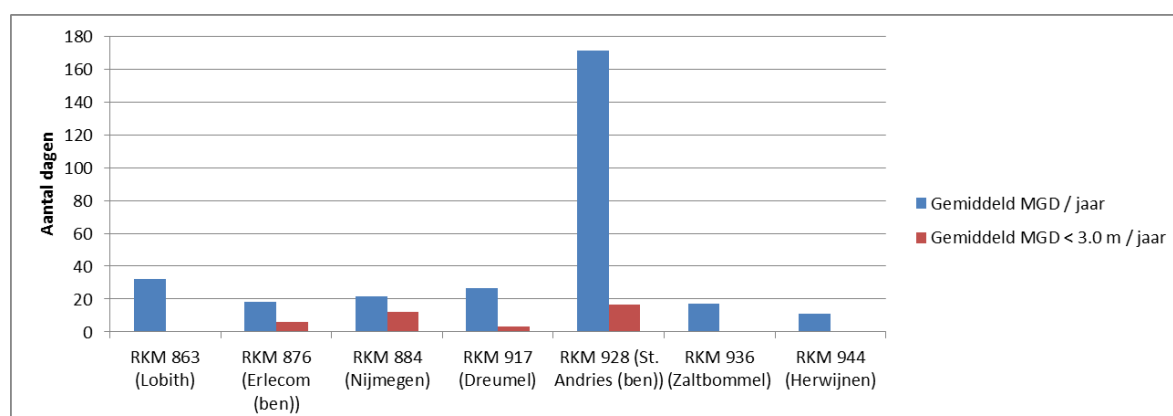
Uit gesprekken met de scheepvaartsector (Regioronde najaar 2017) bleek dat de grootste schepen (die mogelijk bij 25 m³/s in de problemen zouden komen) niet over de route ARK varen. In de analyse is daarom een kritische grenswaarde van 50 m³/s aangehouden als aanvoer waarbij voor het eerst problemen gaan optreden, en 75 m³/s als grenswaarde waarbij grotere hinder voor de scheepvaart optreedt.

Beperkingen voor de scheepvaart door lagere waterstanden bij St. Andries

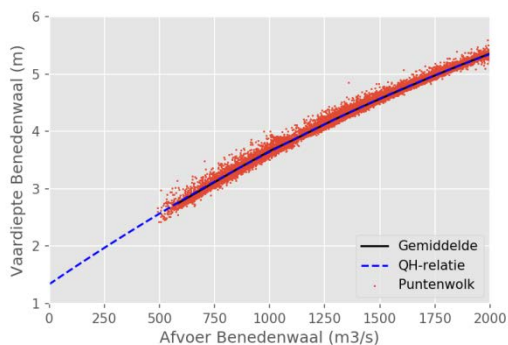
De extra afvoer over het ARK-Betuwapand in de varianten zorgt voor een afname van de Waalafvoer benedenstrooms van Tiel. In de uitgave van de Minst Gepeilde Diepte door Rijkswaterstaat is regelmatig het punt St. Andries maatgevend voor de vaardieptebeperking op de Waal (zie Figuur 3.2, naar Havinga 2011). Deze beperking zal verder toenemen wanneer er extra afvoer onttrokken wordt aan de Waal.

In de uitvoer van het LSM kan op dagbasis de afvoer bij Weesp en Hagestein bepaald worden. Deze resultaten zijn gebruikt om de benodigde hoeveelheid extra onttrekking te bepalen voor de varianten beschreven in Tabel 3.2 (H25mW25 is in de LSM analyse niet meegenomen, omdat dit teveel detail vraagt). Er wordt aangenomen dat deze extra onttrekking volledig zal plaats vinden vanuit het ARK-Betuwapand. De totale afvoer door het Betuwapand is dan gelijk aan de extra onttrekking plus de gemodelleerde afvoer in de referentiesituatie.

Op basis van de grootte van de extra onttrekking door het ARK-Betuwapand kan een schatting worden gemaakt van de mate waarin de vaardiepte daalt indien de afvoer bij Weesp en Hagestein zou worden gehandhaafd volgens de varianten. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een QH-relatie op basis van de NWM-resultaten, waarbij een correctie is aangebracht om de waterstand om te rekenen naar een vaardiepte. Deze QH-relatie is weergegeven in Figuur 3.3. Voor een afvoer van 1000 m³/s geeft dit een helling van 2,1 mm/(m³/s). Dit komt bij een extra onttrekking van 25 m³/s neer op 5,2 cm. Ook in ARCADIS (2017) is een vergelijkbare waterstandsdeling berekend bij St. Andries.



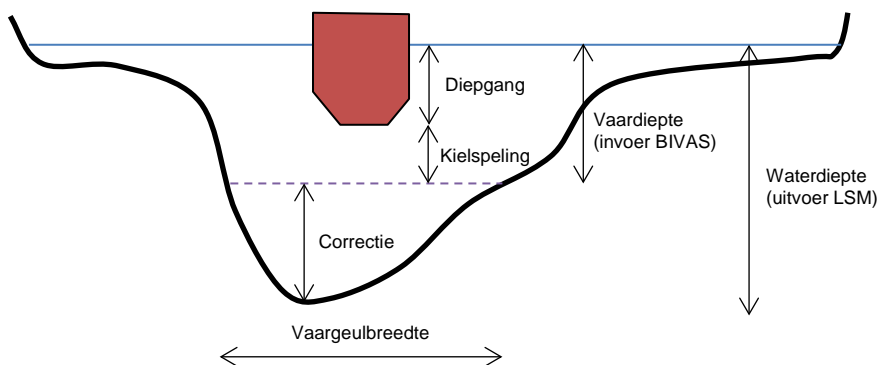
Figuur 3.2 Aantal dagen MGD per jaar voor verschillende locaties op de Waal



Figuur 3.3 QH-relatie Benedenwaal (St. Andries). De curvefit heeft de formule $H = 1.34 + 2.61E-3 * Q + 3.03E-7 * Q^2$

In deze analyse kijken we naar vaardiepte van schepen. Dit bestaat uit de diepgang en de kielspeling. De diepgang is afhankelijk van de scheepsklasse en de hoeveelheid lading en kan dus verminderd worden in droge perioden. Voor de kielspeling wordt vaak een minimale waarde van 25% van de diepgang genomen. Dit betekent dat een vaardiepte van 3,0 meter overeenkomt met een maximale mogelijke diepgang van 2,4 meter.

In deze studie hebben we ervoor gekozen geen harde eis te zetten aan de vaardiepte, maar de veranderingen voor een aantal niveaus te bekijken: 2,5; 3,0; 3,5; 4,0 en 4,5 m. Hiermee wordt het volledige bereik van “grote problemen voor de scheepvaart” tot “geen problemen voor de scheepvaart” meegenomen.



Figuur 3.4 Een dwarsdoorsnede van een rivier met hierin de definitie van vaardiepte (waterdiepte - correctie) en diepgang (vaardiepte - kielspeling)

Droogvallen van regionale inlaten

Tijdens lage afvoerperiodes kan het gebeuren dat waterstanden bij regionale inlaten dalen. Als de waterstand te ver daalt, is het niet meer mogelijk om onder vrij verval water in te nemen bij de inlaten (het zogenaamd droogvallen van de inlaat). Bij sommige inlaten is er een pomp geïnstalleerd. Tabel 3.3 geeft een overzicht van inlaatpunten binnen het interessegebied van deze hotspot (langs de Nederrijn, ARK-Betuwapand en Waal) met een indicatie van de gewenste maximale onttrekking en de kritische drempelwaarde.

Volgens Witteveen+Bos (2016) en ARCADIS (2017) worden Inlaat Prins Bernardsluis, Gemaal Drielandenpunt en Inlaat Tiel als meest beperkend ervaren. In deze hotspotanalyse is gekeken naar de inlaat bij Tiel. Dit punt wordt naar verwachting het meest beïnvloed in de beschouwde varianten als gevolg van de extra afvoer door het Betuwepand. Op basis van de 100-jarige reeks van waterstanden bij Tiel, berekend met LSM, is geanalyseerd wat de kans is op droogvallen van de inlaat bij Tiel in huidige en toekomstige omstandigheden. Uit deze reeks is de frequentie van de onderschrijding van de drempelwaarde geanalyseerd op dagbasis.

Tabel 3.3 Overzicht van inlaten in het interessegebied.

| Naam | Onttrekt uit | Onttrekking (m ³ /s) | Drempelwaarde (m+NAP) |
|---------------------------|----------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| Grebbesluis | Nederrijn (Pand Amerongen) | 3 | 2.5 |
| Mr. G.J.H. Kuykgemaal | Nederrijn (Pand Amerongen) | 1.5 | 3.4 |
| Bonte Morgen | Nederrijn (Pand Amerongen) | Met Grebbesluis | 5.8 |
| Inlaat Kromme Rijn | Nederrijn (Pand Hagestein) | 10 | 1.5 – 2.3 |
| H.A. van Beuningengemaal | Betuwepand | 5 (toekomst 12) | -0.6 |
| Gemaal Drielandenpunt | Betuwepand | 0.06 | 1.2 |
| Inlaat Prins Bernardsluis | Betuwepand | 0.5 | 2.32 |
| Inlaat Tiel | Waal | 0.2 | 1.92 |

3.3 Resultaten

3.3.1 Analyse scheepvaart Betuwepand (Bernardsluizen)

Op basis van de resultaten van het DM (deelmodel van NWM) zijn een aantal varianten doorgerekend in Excel (zie 3.2.1). Hierbij is gekeken hoe vaak afvoeren door het Betuwepand worden overschreden als maat voor de problemen die dit oplevert voor de scheepvaart. De resultaten zijn samengevat in Tabel 3.4.

Uit de tabel blijkt het volgende (zie ook kleurarcering in de tabel):

- [lichtgroen] In de huidige situatie treden zelden beperkingen op voor de scheepvaart ten gevolge van te hoge stroomsnelheden om veilig te kunnen passeren. Er is ruimte om de minimum afvoer bij Weesp te verhogen naar 25 m³/s. Ook bij sterke klimaatverandering is deze ruimte er nog.
- [donkergroen] Als een minimum afvoer van 25 m³/s bij Weesp wordt gecombineerd met een minimum afvoer van 25 m³/s over Hagestein (H25W25), leidt dit eens in de 25 jaar mogelijk tot lichte problemen (>50 m³/s door het Betuwepand). Met sterke klimaatverandering wordt deze frequentie eens in de 15 jaar.
- [oranje] Als 25 m³/s in de monding van de Lek wordt aangehouden (H25mW25) is de inschatting dat dit eens in de 10 jaar (huidig klimaat) of eens in de 6 jaar (Warm2050) tot lichte problemen leidt. Grote problemen, als gevolg van een afvoer > 75 m³/s, treden zelden op.
- [rood] Bij een minimum debiet van 50 m³/s over Hagestein én 25 m³/s bij Weesp zullen zeer regelmatig lichte problemen ontstaan: eens in de 1 a 2 jaar (huidig klimaat) tot bijna jaarlijks (Warm2050). Grote problemen treden eens in de 25 jaar (huidig klimaat) tot eens in de 15 jaar (Warm2050) op.

Het is nog niet bekend hoeveel afvoer er nodig is om de Lek zoet te houden. Er vanuit gaande dat dit tussen variant H25W25 en variant H25mW25 in zit, geeft deze verkennende analyse aan dat in de toekomst (volgens Warm2050) eens in de 6 a 15 jaar grote afvoeren door het Betuwepand gaan die een probleem vormen voor een deel van het scheepvaartverkeer.

Tabel 3.4 Aantal jaren waarin een afvoer door Betuwepand van 50 m³/s en 75 m³/s zou worden overschreden bij toepassing van varianten met een minimaal debiet bij Hagestein en Weesp (zie Tabel 3.2). Gemiddelde duur is het aantal decaden van overschrijding, gemiddeld over de 100 beschouwde jaren waarin overschrijding plaatsvond (de overschrijdingsduur is niet per se aaneengesloten).
 Kleurcodering: lichtgroen = vrijwel nooit, donkergroen = zo nu en dan (1:25 jaar), oranje = regelmatig (1:5 – 1:25 jaar), rood = zeer regelmatig (<1:5 jaar)

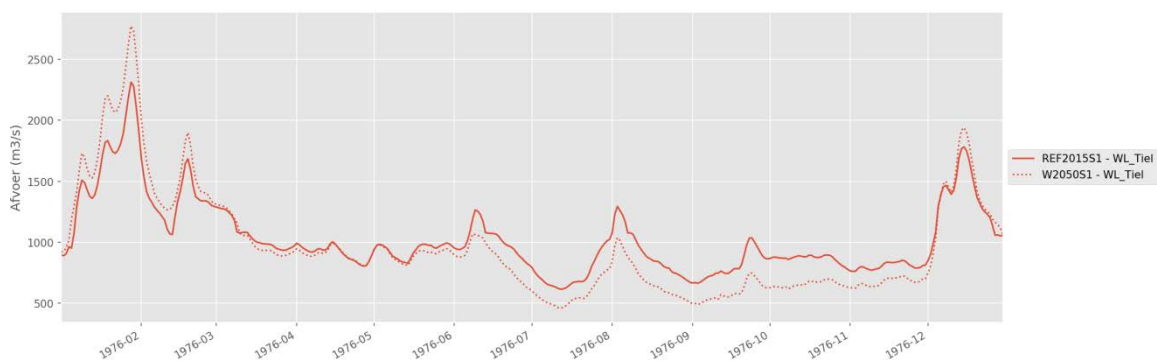
| Betuwepand >50 m ³ /s zomerhalfjaar | | | | | | | | | | |
|---|---------|-------|--------|---------|--------|----------|-------|--------|---------|--------|
| | REF2015 | | | | | WARM2050 | | | | |
| | HB2015 | H0W25 | H25W25 | H25mW25 | H50W25 | HB2015 | H0W25 | H25W25 | H25mW25 | H50W25 |
| aantal jaar in 100-jarige reeks | 0 | 1 | 4 | 9 | 63 | 0 | 1 | 7 | 17 | 85 |
| gemiddelde duur [decaden]* | 0 | 1 | 1 | 4 | 4 | 0 | 1 | 2 | 3 | 5 |
| *in de jaren waarin overschrijding plaatsvindt | | | | | | | | | | |
| Betuwepand >75 m ³ /s in zomerhalfjaar | | | | | | | | | | |
| | REF2015 | | | | | WARM2050 | | | | |
| | HB2015 | H0W25 | H25W25 | H25mW25 | H50W25 | HB2015 | H0W25 | H25W25 | H25mW25 | H50W25 |
| aantal jaar in 100jaar reeks | 0 | 0 | 0 | 1 | 4 | 0 | 0 | 0 | 1 | 7 |
| gemiddelde duur [decaden]* | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 |
| *in de jaren waarin overschrijding plaatsvindt | | | | | | | | | | |
| Toelichting varianten | | | | | | | | | | |
| Streefdebiet/capaciteit | HB2015 | H0W25 | H25W25 | H25mW25 | H50W25 | | | | | |
| Hagestein [m ³ /s] | 0 | 0 | 25 | 25mond | 50 | | | | | |
| Weesp [m ³ /s] | 10 | 25 | 25 | 25 | 25 | | | | | |
| KWA [m ³ /s] | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | | | | | |

3.3.2 Scheepvaart op de Waal

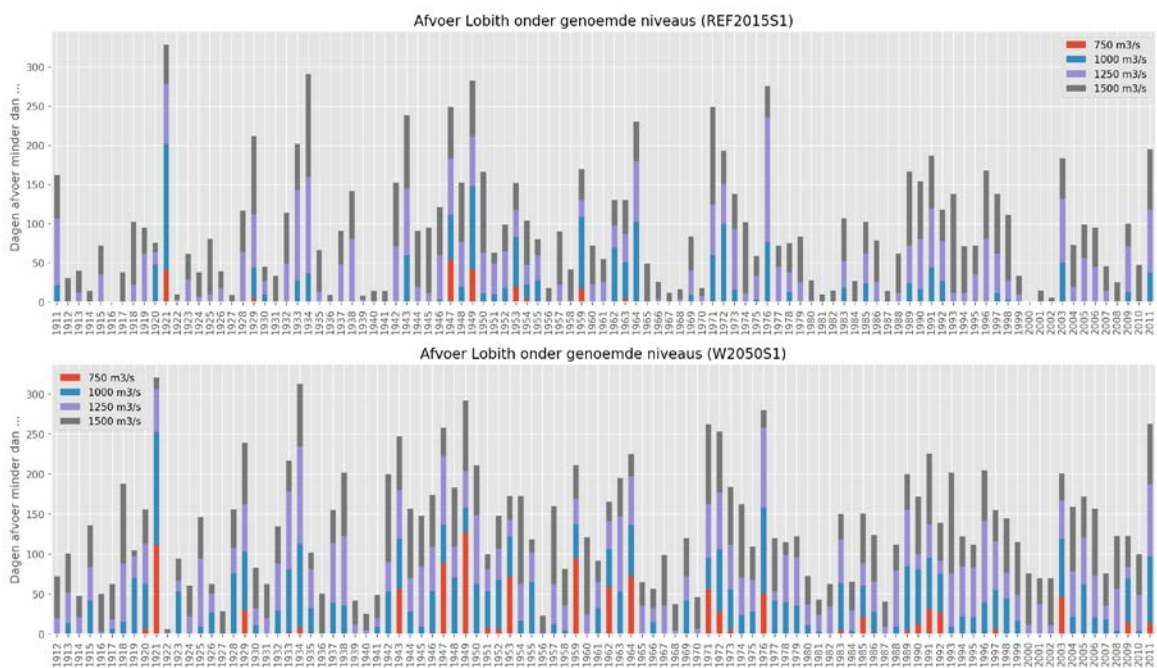
Als gevolg van klimaatverandering (scenario Warm2050) zullen lage afvoeren lager worden en de hoge afvoeren hoger. Voor het extreem droge jaar 1976 is het effect hiervan op de Waalafvoer weergegeven in Figuur 3.5. Voor een eerste inschatting van het effect van klimaatverandering geven Figuur 3.6 en Figuur 3.7 de toename in frequentie en duur van lage afvoer bij Lobith. Hieruit is af te lezen dat lage afvoeren (Q<1000 m³/s), die in het huidige klimaat al grofweg eens in de twee jaar voorkomen, gemiddeld een maand langer aanhouden onder Warm2050 (NB. dit is niet per definitie een aaneengesloten periode). Bij T=10 jaar neemt de duur toe van 60 naar ruim 100 dagen per jaar. Extreem lage afvoeren (Q<750 m³/s) komen nu nog amper voor, maar onder Warm2050 grofweg eens in de 4 jaar.

Voor scheepvaart zijn met Duitsland afspraken gemaakt over een minimale vaardiepte middels de Overeengekomen Lage Rijnaafvoer (OLA). OLA is gedefinieerd als de minimale afvoer die gemiddeld 95% van de tijd overschreden wordt. Bij deze afvoer wordt een vaardiepte op de Waal van 2.80 m gegarandeerd door Rijkswaterstaat. Momenteel is de OLA vastgesteld op 1020 m³/s. Er worden baggerwerkzaamheden uitgevoerd om de vaarweg op diepte te houden.

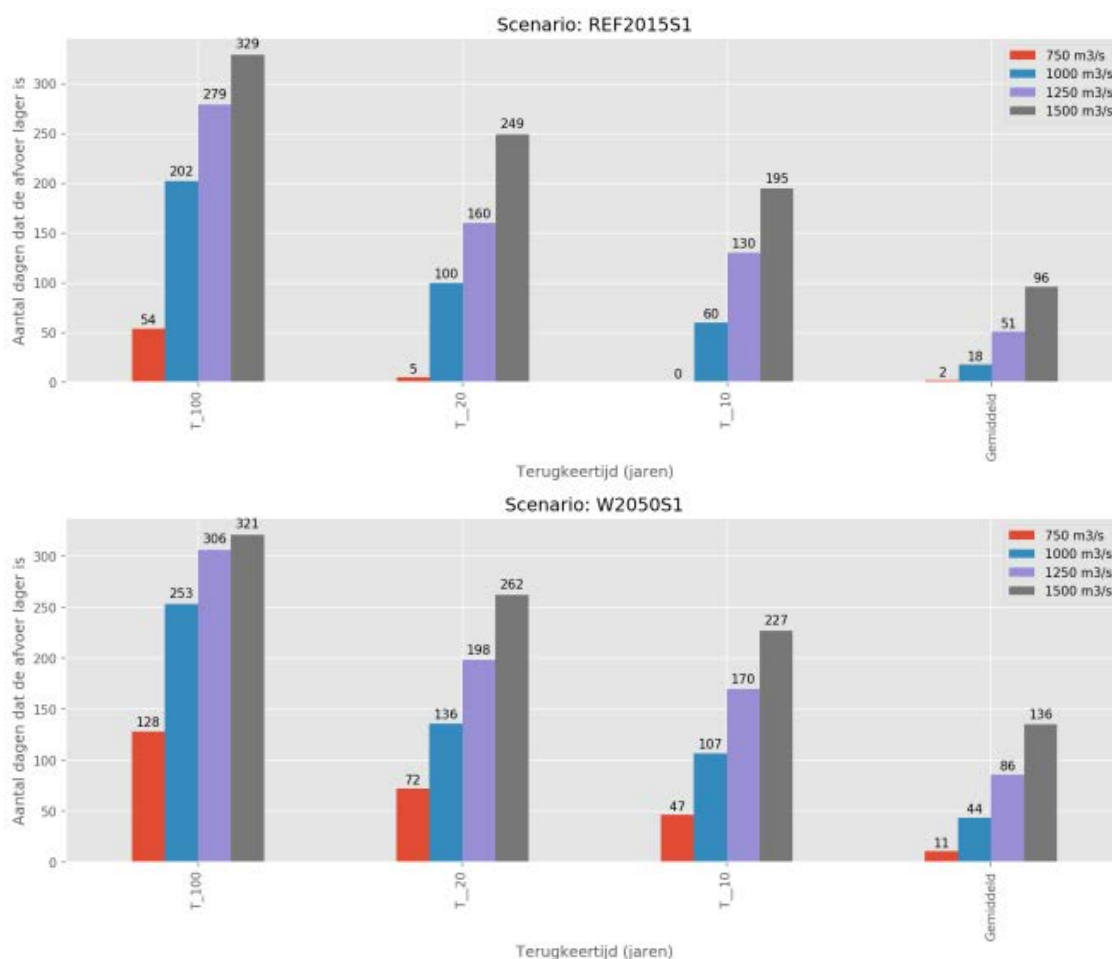
Bij het klimaatscenario Warm2050 zal de OLA afnemen naar ongeveer 820 m³/s (Sloff et al., 2012). Om de Rijntakken bij deze afvoer op diepte te houden zijn onderhouds(bagger)werkzaamheden nodig voor grofweg een halve meter extra diepte. De vraag is of dit realistisch is.



Figuur 3.5 Effect van klimaatverandering op de afvoer op de Waal bij Tiel



Figuur 3.6 Duur per jaar van lage afvoeren bij Lobith voor meerdere drempelwaarden in huidig klimaat (boven) en Warm2050 (onder) op basis van LSM randvoorwaarden (dagbasis)



Figuur 3.7 Onderschrijdingsduur in dagen van de afvoer bij Lobith, voor een aantal drempelwaarden en een aantal herhalingstijden op basis van de data in Figuur 3.6

De doorwerking van lagere afvoeren op vaardieptes op de Waal (bij St.Andries) zijn geanalyseerd met LSM en LSM2BIVAS (voor de vertaling wat waterstanden naar vaardieptes).

Voor het zeer droge jaar 1976 is het effect van de extra afvoeronttrekking (ten opzichte van de referentie HB2015) op de vaardiepte weergegeven in Figuur 3.8. Hieruit blijkt dat, in tegenstelling tot het ARK-Betuwepand waar het effect van de varianten groter is dan dat van klimaatverandering, op de Waal het effect van klimaatverandering op de vaardiepte juist groter is dan het effect van de varianten.

Figuur 3.9 toont de jaarlijkse vaardiepteonderschrijdingsduur op basis van de hele 100-jarige reeks voor Ref2015 en Warm2050. De figuren van de varianten met extra onttrekkingen zijn niet weergegeven omdat de verschillen hierin niet zichtbaar zijn. In Figuur 3.10 is de informatie vertaald in statistieken. Hieruit blijkt dat bij T=100 jaar (eens in de 100 jaar) een waterdiepte van 3 m 116 dagen wordt onderschreden in het huidige klimaat en dat dit volgens Warm2050 zal toenemen naar 160 dagen. Een vergelijkbare toename is af te lezen bij T=20 jaar (van 34 naar 93 dagen) en T=10 (van 21 naar 61 dagen). De gemiddelde jaarlijkse duur (H<3 m) neemt als gevolg van het Warm2050 scenario toe van 6 naar 17 dagen.

Het effect van de varianten (in Figuur 3.11 en Figuur 3.12) is een orde grootte kleiner. Uitgaande van een kritische vaardiepte van 3 m, wordt de onderschrijdingsduur als gevolg van extra afvoer 3 (H25W25) tot 6 (H50W25) dagen langer bij T = 10 jaar in het huidige klimaat. Onder het Warm2050 scenario neemt deze duur toe met 4 (H25W25) tot 9 (H50W25) dagen. De gemiddelde jaarlijkse duur (H<3 m) neemt als gevolg van deze varianten in het Warm2050 scenario toe met 2 (H25W25) tot 4 (H50W25) dagen. Dit is samengevat in Tabel 3.5.

De grootste effecten zullen optreden bij lage Rijnafvoeren en een groot neerslagtekort, wanneer alles samenvalt: lage waterstanden op de Waal, potentiële verzilting van de Lek en ARK-Noordpand, grote regionale watervraag, en inzet van de KWA. Inzet van de KWA is een goede indicator hiervoor. Uit Mens et al. (2018) is gebleken dat de KWA in de toekomst (Warm2050) grofweg eens in de 5 jaar moet worden ingezet. Op basis hiervan schatten we in dat de extra watervragen eens in de 5 jaar tot zichtbare problemen voor scheepvaart zullen leiden.

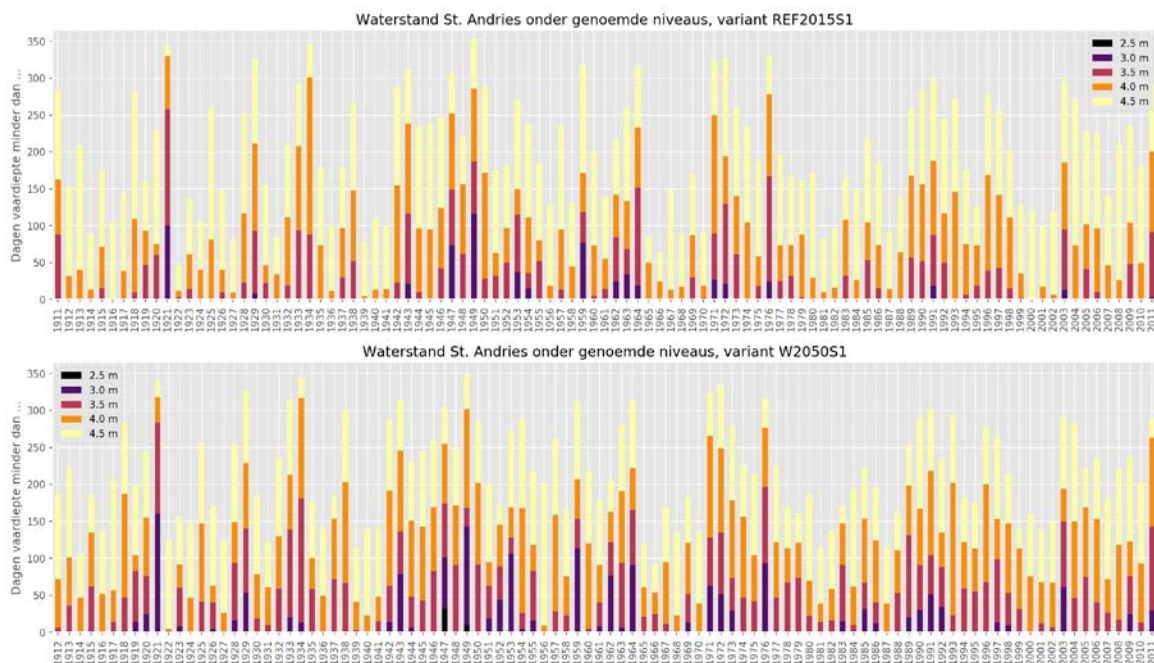
Tabel 3.5 Aantal dagen per jaar dat de vaardiepte op de Waal bij St.Andries kleiner is dan 3 m voor verschillende herhalingsstijden (samenvatting van de figuren die volgen)

| | Aantal dagen vaardiepte bij St.Andries < 3 m | | | | | | | | effect van Warm2050 | | | |
|--------------|--|-------|--------|--------|--------------------|-------|--------|--------|---------------------|-------|--------|--------|
| | REF2015 | | | | WARM2050 | | | | WARM2050 - REF2015 | | | |
| | HB2015 | H0W25 | H25W25 | H50W25 | HB2015 | H0W25 | H25W25 | H50W25 | HB2015 | H0W25 | H25W25 | H50W25 |
| Gemiddeld | 6 | 7 | 7 | 8 | 17 | 18 | 19 | 21 | 11 | 11 | 12 | 13 |
| T = 10 jaar | 21 | 21 | 24 | 27 | 61 | 62 | 65 | 70 | 40 | 41 | 41 | 43 |
| T = 100 jaar | 116 | 116 | 128 | 146 | 160 | 171 | 186 | 197 | 44 | 55 | 58 | 51 |
| | effect van variant | | | | effect van variant | | | | | | | |
| | HxWy - HB2015 | | | | HxWy - HB2015 | | | | | | | |
| | HB2015 | H0W25 | H25W25 | H50W25 | HB2015 | H0W25 | H25W25 | H50W25 | | | | |
| Gemiddeld | | 1 | 1 | 2 | | 1 | 2 | 4 | | | | |
| T = 10 jaar | | 0 | 3 | 6 | | 1 | 4 | 9 | | | | |
| T = 100 jaar | | 0 | 12 | 30 | | 11 | 26 | 37 | | | | |

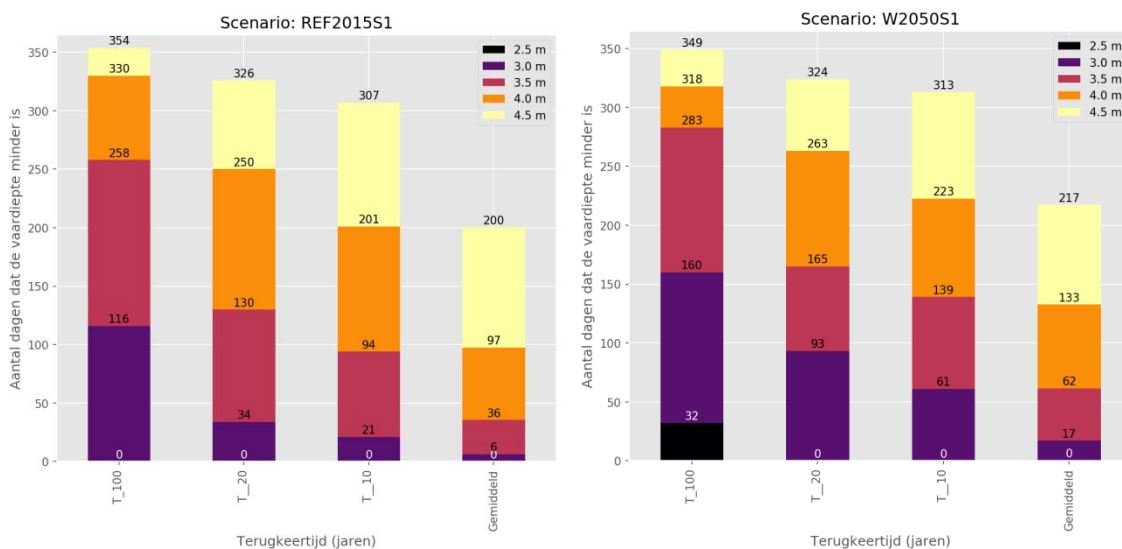
1976



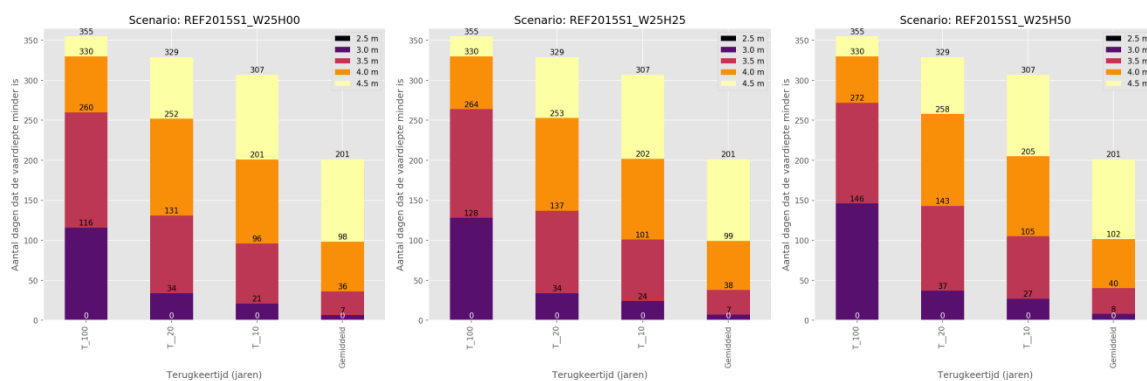
Figuur 3.8 Modeluitvoer LSM voor het jaar 1976 voor de verschillende varianten, met en zonder klimaatverandering. Boven: extra afvoer door Betuwepand (tov HB2015). Onder: het effect op de vaardiepte bij St. Andries.



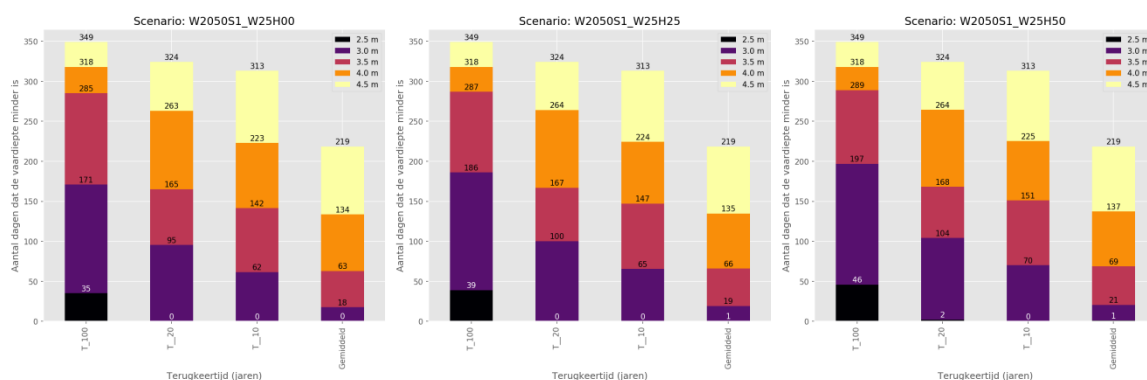
Figuur 3.9 Vaardiepteonderschrijding in alle jaren voor REF2015 (HB2015) en Warm2050 (HB2015)



Figuur 3.10 Vergelijking tussen de overschrijdingen van de vaardiepte tussen REF2015S1 en W2050S1



Figuur 3.11 Vergelijking tussen de overschrijdingen van de vaardiepte voor drie varianten binnen REF2015S1

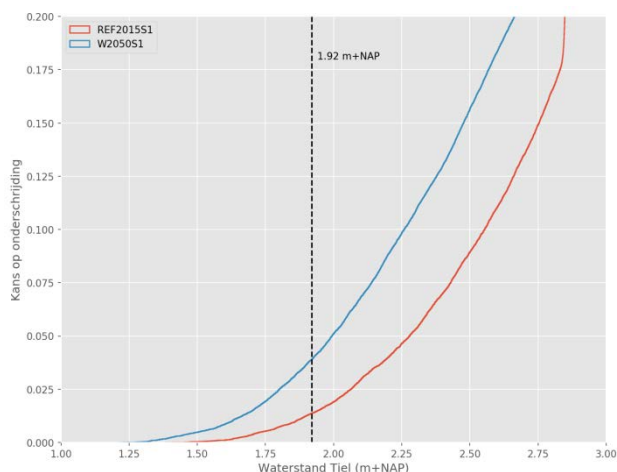


Figuur 3.12 Vergelijking tussen de overschrijdingen van de vaardiepte voor drie varianten binnen W2050S1

3.3.3 Regionale inlaat bij Tiel

De waterstand bij Tiel neemt enerzijds af in het klimaatscenario Warm2050 en anderzijds als gevolg van de hogere afvoer door het ARK-Betuwepand in de varianten. Het effect ten gevolge van de klimaatverandering is gegeven in Figuur 3.13. De waterstand van 1,92 m +NAP die minimaal nodig is voor de inlaat van het gemaal bij Tiel heeft in de referentiesituatie een kans van overschrijden van 0.014 per dag (gem. 5 dagen per jaar), in het Warm2050 scenario neemt deze kans toe naar 0.04 per dag (gem. 14 dagen per jaar).

Een hogere afvoer door het ARK-Betuwapand zal de waterstanden bij de inlaat verder laten dalen. Het gaat hier om een waterstanddaling van 7 cm bij een extra onttrekking van 25 m³/s en een daling van 13 cm bij een extra onttrekking van 50 m³/s (ARCADIS, 2017). Het gemiddeld aantal dagen per jaar dat de drempel van de inlaat wordt overschreden zal dan toenemen met respectievelijk 4 dagen (bij een extra onttrekking van 25 m³/s) en 7 dagen (bij 50 m³/s).



Figuur 3.13 Kans op onderschrijding van de waterstand bij Tiel op basis van dagwaarden uit de 100-jarige reeks uit het NWM (LSM) voor de situaties REF2015S1 en W2050S1.

3.4 Conclusies en keuzes

De extra watervraag aan het hoofdwatersysteem voor de KWA+, het zoet houden van de Lek en het zoet houden van ARK-Noordpand, komt naar verwachting minimaal overeen met de variant waarin minimaal 25 m³/s debiet over stuw Hagestein gaat en minimaal 25 m³/s debiet door het ARK-Noordpand bij Weesp stroomt (H25W25). Als dit extra water uit de Waal wordt aangevoerd, zal dit volgens de berekeningen in de toekomst (Warm2050) minimaal eens in de 15 jaar leiden tot grote afvoeren door het ARK-Betuwapand, waardoor een deel van het scheepvaartverkeer in de problemen komt bij het passeren van de Prins Bernhardsluizen. Scheepvaart op de Waal zal in de toekomst (Warm2050) vaak (~eens in de 5 jaar) hinder ondervinden. Door de extra watervraag zal de waterstand bij locatie St. Andries op de Waal enkele centimeters dalen waardoor de beladingsgraad van de binnenvaart (verder) gereduceerd zal worden. De impact van sterke klimaatverandering (Warm2050) is echter groter en heeft een negatief effect van enkele decimeters op de vaardiepte op de Waal.

In gesprek met de regio zijn de volgende keuzes geformuleerd, die naar verwachting onder het Warm2050 scenario eens in de 5 jaar gemaakt moet worden:

- Extra wateraanvoer uit de Waal via het ARK-Betuwapand (met als gevolg negatieve effecten voor de scheepvaartsector);
- Minder water naar de Lek (negatieve effecten drinkwatersector);
- Minder water naar het ARK-Noordpand (negatieve effecten regionale watervoorziening, natuur, drinkwatersector);
- Meer water via Driel (negatief effect op IJsselafvoer);
- Minder regionale onttrekkingen vanuit het Betuwapand en vanuit de Nederrijn.

3.5 Literatuur

ARCADIS (2017). Verkenning vergrote aanvoer water via Betuwepand onder droge omstandigheden.

Havinga, H. (2011): MGD analyse Bovenrijn Waal 1999-2010 (v4). RWS-ON

Deltares (2012) Deltaprogramma rivieren morfologie en scheepvaart. Deltares rapport 1203442-000-VEB-0006-vj

Witteveen + Bos (2016). Regionale verkenning zoetwater rivierengebied Fase 4. Referentie TL248-1/16-020.108

4 Hotspot Rijn-Maasmonding

4.1 Focus van de hotspot

Door klimaatverandering en diverse ingrepen zal de zoutindringing in de Rijn-Maasmonding toenemen. Daarmee rijst de vraag of we in de toekomst nog aan onze zoetwatervraag kunnen blijven voldoen, waar er knelpunten ontstaan en welke stuurmogelijkheden er zijn om de zoutindringing tegen te gaan. In het hoofdwatersysteem van de Rijn-Maasmonding bevinden zich drie belangrijke stuurknoppen waarmee de afvoer – en daarmee de zoutconcentratie – beïnvloed kan worden: Haringvlietsluizen, stuw Hagestein en Volkeraksluizen. Met oog op het ontwikkelen van de (nieuwe) beleid- en beheerstrategie voor de noord- en zuidrand van de Rijnmaasmond, is meer inzicht in de effecten van de ingrepen en de stuurknoppen gewenst. Daartoe worden binnen de hotspot twee vragen beantwoord:

- Hoe vaak komen bepaalde verziltingsgebeurtenissen voor in huidig en toekomstig klimaat;
- Wat is de effectiviteit van twee stuurknoppen (stuw Hagestein en Volkeraksluizen) om deze verzilting tegen te gaan of te beperken.

De hotspot richtte zich in eerste instantie op Bernisse, Kinderdijk en Krimpen aan den IJssel. Naar aanleiding van recente gesprekken met de regio en recente studies in het kader van versnelde zeespiegelstijging (Hackaton Rijn-Maasmonding en de landelijke verkenning zeespiegelstijging) wordt voor de volledigheid ook aandacht besteed aan de effecten van klimaatverandering op Spijkenisse. Spijkenisse-inlaat en Bernisse-inlaat zijn op dit moment de belangrijkste zoetwateraanvoeropties voor de buffer Brielse-Meer.

4.2 Aanpak

Binnen deze hotspotanalyse gekeken naar vier locaties die van groot belang zijn voor de zoetwatervoorziening van deze regio (Figuur 4.1). Krimpen aan de IJssel en Kinderdijk dienen als proxy voor de Hollandse IJssel en Lek, op deze riviertakken zijn verscheidene (regionale) innamepunten gelegen. De modelresultaten op de Lek en Hollandse IJssel zijn niet goed genoeg om direct naar de concentraties bij de innamepunten te kijken. Bernisse en Spijkenisse zijn inlaatopties voor het Brielse Meer; vanuit het Brielse Meer worden onder meer de Rotterdamse haven, Voorne-Putten en Delfland voorzien van zoet water.

Voor deze hotspot is gebruik gemaakt van de 100-jarige NWM-reeksen, in het bijzonder de uitvoer van SOBEK-RE NDB (Wesselius et al., 2017) voor het huidige en toekomstige klimaat, Deltascenario Warm2050. Deze 100-jarige reeksen dienen als basis om een beeld te krijgen hoe vaak en hoe lang verzilting optreedt tijdens het huidige klimaat en wat de veranderingen zijn als gevolg van klimaatverandering. Als kental wordt gebruik gemaakt van de overschrijdingsduur van een drempelwaarde.

De modelresultaten zijn door Huismans et al (2018) voor de afgelopen tientallen jaren gevalideerd met metingen. Uit de validatie bleek dat het model in staat is om grootschalige trends goed weer te geven maar dat er sprake is van een onderschatting van de zoutconcentratie en getijfluctuatie. Als gevolg hiervan verschilt de overschrijdingsduur van de drempelwaarde sterk tussen meting en model. Om hiermee om te gaan is een methode ontwikkeld om de duur en ernst van de verziltingsgebeurtenissen te evalueren (Huismans et al., 2018). Deze methode is ook in de hotspotanalyse RMM gebruikt om een uitspraak te doen over de gevolgen van klimaatverandering.

Als gevolg van de onnauwkeurigheid van de resultaten kunnen de overschrijdingsduren niet gebruikt worden als absolute waarheid maar geven ze een indicatie voor wat er kan gebeuren als gevolg van klimaatverandering.

Er zijn na bespreking met de regio ten behoeve van de hotspot RMM een aantal aanvullende analyses gedaan. De watervraag is afhankelijk van het seizoen waardoor de analyse is opgesplitst in winter- en zomerhalfjaar. Verder is er een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd voor verschillende grenswaarden. In het aanvullende werk is er gebruik gemaakt van een andere methode om de invloed van klimaatverandering inzichtelijk te maken. De nieuwe figuren laten een meer vloeiend verloop zien van de kans op verziltingsjaren en geven ook een onzekerheidsmarge weer.

Daarnaast is binnen de hotspot een methode ontwikkeld om ook voor Bernisse een uitspraak te doen over de invloed van klimaatverandering op de zoetwaterbeschikbaarheid. De zoetwaterbeschikbaarheid komt bij dit innamepunt in gevaar indien er achterwaartse verzilting optreedt in combinatie met nalevering. Dan is er namelijk sprake van een langdurige overschrijding van de drempelwaarde waardoor de buffer van het Brielse Meer niet meer tijdig aangevuld kan worden. Het model is echter niet goed in staat om de processen van nalevering te simuleren. Uit kennis van het systeem is af te leiden dat nalevering optreedt zodra een zoutpiek, die via het Spui het Haringvliet bereikt, samenvalt met langdurige lage Rijnafoer. Op basis van deze kennis is een methodiek ontwikkeld om op basis van de afvoer en zoutpieken een uitspraak te doen over de kans op nalevering bij Bernisse. Deze methode is gevalideerd met behulp van metingen bij Bernisse.

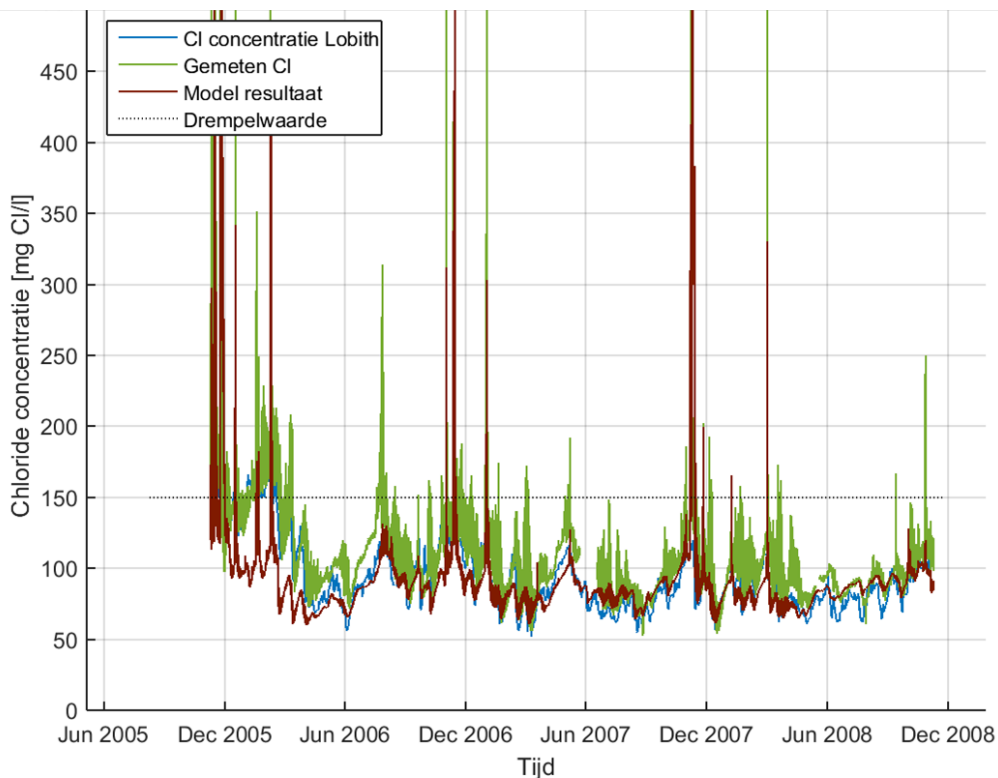
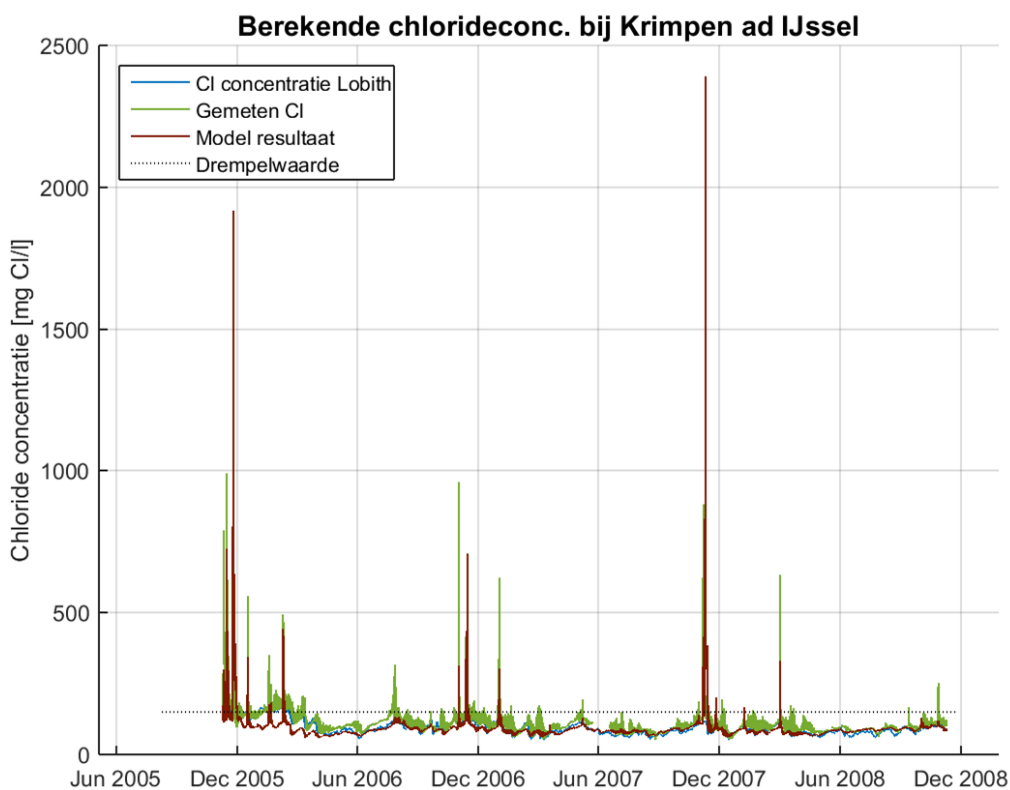
Als laatste is de effectiviteit van de stuurknoppen (stuw Hagestein en Volkeraksluizen) onderzocht in Huismans et al. (2018). Met behulp van het 1D SOBEK-RE model zijn voor een historische gebeurtenis de stuurknoppen modelmatig ingezet om de invloed op de zoutconcentratie op de Noordrand te bepalen. Inzichten worden in Paragraaf 4.3.4 samengevat.



Figuur 4.1 Overzichtskartaal van de Rijn-Maasmonding met de belangrijkste meetlocaties en stuurknoppen (bron: Huismans et al., 2018)

4.3 Resultaten

In Figuur 4.2 worden de gesimuleerde chlorideconcentraties vergeleken met de gemeten concentraties bij Krimpen a/d IJssel en Lobith (Huismans et al., 2018). In dit figuur is te zien dat de grootschalige trends door het model worden gereproduceerd maar dat er een stelselmatige onderschatting is van de chlorideconcentratie. Dit komt deels door het niet volledig meenemen van de achtergrondconcentratie (in blauw). Een ander deel van de onderschatting komt doordat niet alle processen in het 1D model zijn opgenomen die een rol spelen in de Rijn-Maasmonding. De kwaliteit van de resultaten bij Kinderdijk zijn vergelijkbaar met die bij Krimpen a/d IJssel.

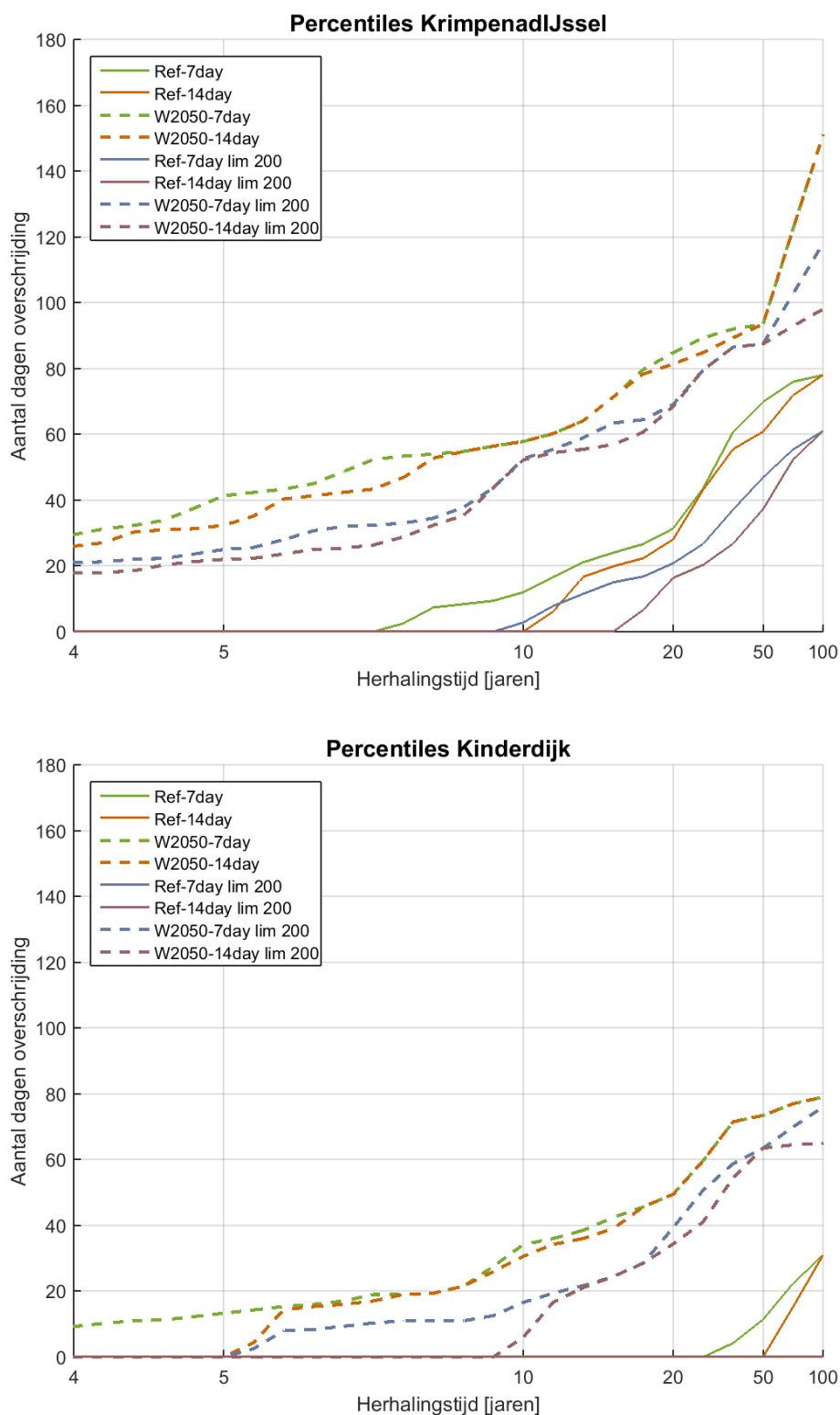


Figuur 4.2 Verificatie 100-jarige reeks voor Krimpen aan de IJssel, met in blauw de gemeten chlorideconcentratie bij Lobith, in groen de gemeten chlorideconcentratie bij Krimpen aan de IJssel en in rood het modelresultaat, uit Huisman et al., 2018

4.3.1 Krimpen aan den IJssel & Kinderdijk

Uit de validatie blijkt dat het model redelijk goed in staat is om langdurige overschrijding van de drempelwaarde te reproduceren (Huisman et al., 2018). Er is daarom in de analyse gekeken naar de overschrijdingsduur voor langere aaneengesloten periodes (minimaal 7 dagen aaneengesloten). Los van een betere reproductie van verziltingsgebeurtenissen zijn langdurige overschrijdingsmomenten ook interessanter vanuit het gebruik bekeken: kortere periodes van overschrijding kunnen vaak overbrugd worden. Als laatste wordt er gekeken naar de monding van de Lek en Hollandsche IJssel en niet bij de innamepunten zelf. Deze riviertakken zullen pas verzilten als de monding permanent verzilt is (zowel bij eb als bij vloed verhoogde concentraties).

Voor Krimpen aan de IJssel treedt er in het huidige klimaat eens in de 10 a 20 jaar verzilting op in het zomerhalfjaar (minimaal 7 dagen aaneengesloten, >200 mg Cl/l) waarbij zout de Hollandsche IJssel op kan trekken. Met het Warm2050 scenario wordt dit vaker dan eens in de 5 jaar (Figuur 4.3). Verder zullen verziltingsgebeurtenissen met een herhalingsstijd van 10 a 20 jaar langer duren; hier moet men denken aan maanden van verzilting in plaats van enkele weken. De monding van de Lek (Kinderdijk) is in het huidige klimaat zelden langdurige verzilt. Doordat de monding zelden permanent verzilt is er op de Lek weinig ervaring met zoutindringing vanuit zee. Onder het scenario Warm2050 kan in het zomerhalfjaar eens in de 5 à 10 jaar verzilting optreden van de monding (Figuur 4.3). Onder deze condities kan het zout optrekken op de Lek.



Figuur 4.3 Herhalingstijden van overschrijdingsduren in het zomerhalfjaar voor verschillende chloridedrempelwaarden (150 en 200 mg/l) en aaneengesloten periodes (7 en 14 dagen) voor de referentie (doorgetrokken lijnen) en onder het klimaatscenario (stippellijnen) voor Krimpen a/d IJssel (boven) en Kinderdijk (onder)

4.3.2 Bernisse-Brielse Meersysteem

Bernisse en Spijkenisse zijn inlaatpunten voor de zoetwaterbuffer Brielse Meer. Momenteel wordt het Brielse Meer gevuld via de Bernisse-inlaat (Spui). Optimalisatie van het Bernisse-Brielse Meer (BBM) systeem, waarbij de Spijkenisse-inlaat (Oude Maas) weer in gebruik genomen wordt als neveninlaat tijdens innamebeperking Bernisse, is onderdeel van de eerste stap in het adaptatiepad van het Deltaplan Zoetwater.

Door de buffercapaciteit van het Brielse Meer zijn kortdurende zoutpieken bij Bernisse geen probleem. Bij Bernisse ontstaan er in de huidige situatie voor de zoetwatervoorziening alleen problemen indien er na achterwaartse verzilting (zout komt vanuit zee via route Nieuwe Waterweg, de Oude Maas en het Spui op het Haringvliet) nalevering optreedt (zout komt uit het Haringvliet gradueel via het Spui terug). Dit treedt alleen op als er tijdens en na achterwaartse verzilting lage afvoercondities zijn en de Haringvlietssluisen dicht staan (de stromingsrichting door het Spui is dan zuid-noord gericht). Het is bekend dat het 1D model de nalevering niet goed reproduceert (Figuur 4.4). Voor de inlaat van Bernisse is daarom op een andere manier gekeken naar een overschrijding van de drempelwaarde.

Spijkenisse is onder normale condities afwisselend zoet/zout ten gevolge van getijdewerking. Inname kan dan onder vrij verval tijdens periodes waarbij de chlorideconcentratie lager is dan 150 mg Cl/l (zogenaamd inlaatvenster). Bij windopzet, lage rivierafvoer of nalevering kunnen zowel de eb- als vloedconcentraties tijdelijk verhoogd raken.

Tijdens periodes van nalevering is alternatieve aanvoer gewenst (ook in de winter omdat het Brielse Meer maar een beperkte buffercapaciteit heeft). Spijkenisse is in het huidige klimaat geen 100% dekkend alternatief⁴. Omdat Spijkenisse dichterbij zee ligt is deze locatie gevoeliger voor zeespiegelstijging dan Bernisse en is het voor het Warm2050 scenario onduidelijk of Spijkenisse een voldoende alternatief is, of dat de volgende stap uit het adaptatiepad, namelijk het vergroten van de buffer en kleinschalige aanvoer vanuit de Biesbosch, al genomen moet worden. Om hier beter grip op te krijgen is nadere (model)analyse nodig.

4.3.3 Kwalitatieve analyse van nalevering bij Bernisse

Op basis van de kennis van het systeem en een visuele controle (Figuur 4.5) valt af te leiden dat nalevering samenvalt met langdurige periodes van lage afvoer in combinatie met achterwaartse verzilting. Met deze kennis is er besloten om het aantal dagen met lage afvoeren uit te zetten tegen de zoutflux (zoutpieken vanuit de Maasmond via de Oude Maas richting het Haringvliet). Op basis van in de werkelijkheid opgetreden langdurige naleveringsmomenten (1991, 2003 en 2005) kan er een kwadrant worden afgeleid waarin er een reële kans is op langdurige nalevering (Figuur 4.6). Deze drie gebeurtenissen (in de winter) zijn echter niet voldoende om grenswaardes af te leiden. Wel kan op basis van deze methode een eerste schatting worden gegeven van de relatieve invloed van klimaatverandering op de kans op nalevering bij Bernisse. Ook voor Bernisse wordt er onderscheid gemaakt tussen het zomer- en winterhalfjaar vanwege het verschil in watervraag (zie De Vries, 2014).

In het huidige klimaat zijn er rond de 20 gebeurtenissen in het kwadrant te vinden (Figuur 4.7).

⁴ As zoutconcentratie Bernisse > 150 mg Cl/l is tgv achterwaartse verzilting met nalevering, dan is Spijkenisse voor ook een deel van die periode verhoogd (dwz minimum concentraties > 150 mg Cl/l, dus geen inlaatvenster).

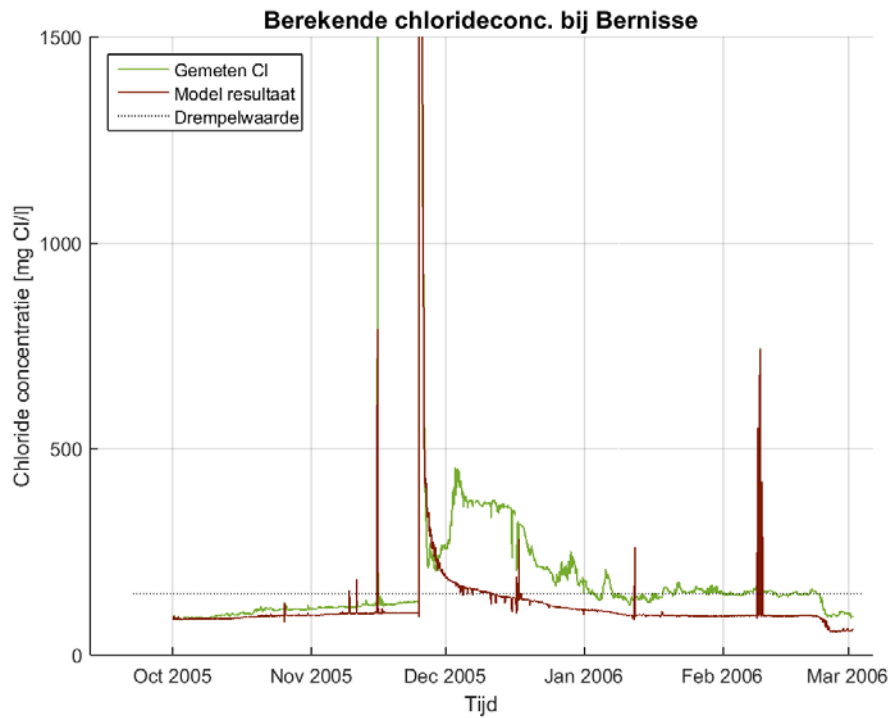
Dit komt overeen met ongeveer eens in de 5 jaar momenten van langdurige nalevering in het winterhalfjaar. Onder het klimaatscenario zijn er rond de 35-40 gebeurtenissen te vinden in het kwadrant (Figuur 4.7). Dit betekent dat onder het klimaatscenario Warm2050 eens in de 3 jaar momenten van langdurige⁵ nalevering kunnen optreden in het winterhalfjaar.

In het zomerhalfjaar is op dit moment zelden tot nooit sprake van langdurige nalevering. In het zomerhalfjaar treden er namelijk minder stormen op waardoor de zoutflux richting het Haringvliet beperkt is. Door klimaatverandering komen er vaker lange periodes van lage afvoer voor (Figuur 4.8). Tevens dringt het zout verder landinwaarts door de zeespiegelstijging wat kan leiden tot een langzame toename in zoutconcentratie (Figuur 4.8). Tijdens deze periodes van langdurige lage afvoer kunnen kleine verhogingen van de waterstand bij Hoek van Holland leiden tot zoutpieken bij Bernisse (Figuur 4.8). Als de afvoer daarna nog langdurig laag blijft kan er nalevering optreden. Deze processen gecombineerd kan er toe leiden dat er ook in het zomerhalfjaar periodes van langdurige nalevering voor kunnen komen.

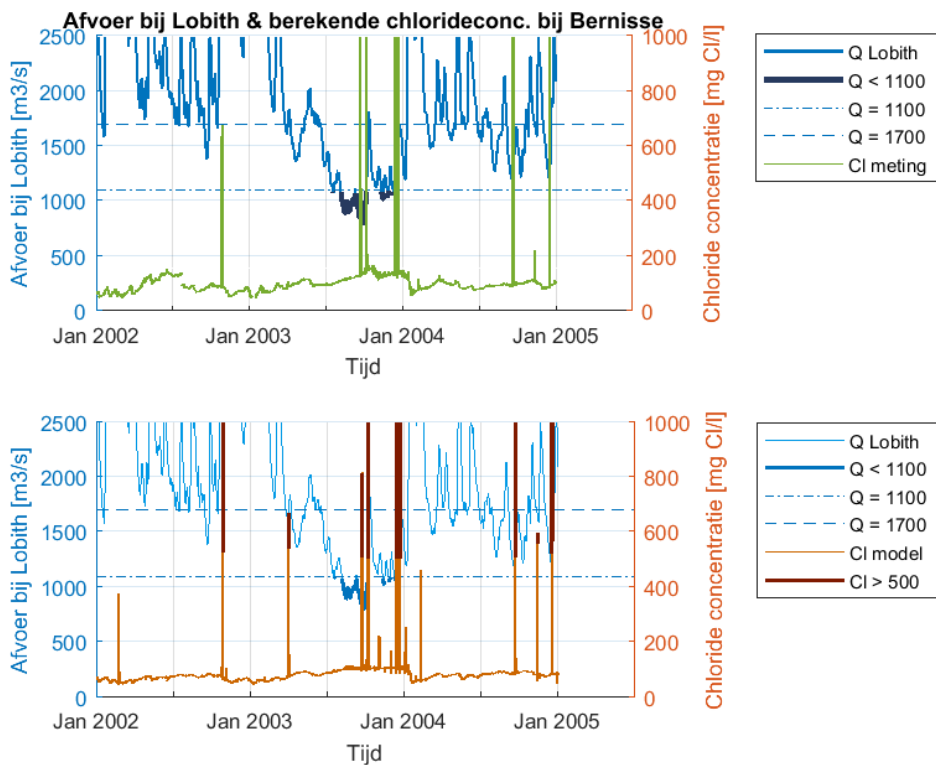
Doordat er geen metingen van nalevering in de zomer beschikbaar zijn, is het onmogelijk om het model te valideren voor deze momenten. Uit de tests is gebleken dat het model de langzame zoutindringing niet goed reproduceert en over het algemeen onderschat (Huisman et al., 2018).

Als gevolg hiervan is de waarde van de zoutflux onzeker voor deze momenten. Het is daarom lastig om een uitspraak te doen over de frequentie van nalevering in het zomerhalfjaar. Het is wel duidelijk dat onder het scenario Warm2050 de kans op langdurige nalevering in het zomerhalfjaar toeneemt en dat het innamepunt Bernisse dan waarschijnlijk tijdelijk niet bruikbaar is.

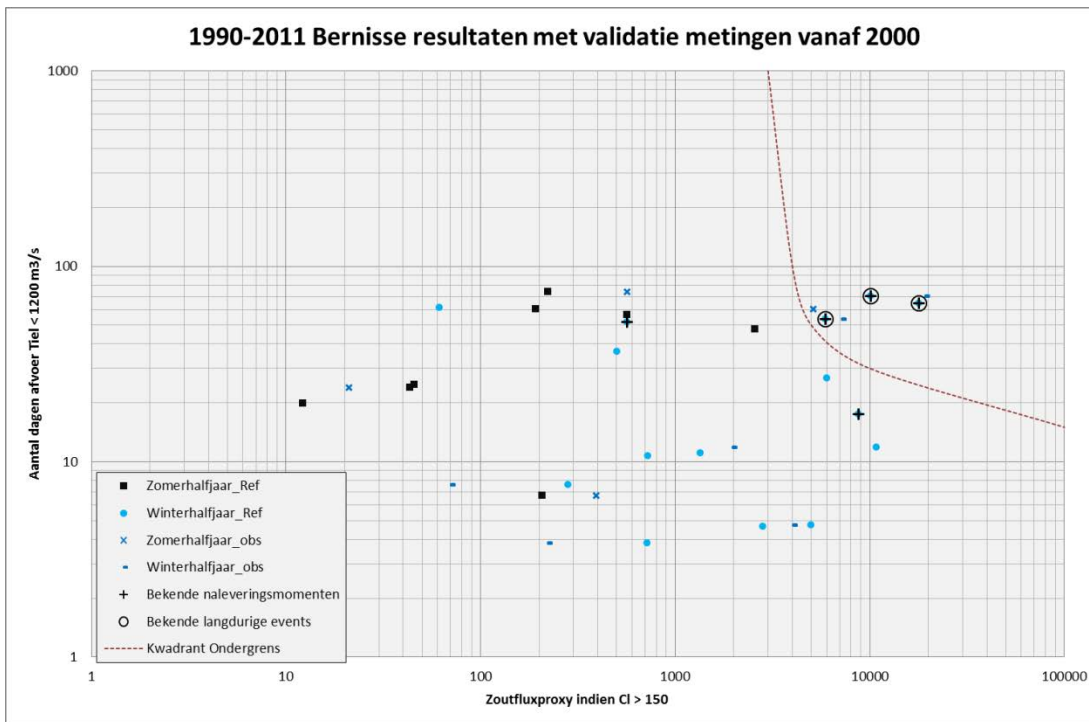
⁵ Onder langdurige verzilting Bernisse verstaan we verzilting die langer dan enkele dagen aanhoudt. Afhankelijk van de watervraag en peilopzet Brielse Meer kan een periode van 1 à 2 dagen van innamebeperking meestal wel overbrugd worden.



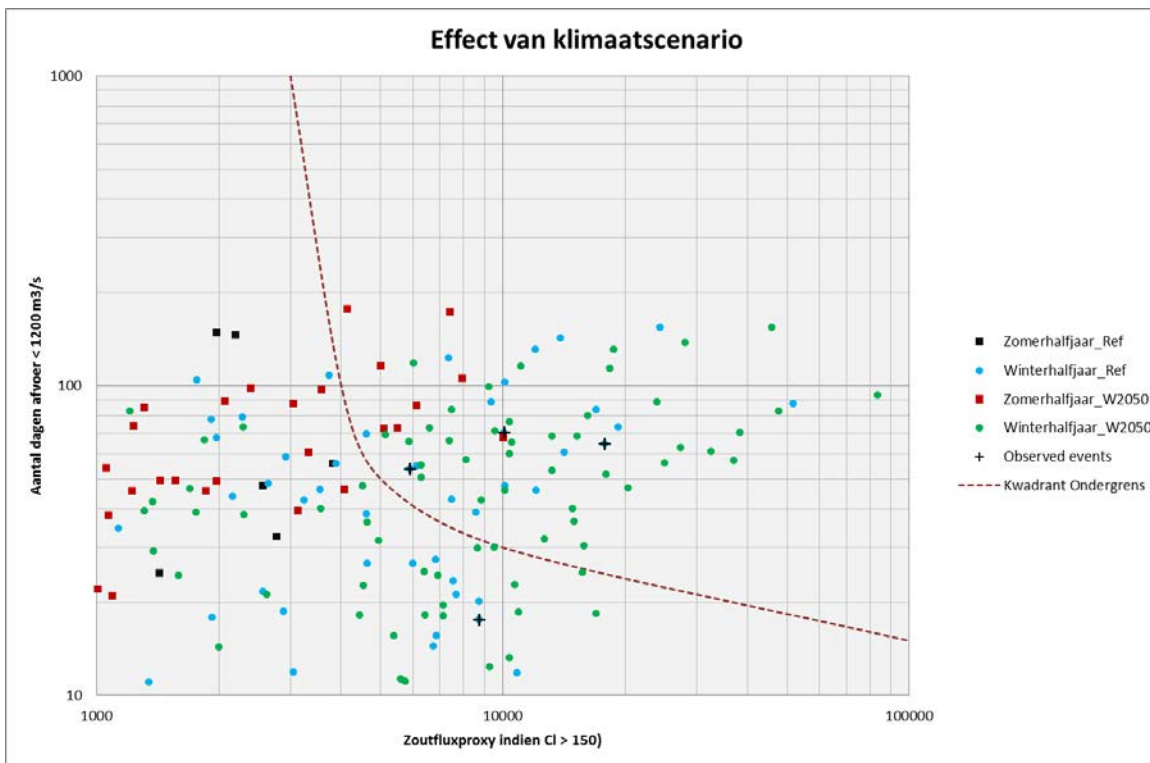
Figuur 4.4 Periode van nalevering bij Bernisse, gemeten en berekend. (Huismans et al., 2018)



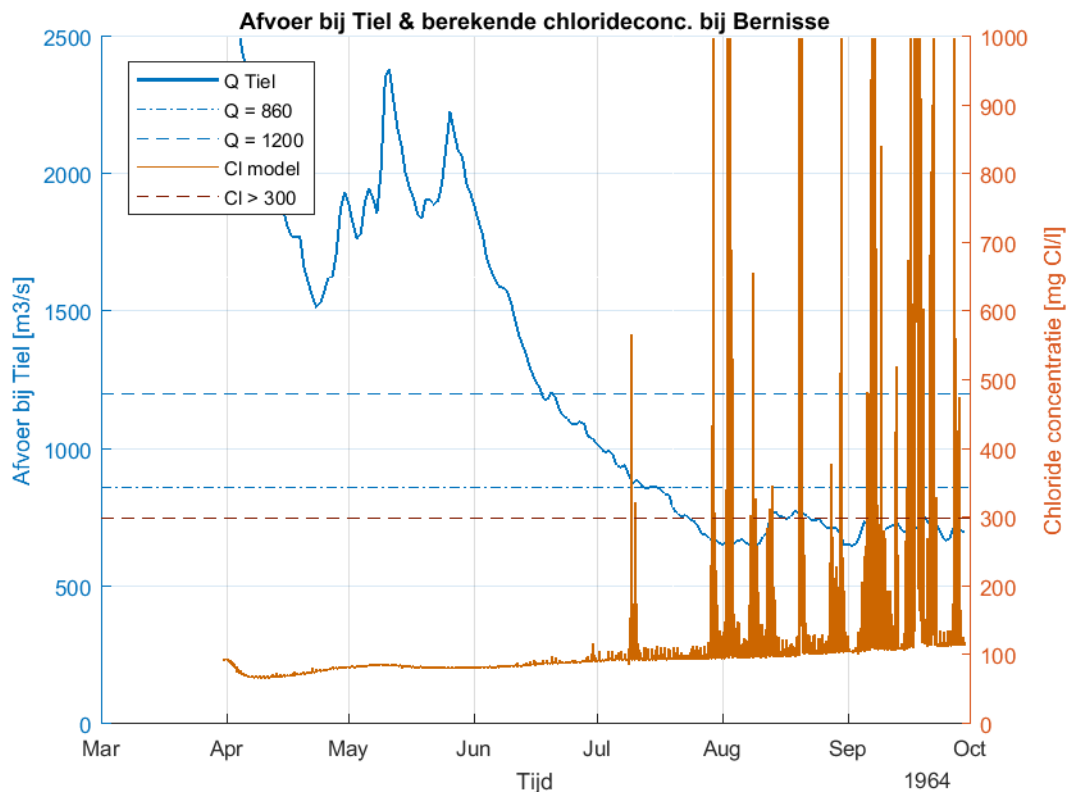
Figuur 4.5 Afvoer bij Lobith geplot met de gemeten (boven) en gesimuleerde (onder) zoutconcentratie; in november/december 2003 trad door de lage afvoer en zoutpiek langdurige nalevering op.



Figuur 4.6 Zoutfluxproxy geplot tegenover het aantal dagen met lage afvoer bij Tiel op basis van metingen vanaf het jaar 2000. De zwarte plusjes geven in de werkelijkheid opgetreden langdurige naleveringsmomenten weer die met het model zijn gesimuleerd; langdurige events (1991, 2003 en 2005) zijn weergegeven met plusjes en zwarte cirkels (rechtsboven in de grafiek).



Figuur 4.7 Zoutfluxproxy uitgezet tegen het aantal dagen met lage afvoer bij Tiel, op basis van SOBEK-RE NDB, voor de referentiesituatie en voor het scenario Warm2050. Elk bolletje of vierkantje representeert één halfjaar. Zwarte plusjes zijn gebeurtenissen die in de werkelijkheid als langdurige nalevering zijn ervaren



Figuur 4.8 Afvoer bij Tiel en berekende zoutconcentratie bij Bernisse onder het klimaatscenario Warm2050 voor het zomerhalfjaar van 1964. De grenswaardes voor de afvoer bij Tiel duiden op het nagenoeg sluiten (1200 m³/s) en volledige sluiten (860 m³/s) van de Haringvlietsluizen

4.3.4 Effect van stuurknoppen

Er zijn drie stuurknoppen aanwezig in de Rijn-Maasmonding (RMM) waar bij verzilting gebruik van gemaakt kan worden om de afvoer binnen RMM anders te verdelen: Haringvlietsluizen, Volkeraksluizen en stuw Hagestein. We kijken hier naar de laatste twee stuurknoppen. De Volkeraksluizen worden gebruikt om water vanuit het Hollands Diep naar het Volkerak-Zoommeer te sturen. De stuw bij Hagestein kan worden gebruikt om water via het Betuwepand over de Lek te sturen ten koste van de Waal. Het effect van de stuurknoppen is in een eerste verkenning met een modelsimulatie (constante afvoer) onderzocht in 2016 (Huismans, 2016) en is in 2017 uitgebreider onderzocht met behulp van de (dynamische) jaarsom van 2011 (Huismans et al., 2018). We geven hier een korte samenvatting van de inzichten:

- Het blijkt dat het effect van de twee stuurknoppen op de permanente verzilting bij de monding van de Hollandsche IJssel en de monding van de Lek beperkt is (Huismans et al., 2018). Dit komt mede doordat de tientallen m³/s van de stuurknoppen in het niet vallen bij het getijvolume op deze locaties. De stuurknoppen zullen de meeste verziltingsgebeurtenissen daardoor niet kunnen voorkomen, hoogstens een licht beperkend effect hebben op deze gebeurtenissen.
- Het inzetten van de stuw van Hagestein kan wel een significant effect hebben op de Lek zelf. Dit is recent in een andere studie verder onderzocht (Hydrologic, 2018).

- Het stopzetten van de onttrekking naar het Volkerak-Zoommeer zal naar verwachting zorgen voor lagere chlorideconcentraties bij Bernisse bij nalevering na achterwaartse verzilting, omdat in dat geval meer zoet water via Spui zal kunnen stromen. Omdat de nalevering niet goed met een 1D-model kan worden gesimuleerd valt niet te zeggen of er sprake is van een significant effect.

4.4 Conclusies en keuzes

Bij langdurige verzilting van de *monding van de Hollandsche IJssel* gecombineerd met een watervraag uit de regio is inzet KWA nodig. Wanneer de monding van de Hollandsche IJssel langdurig (> 7 dagen aaneengesloten) verzilt raakt, zal ook zonder onttrekking de Hollandsche IJssel verzilten en is een lozingsdebiet of aanleg van een zoetwaterbel nodig om de Hollandsche IJssel zoet te houden. Onder sterke klimaatverandering (Warm2050) wordt geschat dat eens in de ongeveer 5 jaar inzet van de KWA nodig is. Eens in de 10 à 20 jaar bedraagt daarbij de inzetduur mogelijk maanden in plaats van enkele weken.

De *monding van de Lek (Kinderdijk)* is in het huidige klimaat zelden langdurig verzilt. Hierdoor is er langs de Lek weinig ervaring met zoutindringing vanuit zee en zijn er weinig tot geen validatiegegevens beschikbaar. Onder het Warm2050 scenario is de modelmatige schatting dat Kinderdijk ongeveer eens in de 5 à 10 jaar langdurig⁶ verzilt. Tijdens deze periodes is het nodig om voldoende afvoer over Hagestein te realiseren om verzilting van de Lek te voorkomen en de inlaatpunten langs de Lek te kunnen blijven gebruiken. Verzilting van de *monding van de Lek* – waar ook innamepunten liggen - kan hiermee niet voorkomen worden.

Kans op langdurige verzilting bij *Bernisse* ten gevolge van nalevering gaat van ongeveer eens in de 5 jaar (huidig klimaat) naar eens in de 3 à 4 jaar (Warm2050). Kans bestaat dat het ook in de zomerperiode gaat optreden. Net zoals bij huidig klimaat gaat het hierbij waarschijnlijk om een beperkte verhoging ten opzichte van de norm van 150 mg Cl/l.

De twee stuurknoppen (het sturen van water over de Lek via de stuw van Hagestein en het stopzetten van de onttrekking van water naar het Volkerak-Zoommeer) hebben een beperkte invloed op het zoet houden van de monding van de Lek en Hollandsche IJssel. De stuurknoppen kunnen wel een significant effect hebben op het zoet houden van de Lek zelf. Het effect van de stuurknoppen op Bernisse is niet onderzocht.

In gesprek met de regio zijn de volgende keuzes geformuleerd:

- Accepteren dat innamepunten vaker en langer verzilten en/of de KWA vaker en langer inzetten voor de watervoorziening van West-Nederland (negatieve effecten industrie, drinkwater, regionale watervoorziening langs de Lek);
- Aanvoeren van extra water vanuit de Waal via het Betuwepand (negatieve effecten scheepvaart) om een structurele oostelijke aanvoer voor de watervoorziening van Midden-West-Nederland op te zetten;
- Inzetten van stuw Hagestein voor het zoet houden van de Lek (positieve effecten regionale watervoorziening en drinkwater vanuit de Lek ten koste van scheepvaart op de Waal en regionale watervoorziening vanuit Nederrijn en ARK-Betuwepand);
- Vergaande maatregelen in de Nieuwe Waterweg door bijvoorbeeld sluizen te bouwen om zoutindringing vanuit zee tegen te gaan (negatieve effecten voor de Rotterdamse haven en scheepvaart);

⁶⁶ Tenminste enkele weken concentraties hoger dan 150 a 200 mg Cl/l (bandbreedte ivm onzekerheid) in de monding van de Lek, waarvan minimaal 7 dagen aaneengesloten verzilting, tijdens het zomerhalfjaar.

- Nieuwe innovatieve maatregelen om zoutindringing te voorkomen zoals bellenboten, pompschepen, gaten in de spiltingsdam en het aanpassen van de geometrie.

4.5 Literatuur

De Vries, I. (2014) Toetsing robuustheid Brielse Meer voor zoetwatervoorziening - Fase 2: Definitieve Toetsing. Deltares rapport 1209018-000, 2014.

Haasnoot, M, L. Bouwer, F. Diermanse en J. Kwadijk (2018) Een verkenning van mogelijke effecten van versnelde en extreme zeespiegelstijging voor het Deltaprogramma. Deltares draft rapport 11202230-005, april 2018.

Huismans, Y. (2016) Systeemanalyse Rijn-Maasmonding: Analyse Relaties Noord- En Zuidrand En Gevoeligheid Stuurknoppen. 1230077-001. Deelproject Systeemanalyse En Slim Watermanagement. Deltares rapport 1230077-001, 2016.

Huismans, Ymkje, R. van der Wijk, A.Fujisaki en K. Sloff. (2018) Zoutindringing in de Rijn-Maasmonding Knelpunten en effectiviteit stuurknoppen. Deltares rapport 11200589-001-ZWS-0010, 2018.

Hydrologic (2018) Verziltingsonderzoek Lek - Langjarige modelreeksen verzilting Lek. Hydrologic concept rapport P954, april 2018

5 Hotspot Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal

5.1 Afbakening gebied en hotspotvragen

Deze hotspotanalyse richt zich op het Noordpand van Amsterdam-Rijnkanaal (ARK) en Noordzeekanaal (NZK), als verbinder tussen het midden-rivierengebied en het IJsselmeer en overgang naar zee. De knelpunten als gevolg van zoutindringing via de Nieuwe Waterweg en Haringvlietsluizen, veranderende afvoeren over de Waal, de zoutindringing via het NZK en de beschikbare bufferschijf in het IJsselmeer zijn daaraan gekoppeld.

Met de bouw van de nieuwe zeesluis bij IJmuiden wordt de zoutvracht richting het NZK naar verwachting verdubbeld. Om deze verdere verzilting als gevolg van de nieuwe zeesluis tegen te gaan heeft RWS gekozen voor de mitigatiemaatregel 'selectieve onttrekking'⁷. Deze maatregel brengt het zoutbezwaar terug naar het niveau van de autonome ontwikkeling (i.e. met de huidige zeesluis, het huidige klimaat en verwachte stijging van aantal schuttingen). Om de selectieve onttrekking te laten werken is mogelijk extra afvoer nodig van het oosten richting het westen over het spui/maalcomplex IJmuiden.

De kennisvraag is: op welke manier kan de wateraanvoer georganiseerd worden - vanuit de Waal of IJsselmeer - om het zoutgehalte in het NZK en ARK op gewenst niveau te houden? Voor de lange termijn gaat het om de vraag wanneer over te stappen op de bouw van een zoutvang bij de sluis, aanleggen van een bellenscherm in de sluis of verder (bovenregionaal) ingrijpen in de waterverdeling over rivieren en kanalen. Ingrijpen in het schutregime kan het zoutbezwaar in theorie ook beperken, maar wordt tot nu toe niet wenselijk en niet haalbaar geacht, m.u.v. calamiteiten situaties.

5.2 Aanpak en uitgangspunten

Eerst is geanalyseerd hoe onder huidig beheer en tijdens droge situaties de waterverdeling van het ARK en NZK er uit ziet. De waterverdeling is vergeleken met de sturingsregels in LHM (onderdeel van NWM). Vervolgens is met behulp van LHM geanalyseerd of het extra water dat nodig is om de selectieve onttrekking (SO) te laten werken uit het Markermeer aangevoerd kan worden en welke gevolgen dat heeft voor uitzakken peil Markermeer/IJsselmeer en watertekorten in de omliggende gebieden.

In de analyses in dit hoofdstuk wordt aangenomen dat de afvoer, die nodig is om de Klimaatbestendige Wateraanvoer (KWA+; de variant met een capaciteit van 15 m³/s) van zoet water te voorzien, en de afvoer (25 m³/s bij Weesp) die nodig is om zoutindringing op het ARK tegen te gaan, vanuit de Waal via Irenesluizen wordt aangevoerd. Voor de effecten hiervan op de Waal wordt verwezen naar de hotspot Midden-rivieren (Hoofdstuk 3).

⁷ 'Vóór het gemaal en spuicomplex in het binnenspuikanaal bouwen we een wand met onderin een opening, vergelijkbaar met een brievenbus. Het zoute water zakt, nadat het via sluisen binnenkomt, naar beneden in een kom en wordt via het gemaal weer afgevoerd terug naar de Noordzee.' (citaat H. Cremers, Omgevingsmanager Rijkswaterstaat, <https://www.rijkswaterstaat.nl/over-ons/nieuws/nieuwsarchief/2018/04/maatregel-ontwikkeld-om-verzilting-zeewater-noordzeekanaal-tegen-te-gaan.aspx>)

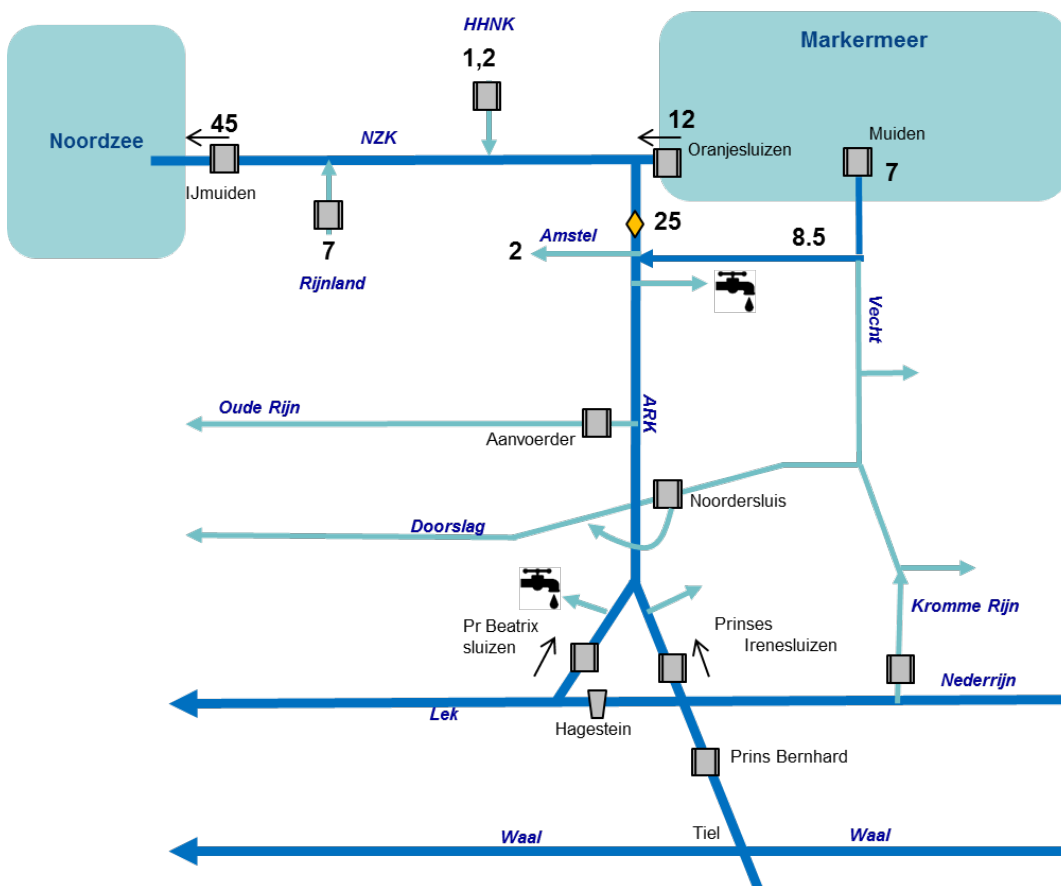
5.3 Achtergrond informatie

5.3.1 Situatieschets ARK/NZK

Figuur 5.1 geeft een overzicht van de waterverdeling in het ARK en NZK **volgens de huidige sturingsregels** en tijdens een droge periode zonder neerslag en een Rijnafvoer bij Lobith van circa 1400 m³/s.

In droge perioden zijn de Prinses Irenesluizen een belangrijke inlaatlocatie van zoetwater. Dit zoete water is nodig om op het ARK tegendruk te bieden tegen het zoute water dat het Noordzeekanaal binnenkomt via de sluisen van IJmuiden. Om het ARK zoet te houden is een minimum debiet van 25 m³/s bij Weesp nodig (zie paragraaf 5.3.3). Verder wordt er extra water ingelaten bij de Prinses Irenesluizen tijdens inzet van de KWA, waarbij er grofweg 14 m³/s door de Noordersluis en gemaal De Aanvoerder uit het ARK wordt onttrokken.

Naast de inlaat via Irenesluizen wordt er ook water aangevoerd vanuit de regio (natuurlijke afstroming en lozingen) en vanuit het Markermeer via de Oranjesluizen en via Muiden. Het debiet over de Oranjesluizen is gemiddeld 12 m³/s en over Muiden 7 m³/s.



Figuur 5.1 Waterbalans ARK/NZK volgens de huidige sturingsregels tijdens de zomermaanden bij Lobith en zonder inzet van de KWA. (stroomschema is een bewerking van Hydrologic (2017); de getallen zijn gebaseerd op metingen van Rijnland en gesprekken met experts)

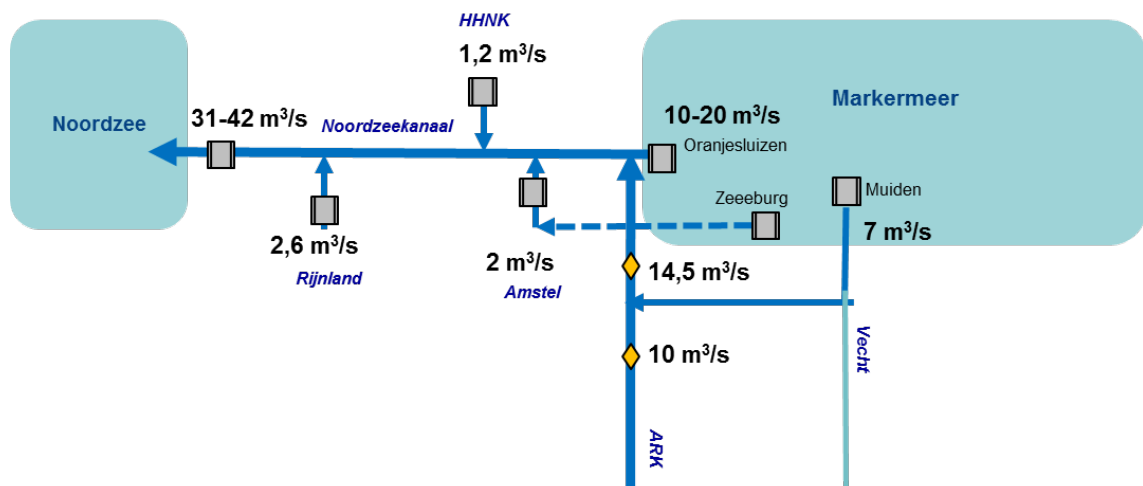
5.3.2 Validatie LHM

In deze paragraaf is de waterverdeling in LHM tijdens een droge situatie (Figuur 5.2) vergeleken met de huidige sturing in de praktijk (Figuur 5.1).

Het gaat hierbij om de NWM Ref2015S1 som (zie H2). Te zien is dat in LHM de afvoer bij IJmuiden flink lager is dan je op basis van de huidige sturing in de praktijk zou verwachten. Verklaringen hiervoor zijn:

- In LHM wordt de aanvoer vanuit de Waal onderschat. In LHM is een minimaal gewenst debiet bij Weesp van $10 \text{ m}^3/\text{s}$ opgelegd, terwijl in de huidige sturing $25 \text{ m}^3/\text{s}$ gehanteerd wordt. Deze $10 \text{ m}^3/\text{s}$ in LHM is afkomstig uit het huidige waterakkoord.
- De aanvoer vanuit Rijnland (Spaarne+Halfweg) wordt in LHM met enkele kuubs onderschat. De oorzaak hiervan is onbekend, maar kan te maken hebben met de waterverdeling over Katwijk, Spaarne, Halfweg en Gouda.
- In LHM worden de Amsterdamse grachten doorgespoeld met water uit Zeeburg. Onlangs is het beheer gewijzigd waardoor Zeeburg nauwelijks meer gebruikt wordt. De Amsterdamse grachten en onderliggende polders halen tegenwoordig water direct uit het ARK.
- Door de Oranjesluizen wordt in de LHM-simulaties meer water uit het Markermeer gehaald. In LHM gaat er in de zomermaanden (juni t/m aug) in principe $20 \text{ m}^3/\text{s}$ door de Oranjesluizen; alleen als er een tekort is in het IJsselmeergebied, dan wordt dit teruggebracht naar $10 \text{ m}^3/\text{s}$. In de praktijk is de gemiddelde aanvoer in de zomermaanden $12 \text{ m}^3/\text{s}$.

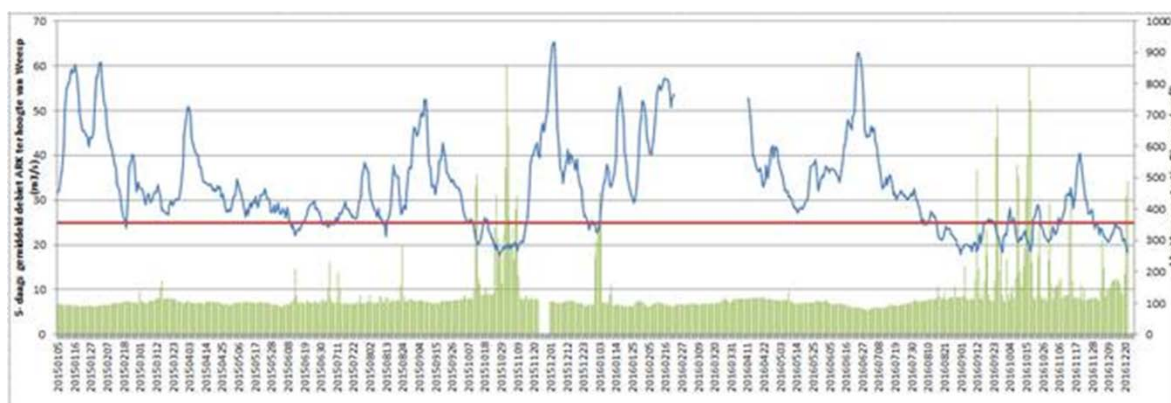
Geconcludeerd kan worden dat LHM de aanvoer vanuit de Waal en de aanvoer vanuit Rijnland onderschat. Echter, in perioden zonder tekort in het IJsselmeergebied wordt de aanvoer vanuit het Markermeer (via de Oranjesluizen en Zeeburg) juist overschat. In de nieuwste versie van LHM is de sturing aangepast zodat het beter overeenkomt met de sturing in de praktijk. Deze versie wordt ook overgenomen in NWM, waarmee dit jaar nieuwe sommen worden gedraaid. Deze berekeningen waren voor de hotspot nog niet beschikbaar.



Figuur 5.2 Gemiddelde afvoer juni t/m sept 2003 volgens LHM-berekeningen (Ref2015S1-som, zie H2)

5.3.3 Toelichting $25 \text{ m}^3/\text{s}$ bij Weesp

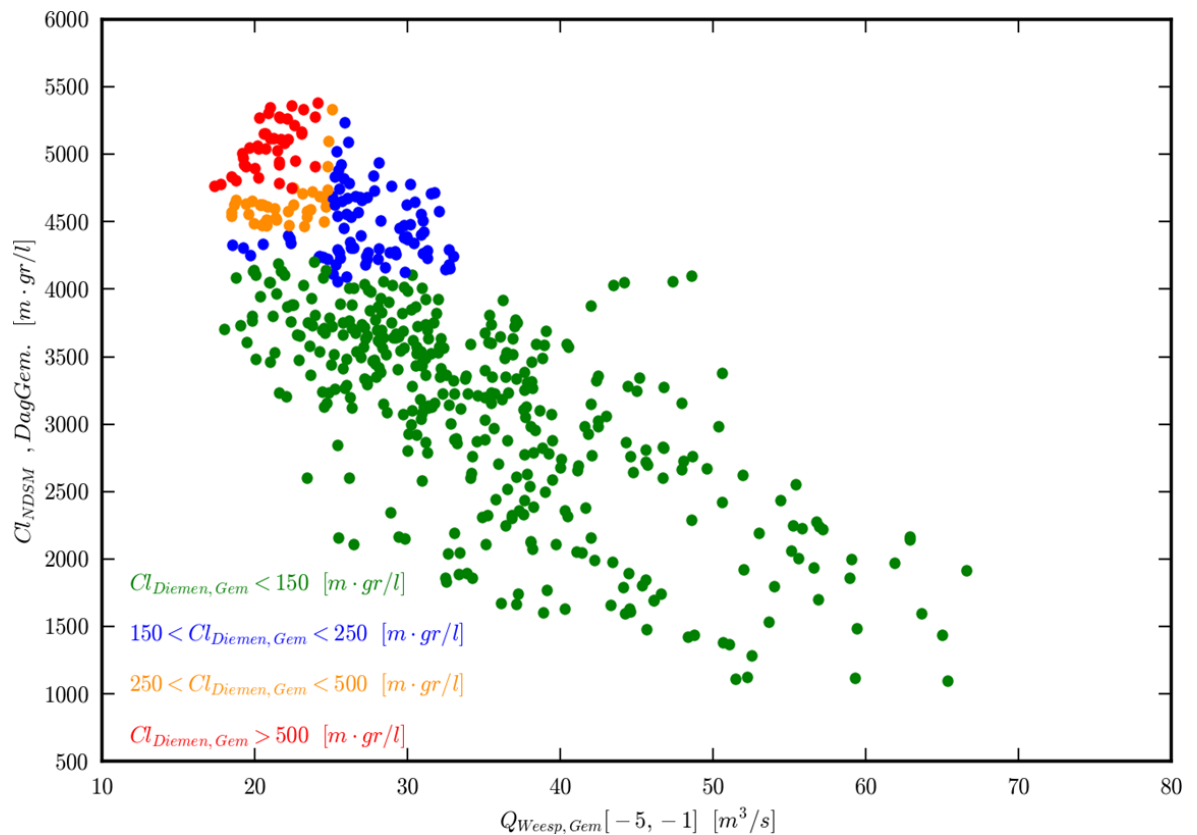
Uit onderzoek (Mens et al., 2018) en ervaring (mondelingen communicatie Arjen Kikkert, RWS-WNN) is gebleken dat bij Weesp een 5-daags gemiddeld debiet van minimaal $25 \text{ m}^3/\text{s}$ aangehouden moet worden om zoutindringing op het ARK onder de meeste omstandigheden te voorkomen. In Figuur 5.3 is goed te zien dat er bij een 5-daags gemiddeld debiet kleiner dan $25 \text{ m}^3/\text{s}$ zoutpieken kunnen optreden.



Figuur 5.3 Tijdsree 2015-2016, blauw is 5-daags gemiddeld debiet ter hoogte van Weesp en groen is chlorideconcentratie ter hoogte van Diemen (-1,4 m NAP). De rode lijn geeft het debiet van 25 m³/s aan (data aangeleverd door Arjen Kikkert, RWS-WNN)

In Mens et al. (2018) is een relatie afgeleid op basis van meetgegevens tussen het zoutgehalte in het IJ (nabij NDSM pier), zoutgehalte bij Diemen en de afvoer van het ARK ten hoogte van Weesp. Waarbij het goed om te weten is dat Weesp gelegen is benedenstrooms van het ARK, Diemen ligt net het hoekje om op het NZK en NDSM ligt nog verder benedenstrooms ter hoogte van Amsterdam. De gevonden relatie is weergegeven in Figuur 5.4. De conclusies die uit de figuur getrokken kunnen worden onderschrijven de conclusies van Arjen Kikkert:

- Voor NDSM-chloridewaarden kleiner dan 4000 mg/l is de kans groot dat, ongeacht de afvoer bij Weesp, het daggemiddelde chloride van Diemen lager zijn dan 150 mg/l;
- Voor NDSM-chloridewaarden groter dan 4000 mg/l:
 - ...en 5-daagse gemiddelde debiet bij Weesp groter dan 25 m³/s, is de kans het grootst dat het daggemiddelde chloride van Diemen hoger is dan 150 mg/l, maar lager dan 250 mg/l;
 - ...en 5-daagse gemiddelde debiet bij Weesp kleiner dan 25 m³/s, zal het daggemiddelde chloride van Diemen het niveau van 250 mg/l gaan overschrijden;
- De kans op extreme verzilting, met daggemiddelde chloridewaarden van Diemen meer dan 500 mg/l, is het grootst van de vier klassen wanneer NDSM-chloridewaarden groter zijn dan ongeveer 4500 mg/l, en tegelijkertijd 5-daagse gemiddelde debiet bij Weesp kleiner is dan 25 m³/s.



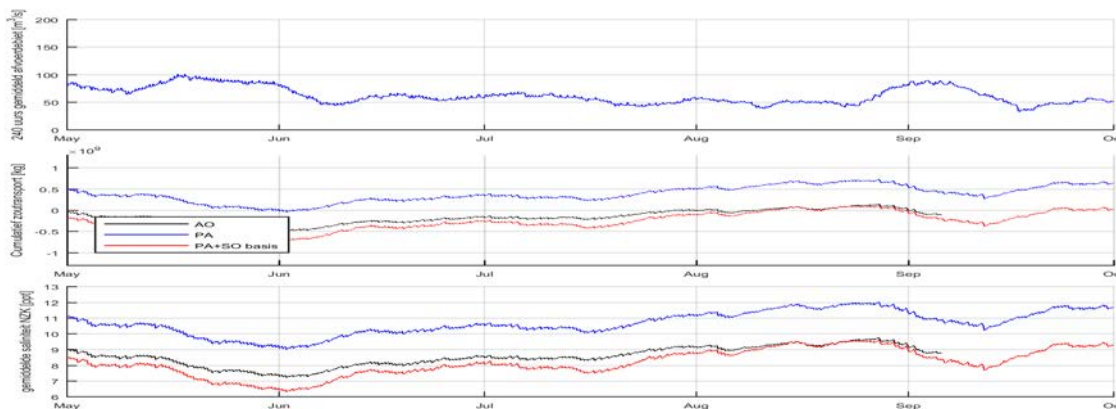
Figuur 5.4 Daggemiddelde chloridegehalte op het IJ (meetpunt NDSM pier) uitgezet tegen het 5-daags gemiddelde debiet bij Weesp. De kleuren geven een schatting van de klasse van chloridegehalte bij Diemen (bron: Mens et al, 2018).

5.3.4 Toelichting 50 m³/s bij IJmuiden

Zoals hierboven beschreven is er een grotere afvoer nodig bij IJmuiden om de maatregel selectief onttrekken (SO) te laten werken. Binnen deze studie wordt een minimaal debiet van 50 m³/s bij IJmuiden aanhouden.

De 50 m³/s bij IJmuiden is gebaseerd op de resultaten van Bijlsma (2017) en Verbruggen (2017), die de effectiviteit van de maatregel SO hebben onderzocht behulp van Delft-3D sommen voor het jaar 2003. Voor de simulatie is uitgegaan van debietmetingen van dat jaar. De resultaten worden weergegeven in Figuur 5.5. Uit deze resultaten kan geconcludeerd worden dat:

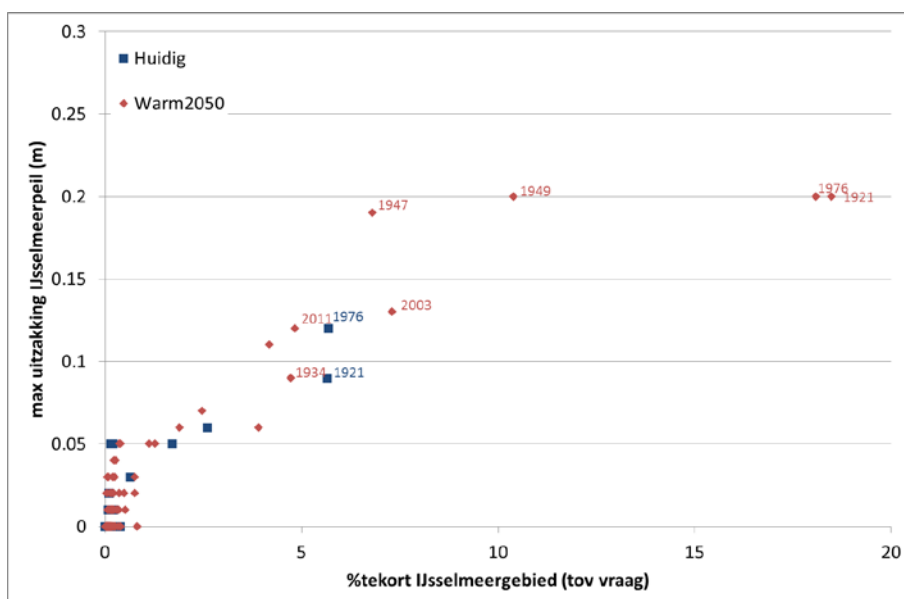
- Bij minimaal debiet IJmuiden van 50 m³/s, waarbij kortdurende, lichte onderschrijding geen probleem hoeft te zijn, blijft zoutlast met SO onder die van de autonome ontwikkeling;
- Gesimuleerde gemiddeld debiet IJmuiden over juni-juli-aug-sept: 54 m³/s.



Figuur 5.5 Resultaten Delft-3D sommen voor het jaar 2003, waarbij zwart: autonome ontwikkeling, blauw: nieuwe zeesluis, geen SO, rood: nieuwe zeesluis, met SO (Bijlsma et al., 2017)

5.4 Resultaten

Met behulp van LHM is gekeken wanneer en hoe vaak er problemen ontstaan in het IJsselmeergebied. De LHM-resultaten zijn weergegeven in Figuur 5.8. In de figuur is te zien dat voor het huidige klimaat er in 2 van de 100 jaar sprake is van een tekort in het IJsselmeergebied van meer dan 4% en een uitzakking van het IJsselmeerpeil van meer dan 5 cm. In het WARM2050 loopt dit op tot 8 van de 100 jaar.

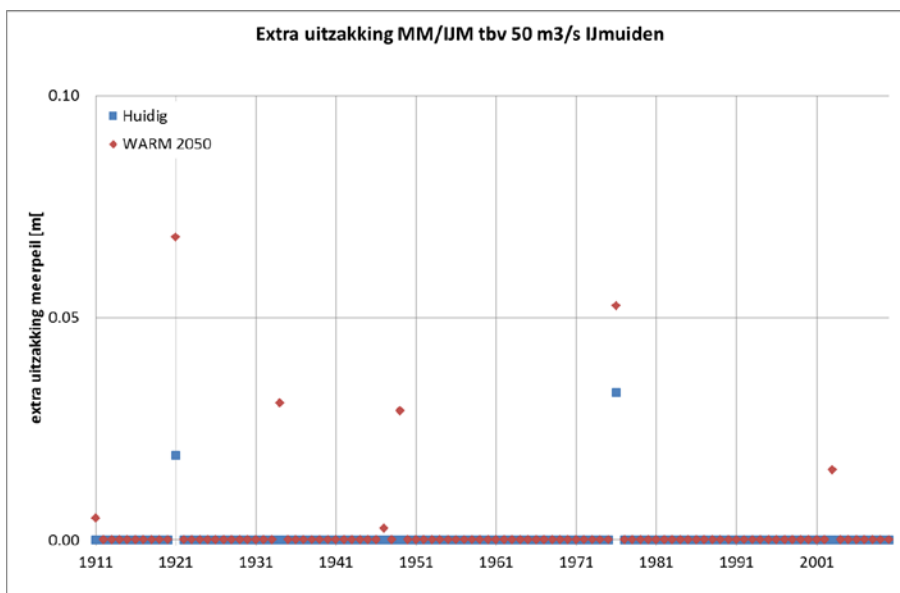


Figuur 5.6 Maximale uitzakking IJsselmeerpeil in het zomerhalfjaar uitgezet tegen het percentuele tekort van het IJsselmeergebied ten opzichte van de vraag. De waarden zijn gebaseerd op de LHM-berekening van 2017. Het tekort is berekend voor de regio's: Noord-Holland, IJsselmeerpolders, Fries-Gronings kustgebied, Drents plateau en IJssel-Vecht delta.

Bovenstaande resultaten zijn geldig voor de sturingsregels die nu in LHM zitten. Op basis van een eenvoudige waterbalansanalyse in excel is gekeken wat het effect is van een vergrote aanvoer vanuit Markermeer om 50 m³/s bij IJmuiden te halen, onder de aanname dat er minimaal 25 m³/s via Weesp wordt aangevoerd. Dit betekent dus dat er t.o.v. de LHM-sommen meer debiet vanuit de Waal wordt aangevoerd (tot 25 m³/s bij Weesp) en dat de rest van het water uit het Markermeer wordt aangevuld.

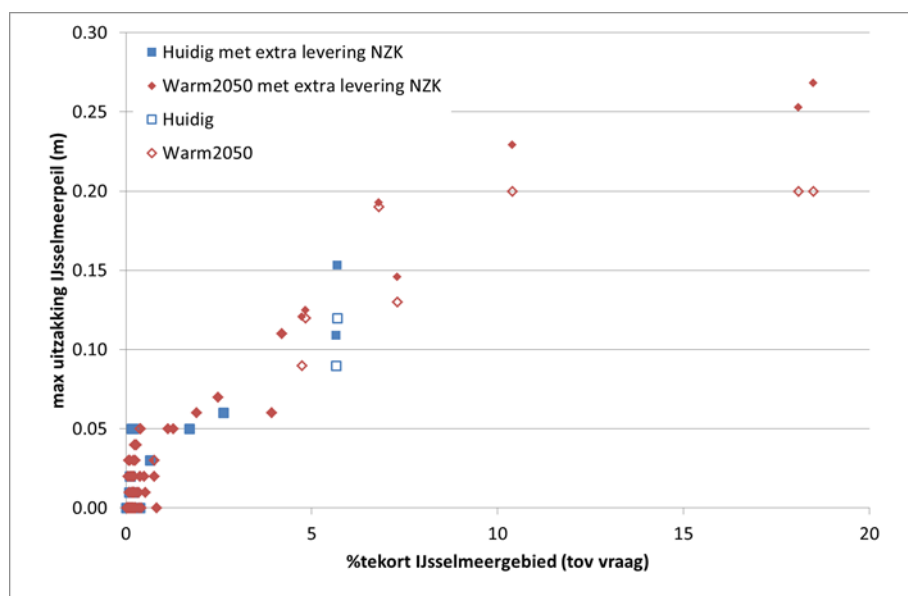
In Figuur 5.7 is de extra uitzakking van het Markermeer en IJsselmeer weergegeven die nodig is om in LHM de 50 m³/s bij IJmuiden te garanderen. De uitzakking is berekend door eerst de afvoer bij Weesp te verhogen tot 25 m³/s en de aanvoer vanuit de regio met 3 m³/s. Vervolgens is voor de maanden juni t/m augustus het tekort bij IJmuiden bepaald (<50 m³/s). Dit debiet is vervolgens omgezet naar volume en gedeeld door het oppervlak van het Markermeer en IJsselmeer samen. Alleen de echte zomermaanden zijn meegenomen bij het bepalen van de extra uitzakking; in de overige maanden is aangenomen dat extra aanvoer naar het NZK kan worden gecompenseerd door minder te spuien op de Waddenzee.

Dat niet in elk jaar extra water uit het Markermeer en IJsselmeer gehaald hoeft te worden heeft er mee te maken dat de aanvoer in LHM al redelijk hoog staat ingesteld (20 m³/s). De correctie is alleen nodig voor de jaren waarin deze aanvoer in LHM werd gekort.



Figuur 5.7 Berekende extra peilpeiluitzakking van het Markermeer en IJsselmeer, om extra water te leveren om de 50 m³/s bij IJmuiden in de maanden juni t/m augustus te halen.

De resultaten met gecorrigeerde IJsselmeerpeilen worden weergegeven in Figuur 5.8. Voor de meeste jaren kan het extra water (wat nodig is om de 50 m³/s bij IJmuiden te halen) uit het IJsselmeer gehaald worden. In extreem droge jaren komt deze extra waterlevering overeen met een bufferschijf van zo'n 3 – 7 cm. Er is in deze vereenvoudigde berekening geen rekening gehouden met de invloed hiervan op de levering aan andere gebruikers. In werkelijkheid zullen tekorten in het IJsselmeergebied toe gaan nemen ten gevolge van het voorrang geven aan waterlevering aan NZK. Dit speelt met name in de jaren waarin het peil volgens de berekening verder uitzakt dan -0.40 m: in 3 jaren in Warm2050. Volgens het huidig peilbeheer worden alle watervragers gekort zodra het peil lager wordt dan -0,40 m NAP. Om hier beter zicht op te krijgen is een berekening met LHM nodig.



Figuur 5.8 Maximale uitzakking IJsselmeerpeil in het zomerhalfjaar uitgezet tegen het procentuele tekort van het IJsselmeergebied ten opzichte van de vraag. De waarden zijn gebaseerd op de LHM-berekening van 2017, waarna de maximale uitzakking is gecorrigeerd om aan de voorwaarde van 50 m³/s bij IJmuiden te voldoen. Het tekort is berekend voor de regio's: Noord-Holland, IJsselmeerpolders, Fries-Gronings kustgebied, Drents plateau en IJssel-Vecht delta.

5.5 Conclusies en keuzes

Uit de analyse van de resultaten van het Nationaal Water Model (100-jarige reeks) blijkt het volgende:

- In huidig klimaat gaat de extra watervraag van NZK voor selectieve onttrekking ten behoeve van de nieuwe zeesluis IJmuiden eens in de 30 a 40 jaar concurreren met watervoorziening IJsselmeer/Markermeergebied. Zonder deze extra onttrekking was ook al met deze frequentie sprake van concurrentie tussen watervragers.
- Bij sterke klimaatverandering (Warm2050) gaat de selectieve onttrekking vaker concurreren met de watervoorziening van het IJsselmeer/Markermeergebied: ongeveer eens in de 10 jaar. Ook hier geldt dat de frequentie van jaren waarin gebruikers gaan concurreren niet verandert, ten opzichte van de situatie zonder extra onttrekking door selectief onttrekken, maar dat de concurrentie wel groter wordt (extra gebruiker).

In gesprek met de regio zijn de volgende keuzes geformuleerd :

- aanleggen van een zoutvang bij IJmuiden;
- accepteren van hogere zoutgehalten op het NZK/ARK; of
- accepteren grotere tekorten IJsselmeer/Markermeergebied.

5.6 Literatuur

Bijlsma., A. (2017) Samenvatting Delft3D berekeningen voor droge periode 2003 voor het NZK en ARK. A. Bijlsma, Deltares memo 11200215-000-HYE-0006, maart 2017.

Verbruggen, W. (2017) Aanvullende berekeningen effectiviteit selectieve onttrekking 2003, Wilbert Verbruggen, Deltares concept memo 11200215-000-HYE-0003, maart 2017

Mens, . H. van den Boogaard, F. Buschman en A. Nolte (2018) Eenvoudige zoutrelaties voor snelle zoetwateranalyses: Onderdeel van KPP-project Systeemanalyse Verzilting 2017. Deltares rapport 11200589-002, februari 2018.

Hydrologic (2017) Systeemvisualisatie Bypass Irenesluizen + Toelichting. Hydrologic rapport, juli 2017.

6 Hotspot IJsselmeer/Twentekanalen

6.1 Afbakening gebied en hotspotvragen

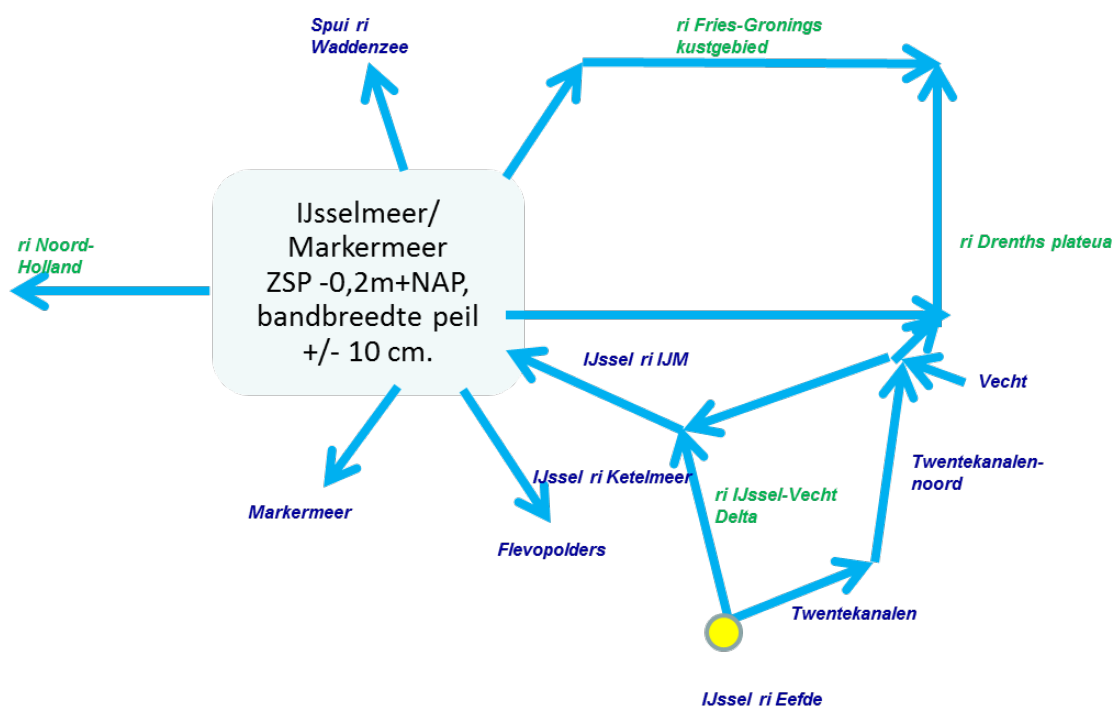
Deze hotspotanalyse richt zich op het IJsselmeer en omliggende gebieden die voor hun watervoorziening afhankelijk zijn van het IJsselmeer, inclusief IJssel-Vechtdelta die indirect via waterinlaten uit IJssel en/of Twentekanalen de buffer IJsselmeer beïnvloedt (Figuur 6.1).

De volgende vragen zijn vanuit de regio gesteld:

- Vanuit het perspectief van de zoetwatervoorziening vanuit het IJsselmeer is het belangrijk om te weten welke bufferschijf beschikbaar is om de waterbehoefte in het IJsselmeergebied en omliggende regio's te voorzien en hoe het huidige peilbeheer zich daarin verhoudt tot een 'flexibel' peilbeheerregime.
- Er is behoefte om meer water in te laten bij sluis Eefde naar het Twentekanaal (IJssel-Vechtdelta). In de toekomst bij sterke klimaatverandering is het namelijk de verwachting dat er een hogere watervraag is van het Twentekanaal en het achterliggende gebied (zie ook regionale knelpuntenanalyse in Deltaprogramma DPZW fase 1).
- Volgens de huidige verdringingsreeks wordt er bij Eefde alleen water ingelaten indien het peil van het IJsselmeer op voldoende niveau is. De vraag is of een prioritering van de Twentekanalen de watertekorten in het achterliggende gebied (IJssel-Vechtdelta) kan terugdringen zonder dat de tekorten in de rest van het IJsselmeergebied daardoor toenemen.

De bovenstaande behoefte is omgezet in de volgende hotspotvragen:

- 1 Hoe vaak wordt de bufferschijf van het IJsselmeer benut en wat zijn de resterende watertekorten, in huidig klimaat en met sterke klimaatverandering (Warm2050) [analyse met NWM]?
- 2 Hoe verandert dit beeld als Flexibel Peilbeheer wordt ingevoerd? [analyse met QWAST]?
- 3 Hoe verandert dit beeld als Twentekanalen prioriteit krijgen? [analyse met QWAST]?
- 4 Hoe verandert dit beeld als de watervraag in de IJssel-Vecht-Delta toeneemt? [analyse met QWAST]?



Figuur 6.1 Gebiedsschematisatie hotspot IJsselmeer/Twentekanalen

6.2 Aanpak

6.2.1 Analysestappen

In de analyse is gebruik gemaakt van zowel NWM (deelmodel LHM) als QWAST. In Mens et al. (2018) is al op hoofdlijnen gekeken naar de resultaten van de 100-jarige NWM-reeks voor het peilverloop van het IJsselmeer. In deze hotspotanalyse zoomen we in op de watertekorten in de regio 'IJsselmeergebied'. Volgens de regio-indeling (zie Hoofdstuk 2) omvat deze regio: Fries-Gronings kustgebied, Noord-Holland, IJsselmeerpolders, Drenth Plateau en IJssel-Vechtdelta. Aan de hand van de beschikbare LHM resultaten (100-jarige reeks 'S1': Ref2015 en Warm2050) is een analyse gedaan op (de frequentie van) buffergebruik IJsselmeer en tekorten in de regio. Met buffergebruik wordt in dit geval bedoeld: de maximale peiluitzakking over het zomerhalfjaar, dus maximum opgetreden peil minus minimum opgetreden peil. Met deze analyse wordt de eerste hotspotvraag beantwoord. De indicatoren worden verder uitgelegd in Paragraaf 6.2.3.

QWAST is bij uitstek geschikt om flexibel peilbeheer te analyseren, omdat het de mogelijkheid biedt om vooruit te kijken in de tijd. Door hiervan gebruik te maken, kan het inspelen op de droogte door de waterverdeling zo te optimaliseren dat zoveel en zo lang mogelijk aan de waterbehoeften voldaan kan worden. QWAST is eerst geverifieerd voor specifieke toepassing in deze hotspot (zie ook H2). Hiertoe zijn de LHM-resultaten (100-jarige reeks) vergeleken met de basisrun van QWAST (som met kenmerk 'S1+'), waarin zo goed mogelijk LHM (som S1) is gereproduceerd.

De volgende variabelen zijn vergeleken: maximale peiluitzakking (frequentie en mate van uitzakking) en watervraag en -tekort voor regio IJsselmeergebied. De watervraag komt overeen, omdat deze 1-op-1 wordt overgenomen uit LHM. Vervolgens zijn er in QWAST aanpassingen gedaan in beheer, zodat dit beter overeenkomt met de huidige/aankomende praktijk en/of met LHM (som met kenmerk 'S1+'). De volgende paragraaf gaat verder in op de belangrijkste QWAST-instellingen.

QWAST is gebruikt om volgende varianten te analyseren:

- Flexibel peilbeheer;
- Prioriteren van inlaat Twentekanalen (TK) bij water aflaat locatie Eefde;
- Vergroten van de watervraag van IJssel-Vechtdelta (via grotere watervraag TK aan de IJssel, bij locatie Eefde).

Tabel 6.1 Naamgeving QWAST-sommen

| Korte naam | Lange naam | Toelichting |
|----------------|---|---|
| Ref2015 | | |
| Ref2015_S1+ | REF2015_S1+_mei2018_basisrun | Referentierun huidig systeem en huidig klimaat |
| Ref2015_FP | REF2015_S2FP_mei2018_basisrunFP | Ref2015_S1+ met flexibel peilbeheer |
| Warm2050 | | |
| Warm2050_S1+ | WARM2050_S1+_mei2018_basisrun | Referentierun met Deltascenario Warm2050 |
| Warm2050_FP | WARM2050_S2FP_mei2018_basisrunFP | Warm2050_S1+ mei2018_basisrun met flexibel peilbeheer |
| Warm2050_prio | WARM2050_S1+_mei2018_prioTK | Warm2050_S1+ met Twentekanalen verhoogde prioriteit |
| Warm2050+_prio | WARM2050_S1+_mei2018_vraagIJVD+10pct_prioTK | Warm2050_S1+ met Twentekanalen verhoogde prioriteit en watervraag IJssel-Vechtdelta opgehoogd met 10% |

6.2.2 Instellingen voor de QWAST-sommen

Basisrun S1+

De watervraag Twentekanalen (bij inlaat Eefde) wordt in LHM berekend tussen de 7-10 m³/s. De regio heeft echter aangegeven dat de vraag in de praktijk groter is (tot een piekvraag van 15 m³/s) en ze rekening houdt met een groei van minimaal 10 % (piekvraag tot 16,5 m³/s maar mogelijk nog verder; de aanwezige pompcapaciteit is 22 m³/s waardoor nog meer levering in de toekomst in principe mogelijk is). De watervraag voor de regio IJssel-Vecht Delta, waar Twentekanalen binnenvalt, is in S1+ verhoogd naar 150% t.o.v. de vraag in LHM, zodat wateraanvoer en tekort van IJssel-Vechtdelta beter overeenkomt tussen QWAST en LHM. In een van de varianten (verderop in dit hoofdstuk beschreven) is een verdere verhoging van de vraag met 10% opgenomen.

Peilbeheer grote meren

QWAST bepaalt met behulp van een Model Predictive Control techniek of en wanneer peilopzet nodig is om zo goed mogelijk te voldoen aan de wensen voor zoetwatervoorziening in het hele zomerhalfjaar. De 'wensen' kunnen door de gebruiker worden opgegeven in de vorm van onder andere streefpeilen, maximale uitzakking per gebruikerstype, en vragen door verschillende gebruikers. Hiermee kan tevens een prioritering worden opgelegd. Om te bepalen wat de optimale waterverdeling is, gebruikt het model informatie over het hele zomerhalfjaar. Hiermee wordt dus aangenomen dat droogte perfect voorspeld kan worden.

De instellingen voor de meren voor *huidig peilbeheer* zijn weergegeven in Tabel 6.2 en Figuur 6.2.

De maximale uitzakking van 10 cm ten behoeve van doorspoeling (laatste kolom) houdt in dat deze functie gekort wordt zodra het meerpeil verder uitzakt dan -0.30 m NAP. De andere functies worden pas gekort bij een meerpeil van -0.40 m NAP (of lager).

N.B. Het 'huidig' peilbeheer in QWAST volgt in september niet gegarandeerd het zomerstreefpeil, aangezien het model de ruimte is gegeven om indien nodig een peil te handhaven tussen zomerstreefpeil van -0,20m NAP en uitzakking naar -0,30 m NAP.

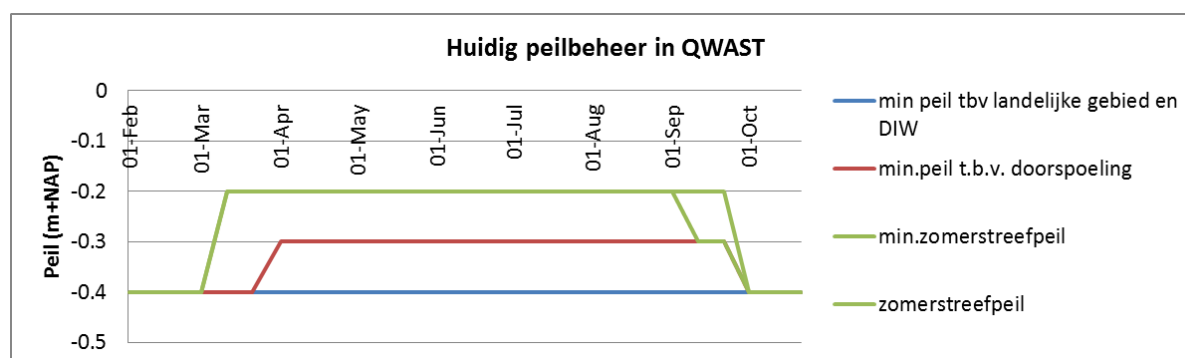
Met *flexibel peilbeheer* verandert de potentiële buffer (extra opzet indien nodig) in het zomerhalfjaar en de timing van de peiluitzakking aan het eind van het seizoen. In Tabel 6.3 en Figuur 6.3 zijn de instellingen van de meerpeilen weergegeven in de runs met flexibel peilbeheer.

Het belangrijkste verschil tussen flexibel peilbeheer en huidig peilbeheer is de gewenste opzet van 10 cm in het vroege voorjaar en direct daarna in principe weer laten uitzakken naar zomerstreefpeil (-0,10 m NAP), maar met de mogelijkheid om gedurende de rest van de zomer het peil nogmaals 10 cm op te zetten indien daar noodzaak toe bestaat vanuit de (te verwachten) watervraag (op basis van droogteverwachtingen).

Meer informatie over het ontwerp peilbesluit flexibel peilbeheer (Kollen, 2017) en de vertaling hiervan naar QWAST modelinvoer is opgenomen in Bijlage B.

Tabel 6.2 Instellingen meerpeilen in QWAST in de referentierun (huidig peilbeheer)

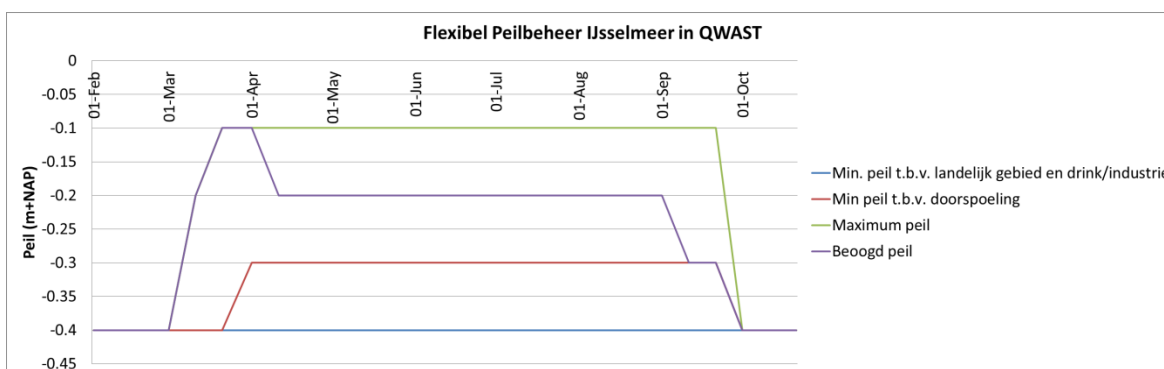
| | Streefpeil winter [m +NAP] | Streefpeil zomer [m +NAP] | Max opzet [cm] | Max uitzak t.b.v. DIW [cm] | Max uitzak t.b.v. landelijk gebied [cm] | Max uitzak t.b.v. doorspoeling [cm] |
|------------|----------------------------|---------------------------|----------------|----------------------------|---|-------------------------------------|
| IJsselmeer | -0.4 | -0.2 | 0 | 20 | 20 | 10 |
| Markermeer | -0.4 | -0.2 | 0 | 20 | 20 | 10 |
| Randmeren | -0.3 | -0.05 | 0 | 20 | 20 | 10 |



Figuur 6.2 Huidig Peilbeheer (IJsselmeer & Markermeer) zoals gemodelleerd in QWAST. Met 'min. peil' wordt bedoeld dat het peilbeheer meer prioriteit krijgt ten opzichte van andere 'gebruikers' naarmate het peil verder uitzakt. Met 'landelijk gebied' wordt bedoeld: beregening en peilbeheer van de regio's.

Tabel 6.3 Instellingen meerpeilen in QWAST voor de runs met flexibel peilbeheer (FP)

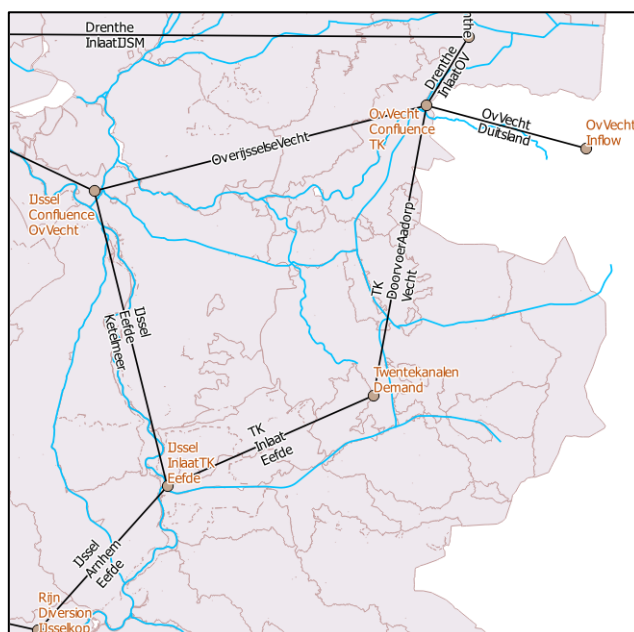
| | Streefpeil winter [m +NAP] | Streefpeil zomer [m +NAP] | Max opzet [cm] | Max uitzak t.b.v. DIW [cm] | Max uitzak t.b.v. landelijk gebied [cm] | Max uitzak t.b.v. doorspoeling [cm] |
|------------|----------------------------|---------------------------|----------------|----------------------------|---|-------------------------------------|
| IJsselmeer | -0.4 | -0.2 | 10 | 20 | 20 | 10 |
| Markermeer | -0.4 | -0.2 | 10 | 20 | 20 | 10 |
| Randmeren | -0.3 | -0.05 | 10 | 20 | 20 | 10 |



Figuur 6.3 Flexibel peilbeheer IJsselmeer zoals gemodelleerd in QWAST. Met 'min. peil' wordt bedoeld dat het peilbeheer meer prioriteit krijgt ten opzichte van andere 'gebruikers' naarmate het peil verder uitzakt. Met 'landelijk gebied' wordt bedoeld: beregening en peilbeheer van de regio's.

Twentekanalen prioriteit

De takken *TK_DoorvoerAadorp_Vecht* en *TK_Inlaat_Eefde* (Figuur 6.4) krijgen in deze variant een hogere prioriteit. Dit houdt in dat de Twentekanalen prioriteit krijgen boven het peilbeheer van de meren, en dat dus altijd geleverd wordt (mits er water in de IJssel beschikbaar is), vóór het afregelen van de meerpeilen. In de referentierun is dit andersom: eerst worden, per prioriteit, de gewenste meerpeilen gerealiseerd voordat de vraag van Twentekanalen geleverd wordt.



Figuur 6.4 Schematisatie QWAST-takken en -knoten rond de Twentekanalen

Vergrote watervraag

De watervraag van de regio's is in principe gelijkgesteld aan de watervraag uit LHM, en bestaat uit het totaal van de volgende districtswatervragen: industrie, peilhandhaving, doorspoeling en beregening. In QWAST heeft de gebruiker de optie om deze vraag per regio aan te passen door een percentage op te geven. In S1+ was de vraag van de IJssel-Vechtdelta al opgehoogd met 50%.

Voor de variant waarin Twentekanalen prioriteit krijgt, is tevens de vraag in IJssel-Vechtdelta verhoogd met 10% ten opzichte van S1+, overeenkomstig de groei in de waterbehoefte die de regio verwacht (zie ook Ter Maat., 2014).

6.2.3 Indicatoren

Resultaten zijn vertaald in mate en frequentie van peiluitzakking en watertekorten. De mate van peiluitzakking is berekend als het verschil tussen maximaal en minimaal peil in het zomerhalfjaar. Daarnaast is voor specifieke jaren gekeken naar:

- Peilverloop IJsselmeer;
- Verloop watervraag en -tekort IJsselmeerregio's;
- Hoeveelheid (m^3/s) inlaat Twentekanalen bij Eefde (voor de varianten waarbij dit aangepast is).

De peiluitzakking in QWAST is berekend over de periode mei t/m augustus. Ten opzicht van een volledig zomerhalfjaar worden april en september dus niet meegenomen. April wordt niet meegenomen, omdat daarin – althans bij de variant flexibel peilbeheer - de initiële opzet van 10 cm zit die in de meeste jaren niet nodig is voor zoetwatervoorziening. Wel meenemen zou ertoe leiden dat in de variant flexibel peilbeheer altijd 10 cm meer uitzakking wordt berekend, ook in normale en natte jaren. September wordt niet meegenomen omdat uitzakken aan het eind van het zomerseizoen (1 sept – 1 okt) twee doelen kan dienen: ten behoeve van winterpeil ofwel ten behoeve van waterallocatie. Als september wel wordt meegenomen in de berekening, kan het gebeuren dat uitzakking in september ten onrechte wordt toegekend aan droogtebestrijding. Met de gekozen aanpak, dus door april en september niet mee te nemen, wordt in sommige jaren de maximale peiluitzakking ten behoeve van zoetwatervoorziening mogelijk iets onderschat.

De watervragen en -tekorten betreffen het regionale oppervlaktewater in de peilbeheerste en/of beregende gebieden. Watervraag is de totale vraag van het oppervlaktewatersysteem in een regio, na levering vanuit neerslag, kwel, interne uitwisseling van oppervlaktewater binnen een district. De vraag betreft het water dat nodig is voor beregening, doorspoeling en peilbeheer. Vragen aan grondwater (voor beregening, drinkwaterbereiding, etc.) worden in het model altijd geleverd en zijn daarom niet in de overzichten opgenomen. Boezems (Friese Boezem, Schermerboezem) worden tot het regionale systeem gerekend, maar grote kanalen en rivieren (Noordzeekanaal en IJssel) horen bij het hoofdwatersysteem.

6.2.4 Verificatie QWAST

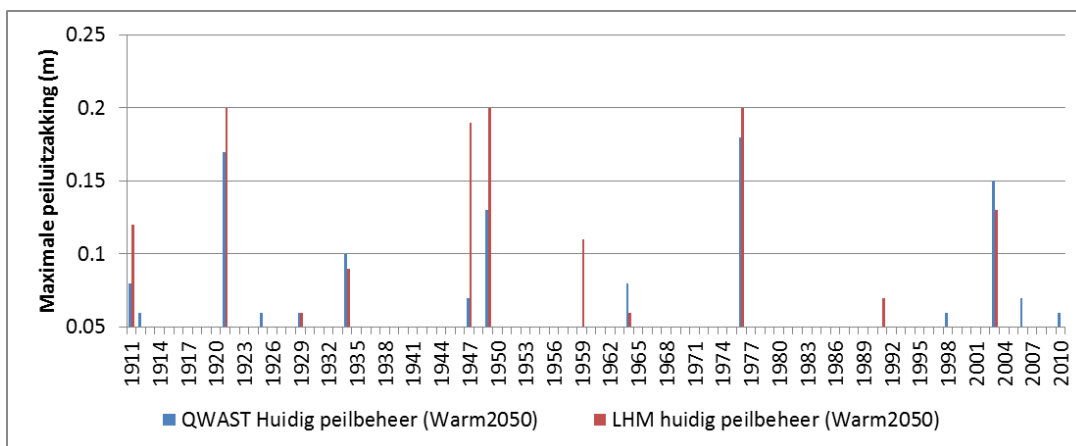
Voor de toepassing in deze hotspotanalyse is bij aanvang van de analyse in meer detail geverifieerd in hoeverre QWAST (run: Warm2050_S1), overeenkomt met LHM resultaten, (run: Warm2050S1). In beide runs is het huidig peilbeheer gemodelleerd.

Voor de verificatie is ten eerste de maximale peiluitzakking over het zomerhalfjaar tussen beide runs vergeleken voor de 100-jarige reeks, zie Figuur 6.5.

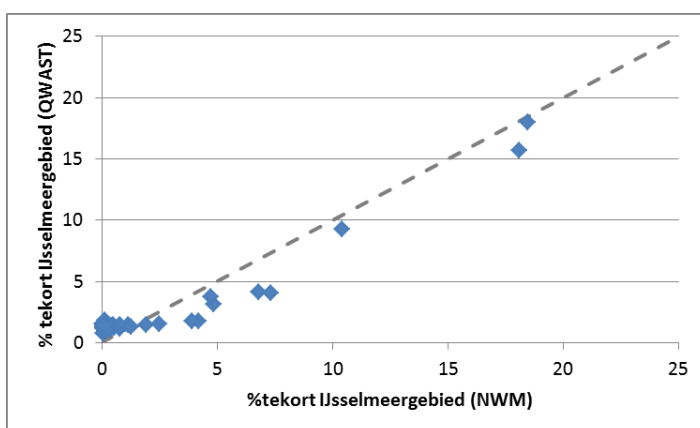
Ten tweede zijn de procentuele tekorten voor de regio IJsselmeergebied van beide runs tegen elkaar uitgezet in Figuur 6.6. Uit de verificatie blijkt het volgende:

- Peiluitzakking van meer dan 10 cm komt zowel in LHM als in QWAST in dezelfde jaren voor. Uitzondering hierop is het jaar 1959, waarin het peil volgens LHM 5 cm verder uitzakt. De mate van uitzakken is meestal groter in LHM, met uitzondering van het jaar 2003.
- Het percentage tekort in QWAST vertoont hetzelfde patroon als dat van LHM. Over het algemeen berekent QWAST iets grotere tekorten dan LHM.
- Er is tussen de jaren realistische variatie in de effecten van droogte op peilen en tekorten.

We concluderen uit de verificatie dat QWAST geschikt is voor het op hoofdlijnen verkennen van (veranderingen in) waterverdelingsregels, watervraag en prioritering voor het IJsselmeergebied.



Figuur 6.5 Maximale peiluitzakking IJsselmeerpeil: LHM (hele zomerhalfjaar) versus QWAST (mei t/m augustus). NB. Uitzakking < 0.05 m kan het gevolg zijn van modelonzekerheid en wordt daarom niet meegenomen in deze vergelijking.



Figuur 6.6 Scatterplot percentage watertekort IJsselmeergebied: NWM versus QWAST voor Warm2050

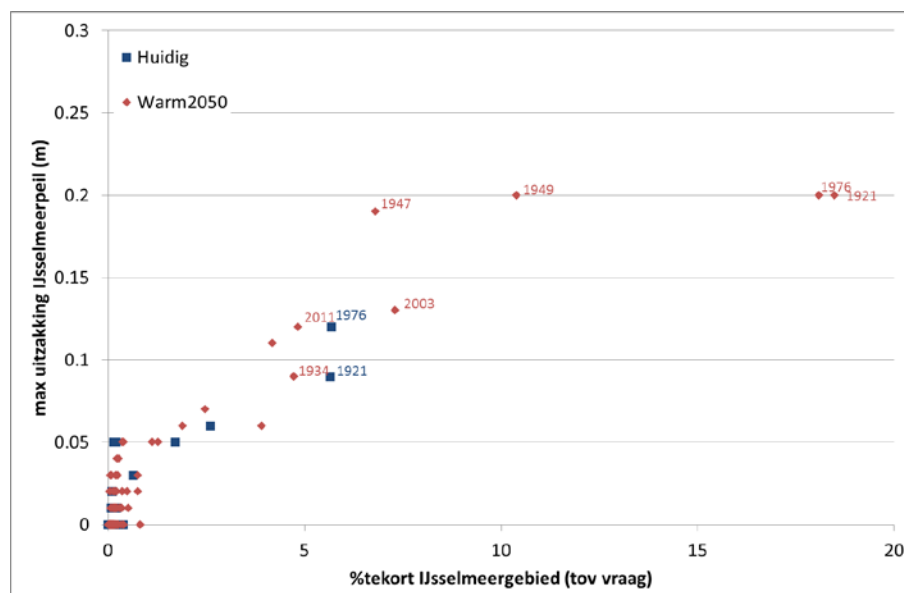
6.3 Resultaten

6.3.1 Huidig peilbeheer: peiluitzakking en watertekorten op basis van LHM

Voor het IJsselmeergebied hebben we eerder berekend dat de frequentie van peiluitzakking (>5 cm) in het scenario Warm2050 ten opzichte van Ref2015 toeneemt van eens in de 33 jaar naar grofweg eens in de 10 jaar (Mens et al., 2018). In het Warm2050 scenario zakt het peil bij ongewijzigd peilbeheer in 4 van de 100 jaar (dus eens in de 25 jaar) zelfs uit tot het minimum peil van -0,40 m NAP.

In Figuur 6.7 is de maximale peiluitzakking IJsselmeer uitgezet tegen het procentuele tekort (t.o.v. de vraag) van het IJsselmeergebied, zoals berekend met LHM. Uit de berekeningsresultaten blijkt dat tekorten gaan optreden zodra het peil meer dan 10 cm uitzakt. Dit is het gevolg van prioritering die in het model ingesteld is. Bij uitzakking van 5 cm (gelijk aan peil -0,25 m NAP) worden alleen doorspoelvragen met lage prioriteit gekort (bv doorspoeling Oranjesluizen). Bij uitzakking van 10 cm (-0,30 m NAP) worden regionale watervragers categorie 4 gekort, waardoor tekorten langzaam gaan oplopen. Bij uitzakking van 20 cm (-0,40 m NAP) worden alle gebruikers gekort. Het IJsselmeerpeil kan dan alleen nog maar uitzakken als gevolg van verdamping.

In het huidige klimaat wordt er grofweg eens in de 10 jaar gebruik gemaakt van (een deel van) de buffer in het IJsselmeer, en die buffer is grotendeels toereikend voor het leveren van de watervraag. Met sterke klimaatverandering (Warm2050) verandert dit beeld. Er wordt dan grofweg elke 3 jaar gebruik gemaakt van (een deel van) de buffer in het IJsselmeer. In 7 van de 100 jaar zakt het peil meer dan 10 cm uit en treden ook tekorten op (1934 is hierbij meegerekend, hoewel de uitzakking net iets minder is dan 10 cm). Hiervan zijn 5 jaar significant in termen van zowel uitzakking (>10 cm) als tekort (>5%).



Figuur 6.7 Maximale uitzakking IJsselmeerpeil in het zomerhalfjaar uitgezet tegen %tekort IJsselmeergebied op basis van LHM-run S1 (huidig peilbeheer); elk puntje is een jaar uit de 100-jarige reeks (Bron; Mens et al., 2018)

6.3.2 Effect van flexibel peilbeheer op buffergebruik en watertekorten op basis van QWAST

Bij flexibel peilbeheer (FP) wordt het peil 10 cm extra opgezet als het nodig is (tot niveau -0,10 m NAP).

Omdat QWAST een half jaar vooruit kan kijken, is het zeer goed in staat om te bepalen of het 'nodig' is, d.w.z. anticiperend het peil op te zetten rekening houdend met de droogte(verwachting). Het representeert een ideaalsituatie; in de praktijk kan minder ver vooruit gekeken worden.

Echter, het belangrijkste effect van FP ten opzichte van huidig peilbeheer (HP) is dat de volledige buffer van 20 cm benut kan worden zonder dat gebruikers gekort worden. Voorwaarde is wel dat de opzet naar -0,10 m NAP tijdig gehaald kan worden. Met FP treedt de prioritering tussen gebruikers in werking bij -0,30 m NAP (dus na 0,2 m uitzakking). Bij HP treedt begint de korting van de meeste gebruikers ook bij -0,30 m NAP (zie paragraaf 6.3.1), maar zonder die extra opzet is dit al na 0,10 m uitzakking. Het is dus te verwachten dat met implementatie van FP de buffer meer benut wordt en dat tekorten afnemen. We laten hierna eerst de resultaten zien voor het voorbeeldjaar 1976 (zeer droog) en voorbeeldjaar 2003 (droog) onder het Warm2050 scenario. Daarna gaan we in op de statistieken op basis van de hele 100-jarige reeks.

In droog jaar 2003 zorgt flexibel peilbeheer ervoor dat in de zomer het peil verder wordt opgezet, waardoor tekorten vrijwel geheel worden teruggedrongen (Figuur 6.8). Ook in zeer droog jaar 1976 (Figuur 6.9) wordt het peil opgezet tot -0,10 m NAP en worden tekorten flink teruggedrongen.

De resultaten voor de hele 100-jarige reeks zijn weergegeven in Figuur 6.10 en Figuur 6.11. In 7 van de 100 jaar is een duidelijk positief effect te zien: de peiluitzakking is groter en het %tekort (t.o.v. watervraag) kleiner dan met huidig peilbeheer. Het % tekort voor het IJsselmeergebied wordt significant (meer dan 2 procentpunt) gereduceerd in 5 van de 100 jaar. Het jaar 1921 is een uitzondering: hier worden tekorten zelfs iets groter. In dit jaar valt de droogte in het begin van het seizoen samen met lage IJsselafvoeren, waardoor het langer duurt voordat het zomerpeil is opgezet. Daarbij is peilopzet Markermeer bij FP iets anders gemodelleerd dan bij HP, wat in dit specifieke jaar kan doorwerken in de tekorten.

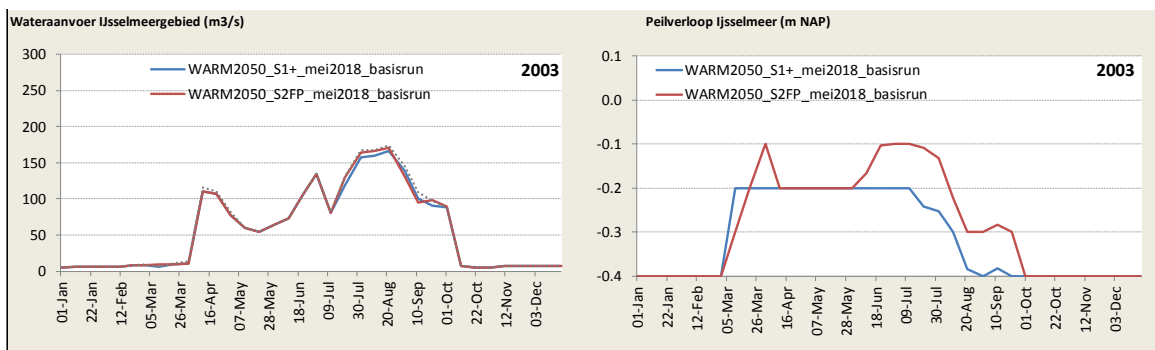
Het valt verder op dat in de 7 jaren waarin extra opzet nodig was, twee weken tot een maand (zelfs bijna 2 maanden in 1976; Figuur 6.9) nodig was om deze opzet te bereiken. Dit laat zien dat het optimaal benutten van flexibel peilbeheer een goed voorspelsysteem vraagt.

In grofweg 7 van de 100 jaar was er niet voldoende water om de initiële opzet (in april) te bereiken. Dit heeft te maken met een lage IJsselafvoer in maart en zijn niet per definitie droge jaren (in slechts 2 van deze 7 jaren treden later in het seizoen tekorten op). Nadere analyse hiervan viel buiten de scope van deze rapportage.

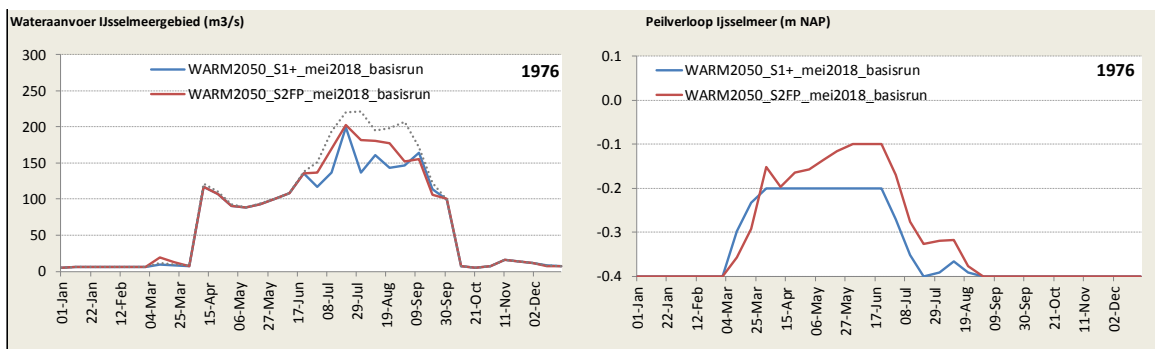
We merken op dat het werkelijke buffergebruik groter kan zijn dan de hier berekende maximale peiluitzakking, doordat gedurende het zomerseizoen het peil uitzakt en weer wordt opgezet. Bij flexibel peilbeheer is de verwachting dat de buffer in dit opzicht vaker benut wordt (en dat er dus minder water wordt geloosd naar de Waddenzee). Nadere analyse is echter nodig om deze hypothese verder te onderbouwen.

Samenvattend blijkt het volgende uit de analyses:

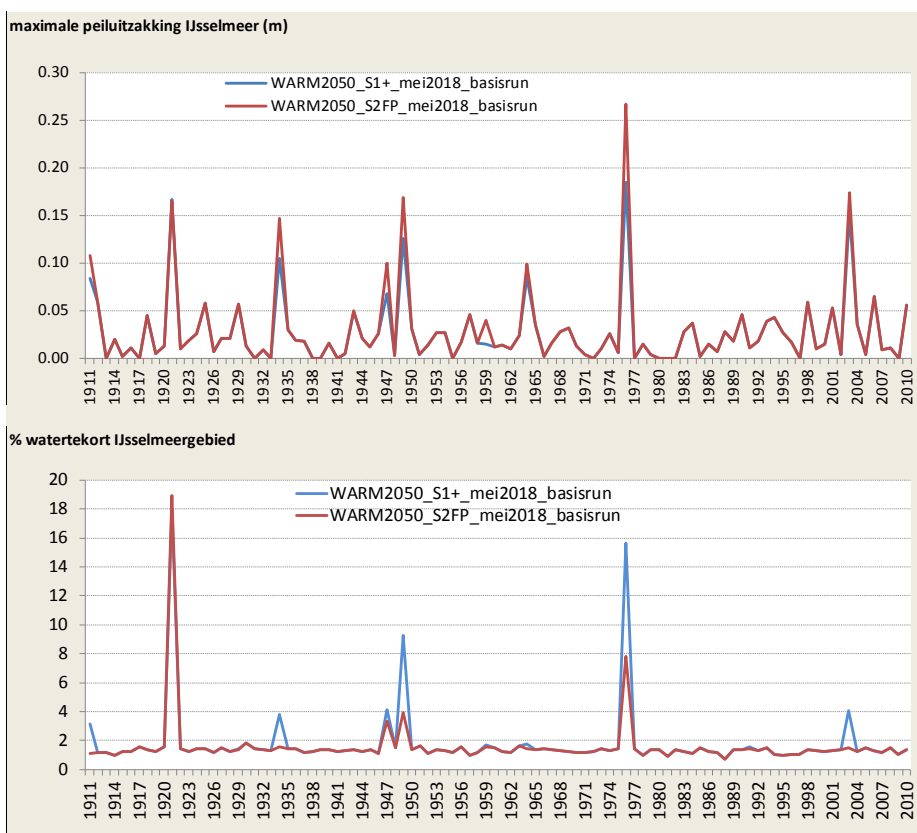
- Met toepassing van flexibel peilbeheer in het IJsselmeer wordt de bufferruimte ten opzichte van huidig peilbeheer vergroot. Hierdoor kan de buffer door meer watervragers langer benut worden, maar alleen als het peil anticiperend opgezet kan worden naar -0,10 m NAP. Dit vraagt voldoende aanvoer uit de IJssel én een goed voorspellingssysteem.
- Met flexibel peilbeheer wordt de bufferschijf ongeveer even vaak gebruikt, en worden de tekorten in 5 van de 100 jaar teruggedrongen met 2 procentpunt of meer.



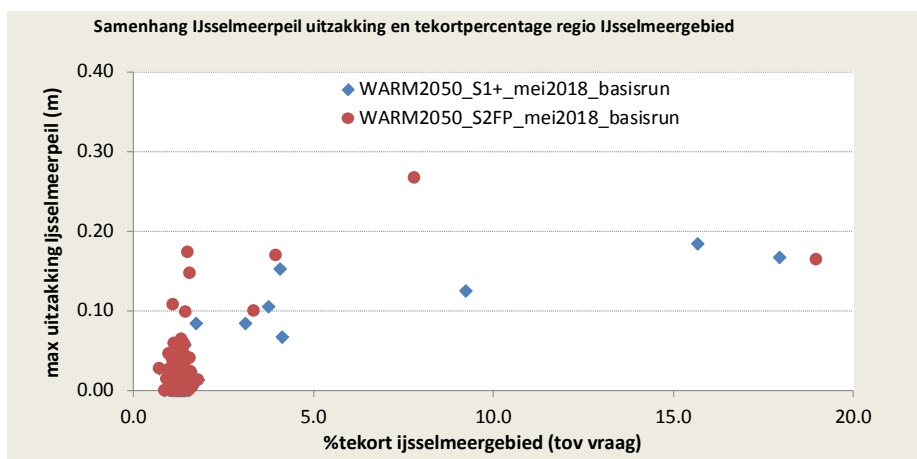
Figuur 6.8 Watervraag en -tekort voor IJsselmeergebied (boven) en peilverloop IJsselmeer (onder) met huidig peilbeheer (blauw) en flexibel peilbeheer (rood) voor een droog jaar 2003 in scenario Warm2050



Figuur 6.9 Watervraag en -tekort voor IJsselmeergebied (boven) en peilverloop IJsselmeer (onder) met huidig peilbeheer (blauw) en flexibel peilbeheer (rood) voor een extreem droog jaar 1976 in scenario Warm2050



Figuur 6.10 Maximale peiluitzakking IJsselmeer (boven) en watertekort voor IJsselmeergebied (onder) over het zomerhalfjaar met huidig peilbeheer (blauw) en flexibel peilbeheer (rood) van 1911-2010 in scenario Warm2050



Figuur 6.11 Samenhang maximale peiluitzakking IJsselmeer en watertekort voor IJsselmeergebied over het zomerhalfjaar met huidig peilbeheer (blauw) en flexibel peilbeheer (rood) van 1911-2010 in scenario Warm2050

6.3.3 Hogere prioriteit TK en hogere watervraag IJssel-Vechtdelta

In deze variant krijgen Twentekanalen prioriteit boven het peilbeheer van de meren en is de watervraag van de IJssel-Vechtdelta verhoogd met 10%.

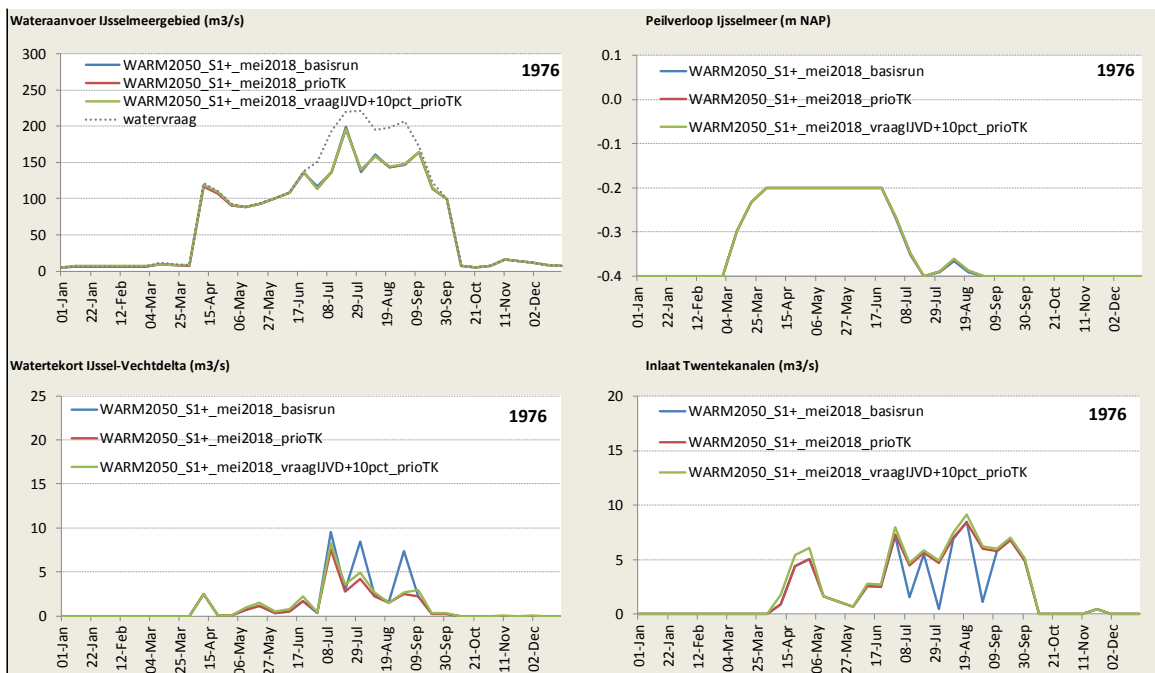
Prioriteit betekent dat de gevraagde hoeveelheid water altijd geleverd wordt, mits er water in de IJssel beschikbaar is (dat is vrijwel altijd het geval).

Figuur 6.12 en Figuur 6.13 laten de resultaten zien voor de voorbeeldjaren 1976 en 2003. Hieruit blijkt dat het peilverloop en de tekorten van het IJsselmeergebied niet of nauwelijks veranderen als Twentekanalen prioriteit krijgt, ook niet als tegelijkertijd de vraag van IJssel-Vechtdelta 10% verhoogd wordt. Daarentegen worden de tekorten in de IJssel-Vechtdelta in 1976 gereduceerd, doordat er meer water kan worden ingelaten via Twentekanalen. Het effect van de 10% verhoogde watervraag is zeer klein ten opzichte van het effect van de prioritering. In 2003 wordt er in de variant met prioritering nauwelijks extra water ingelaten via de Twentekanalen, waardoor de tekorten van de IJssel-Vechtdelta nauwelijks teruggedrongen worden.

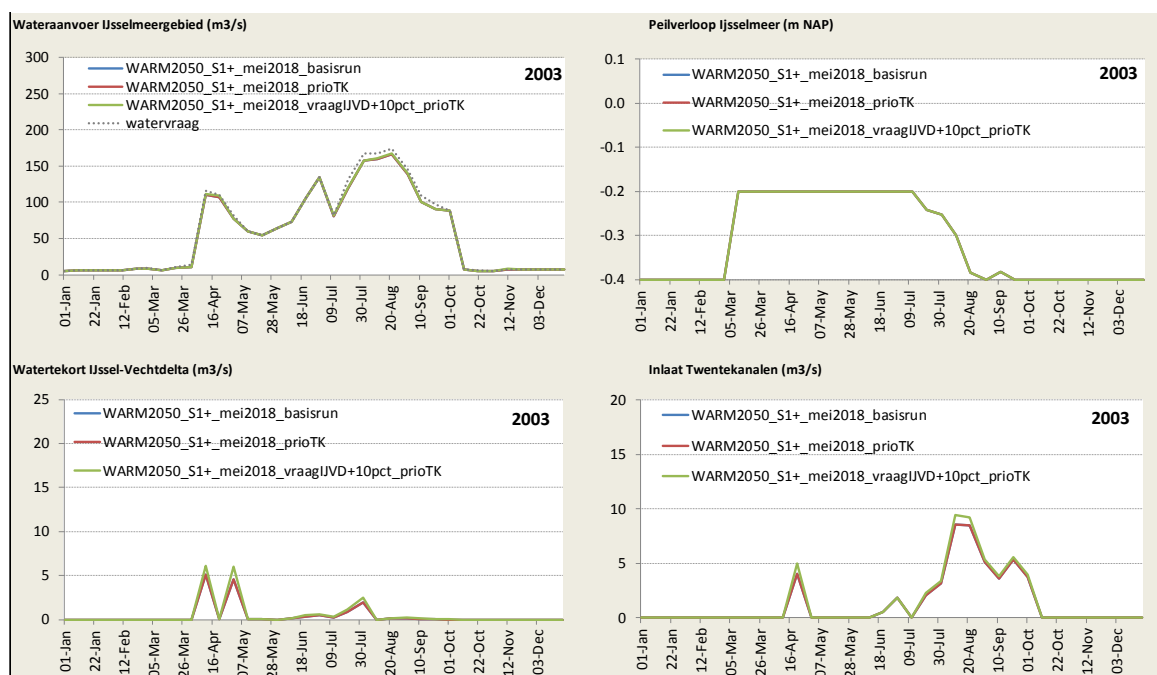
De 100-jarige reeks van watertekorten IJssel-Vechtdelta is weergegeven in Figuur 6.14. Hieruit blijkt dat de prioritering alleen een significant effect heeft in twee extreem droge jaren: 1921 en 1976. Als gevolg hiervan nemen de tekorten in de andere deelgebieden binnen het IJsselmeergebied toe (van ~18% naar ~19% in 1921; van 16,1% naar 16,4% in 1976). Het netto effect op de tekorten in het hele IJsselmeergebied is verwaarloosbaar klein.

Samenvattend blijkt uit de analyse het volgende:

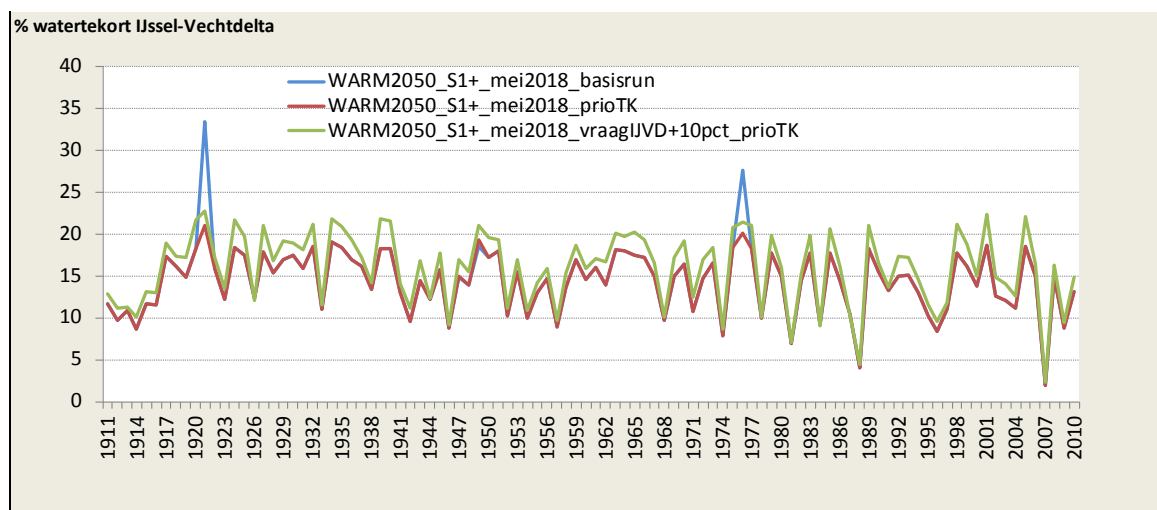
- Het prioriteren van de Twentekanalen reduceert de watertekorten in de IJssel-Vechtdelta in zeer droge jaren, ook bij hogere watervraag van dit gebied;
- Voor peilverloop IJsselmeer heeft dit geen of nauwelijks gevolgen;
- Het totale watertekort van de rest van het IJsselmeergebied (exclusief IJssel-Vechtdelta) neemt hierdoor wel toe.



Figuur 6.12 Effect van prioritering Twentekanalen en verhoogde watervraag IJssel-Vechtdelta op: wateraanvoer IJsselmeergebied (linksboven), Peilverloop IJsselmeer (rechtsboven), inlaat Twentekanalen (rechtsonder) en watertekort IJssel-Vechtdelta (linksonder), voor het Warm2050 scenario en voorbeeldjaar 1976



Figuur 6.13 Effect van prioritering Twentekanalen en verhoogde watervraag IJssel-Vechtdelta op: wateraanvoer IJsselmeergebied (linksboven), Peilverloop IJsselmeer (rechtsboven), inlaat Twentekanalen (rechtsonder) en watertekort IJssel-Vechtdelta (linksonder), voor het Warm2050 scenario en voorbeeldjaar 2003



Figuur 6.14 Effect van prioritering Twentekanalen en verhoogde watervraag IJssel-Vechtdelta op watertekort IJssel-Vechtdelta (%), voor het Warm2050 scenario. NB. blauwe lijn ligt onder de rode lijn

6.4 Conclusies en keuzes

Uit de analyses met het Nationaal Water Model blijkt het volgende:

Met huidig peilbeheer in Warm2050 scenario is er eens in de 33 jaar een bufferschijf van 20 cm nodig en treden watertekorten op in het IJsselmeergebied. In 5 van de 100 jaar (dus eens in de 20 jaar) is de uitzakking meer dan 10 cm en zijn de tekorten groter dan 5% van de watervraag.

Uit de analyses met QWAST blijkt het volgende:

- Met toepassing van flexibel peilbeheer in het IJsselmeer wordt de bufferruimte ten opzichte van huidig peilbeheer vergroot. Hierdoor kan de buffer door meer watervragers langer benut worden, maar alleen als het peil anticiperend opgezet kan worden naar -0,10 m NAP. Dit vraagt voldoende aanvoer uit de IJssel én een goed voorspellingssysteem.
- Met flexibel peilbeheer wordt de bufferschijf ongeveer even vaak gebruikt, maar worden de tekorten in 5 van de 100 jaar teruggedrongen met 2 procentpunt of meer.
- Hogere prioriteit inlaat Twentekanalen (bij Eefde) zorgt er in zeer droge jaren voor dat het watertekort in de IJssel-Vechtdelta vermindert, ook bij 10% hogere watervraag die voorzien wordt vanuit Twentekanalen. Voor de buffer IJsselmeer heeft dit geen of nauwelijks gevolgen. Tekorten in de andere deelgebieden van het IJsselmeergebied nemen hierdoor wel toe.

In gesprek met de regio zijn de volgende keuzes geformuleerd:

- Er is bij sterke klimaatverandering (Warm2050) eens in de 20 jaar een regionale afweging nodig tussen gebieden en functies die voor hun wateraanvoer afhankelijk zijn van het IJsselmeer.
- Vergroten van de bufferschijf door flexibel peilopzet kan in veel gevallen de tekorten in het IJsselmeergebied reduceren ten opzichte van de situatie met huidig peilbeheer doordat er meer water uit het IJsselmeer/Markermeer onttrokken kan worden tijdens droge periodes.
- De IJssel-Vechtdelta kan in zeer droge jaren baat hebben bij het prioriteren van de inlaat Twentekanalen, zonder grote gevolgen voor de buffer van het IJsselmeer.

6.5 Literatuur

Kollen, J. (2017) Ontwerp Peilbesluit IJsselmeergebied. SWECO rapport SWNL-0186380, revisie D1.0 in opdracht van Rijkswaterstaat Midden-Nederland

Mens, M., G. Prinsen, J. Hunink, D. Bachmann, E. Snippen, J. Delsman (2018) Knelpuntenanalyse voor het Deltaprogramma Zoetwater 2017: analyse van de 100-jarige NWM-reeks. Deltares rapport 11202240-000-ZWS-0001. Mei 2018.

Snippen, E., M. Mens, J. Hunink, J. Ter Maat, (2016). Basisprognoses Zoetwater - Controle NWM-instrumentarium in het licht van de Knelpuntenanalyse Zoetwater. Deltares rapport 1230058-001

7 Hotspot Maas

7.1 Afbakening en hotspotvragen

In de hotspotanalyse Maas is geïnteriseerd welke toekomstige ontwikkelingen in het buitenland plaatsvinden, en welke invloed deze mogelijk hebben op de afvoer van de Maas. Het doel was om enerzijds een groslijst te maken van mogelijke ontwikkelingen met een zo breed mogelijk blik, en anderzijds een eerste schifting te maken geredeneerd vanuit relevantie voor zoetwatervoorziening. Het gaat naast ontwikkelingen van fysische aard, bijvoorbeeld hydrologische veranderingen als gevolg van klimaatverandering, vooral om socio-economische ontwikkelingen, bijvoorbeeld verandering van energiebeleid. Effecten op waterkwaliteit en watertemperatuur worden, indien van toepassing, ook meegenomen. Het was nadrukkelijk niet de bedoeling om uitgebreid literatuuronderzoek te doen. Ook viel modelsimulatie buiten de scope van deze hotspotanalyse.

7.2 Aanpak

Als eerste stap is een brainstormsessie gehouden om alle mogelijke ontwikkelingen te verzamelen die invloed kunnen hebben op het Nederlandse waterbeheer, los van de vraag of deze ontwikkelingen daadwerkelijk plaatsvinden of gesignaleerd zijn. Tijdens de brainstormsessie zijn de volgende drie vragen gesteld:

- 1 Welke ontwikkelingen in het Maasstroomgebied spelen of zijn denkbaar?.
- 2 Welke ontwikkelingen zijn het belangrijkste om nader te onderzoeken? Met andere woorden: welke ontwikkelingen hebben het grootste effect op waterbeheer in het Maasstroomgebied, wie zijn de spelers rondom deze ontwikkelingen en waar spelen ze?
- 3 Wat zijn relevante informatiebronnen voor de genoemde ontwikkelingen met hoge prioriteit voor nader onderzoek?

Aanvullend op en geïnspireerd door de brainstormsessie is een overzicht gemaakt van relevante studies, waarin bovenstroomse ontwikkelingen onderzocht zijn. Tot slot is een prioritering gemaakt op basis van expertbeoordeling. Hierbij is aan experts gevraagd om de urgentie aan te geven op basis van de volgende criteria:

- Wat is de kans dat de ontwikkeling gaat plaatsvinden (klein, gemiddeld, groot)?
- Wat is de impact op de Maasafvoer (groot, gemiddeld, klein)?

De brainstormsessie heeft plaatsgevonden tijdens de werksessie zoetwater op 27 juni 2017 in Utrecht. De prioritering is in eerste instantie gemaakt met experts aanwezig tijdens de regionale waterbeschikbaarheid op 31 oktober 2017 in Eindhoven, en later aangevuld met inzichten uit literatuur.

7.3 Resultaten

Tabel 7.1 geeft een overzicht van alle mogelijke ontwikkelingen voortgekomen uit de brainstorm (W – Werksessie) en uit literatuur (L), gesorteerd naar hoogste score (kans * impact). Voor sommige ontwikkelingen (onderaan de lijst) bleek het niet mogelijk om een goede inschatting te doen van kans en impact.

Uit de brainstorm sessie kwamen de volgende categorieën ontwikkelingen naar voren:

- De Maas wordt belangrijker voor de scheepvaart, dit uit zich nu al in de volgende infrastructuurprojecten:
 - openen extra sluis Ternaaien
 - start nieuwbouw van het Canal Seine-Nord Europe in het najaar 2017
- Verandering stuwmeerbeheer in Duitsland
- Verandering van waterbehoefte en -gebruik in Vlaanderen,
- Verandering energiebeleid
 - sluiting kerncentrale Thiange
 - decentralisatie van de energieproductie.

Het literatuuronderzoek voegt hier nog de volgende ontwikkelingen aan toe:

- Waterbeheer Albertkanaal;
- Einde bruinkoolmijnbouw in Nordrhein-Westfalen.

De volgende paragrafen geven extra toelichting op de belangrijkste ontwikkelingen.

Tabel 7.1 Lijst van mogelijk relevante ontwikkelingen op basis van brainstormsessie en literatuuroverzicht, met indicatie van kans van optreden (1- kleine kans; 3 - grote kans), impact (1- lage impact; 3 – hoge impact), en 'score' (=kans * impact)

| Bron | Ontwikkeling | Kans (K) | Impact (I) | Score (K*I) |
|------|---|----------|------------|-------------|
| W | de Maasroute wordt belangrijker voor scheepvaart | 3 | 3 | 9 |
| L | bouw van pomp-hydropower-installaties Albertkanaal | 3 | 3 | 9 |
| W | Stijgend waterbehoefte Vlaanderen beneden Albertkanaal | 2 | 3 | 6 |
| W | andere scheepvaartbelasting door Rijn-Seine-verbinding? | 3 | 2 | 6 |
| L | Grootschalige grondwaterspiegelstijging na beëindigen van de mijnbouw in Duitsland | 3 | 2 | 6 |
| L | Reductie van de afvoer in de Roer na beëindigen van de mijnbouw in Duitsland | 3 | 2 | 6 |
| L | Beheer stuwmeren Roer | 3 | 2 | 6 |
| W | verharding stroomgebied, urbanisatie | 2 | 2 | 4 |
| L | Nieuwe waterkrachtcentrales | 2 | 2 | 4 |
| L | Watervraag industrie | 2 | 2 | 4 |
| W | sluiting kerncentrale Thiange (hoe verder met energie?) | 3 | 1 | 3 |
| W | Temporisering bruinkoolwinning | 3 | 1 | 3 |
| W | Maasverdrag wordt opgezegd, nieuw verdrag (trilateraal) | 1 | 3 | 3 |
| L | Koelwater voor bruinkoolenergiecentrale Weisweiler | 3 | 1 | 3 |
| L | Aardbevingen | 3 | 1 | 3 |
| W | sluiting industrie langs de Roer | 1 | 2 | 2 |
| W | verandering van de landbouwpraktijk | 2 | 1 | 2 |
| W | recreatie en natuur vragen meer water (Maasplassen, Grensmaas) | 2 | 1 | 2 |
| W | meer industrie in Frankrijk en Wallonië | 1 | 2 | 2 |
| W | beperken risico's bruinrot (aardappelziekte) in Brabantse kanalen | 2 | 1 | 2 |
| W | bouw RWZI's en riool in België | 2 | 1 | 2 |
| W | zuivering en hergebruik (RWZI): minder grondwateronttrekkingen, dus minder water naar de Maas | 2 | 1 | 2 |
| W | Maas als bron van drinkwater --> eisen waterkwaliteit | 2 | 1 | 2 |
| W | afkoppelen dakwater en bergen, gescheiden rioolstelsel | 2 | 1 | 2 |
| W | vervanging stuwen in Frankrijk --> meer fluctuatie (nu: 1 keer per maand) | 2 | 1 | 2 |
| L | Mobilisatie van gecontamineerd sediment | 1 | 2 | 2 |
| W | infiltratiecapaciteit van de bodem vergroten | | | |
| W | sponswerking-herstel (effekt grondwater op afvoer bij droogte) | 1 | 1 | 1 |
| W | energiebeleid per land: kool, kernenergie, waterkracht (ook samenhangend te bekijken) | 1 | 1 | 1 |
| W | effect (gesloten) mijnen in Nederland | 1 | 1 | 1 |
| W | vistrappen in Frankrijk | 1 | 1 | 1 |
| W | klimaatverandering, socio-economische ontwikkelingen, beleid | | | |
| W | relatie stuwmeren Duitsland (Eifel) | | | |
| W | vierde sluis Ternaaien | | | |
| W | aanpassing beheer stuwmeren (Wallonië, Duitsland) | | | |
| W | toename fruitteelt in stroopgebied stroomopwaards (--> variable watervraag) | | | |
| W | meer onttrekkingen landbouw (Frankrijk, Wallonië), intensivering | | | |
| W | grondwaterstijging door stijgend mijnwater Limburg (waterkwaliteit) | | | |
| W | DMZ --> water vasthouden --> minder afvoer | | | |
| W | watergebruik belgische kanalen in toekomst (watertekorten in België) | | | |

7.3.1 Ontwikkelingen in de scheepvaart

De Maasroute is een van de belangrijkste scheepvaartverbindingen binnen Europa. De route die vrachtschepen varen, gaat deels over de Maas en deels over het Julianakanaal en het Lateraalkanaal. Rijkswaterstaat doet meerdere investeringen om deze vaarroute geschikt te maken voor de zogenoemde tweebaksduwvaart. Dat zijn schepen van 190 m lang, 11,4 m breed en 3,5 m diep. Ook de in 2015 geopende nieuwe sluis Ternaaien (verbinding tussen de Maas en het Albertkanaal) draagt hieraan bij.

Scheepvaartontwikkelingen in Frankrijk en België kunnen ook bijdragen aan een toename van scheepvaart in de Maas. Met het project Seine-Schelde Vlaanderen (<http://www.seineschelde.be>), medegefinancierd door de Europese Unie, wordt de Schelde- en Rijndelta in Nederland en Duitsland verbonden met de regio's van Le Havre, Rouen en Parijs. Als onderdeel hiervan wordt in Frankrijk een nieuw kanaal gegraven: Canal Seine-Nord Europe (zie figuur). Dit zal ook een effect hebben op de scheepvaart op de Maas.

Meer scheepvaart betekent dat ook meer schuttingen nodig zijn om de schepen over de stuwen heen te leiden, en aan elke schutting is een verlies van water verbonden (schutverlies). Met name bij lage afvoeren is dit een belangrijke verliespost. Onder sterke klimaatverandering (Warm2050) zullen lage afvoeren ($Q < 50 \text{ m}^3/\text{s}$ bij Monsin) bijna jaarlijks voorkomen tegenover eens in de 4 jaar in het huidige klimaat. Dit is berekend op basis van de volgens KNMI'14 klimaatscenario's getransformeerde afvoerreeksen zoals afgeleid in Kramer en Mens (2016).

Mogelijke maatregelen om de schutverliezen te beperken of te compenseren zijn:

- Terugpompen van water; hiervoor zijn al installaties bij meerdere stuwen. Aan het pompen zijn kosten verbonden voor de waterbeheerder.
- Schutten alleen met volle sluisen. Aan deze maatregel zijn wachttijden en daarmee kosten voor de scheepvaart verbonden.
- Besparen van water door synchroon te schutten (siphon-effect in een tweelingsluis: twee sluisen wisselen het water met elkaar uit, waarvan een sluis afschut en de ander opschut) of opbergen in zijdelingse reservoirs (spaarsluis). Om deze besparingen te kunnen realiseren zijn investeringen nodig.



Figuur 7.1 Ligging van het nieuw te graven kanaal Seine-Nord (www.wikipedia.nl)

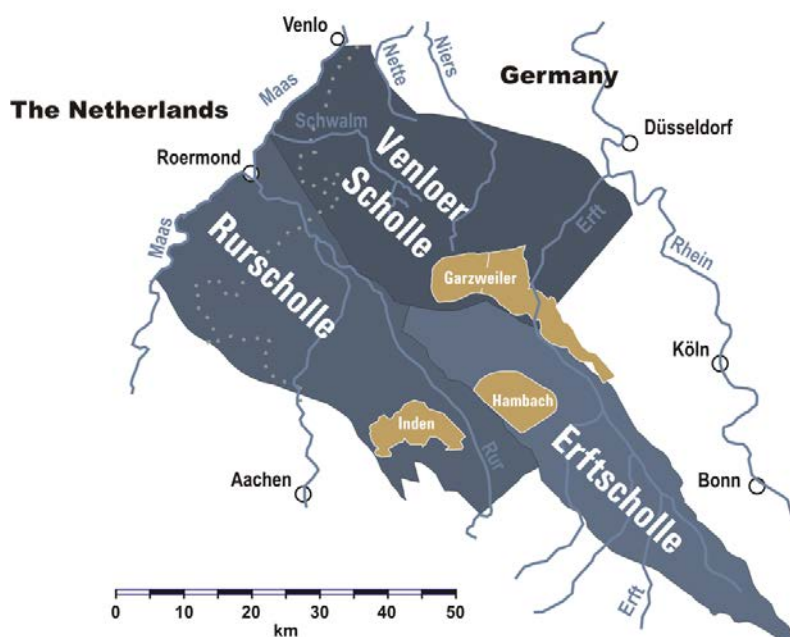
7.3.2 Sluiten van de bruinkoolmijnen in Duitsland

Rondom de bruinkoolwinning in de dagbouw mijn Inden zijn er vier verschillende ontwikkelingen:

- 1 De dagbouw mijn wordt gedraineerd, waardoor de grondwaterspiegel nu lager is dan zonder mijnbouw. Enerzijds wordt drainagewater via de Roer naar de Maas afgevoerd. Anderzijds stroomt water uit de Maas en de Roer via het grondwater in kleine hoeveelheden af richting dagbouw mijn. Na het sluiten van de mijn zal de grondwaterspiegel weer stijgen, en zal de Roerafvoer in eerste instantie afnemen;
- 2 De bruinkoolenergiecentrale Weisweiler wordt tegenwoordig gekoeld met drainagewater uit de dagbouw mijn Inden. Het gebruikte koelwater wordt geloosd in de Roer. Met de sluiting van energiecentrale Weisweiler zal deze afvoercomponent wegvallen. De inschatting is dat het effect hiervan op de Roerafvoer klein is in vergelijking met de effecten genoemd onder punt 1.
- 3 Een deel van het water voor het vullen van het restmeer (relict lake) van de dagbouw mijn Inden zal uit de Roer worden onttrokken. Dit betekent een reductie van de afvoer, het geplande patroon voorziet echter geen onttrekkingen gedurende laagwater. Dit zal bovendien een tijdelijke maatregel zijn, na een periode van ongeveer 40 jaar (Köngeter et al., 2007) zal het meer vol zijn en zal zich een evenwicht hebben ingesteld.

Ad 1. Het effect van het sluiten van de mijn op grondwaterstroming richting de Maas is in Becker & Klaunder (2007) gekwantificeerd op 14 Mm³/jaar (~0,4 m³/s). Het effect op de kleineredrainagesystemen en op de Roer is voor zover bekend niet onderzocht. Als gevolg van het stoppen met draineren zal de afvoer in de Roer afnemen met grofweg 1,6 m³/s (RWE, 2015). Tijdens laagwaterperiodes (orde grootte 10 m³/s Roerafvoer) kan dit significant zijn. De genoemde effecten hebben een tegengesteld effect, maar het is niet bekend of ze tegen elkaar opwegen. Het netto effect op de drainagesystemen in het stroomgebied van Roer en de Maas is echter niet bekend.

Het sluiten van de mijnen heeft niet alleen effect op de grondwaterstanden in de directe omgeving, maar reiken tot ver in Nederland. In de diepe watervoerende pakketten in de Venloslenk en de Roerdalslenk in Brabant zijn stijghoogtedalingen gemeten die zijn veroorzaakt door de bruinkoolwinning. Deze stijghoogteveranderingen hebben de diepe stromingsrichting omgedraaid waardoor de het voedingsgebied van watervoerende pakketten is veranderd (Stuurman *et al*, 2007). De grootste effecten treden op in de watervoerende pakket waar in Nederland geen drinkwater uit gewonnen wordt, maar ook in het watervoerende pakket waar in Nederland uit gewonnen wordt zijn stijghoogteverlagingen als gevolg van de bruinkoolwinning opgetreden.



Figuur 7.2 Ligging van de bruinkoolmijnen in het Roerstroombied (bron: Becker et al., 2007)

7.3.3 Stuwmeerbeheer in Duitsland

De Wasserverband Eifel-Rur ontwikkelt een nieuw beheersplan voor de stuwmeren in de Noord-Eifel. Hieruit volgt nog geen knelpunt, want de minimale afvoer uit de stuwmeren van 5 m³/s zal niet veranderen. In deze context wordt het beheer van stuwmeren in de Ardennen als kennishiaat geïdentificeerd. De stuwmeren zijn grotendeels in beheer van Service Publique de la Wallonie. Er is weinig contact met beheerders van de stuwmeren in de Ardennen. Het is aan te bevelen om te verkennen wat het effect is van het stuwmeerbeheer in de Ardennen op de afvoer van de Maas, vergelijkbaar met de studie die is uitgevoerd om het effect van de Roerafvoer op de Maasafvoer bij laagwater in beeld te brengen. Centrale onderzoeksvragen voor deze studie zouden kunnen zijn:

- Is in het stuwmeerbeheersplan een minimale afvoer voorzien? In welke gevallen wordt hiervan afgeweken?
- Hoe groot is het aandeel van de afvoer van de zijrivieren ten opzichte van de afvoer in de hoofdrivier gedurende laagwater?

7.3.4 Energietransitie

België, Frankrijk, Duitsland en Nederland gaan tegenwoordig een energietransitie in: in de toekomst zal minder elektriciteit uit fossiele bronnen of kernenergie worden opgewekt. De energieopwekking zal dan ook minder gecentraliseerd zijn. Grote centrales, bijvoorbeeld de kernenergiecentrale Thiangen in België en de bruinkoolenergiecentrale Weisweiler in Duitsland zullen sluiten, met het gevolg dat minder verliezen door evaporatie van koelwater ontstaan. Koelwaterverliezen zijn afhankelijk van de energieproductie. Een sluiting van een grote energiecentrale heeft dus een reductie van de netto-koelwateronttrekking als gevolg, wat juist voor laagwater in het voordeel werkt. Aan het sluiten van energiecentrales en een meer decentrale energieopwekking is geen knelpunt verbonden.

7.4 Conclusie

Met behulp van een brainstormsessie en een literatuuronderzoek is een verkennende inventarisatie gemaakt van toekomstige ontwikkelingen in het buitenland die invloed kunnen hebben op de afvoer van de Maas. Vervolgens is een selectie van de meest relevante ontwikkelingen gemaakt.

Een knelpunt voor de zoetwatervoorziening zou vooral door de ontwikkeling van de scheepvaart op de Maas kunnen ontstaan, omdat dit kan leiden tot grotere schutverliezen en dus een hogere watervraag voor de scheepvaart. Het beëindigen van de bruinkoolmijnbouw in Duitsland heeft een groot effect op de grondwaterdynamiek in het stroomgebied van de Roer. Ook in Nederland zal het effect van het stopzetten van de bruinkoolwinning merkbaar zijn in het grondwatersysteem door hogere stijghoogtes. Beschikbare studies lijken aan te geven dat het effect op de afvoeren van de Maas en de Roer klein is. Het systeem is echter complex en het is onduidelijk wat het gezamenlijke effect is van de ontwikkelingen (stoppen met drainage en met water vullen van de mijnen) op zowel grondwaterstroming als kwel en basisafvoer van de Roer. Bovendien is de Roer voor het peilbeheerste gebied van Waterschap Rivierenland ten zuiden van de Linge een belangrijke zoetwaterbron tijdens droogte. Meer onderzoek is nodig om het netto effect tijdens droogte te kwantificeren.

Andere relevante ontwikkelingen om in de gaten te houden zijn:

- Het nieuwe stuwmeerbeheer in Duitsland en het stuwmeerbeheer in de Ardennen;
- Sluiten van energiecentrales langs de Maas en zijrivieren.

7.5 Literatuur

Becker, B. & Klaunder, W. S. (2007) Gekoppeltes Grundwassermodell Erftscholle, Rurscholle und Venloer Scholle / Prognoserechnungen. Wissenschaftliche Untersuchung im Auftrag des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Bericht I/2007. Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen.

Becker, B., C. Homann, J. Königeter (2007) Coupling of large scale groundwater models. *Computing and Visualization in Science* 12 (2), 71–76. DOI 10.1007/s00791-007-0079-4

Homann (2017): Modelling, operation and management of Reservoirs in the Rur catchment during low flow. Presentation on the 4th symposium on the hydrological modelling of the Meuse basin. (<https://publicwiki.deltares.nl/display/HydrologyMeuse>)

Kramer, N. en M. Mens (2016) Methode voor het afleiden van een 100-jarige toekomstige afvoerreeks voor Lobith en Monsin. Deltares memo 1230078-000-BGS-0001.

Kufeld, M.; Lange, J.; Hausmann, B. (2010) Das Einzugsgebiet der Rur / Ergebnisbericht der im Rahmen des AMICE-Projekt durchgeführten Literaturrecherche. AMICE, www.amice-project.eu.

Pyka (2016): Effects of water diversion and climate change on the Rur and Meuse in low flow situations. Presentation on the 3rd symposium on the hydrological modelling of the Meuse basin. (<https://publicwiki.deltares.nl/display/HydrologyMeuse>)

RWE 2015: WASSERWIRTSCHAFT IM RHEINISCHEN REVIER / Wissenswertes kurz zusammengefasst. <https://www.rwe.com/web/cms/mediablob/de/2915484/data/60012/2/rwe-power-ag/energietraeger/braunkohle/standorte/tagebau-hambach/Wasserwirtschaft-Flyer.pdf>

Van Gils, J.; Bakker, D.; Brils, J. (2010): Downstream ecological risks in the Meuse from historically contaminated upstream river banks. Deltares-memo 1202141-000-ZWS-0001.

Van Winden, A.; Otterman, E.; Braakhekke, W.; van Deursen, W. (2014): Vasthouden in de bergen om afvoeren te vertragen. H2O-Online.

8 Hotspot Hoge Zandgronden/grondwater

8.1 Afbakening gebied en hotspotvragen

Deze hotspot richt zich op een analyse van het effect van Deltascenario Warm2050 op de 'grondwaterstanden' van de Hoge Zandgronden. De onderliggende vraag is of klimatologische en socio-economische ontwikkelingen zouden kunnen leiden tot 'knikpunten' die aanleiding zouden kunnen zijn voor het versnellen, vertragen, aanscherpen of bijstellen van beleidsstrategieën of –plannen ten aanzien van de zoetwaterbeschikbaarheid in dit gebied. De analyse levert informatie die een aanzet geeft voor de beantwoording van deze vraag.

Op basis van overleg met de Provincie Gelderland (Teun Spek) en gesprekken in de regioessies zijn de volgende vragen naar voren gekomen:

- 1 Wat zijn de consequenties voor de grondwatervoorraden ten behoeve van drinkwater?
- 2 Wat zijn de effecten op de grondwaterdynamiek (hoge-lage grondwaterstanden)
- 3 Wat is de invloed op het herstelvermogen van het grondwatersysteem na een periode van droogte?
- 4 Gaat het grondwatersysteem (rond de stuwwallen) blijvend anders functioneren als gevolg van de Deltascenario's: veranderen kwelzones (rond stuwwallen) en grondwatervoeding van oppervlaktewater ingrijpend?

Aanvullend geldt voor elke vraag in hoeverre effecten veroorzaakt worden door klimaatverandering, dan wel door socio-economische veranderingen. Ook is aangegeven dat er speciale aandacht nodig is voor de effecten bij grote grondwaterwinningen en bij de stuwwallen.

8.2 Aanpak

8.2.1 Gebruikte datasets en gehanteerde uitgangspunten

De analyse is uitgevoerd op basis van de resultaten van het Nationaal Water Model (NWM) voor twee Deltascenario's *Warm (W)* en *Stoom (S)*, en voor de referentiesituatie (Snippen *et al*, 2016). Deze berekeningen zijn uitgevoerd voor de periode 1981-2006. Deze worden aangeduid als de S0 berekeningen. Aanvullend zijn historische berekeningen gedaan voor de periode 1911-2011 met het NWM voor de referentiesituatie en het scenario Warm voor het zichtjaar 2050, verder aangeduid als de S1 berekeningen. De modelschematisatie van deze S0 en de S1 berekeningen zijn gelijk, waarbij de hydrologische randvoorwaarden als neerslag, verdamping en afvoeren is aangepast op basis van historische reeks. Voor de Deltascenario's zijn de historische klimaatreeksen getransformeerd naar reeksen voor het zichtjaar 2050. De verlenging van de reeks is gedaan om meer inzicht te krijgen in de extremen en de langjarige statistiek.

De schaal van de grondwateranalyse is gelijk aan het de resolutie van modelresultaat, 250 bij 250 m. Voor de analyse van de oppervlaktewaterafvoer is de schaal van MOZART/DM districten aangehouden (244 voor heel Nederland).

Concreet zijn de uitkomsten van de volgende deltasenario's beschouwd:

- REFS0: Referentiescenario, 26 jaar.
- W2050S0: Scenario "Warm", zichtjaar 2050, 26 jaar.
- S2050S0: Scenario "Stoom", zichtjaar 2050, 26 jaar.
- REFS1: Referentiescenario, 101 jaar.
- W2050S1: Scenario "Warm", zichtjaar 2050, 101 jaar.

In de scenario's Warm en Stoom wordt gerekend met hetzelfde klimaatscenario (KNMI'14 WH) maar bevatten wel verschillen in socio-economische ontwikkelingen zoals landgebruik en watergebruik. Warm gaan uit van een lage economische ontwikkeling en Stoom gaan uit van een hoge economische ontwikkeling (Hunink *et al*, 2013). Voor het grondwater is de onttrekking uit het grondwater ten behoeve van drinkwater een belangrijk verschil tussen de scenario's. Voor het zichtjaar 2050 zijn de factoren die gebruikt zijn ten opzichte van de huidige grondwateronttrekkingen ten behoeve van drinkwater weergegeven in onderstaande tabel (Hunink *et al*, 2013).

Er bestaat geen 100-jarige run van het "Stoom" scenario. In overzicht levert de vergelijking tussen Referentie en de scenario's een inschatting van de effecten van klimaatverandering op het grondwatersysteem. De vergelijking tussen Stoom en Warm levert een inschatting van verdere effecten van socio-economische veranderingen op.

Tabel 8.1 Ontwikkeling grondwateronttrekkingen ten behoeve van drinkwater in de Deltascenario's 2013 (Hunink *et al*, 2013).

| | Warm 2050 | Stoom 2050 |
|---------------|-----------|------------|
| Drenthe | 0.90 | 1.15 |
| Flevoland | 1.10 | 1.42 |
| Friesland | 0.89 | 1.15 |
| Gelderland | 0.89 | 1.15 |
| Groningen | 0.85 | 1.10 |
| Limburg | 0.83 | 1.07 |
| Noord-Brabant | 0.89 | 1.14 |
| Noord-Holland | 1.00 | 1.00 |
| Overijssel | 0.90 | 1.16 |
| Utrecht | 1.02 | 1.30 |
| Zeeland | 1.00 | 1.00 |
| Zuid-Holland | 1.00 | 1.00 |

Er is vanuit gegaan dat de resultaten van de NWM scenario's voor grondwaterstanden en grondwaterfluxen bruikbaar zijn voor de analyse. Dat wil zeggen dat analyse van de betrouwbaarheid, bijvoorbeeld via validatie of gevoeligheidsanalyse, geen onderdeel is van deze analyse. De toepasbaarheid van het model LHM voor de toepassing zoetwater is beschreven in Marchand *et al*, 2013.

Vraag 1 over drinkwatervoorraden vereist een nadere beschouwing. De invloed van de deltasenario's op het beschikbare *volume* grondwater voor drinkwatervoorziening is klein. Bij een afname van de grondwateraanvulling via neerslag en oppervlaktewater (of bij vergroting van de onttrekkingshoeveelheid) stelt zich een nieuw evenwicht in waarin het voedingsgebied iets groter wordt. Dat levert geen bedreiging voor de beschikbare 'voorraad'. Wel kunnen er op termijn veranderingen optreden in het volume grondwater dat aan bepaalde kwaliteitsnormen voldoet.

Ook zouden door veranderingen in de freatische grondwaterstand (en bodemvocht) en in de uitwisseling tussen grondwater en oppervlaktewater (vooral in lange droge perioden) in principe omstandigheden kunnen ontstaan die aanleiding geven tot herbeoordeling van duurzame inpassing van winningen door de invloed op de natuur of andere functies.

Het uitgangspunt voor de huidige analyse met betrekking tot vraag 1 is om op basis van de genoemde datasets en de bijbehorende resolutie informatie te leveren over veranderingen in grondwaterstanden en kwel/infiltratie condities die relevant zijn (een eerste indicatie geven) voor eventuele herbeoordeling van winningen. De antwoorden op vragen 2 t/m 4 dragen daaraan bij. Aanvullend wordt voor vraag 1 gekeken naar de consequenties van de deltasenario's voor de gemiddelde freatische grondwaterstand. Herbeoordeling van de duurzaamheid van winning hangt af van omstandigheden en vraagt ook om gedetailleerde lokale studie en lokale modellen en wordt hier niet geadresseerd. Analyse van eventuele veranderingen van de kwaliteit van grondwatervoorraden vraagt ook om nadere lokale analyse met aanvullende datasets en modellen en valt daarmee ook uit buiten het kader van deze studie.

8.2.2 Methode analyse

In de onderstaande paragrafen staat beschreven hoe de vier vragen zijn geconcretiseerd in de context van de uitkomsten van de beschikbare Deltascenario uitkomsten.

8.2.2.1 *Verskil in GVG, GLG, en GHG*

Ten eerste zijn de verschillen tussen GVG, GLG, en GHG voor de scenario's ten opzichte van referentie berekend. Hiervoor zijn de GXG's over een periode van 20 jaar genomen voor de S0 scenario's, en een periode van 80 jaar voor de S1 scenario's om eventuele effecten van de opstartcondities te verminderen. Voor traag reagerende systemen zoals de Veluwe is het mogelijk inspeleffecten aanwezig zijn in de berekeningen. De GVG, GLG, en GHG zijn binnen deze analyse als volgt berekend:

- GVG: de grondwaterstanden van 14 maart, 28 maart en 14 april per jaar gemiddeld, en vervolgens voor de analyseperiode gemiddeld (S0 20 jaar, S1 80 jaar).
- GLG: de drie laagste grondwaterstanden per jaar gemiddeld (LG3), en vervolgens voor de analyseperiode gemiddeld (S0 20 jaar, S1 80 jaar).
- GHG: de drie hoogste grondwaterstanden per jaar gemiddeld (HG3), en vervolgens voor de analyseperiode gemiddeld (S0 20 jaar, S1 80 jaar).

8.2.2.2 *Verskil in jaarlijkse grondwaterstandvariatie*

De jaarlijkse grondwaterdynamiek is berekend als het verschil tussen de hoogste (HG3) en de laagste grondwaterstanden (LG3). Deze is gemiddeld over de analyseperiode om een gemiddelde grondwaterdynamiek te berekenen.

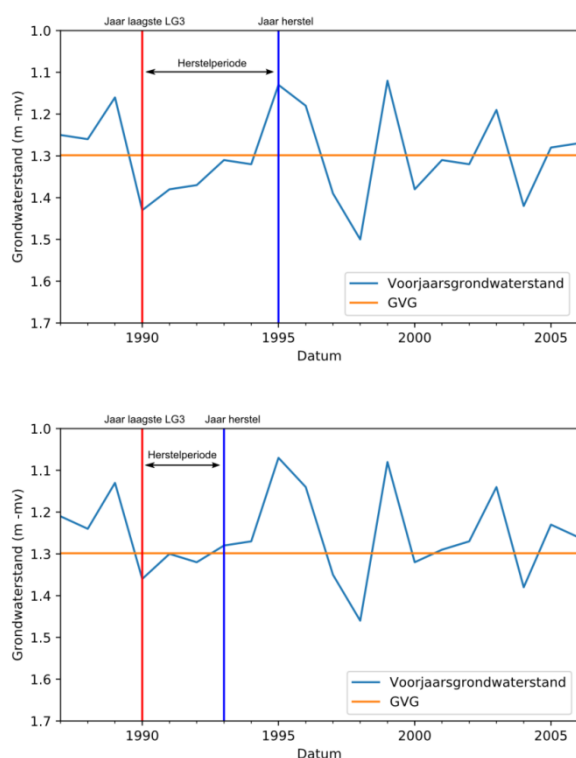
8.2.2.3 *Verskil in herstelperiode na droogte*

"Herstel van de grondwaterstand na droogte" valt op een groot aantal manieren te definiëren. Mits grondwaterstanden in de toekomst structureel hoger of lager zijn in bepaalde gebieden, dan zal de benutting zich hierop aanpassen. In dat geval geldt als hersteltijd de tijd tot het bereiken van de toekomstige gemiddelde of modale toestand. Bij vergelijking met de referentiesituatie kan dit echter tot lastig te interpreteren resultaat leiden: zo kan een gebied structureel natter zijn dan in de referentiesituatie, maar duurt het na een droogte langer om het nieuwe, nattere, gemiddelde te bereiken.

Vanuit de context van grondwateronttrekkingen geldt dat langdurige verhoging van grondwaterstanden niet als een bedreiging van de duurzame inpassing van grondwateronttrekking geldt. Aangezien de meteorologische input voor de verschillende scenario's dezelfde opeenvolging van relatief natte en droge perioden kent, lenen de scenario-uitkomsten zich voor vergelijking in de tijd. Wij hebben een herstelcriterium gekozen dat leidt tot robuuste en eenvoudig te interpreteren resultaten: de tijd tussen laagste LG3 in het referentiescenario en het eerste moment waarop de voorjaarsgrondwaterstand de REF GVG weer overschrijdt. Hierbij kijken wij dus expliciet naar de duur van grondwaterverlagingen ten opzichte van het referentiegemiddelde, en niet naar de duur van verhogingen (Figuur 8.1).

De volgende stappen worden doorlopen:

- Per cel wordt het moment van diepste REF LG3 opgezocht;
- Per cel wordt de gemiddelde REF voorjaarsgrondwaterstand (GVG) berekend;
- Vervolgens wordt er berekend hoe lang het duurt voordat de grondwaterstand zijn gemiddelde REF GVG waarde weer heeft bereikt;
- Ten slotte wordt ook voor het Deltascenario berekend hoe lang het duurt voordat REF GVG wordt bereikt.



Figuur 8.1 Voorbeeld van bepaling hersteltijden. Bovenste grafiek is een tijdserie van de voorjaarsgrondwatersstanden gesimuleerd in scenario REF2015S0, onderstaande grafiek voor scenario W2050S0. De rode verticale lijn geeft het moment van de diepste grondwaterstanden aan voor het scenario REF2015S0. De blauwe verticale lijn geeft het eerste jaar aan waarop de voorjaarsgrondwaterstand de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG) overschrijdt van scenario REF2015S0. De oranje horizontale lijn geeft de referentie GVG weer. De tijd tussen deze momenten is gedefinieerd als herstelperiode. In dit voorbeeld is de herstelperiode twee jaar korter voor scenario W2050S0.

8.2.2.4 *Omslag van kwel naar infiltratie of vice versa*

Om inzicht te verkrijgen in het veranderd functioneren van het grondwatersysteem van de stuwwallen is geanalyseerd waar veranderingen optreden in de ligging van kwelgebieden. Hiervoor is berekend welke gebieden in de deltasceario's overgaan van kwelgebied naar infiltratiegebied of vice versa. Voor elk scenario is eerst de gemiddelde kwel-infiltratieflux per cel berekend voor de analyse periode. Deze is vervolgens met de referentie vergeleken om te bepalen waar de kwel-infiltratieflux omslaat. Er is geen onderscheid gemaakt in zomer en winter, hoewel dat voor de ecologische effecten wel van belang kan zijn.

8.2.2.5 *Verschillen grondwatervoeding oppervlaktewater*

Naast veranderingen in grondwaterstanden zijn ook juist verandering in afvoer naar het oppervlaktewater interessant. Het is mogelijk dat de grondwaterstand relatief weinig veranderd, maar dat de voeding naar het oppervlaktewater door het jaar sterk toeneemt of afneemt.

Om hier een indruk van te krijgen zijn de diepe en ondiepe drainage termen uit MOZART beschouwd (de flux van het grondwater naar oppervlaktewater). Deze zijn per district geaggregeerd, voor 440 districten in totaal. Om een indruk te krijgen van zowel de gemiddelde situatie, als veranderingen in variabiliteit is voor de gesimuleerde periode per district naar de verschillen in 10^e, 50^e, en 90^e percentielswaarde gekeken. Een positieve drainage term wil zeggen dat het grondwater netto water levert aan het oppervlaktewater; een negatieve term het tegenovergestelde. Deze term wordt verder in dit rapport aangeduid als "afvoer". De P10 afvoer is in dit geval een maat voor een lage (zomer) afvoer, de P50 voor een gemiddelde afvoer, en de P90 voor hoge (winter) afvoer. Naast de percentielen voor de gehele periode is ook specifiek gekeken naar de verandering van de verschillen in 10^e, 50^e, en 90^e percentielswaarde voor de maanden juli, augustus en september. Deze maanden zijn gekozen om de effecten van het klimaatscenario op de lage afvoeren in beeld te brengen.

8.2.2.6 *Uitsplitsing effecten klimaatverandering en socio-economische verandering*

Om de effecten van klimaatverandering en socio-economische verandering uit te splitsen is zijn de bovenstaande analysestappen nogmaals uitgevoerd, waarbij het W2050S0 scenario (klimaatverandering) de rol van referentiescenario gespeeld in vergelijking met scenario S2050S0 (klimaat- en socio-economische verandering).

8.3 Resultaten

Voor elk deltasceario zijn de bovenstaande analyses uitgevoerd, en kaarten gemaakt. Omdat dit een groot aantal combinaties levert, worden hier enkele resultaten eruit gelicht aan de hand van de vragen uit de inleiding. Alle kaarten zijn te vinden in bijlage C.

8.3.1 Consequenties grondwatervoorraden

Grondwaterstanden stijgen hoofdzakelijk in de "Warm" Deltascenario's: zowel de GVG's als GHG's stijgen. Meer verdamping zorgt ervoor dat de GLG gemiddeld wel zakt in gebieden met ondiepe grondwaterstanden, waarbij verlaging beperkt blijft tot 0.25 m. Gebieden met diepe grondwaterstanden laten echter vooral een stijging van de grondwaterstand zien: extra regen resulteert in meer grondwateraanvulling, dat ook ten tijde van de laagste grondwaterstanden nog niet is afgevoerd.

Ook in scenario "Stoom" stijgen grondwaterstanden hoofdzakelijk. Omdat in het Stoom scenario een toename van de grondwateronttrekkingen ten behoeve van drinkwater is meegenomen, zijn sommige grondwateronttrekkingen zijn nu wel duidelijk herkenbaar.

Qua grondwaterdaling laat de GLG kaart weer de meeste daling zien. Deze daling wordt dus veroorzaakt door een combinatie van een groter neerslagtekort en een toename van de onttrekkingen uit het grondwater ten behoeve van drinkwater. Deze is afgebeeld in Figuur 8.2, waarbij ook de onttrekkingen in het NWM afgebeeld zijn. De volgende onttrekkingen zijn duidelijk aanwijsbaar:

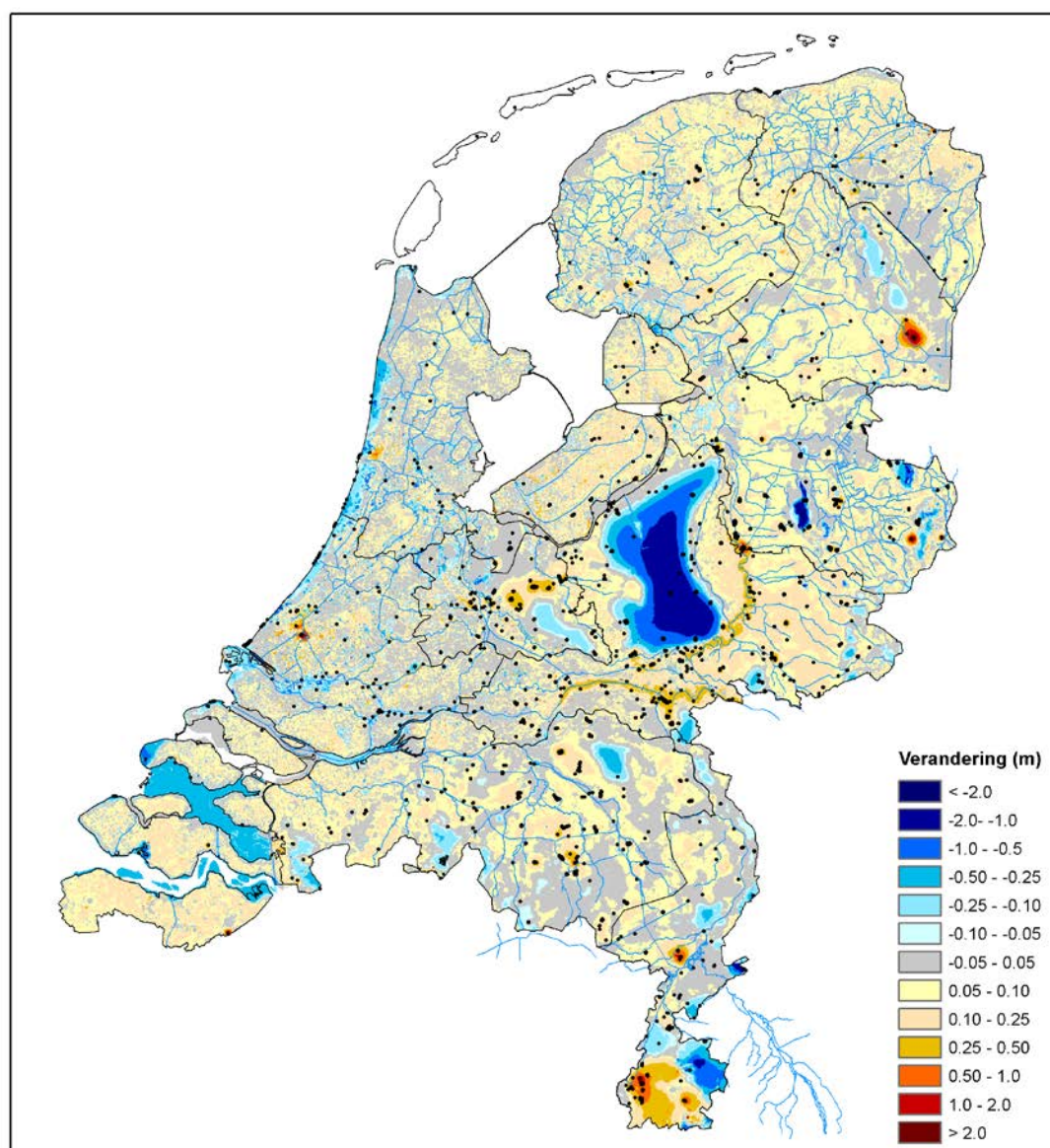
- Utrechtse Heuvelrug;
- Hondsrug;
- Stuwwal van Enschede;
- Deventer;
- Roermond;
- Eindhoven;
- Zuid-Limburg.

Uit de veranderingsrapportage van LHM3.1.0 (Hoogewoud et al, 2015) blijkt dat in LHM versie 3.0.2, die ten grondslag ligt aan de hier geanalyseerde versie van het NWM, een aantal drinkwateronttrekkingen dubbel zijn geschematiseerd. Het betreft hier winningen van Brabantwater en Waterleiding Maatschappij Limburg. Dit betekent dat er in Brabant 35% te veel is onttrokken en in Limburg 28% te veel; respectievelijk 98 miljoen m³/jaar op 184 miljoen m³/jaar, en 27 miljoen m³/jaar op 98 miljoen m³/jaar.

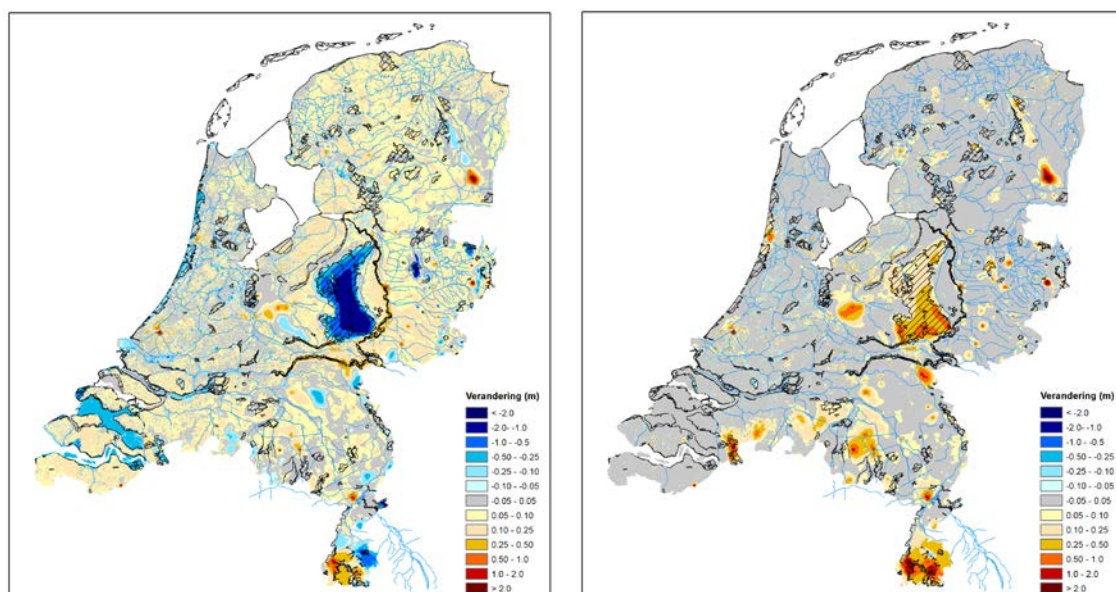
In de Warm en Stoom scenario's is de onttrokken hoeveelheid aangepast om aan de watervraag te voldoen. Omdat dit met een factor ten opzichte van de huidige situatie betreft, is het effect van de scenario's op de onttrekkingen overdreven in Brabant en Limburg.

Het door onttrekkingen beïnvloedde gebied met dalende grondwaterstanden beperkt in oppervlak (zie Figuur 8.3). Dit wordt veroorzaakt door de geohydrologische opbouw waardoor veel onttrekkingen een beperkt effect hebben op de freatische grondwaterstand. Ook laten de Natura2000 gebieden weinig sterke verdroging zien, en waar verdroging optreedt wordt dit vooral door klimaatverandering veroorzaakt. Dit komt omdat veel van de Natura2000 gebieden zijn buiten de invloedsgebieden van de onttrekkingen vastgesteld.

Uit de stijgende grondwaterstanden in de infiltratiegebieden kan worden afgeleid dat er lokaal een toename van de grondwatervoorraad op kan treden. Dit zal in de praktijk niet tot nauwelijks het geval zijn. De stijging van de grondwaterstand in een systeem als Veluwe is in enkele tientallen jaren opgebouwd en is het gevolg van een gemiddelde toename van de grondwateraanvulling. De hogere grondwaterstanden in de infiltratiegebieden zorgen ook voor een demping van de verlaging van de grondwaterstanden in de overige gebieden. Indien door extra onttrekking de grondwaterstand in de infiltratiegebieden op een vergelijkbaar niveau als de referentie komt, is het effect van het klimaatscenario in het omliggende gebied groter.



Figuur 8.2 Scenario S2050S0 in vergelijking met scenario REF2015S0: verschil in GLG. Punten markeren grondwateronttrekkingen in het NWM. Een negatief getal betekent een stijging van de grondwaterstand en een positief getal betekent een daling van de grondwaterstand.



Figuur 8.3 Links: Scenario S2050S0 in vergelijking met scenario REF2015S0: verschil in GLG. Rechts: Scenario S2050S0 in vergelijking met scenario W2050S0: verschil in GVG. Arcering geeft de ligging van Natura2000 gebieden aan.

8.3.2 Effecten grondwaterdynamiek

De grondwaterdynamiek neemt in alle scenario's toe ten opzichte van referentie. Opvallend zijn de grotere veranderingen rond de Rijn, en rond de IJssel. Deze worden veroorzaakt door grotere fluctuaties in rivierpeilen.

8.3.3 Invloed herstelvermogen grondwatersysteem na droogte

De tendens in Deltascenario's is meer jaarlijkse grondwateraanvulling in de infiltratiegebieden. Dat betekent dat de effecten van droogte (voor zover deze aanwezig zijn in de deltasenario's) minder lang voelbaar zijn. Socio-economische veranderingen hebben buiten de onttrekking in het zuiden van de Hondsrug, Roermond, en Zuid-Limburg erg beperkte invloed op herstel van het grondwater na droogte.

Overigens zijn deze afgebeelde hersteltijden kwalitatief in aard. Vooral voor de gebieden met diepe grondwaterstanden kennen de gebieden langere karakteristieke tijdschalen, en zijn simulaties met veel langere periodes noodzakelijk om kwantitatief karakteristieke hersteltijden te bepalen.

De berekende hersteltijden in westelijk Nederland zijn niet plausibel als gevolg door de in het model meegenomen bodemdaling.

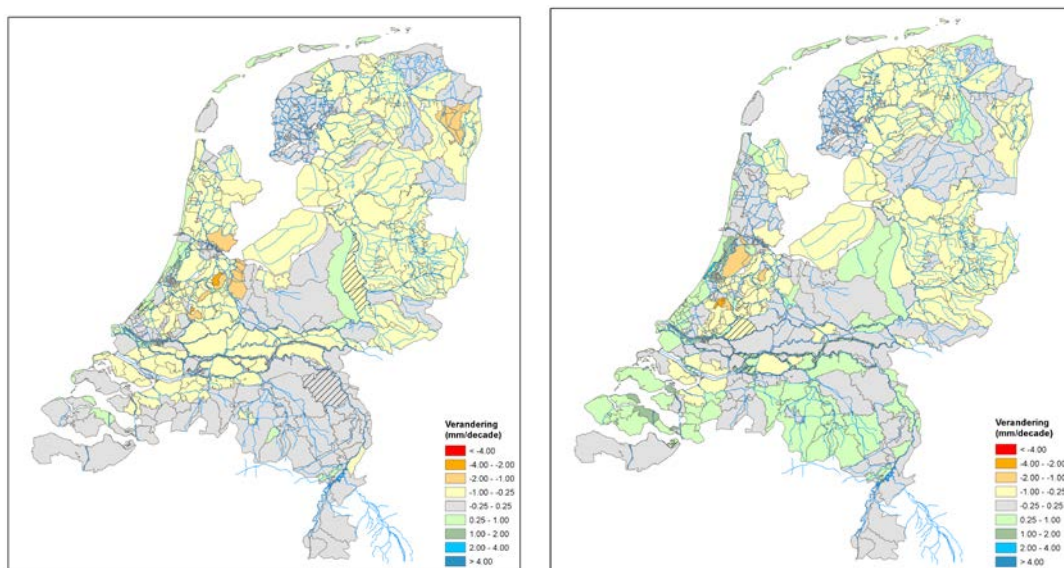
8.3.4 Kwelzones

De langjarige ligging van de kwelzones verandert minimaal. Door stijgende grondwaterstanden neemt in vrij afwaterend Nederland het areaal aan kwelgebieden ietwat toe. Dit beperkt zich vooral tot één a twee cellen rond de hoger gelegen gebieden, wat neerkomt op verschuivingen van 250 a 500 m. De kwelflux in de winter neemt in veel gevallen toe door stijging van de grondwaterstanden in de infiltratiegebieden. Rond de infiltratiegebieden waar de grondwaterstand daalt in de zomer, kan de kwelflux afnemen. Rond de infiltratiegebieden waar de grondwaterstand stijgt in de zomer kan de kwelflux toenemen. Dit laatste zal optreden in de kwelzones rond de Veluwe maar ook in delen van Brabant en oost Nederland is dit mogelijk.

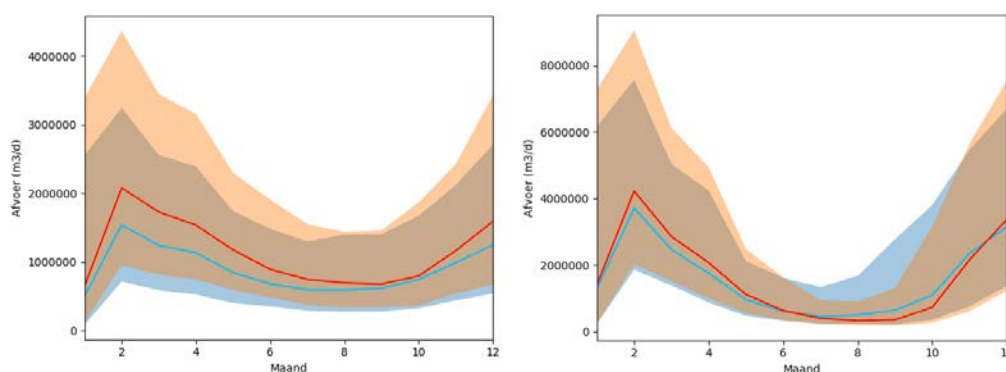
Een toename van de onttrekkingen uit het grondwater dalen de stijghoogtes onder de deklaag, wat in veel gevallen tot een lagere kwelflux zal leiden. Deze kaarten zijn in deze rapportage niet opgenomen.

8.3.5 Verschillen grondwatervoeding oppervlaktewater

Figuur 8.4 laat de veranderingen in P10 en P50 afvoeren zien tussen W20150S0 en REF2015S0 voor de gehele doelperiode. De lage en mediane afvoeren worden lager, maar vooral hoge afvoeren nemen toe. De P10 afvoeren laten hoofdzakelijk afname zien, maar de P50 afvoeren laten een afwisselender beeld zien (P90 afvoeren nemen in alle districten toe en zijn hier niet afgebeeld, zie Figuur 8.21).

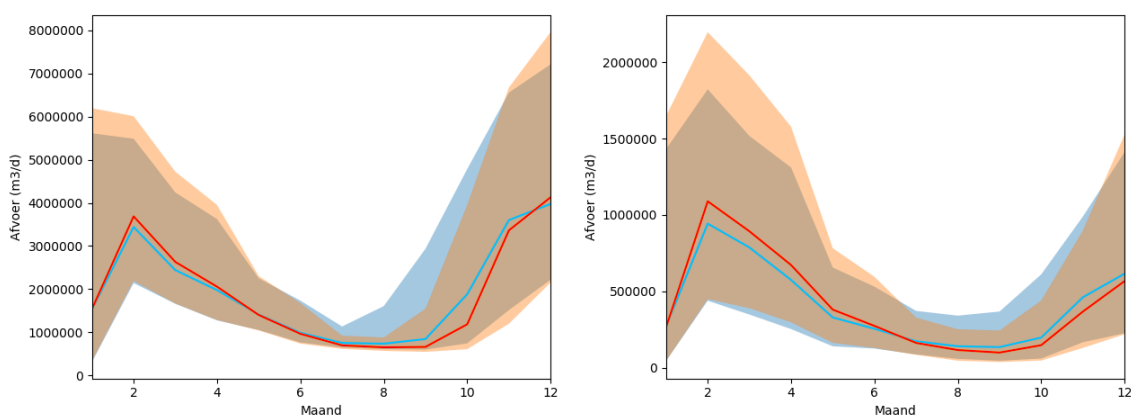


Figuur 8.4 Scenario W2050S0 in vergelijking met scenario REF2015S0. Links: verschil in 10^e percentiel afvoer obv de volledige reeks. Rechts: verschil in 50^e percentiel afvoer obv de volledige reeks. Arcering geeft een omslag van drainage naar infiltratie aan, of vice versa. Eenheid is in mm voor het volledige oppervlak van het district.



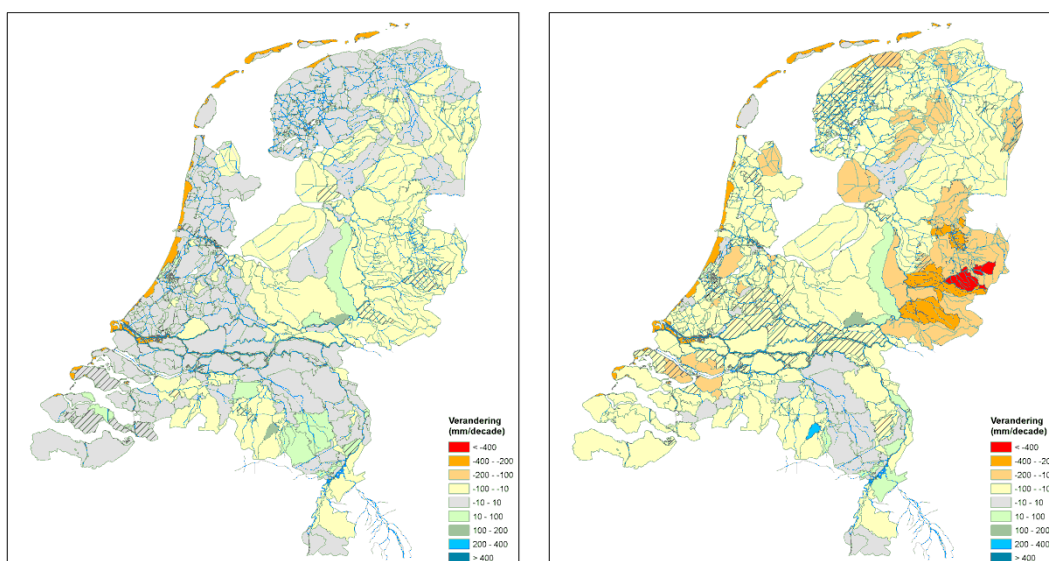
Figuur 8.5 Oppervlaktewaterafvoer IJssel vallei, Scenario W2050S0 in vergelijking met scenario REF2015S0. Links: Maandelijks geaggregeerde oppervlaktewaterafvoer voor district 23, Noordoost-Veluwe. Rechts: Maandelijks geaggregeerde oppervlaktewaterafvoer voor district 22, IJssel. Het interval tussen P10 en P90 maandelijkse afvoeren is ingekleurd, de maandelijkse P50 afvoer is met een lijn aangegeven; REF2015S0 is blauw gekleurd, W2050S0 is rood gekleurd (waar de intervallen overlappen is de kleur grijs). De januari afvoer sluit niet aan op de december afvoer als gevolg van een incorrecte 'warme' start van MOZART aan het begin van de gemodelleerde jaren.

Om een beeld te krijgen van de verandering van de afvoeren door het jaar heen zijn de gemiddelde afvoeren per maand bepaald. Figuur 8.5 toont voor deze districten de maandelijks geaggregeerde afvoeren voor beide scenario's. De twee districten laten een toename zien in winterse afvoer, vooral voor de hoogste afvoeren. In de zomer laat de westelijke IJsseloever echter een duidelijke reductie in afvoer zien. De Veluwe is daarentegen een veel trager systeem, en de hogere grondwaterspiegels resulteren ook in de zomer in meer afvoer. Figuur 8.6 toont de afvoer voor de Haarlemmermeer, als voorbeeld van een peilgestuurd district. Ook hier is het beeld dat in W2050S0 de winters natter zijn, en de zomers droger. Dit beeld is ook terug te zien in bijna alle districten, zowel peilgestuurd als vrij afwaterend.



Figuur 8.6 Oppervlaktewaterafvoer IJssel vallei, Scenario W2050S0 in vergelijking met scenario REF2015S0. Links: Maandelijks geaggregeerde oppervlaktewaterafvoer voor district 954, Haarlemmermeer. Rechts: Maandelijks geaggregeerde oppervlaktewaterafvoer voor district 643, De Peel Zuid. Het interval tussen P10 en P90 maandelijks afvoeren is ingekleurd, de maandelijks P50 afvoer is met een lijn aangegeven; REF2015S0 is blauw gekleurd, W2050S0 is rood gekleurd (waar de intervallen overlappen is de kleur grijs).

In de Figuur 8.5 en Figuur 8.6 is te zien dat in veel gebieden de afvoeren vanuit het grondwater naar het oppervlaktewater in de zomer afnemen. De p10 waarde blijft ongeveer gelijk wat aangeeft dat de minimale afvoer in de droge jaren weinig veranderd, maar de P90 waarde in de zomer neemt flink af. Dit geeft aan dat de afvoer in de gemiddelde en natte jaren flink afneemt. De figuren van de verandering van de afvoeren geven een beperkt beeld van de verandering van de afvoer in de zomer. Hierom is de analyse herhaald voor de zomer periode. Figuur 8.7 laat de verandering zien van de P10 en de P90 percentiel afvoeren tussen W2015S0 en REF2015S0 voor de maanden juli, augustus en september. Hier is duidelijk te zien dat voor een groot deel van Nederland afvoeren in de zomerperiode afnemen.



Figuur 8.7 Scenario W2050S0 in vergelijking met scenario REF2015S0. Links: verschil in 10^e percentiel afvoer voor de maanden juli, augustus en september. Rechts: verschil in 90^e percentiel afvoer voor de maanden juli, augustus en september. Arcering geeft een omslag van drainage naar infiltratie aan, of vice versa. Eenheid is in mm nat oppervlak binnen het district.

8.4 Conclusies

De klimaatveranderingscomponent in de Deltascenario's betekent concreet voor het grondwater in Nederland:

- meer grondwateraanvulling in de winter;
- minder grondwateraanvulling in de zomer.

Dit leidt tot hogere grondwaterstanden in de winter en voorjaar, maar lagere grondwaterstanden in de zomer. Lagere grondwaterstanden in de zomer resulteren in minder voeding van het oppervlaktewatersysteem. De traag reagerende systemen, zoals de stuwwallen, vormen een uitzondering: de extra winterse grondwateraanvulling wordt hier geborgen en resulteert in hogere grondwaterstanden ook in de zomer.

De additionele variabiliteit van de grondwateraanvulling in de Deltascenario's betekent ook dat langjarige droogtes doorgaans minder lang duren: meer winterse grondwateraanvulling betekent sneller herstel. Desalniettemin zullen de snel reagerende systemen vaker en ernstigere kortstondige (< 1 jaar) droogte ervaren.

Het grondwatersysteem gaat niet blijvend anders functioneren als gevolg van de Deltascenario's: de verdeling van kwel- en infiltratiegebied verschuift weinig.

Wel kan de kwel flux in de zomer veranderen. Door zowel stijging als daling van de GLG kan de kwel flux rond de infiltratiegebieden zowel af als toenemen in de zomer. Een toename van de onttrekkingen uit het grondwater zullen door het verlagen van de stijghoogte ook een verlaging van de kwel tot gevolg hebben. De afvoerkaarten laten zien dat voor grote gebieden in Nederland de grondwatervoeding naar het oppervlaktewater sterk afneemt in zomer: zo veel dat sommige gebieden het oppervlaktewatersysteem omslaat van drainerend naar infiltrerend.

De socio-economische effecten (meer grondwateronttrekking) hebben in vergelijking tot de klimaatverandering een beperkt effect op de freatische grondwaterstand. De toename in grondwaterwinning leidt in de gebieden rond de winning tot lagere grondwaterstanden; in sommige gebieden kan deze daling door extra grondwateraanvulling worden gecompenseerd. Extra grondwateronttrekkingen leidt naast daling van de grondwaterstand ook tot daling van de diepere stijghoogte waardoor kwelfluxen over een groter gebied minder worden.

Voor grondwaterwinning betekent dat een gebiedsafhankelijke analyse noodzakelijk is. Voor veel winningen zal gelden dat er winters mogelijkheid is tot grotere onttrekking, maar dat er zomers minder water beschikbaar is. Mogelijkerwijs moet de winning in de zomer zelfs gereduceerd worden tot onder het referentieniveau om bijvoorbeeld voldoende grondwatervoeding naar beken te behouden. Hiervoor is een studie op nationale schaal met relatief grote eenheden (de MOZART/DM districten) niet toereikend.

Op basis van de analyse wordt het volgende geconcludeerd:

- Bij een scenario van sterke klimaatverandering zal de dynamiek in het grondwatersysteem toenemen. Kort gezegd betekent dit hogere grondwaterstanden en hogere afvoeren in winter; lagere grondwaterstanden, lagere afvoeren, en minder kwel in de zomer en het najaar. Dit kan betekenen dat er meer beken droogvallen in de zomer, en de vraag voor peilbeheer toeneemt in de peilbeheerste gebieden.
- Er ligt een opgave om het watersysteem zo aan te passen dat negatieve gevolgen van die grotere dynamiek (o.a. voor landbouw en natuur) worden opgevangen en het grondwatersysteem wordt hersteld. Wateroverlast en watertekort maken beide deel uit van die opgave.
- Door stijging van de grondwaterstanden in enkele infiltratiegebieden zoals de Veluwe is *lokaal* mogelijk extra grondwatervoorraad beschikbaar. Doordat de verandering van het grondwatersysteem als gevolg van de scenario's ruimtelijk en in tijd verschilt, kan gebruik van deze extra voorraad wel zorgen voor nog lagere grondwaterstanden in overige gebieden, lagere afvoeren in de zomer en minder kwel in natuurgebieden
- Binnen voorliggend onderzoek was het niet mogelijk conclusies verder te detailleren naar regio's. Hiervoor is een gedetailleerder regionaal model nodig.

8.5 Literatuur

Snippen, E., M. Mens, J. Hunink, J. Ter Maat, (2016). Basisprognoses Zoetwater - Controle NWM-instrumentarium in het licht van de Knelpuntenanalyse Zoetwater. Deltares rapport 1230058-001

Hunink, J.C., A. Veldhuizen, G. Prinsen, J. Oosterwijk, G. Oude Essink (2013) Deltascenario's 2012: NHI modelinvoer, technische achtergrond rapportage. Deltares rapport 12053-000-BGS-0003.

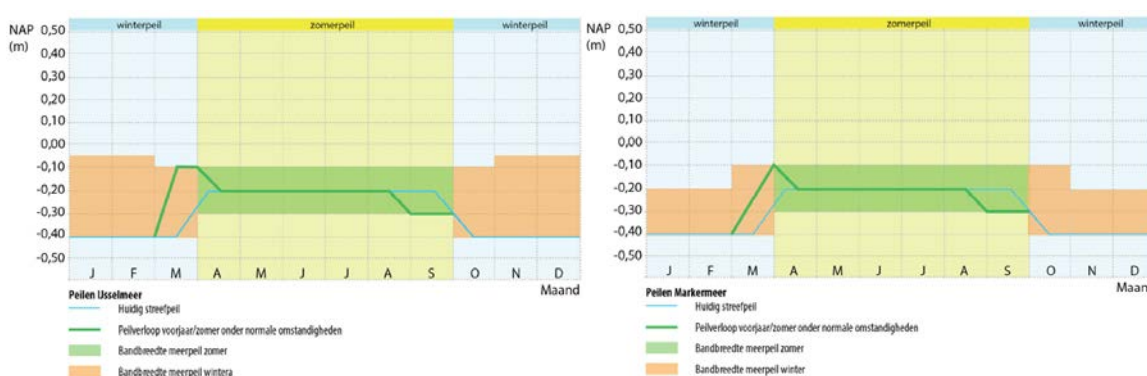
Marchand, M., W.J. de Lange, G. Prinsen, A. Veldhuizen, F. Klijn, (2013) Toepasbaarheid NHI voor het Deltaprogramma Zoetwater. Deltares rapport 1206107-000-BGS-0006.

A Interpretatie van ontwerp peilbesluit flexibel peilbeheer

A.1 Ontwerp peilbesluit

Het ontwerp-peilbesluit van het nieuw in te voeren flexibel peilbeheer van de grote meren (Sweco, 2017) gaat uit van een vroege voorjaarsopzet tot -0.10 m NAP t.b.v. natuur. Daarna zakt het beoogd peil naar -0.20 m NAP. Dit beoogd peil wordt gehandhaafd van april tot half augustus, waarna het beoogd peil, wederom t.b.v. natuurdoelen, verder uitzakt tot ongeveer -0.30 m NAP begin september. Bij een verwacht zoetwatertekort mag het meerpeil opgezet worden tot -0.10 m, ook in augustus/september.

Figuur 8.8 toont het ontwerp beoogd peilverloop voor IJsselmeer (links) en Markermeer (rechts). Bij het IJsselmeer wordt ernaar gestreefd om de vroege voorjaarsopzet van 15 maart tot 31 maart vast te houden. In het Markermeer wordt gestreefd om het voorjaarsopzetpeil op 31 maart te bereiken.



Figuur 8.8 Ontwerp-peilbesluit IJsselmeergebied (Sweco 2017)

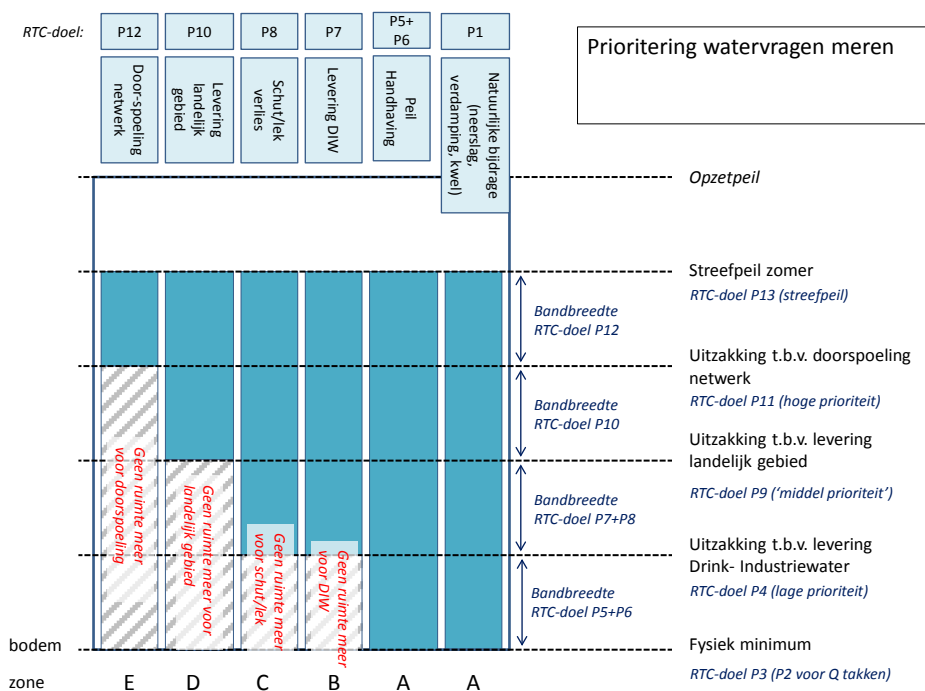
Onder huidig beheer is de buffer in zomerperiode 20 cm, mits de LCW toestemming geeft om deze buffer in te zetten. Zodra de buffer wordt ingezet treedt in principe de verdringingsreeks in werking.

Onder flexibel peilbeheer is de buffer in de zomerperiode 10 cm; een waterschijf vrijelijk inzetbaar door de tactisch beheerder (Rijkswaterstaat). In het Waterbeheerdersoverleg kan besloten worden om deze buffer met 10 cm te vergroten. Mits dit besluit op tijd genomen wordt en voldoende water aangevoerd wordt is dus een buffer van maximaal 20 cm vrij inzetbaar. De LCW kan besluiten om de buffer verder te vergroten tot maximaal 30 cm door toestemming te geven om onder de -0.30 m NAP te zakken tot -0.40 m NAP. Op dat moment treedt de verdringingsreeks in werking.

Onder flexibel peilbeheer zakt het beoogd peil vanaf half augustus uit tot -0.30 m NAP, tenzij het Waterbeheerdersoverleg besluit om een ander beoogd peil te handhaven. Indien het peil al op -0.30 m NAP is gebracht is er geen bufferschijf beschikbaar om een droge/warme periode in september op te vangen.

A.2 Hoe is dit peilbesluit gemodelleerd in QWAST?

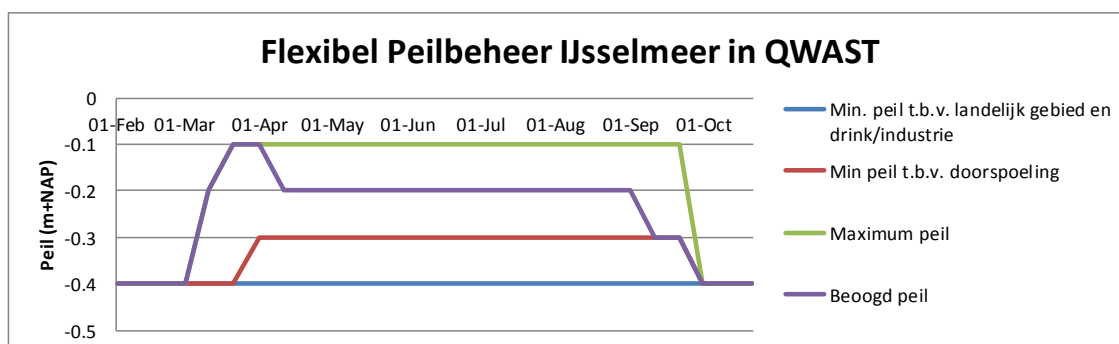
Figuur 8.9 geeft het prioriteringsprincipe van QWAST weer, waarbij per prioriteit wordt geprobeerd om de doelen te halen, terwijl de behaalde doelen uit de vorige prioriteit niet mogen verslechteren (d.w.z. geen afname van levering of uitzakking van peil door een nieuwere prioriteit). QWAST werkt dus van meest belangrijk (handhaven) naar minder belangrijk (proberen te behalen). QWAST kan in de tijd water bufferen om toekomstige doelen te behalen. Dit maakt QWAST een geschikt instrument om flexibel peilbeheer te modelleren.



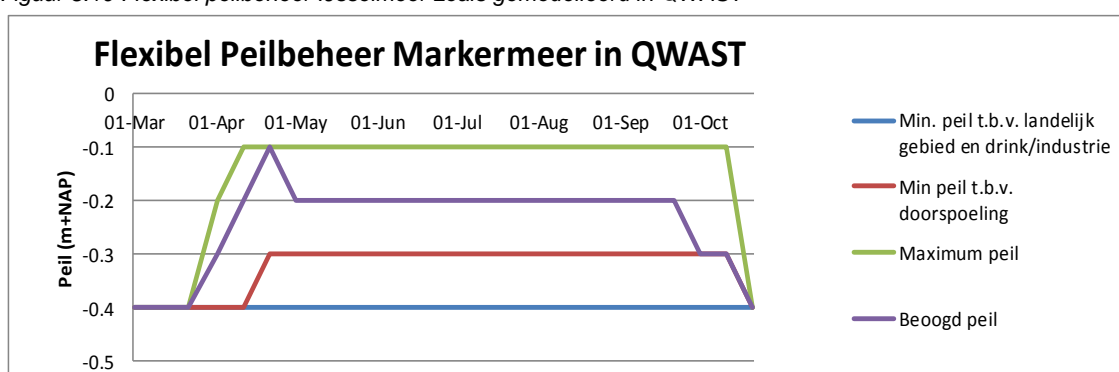
Figuur 8.9 Prioriteringsprincipe in QWAST

In QWAST is het beoogd peilverloop voor flexibel peilbeheer gemodelleerd volgens Figuur 8.10 en Figuur 8.11. De verschillen ten opzichte van het ontwerpbesluit zitten vooral in het vastleggen van beoogde tussenpeilen tijdens de opzetperiode en het vasthouden van het beoogd peil op -20cm tot 1 september i.p.v. het laten zakken van dit peil vanaf half augustus. Het model bepaalt met behulp van de Model Predictive Control techniek of en wanneer peilopzet nodig is om zo goed mogelijk te voldoen aan de wensen voor zoetwatervoorziening.

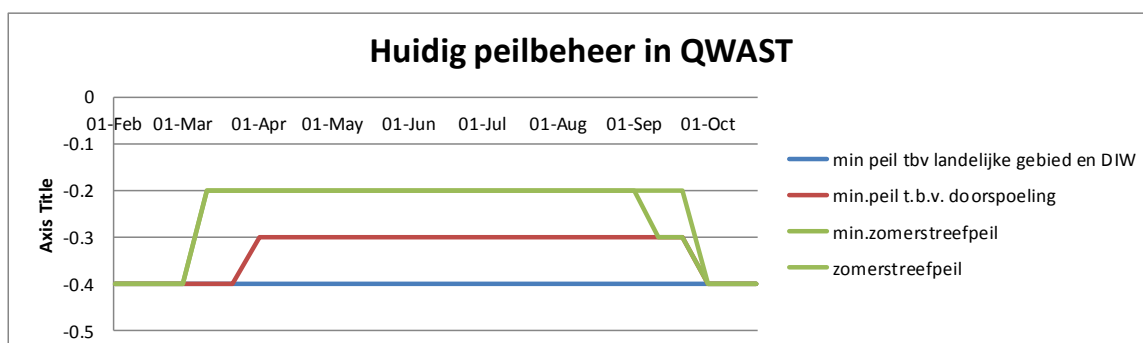
Het 'huidig' peilbeheer in QWAST (Figuur 8.12) volgt in september niet gegarandeerd het zomerstreefpeil, aangezien het model de ruimte krijgt om een peil te handhaven tussen zomerstreefpeil -20cm en uitzakking naar -30cm.



Figuur 8.10 Flexibel peilbeheer IJsselmeer zoals gemodelleerd in QWAST



Figuur 8.11 Flexibel Peilbeheer Markermeer zoals gemodelleerd in QWAST



Figuur 8.12 Huidig Peilbeheer (IJsselmeer & Markermeer) zoals gemodelleerd in QWAST

Uit de QWAST berekeningen blijkt dat de peilopzet in het vroege voorjaar niet altijd gehaald wordt in droge of extreem droge jaren. Tevens is gebleken dat de vervroegde uitzakking van het beoogd peil in de nazomer de analyse bemoeilijkt van het bufferschijfgebruik voor zoetwatervoorziening. Het buffergebruik vanaf 11 april tot 1 september kan volledig toegekend worden aan de zoetwatervoorziening. Na 1 september is echter niet uit het meerpeil te achterhalen of de uitzakking plaatsvindt vanwege zoetwatervoorziening of dat het waterpeil zakt omdat het beoogd peil wordt nagestreefd.

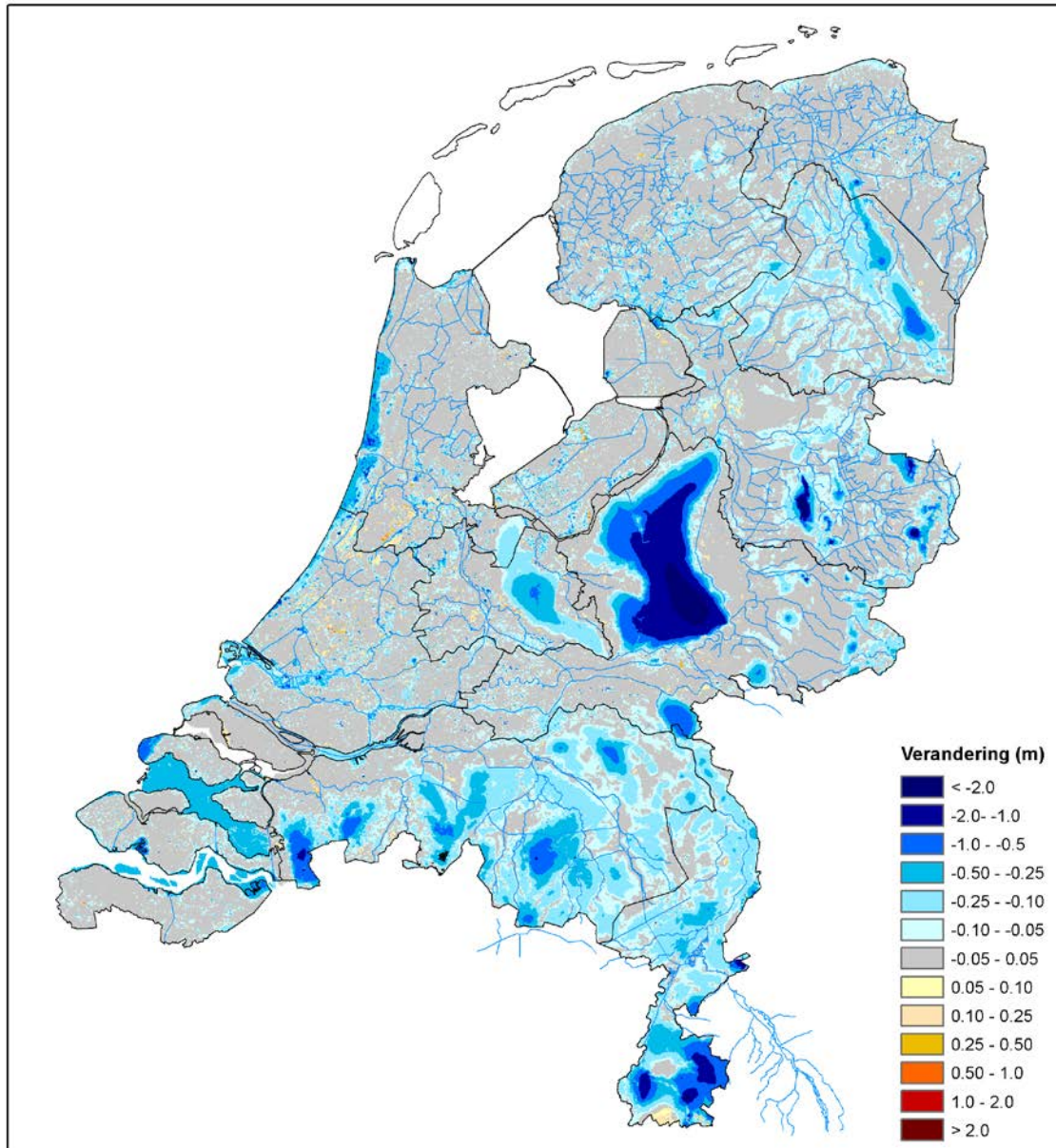
Bij huidig peilbeheer zakt QWAST vaak al eerder uit naar winterpeil. Omdat in veel jaren ook in september aanspraak wordt gemaakt op de buffer, biedt flexibel peilbeheer in die maand dus voordelen omdat peil opgezet mocht worden en/of langer hoog gehouden mocht worden en naar omliggende regio's geleverd mag worden.

B Bijlage grondwater

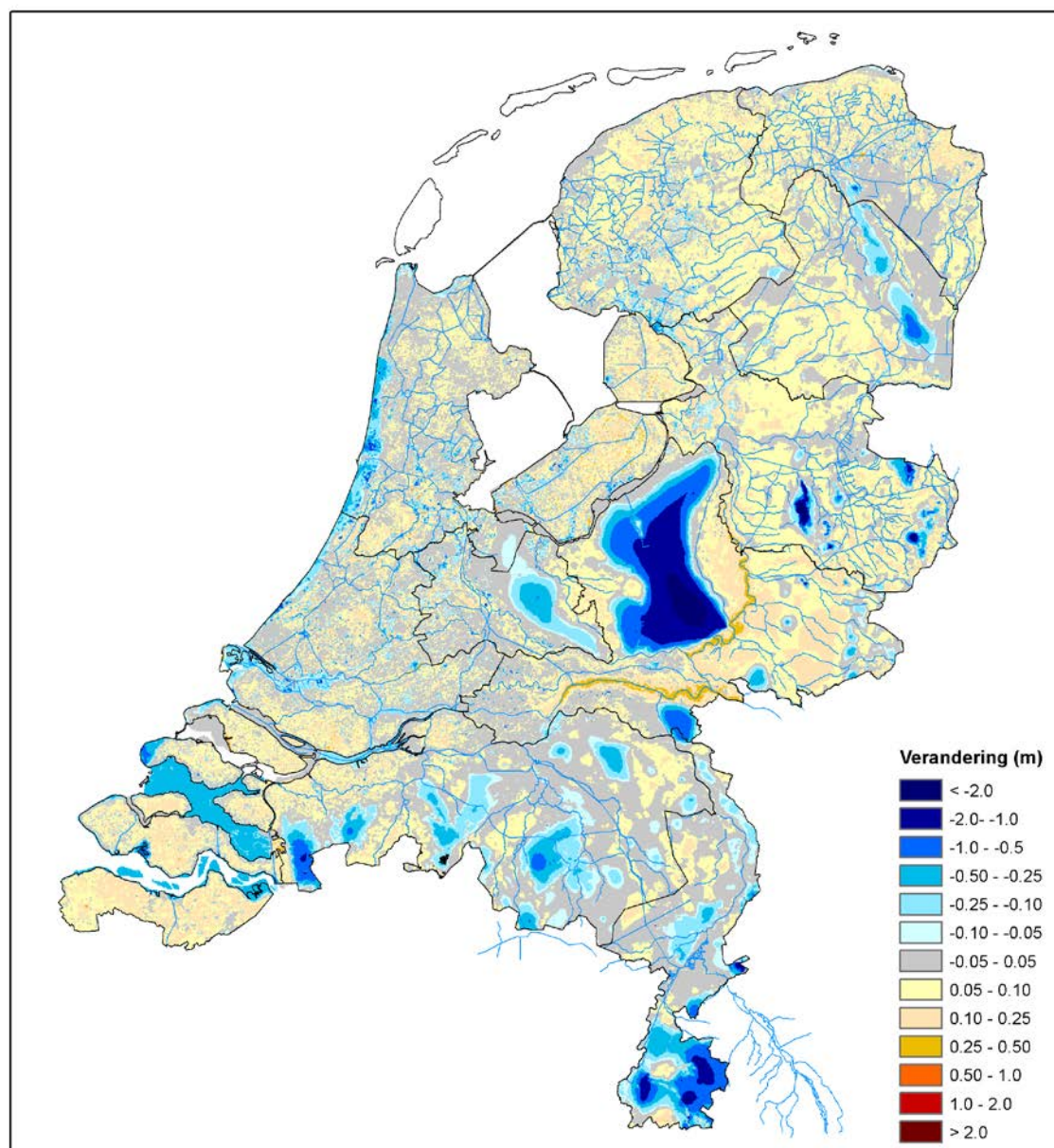
In deze bijlage zijn grondwaterkaarten opgenomen die volgen uit de berekeningen met het Landelijk Hydrologisch Model (zie Hoofdstuk 2). Het gaat om verschilkaarten van GVG, GLG, GHG, grondwaterdynamiek, kwel/infiltratie, hertelperiode en afvoeren (10percentiel, 50percentiel en 90percentiel). Voor uitleg bij de kaarten verwijzen we naar Hoofdstuk 8.

- B.1: verschil tussen Warm2050 en Ref2015 (NWM S0 som);
- B.2: verschil tussen Stoom2050 en Ref2015 (NWM S0 som);
- B.3: verschil tussen Stoom2050 en Warm2050 (NSM S0 som);
- B.4: verschil tussen Warm2050 en Ref2015 (NWM S1 som);

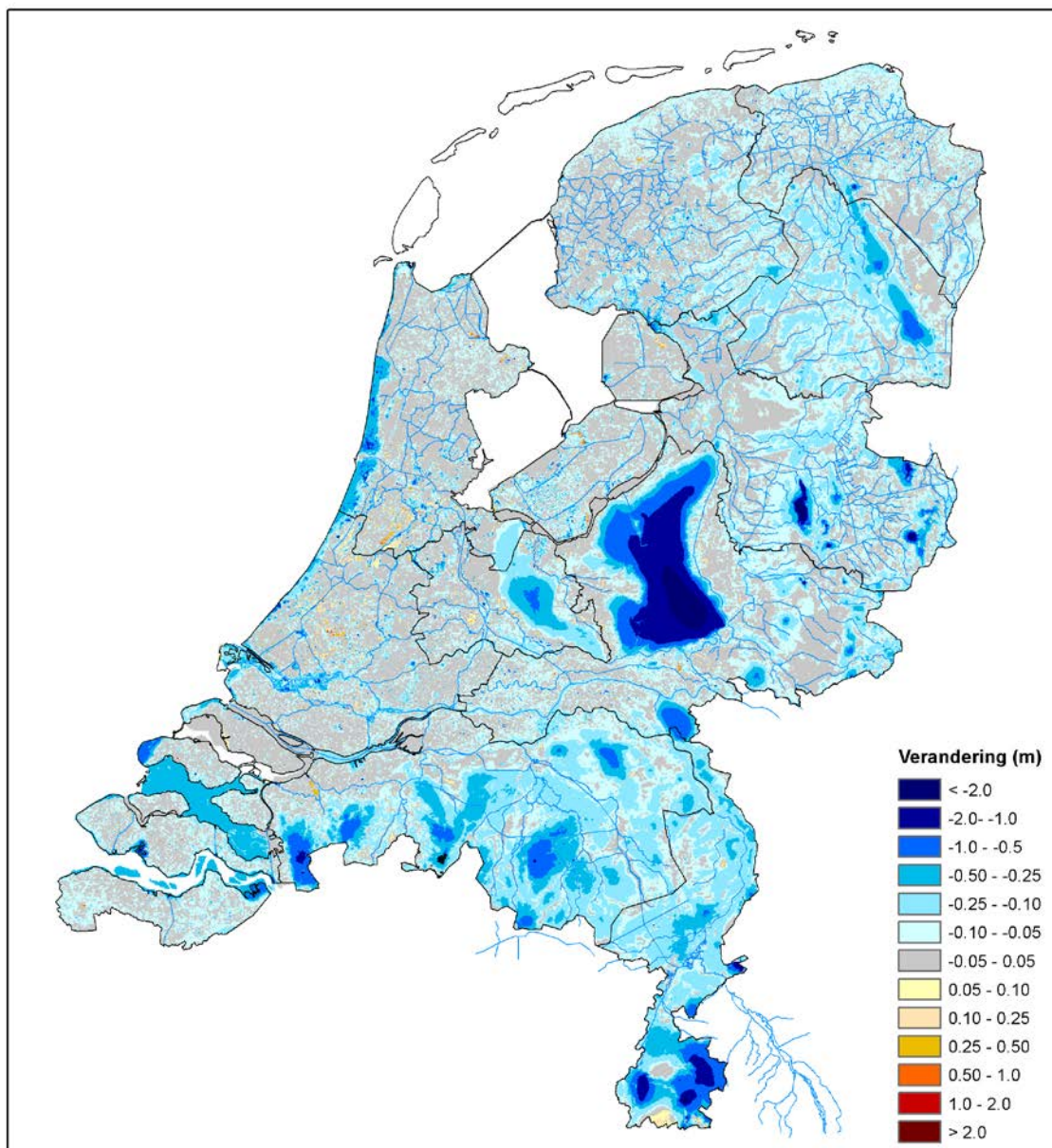
B.1 Effect van Warm2050 op GVG, GLG en GHG (NWM som S0)



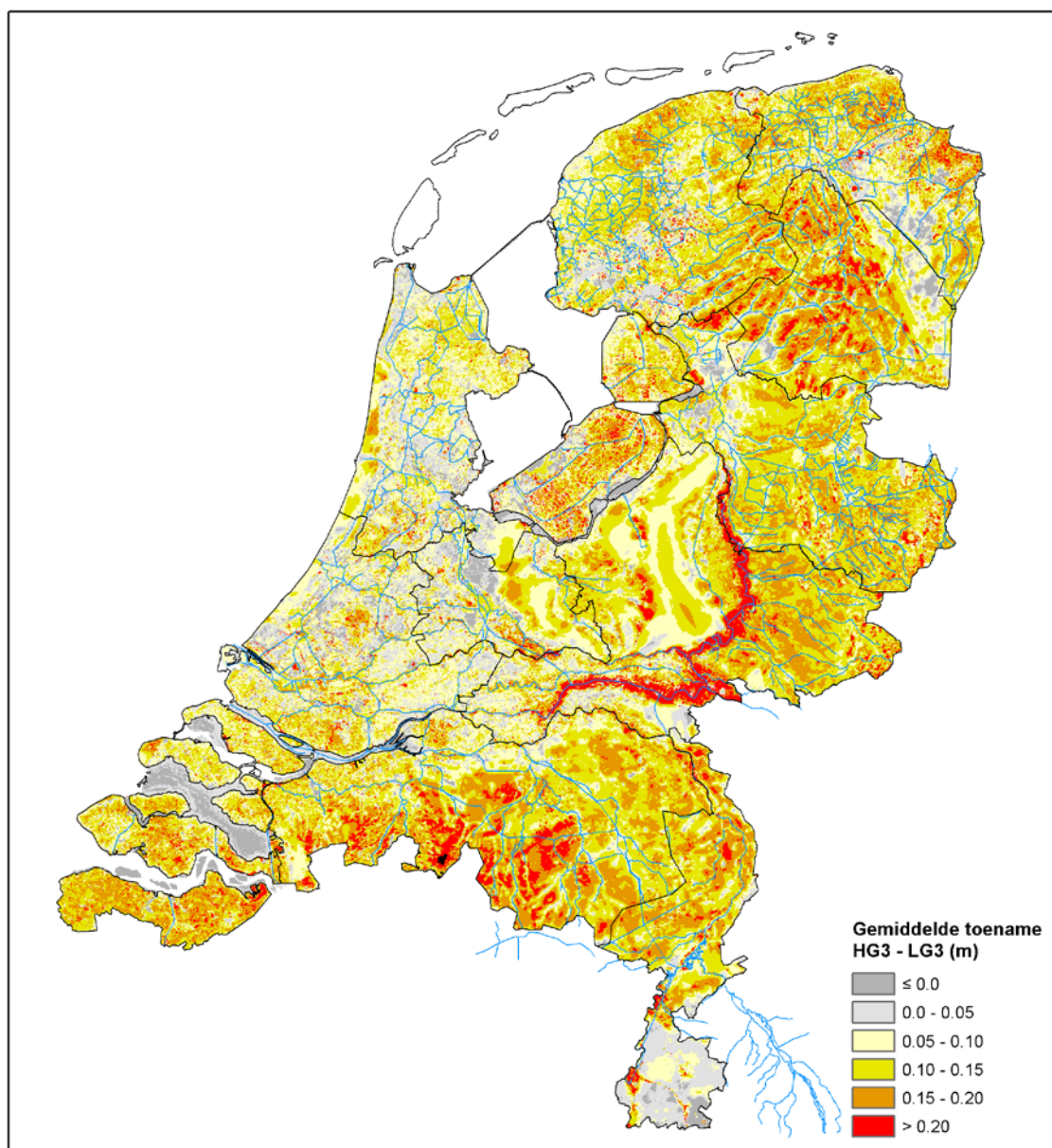
Figuur 8.13 Scenario W2050S0 in vergelijking met scenario REF2015S0: verschil in GVG.



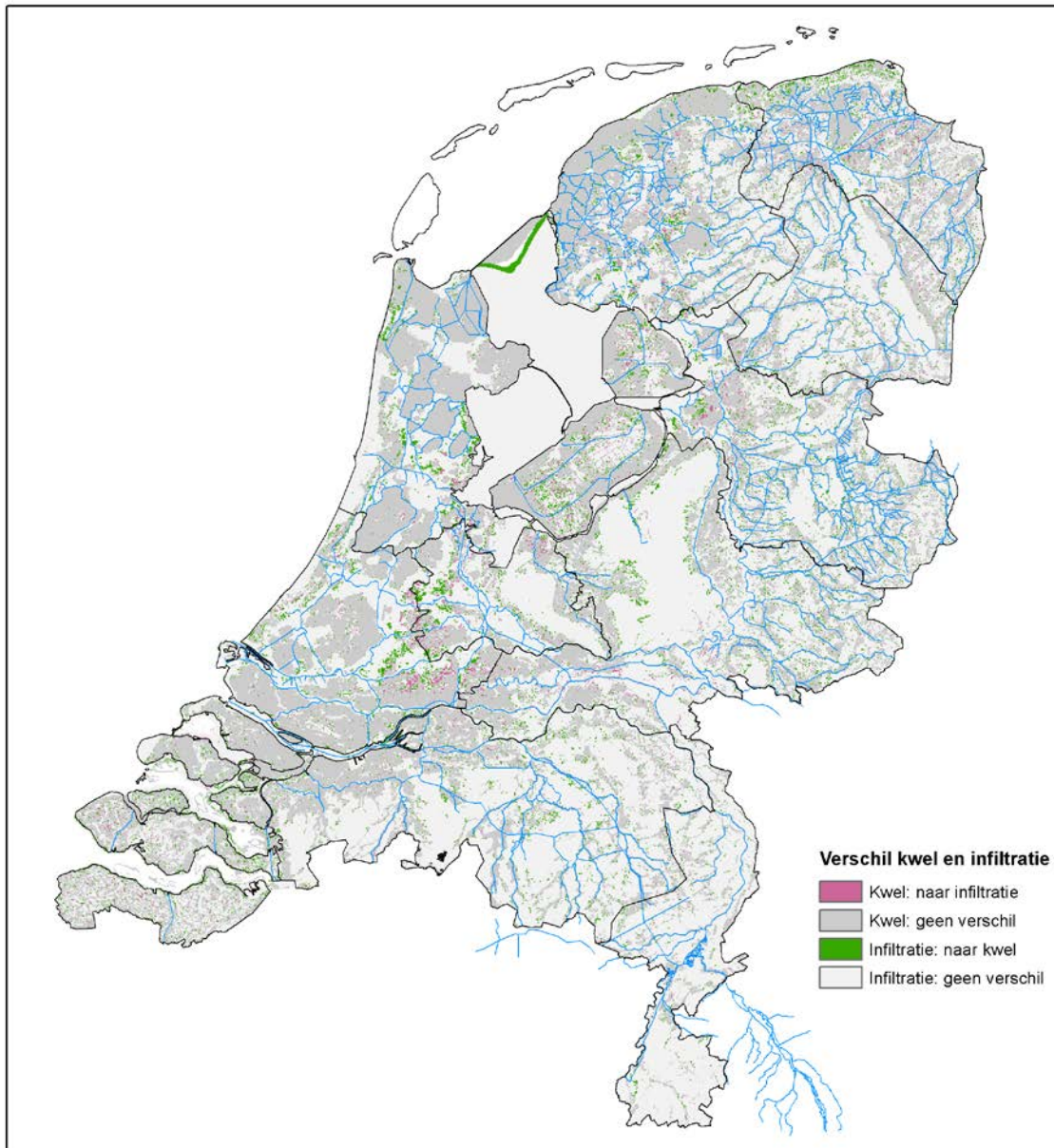
Figuur 8.14 Scenario W2050S0 in vergelijking met scenario REF2015S0: verschil in GLG.



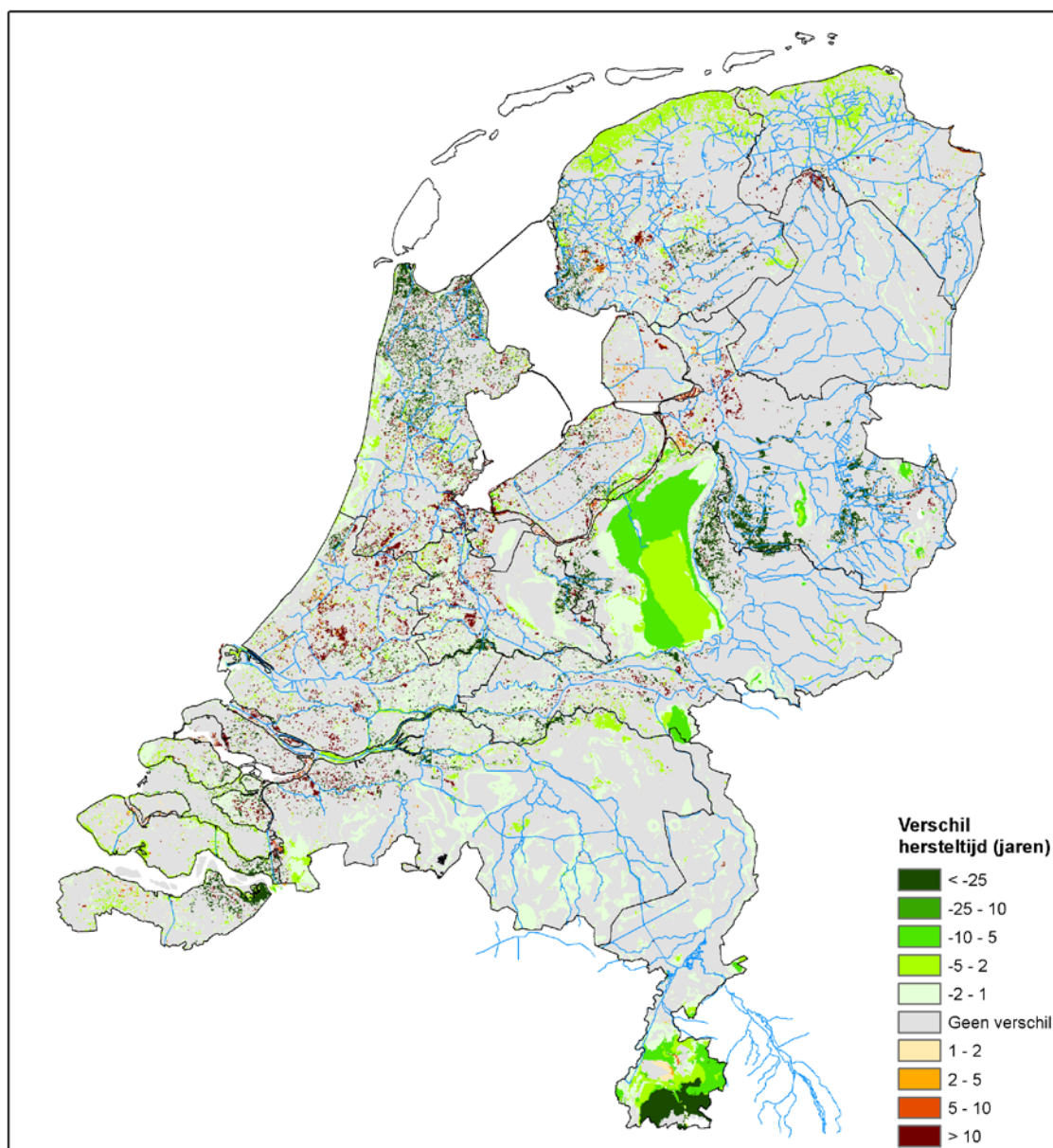
Figuur 8.15 Scenario W2050S0 in vergelijking met scenario REF2015S0: verschil in GHG.



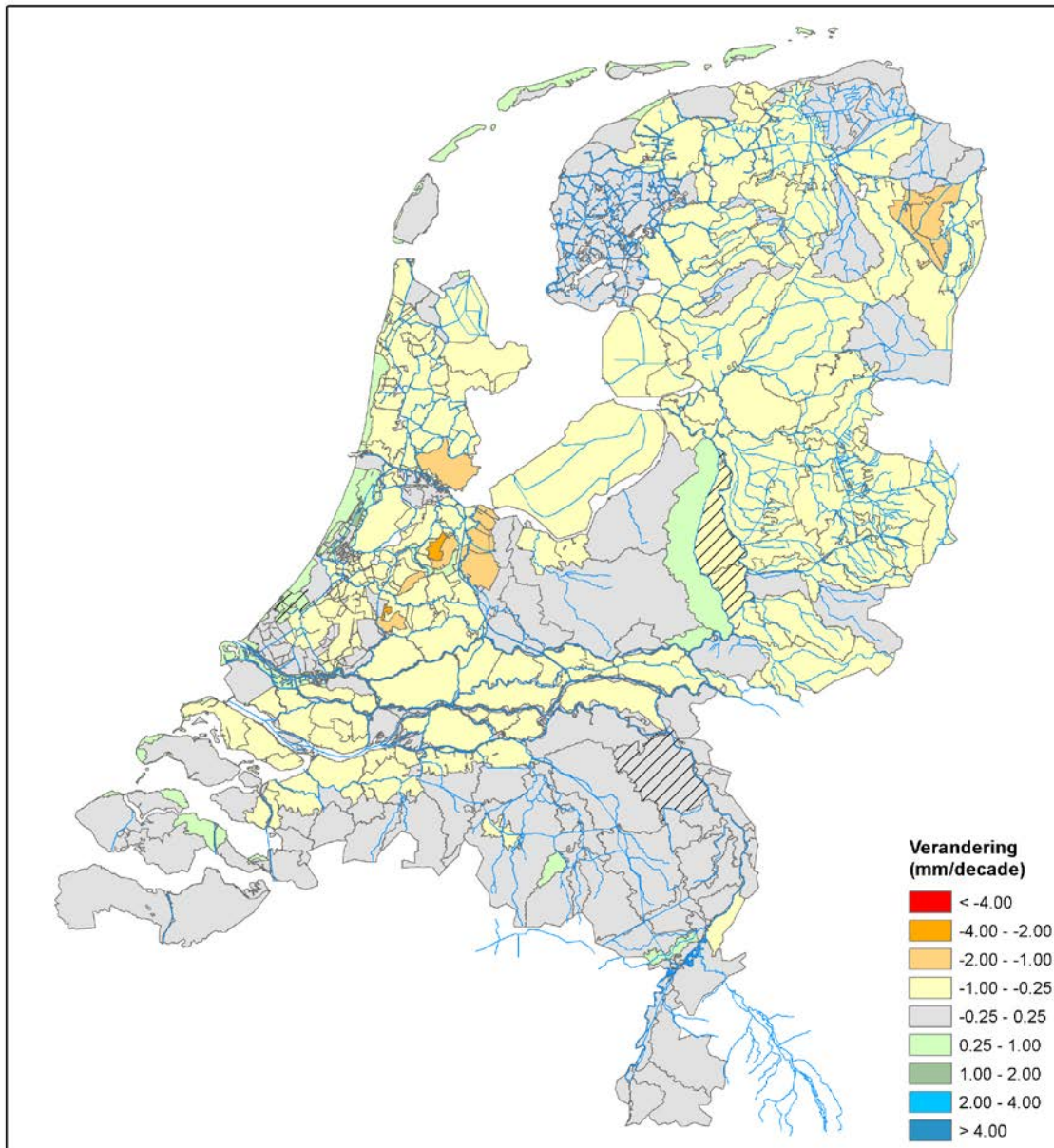
Figuur 8.16 Scenario W2050S0 in vergelijking met scenario REF2015S0: verschil in grondwaterdynamiek (GLG - GHG).



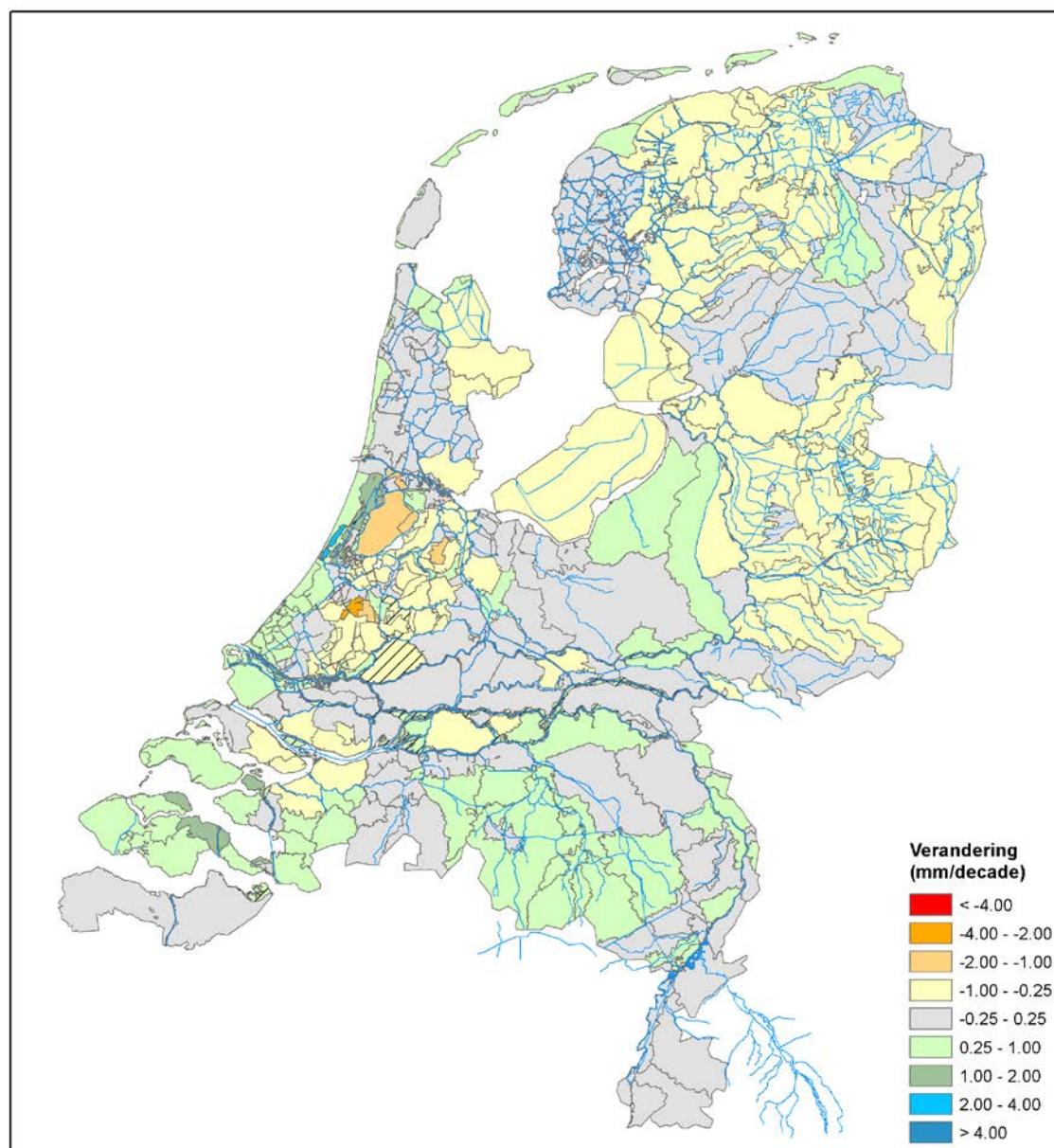
Figuur 8.17 Scenario W2050S0 in vergelijking met scenario REF2015S0: verandering van kwel naar infiltratie of vice versa.



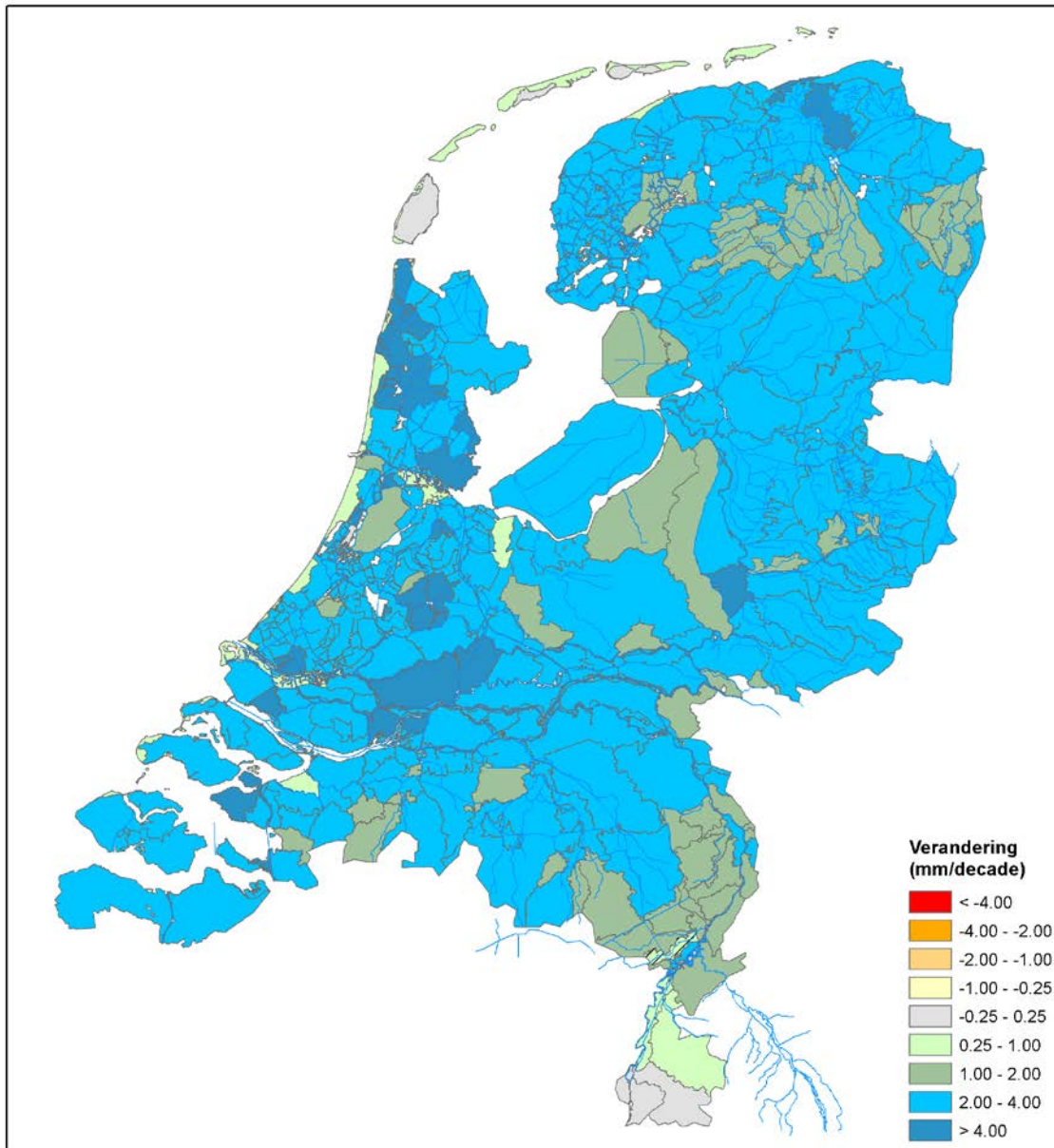
Figuur 8.18 Scenario W2050S0 in vergelijking met scenario REF2015S0: verschil in herstelperiode na diepste grondwaterstand.



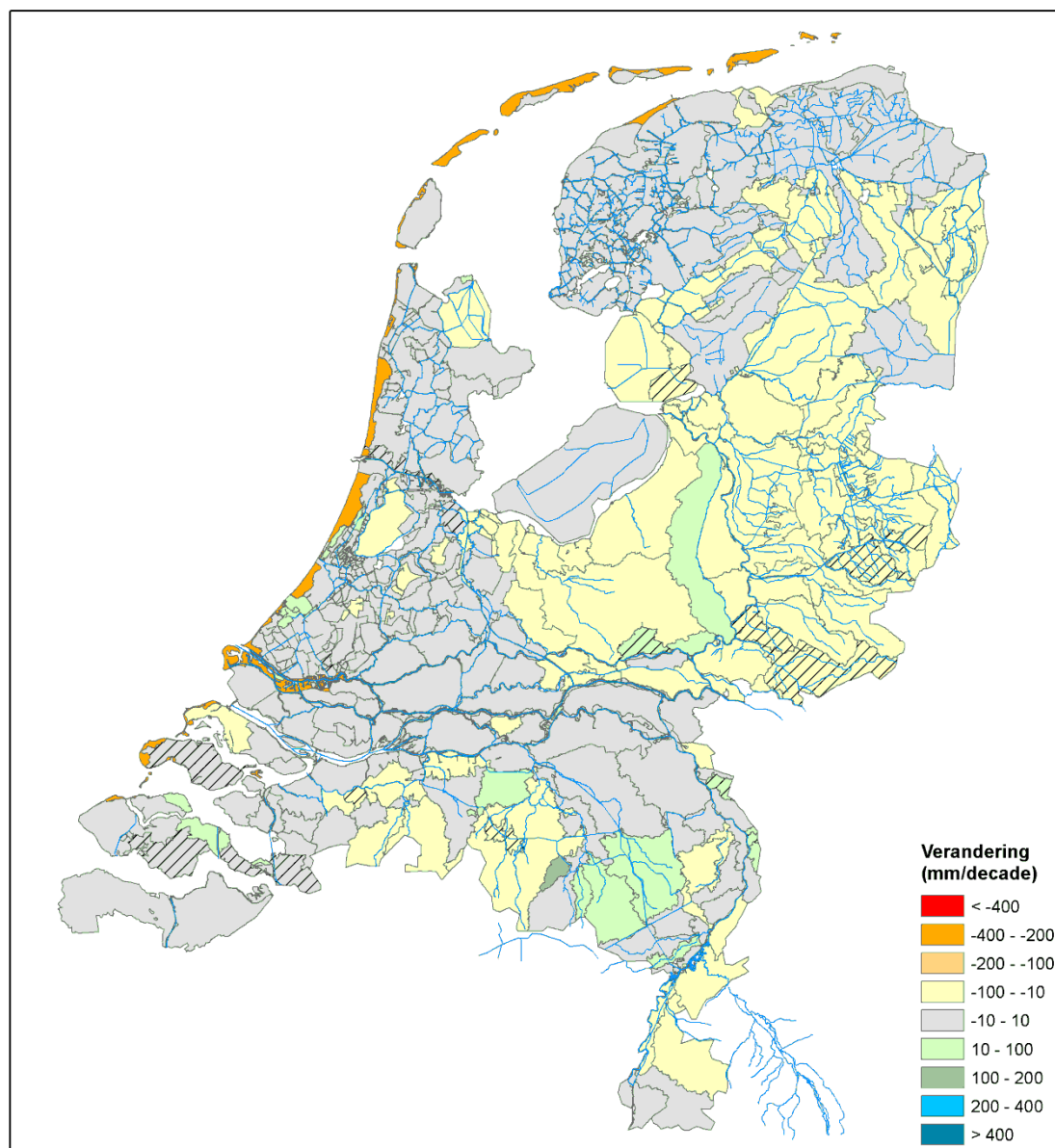
Figuur 8.19 Scenario W2050S0 in vergelijking met scenario REF2015S0: verschil in 10e percentiel afvoer. Arcering geeft een omslag van drainage naar infiltratie aan, of vice versa.



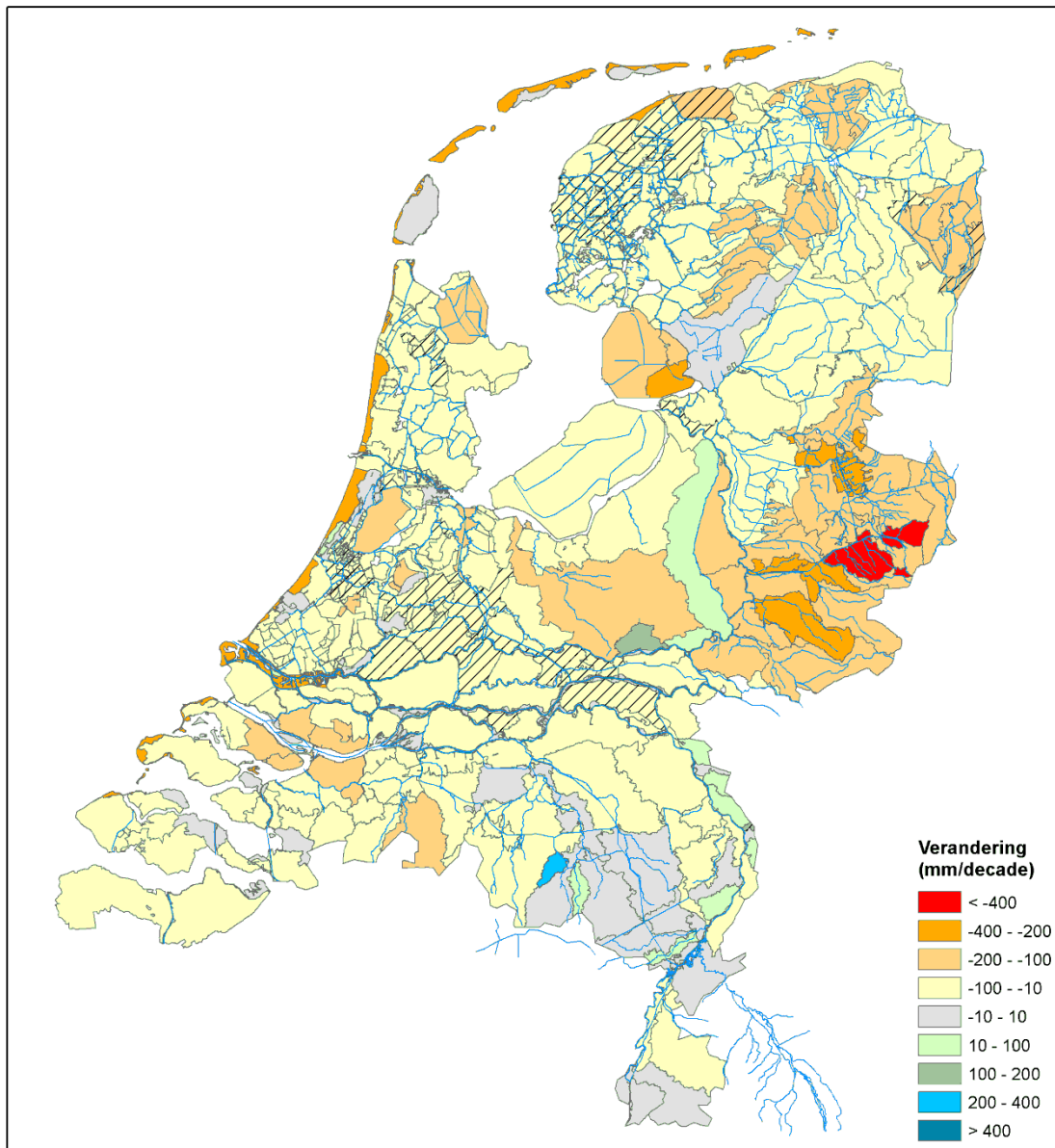
Figuur 8.20 Scenario W2050S0 in vergelijking met scenario REF2015S0: verschil in 50ste percentiel afvoer. Arcering geeft een omslag van drainage naar infiltratie aan, of vice versa.



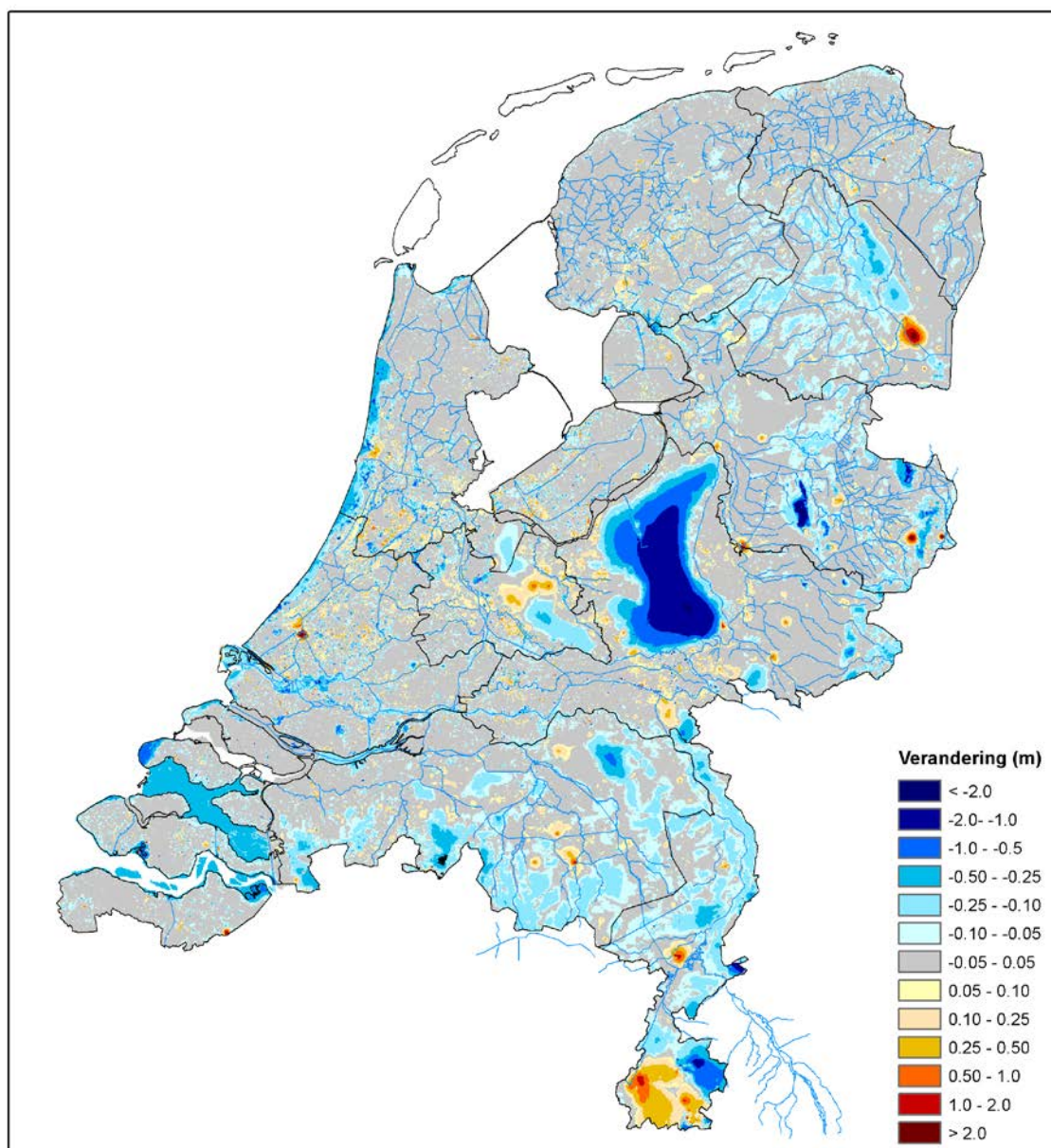
Figuur 8.21 Scenario W2050S0 in vergelijking met scenario REF2015S0: verschil in 90ste percentiel afvoer. Arcering geeft een omslag van drainage naar infiltratie aan, of vice versa.



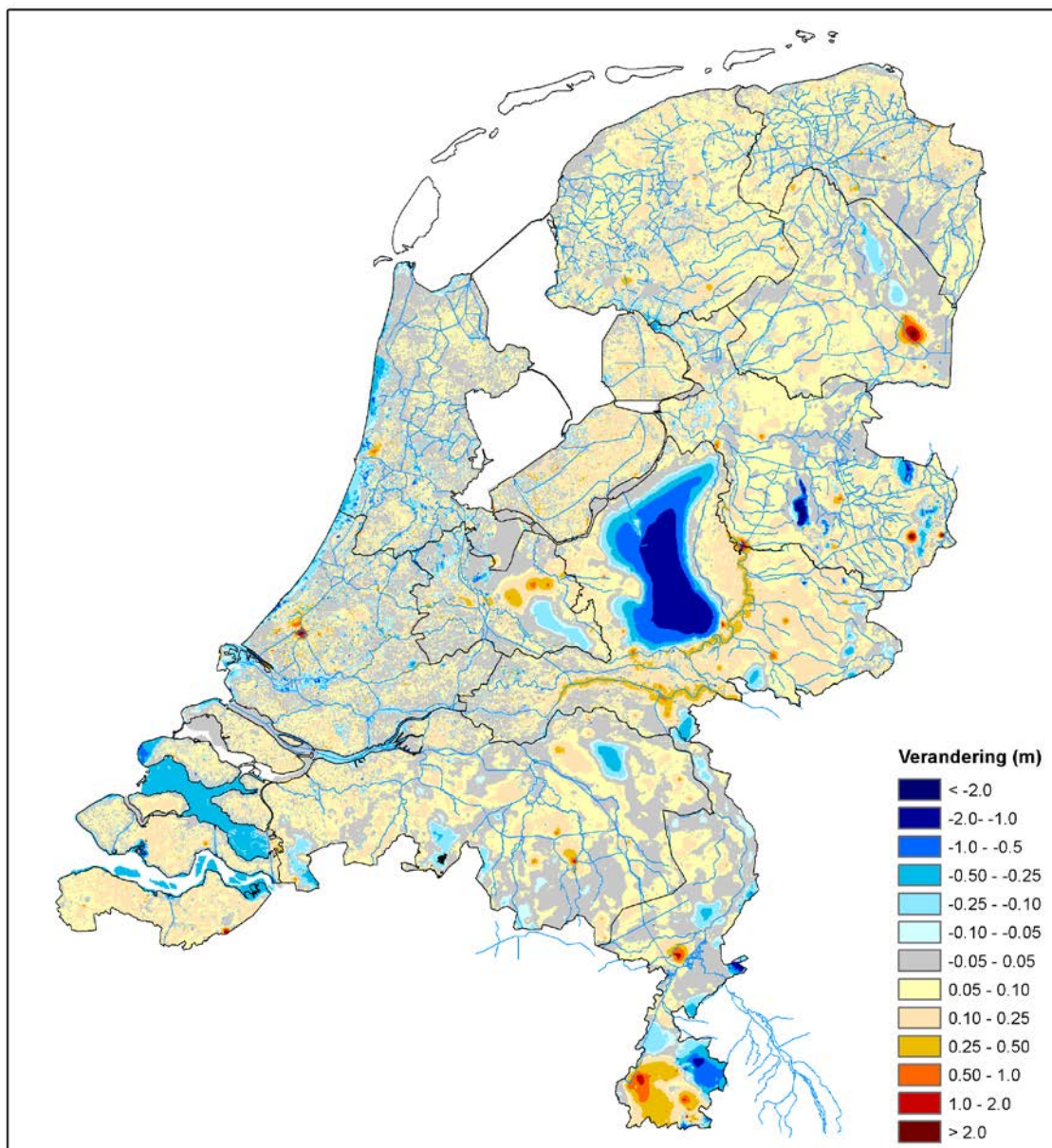
Figuur 8.22 Scenario W2050S0 in vergelijking met scenario REF2015S0: verschil in 10ste percentiel afvoer voor de zomer (juli, augustus, september). Arcering geeft een omslag van drainage naar infiltratie aan, of vice versa.



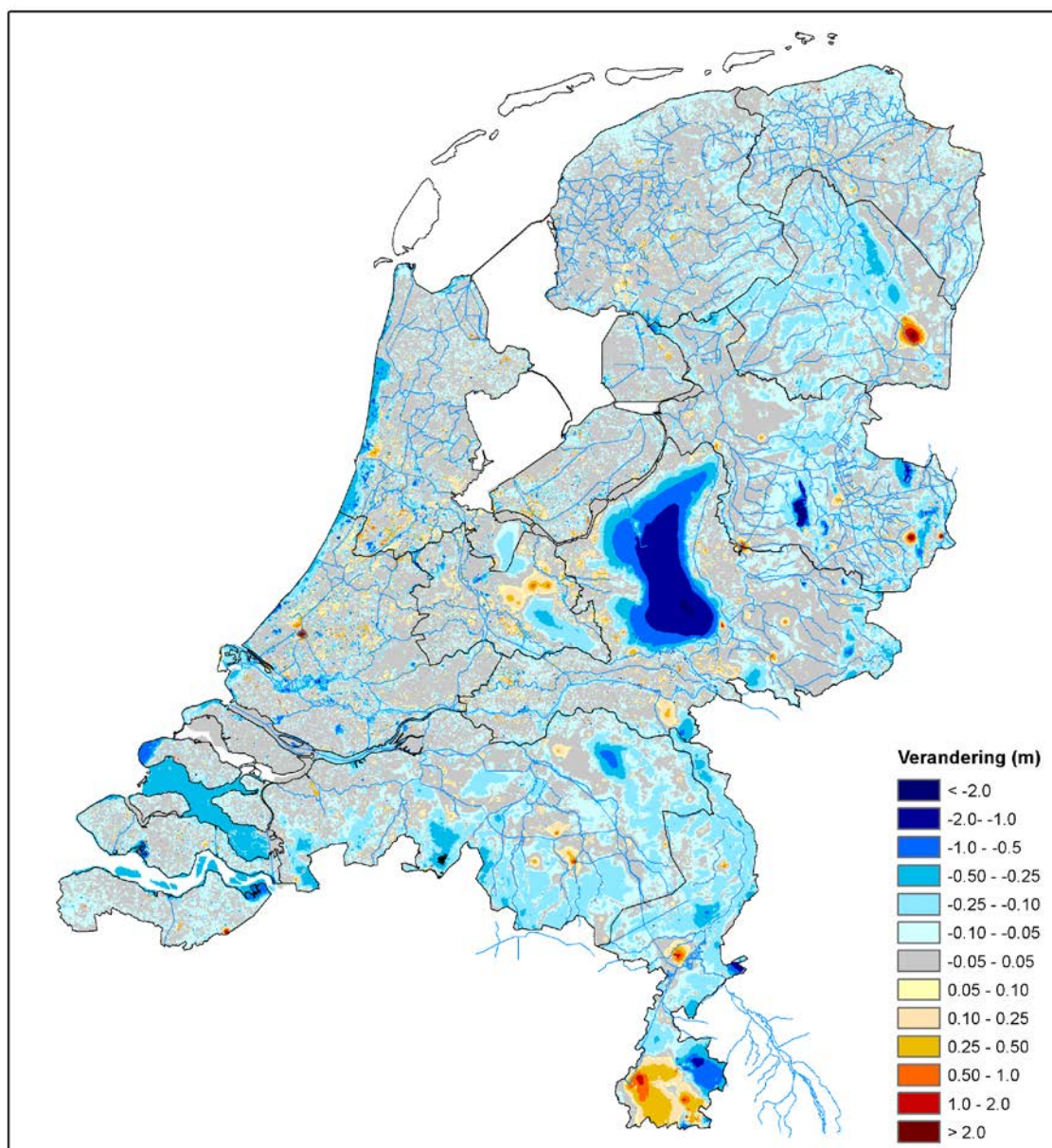
Figuur 8.23 Scenario W2050S0 in vergelijking met scenario REF2015S0: verschil in 90ste percentiel afvoer voor de **zomer** (juli, augustus, september). Arcering geeft een omslag van drainage naar infiltratie aan, of vice versa.

B.2 Effect van Stoom2050 op GVG, GLG en GHG (NWM som S0)

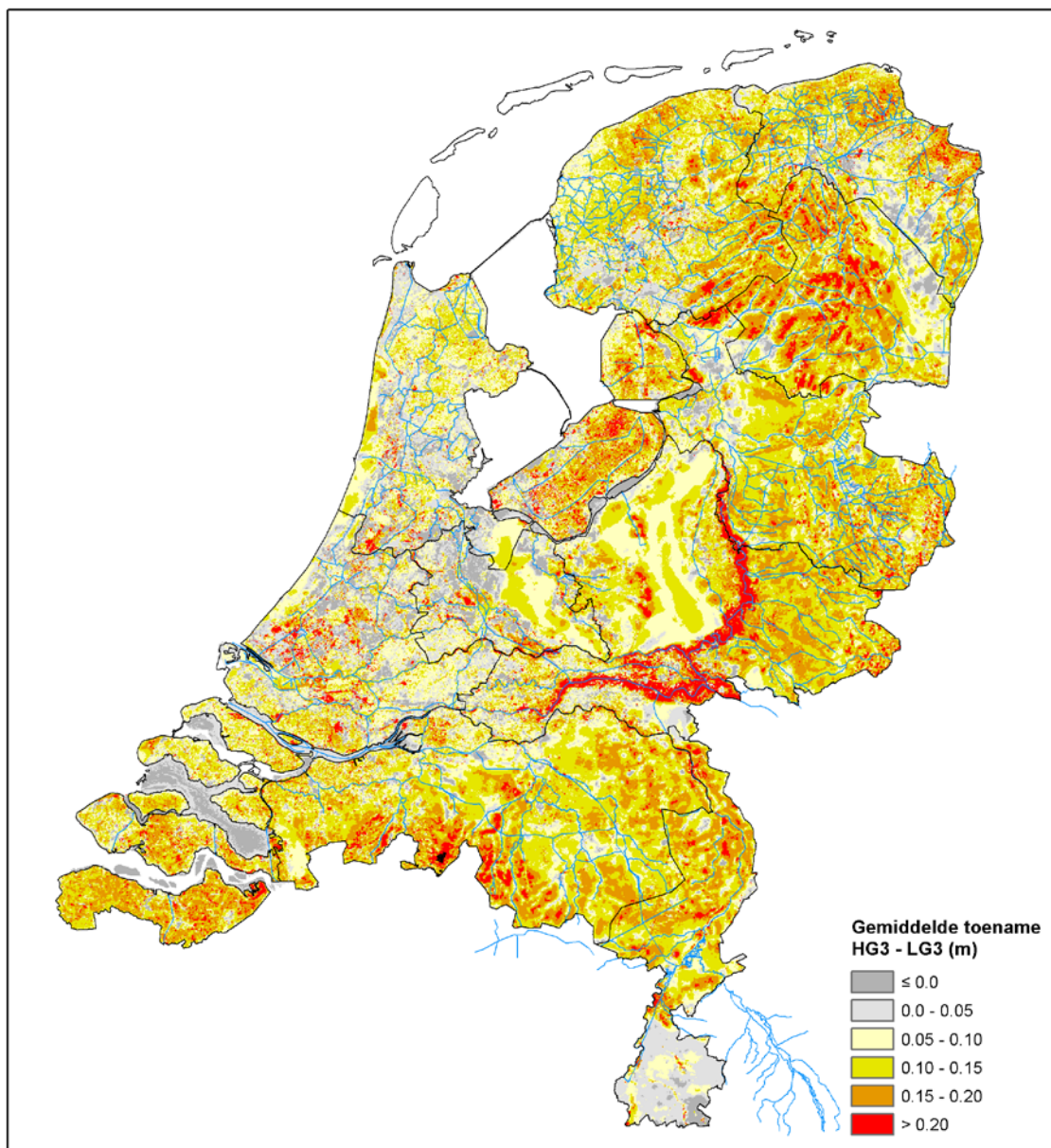
Figuur 8.24 Scenario S2050S0 in vergelijking met scenario REF2015S0: verschil in GVG.



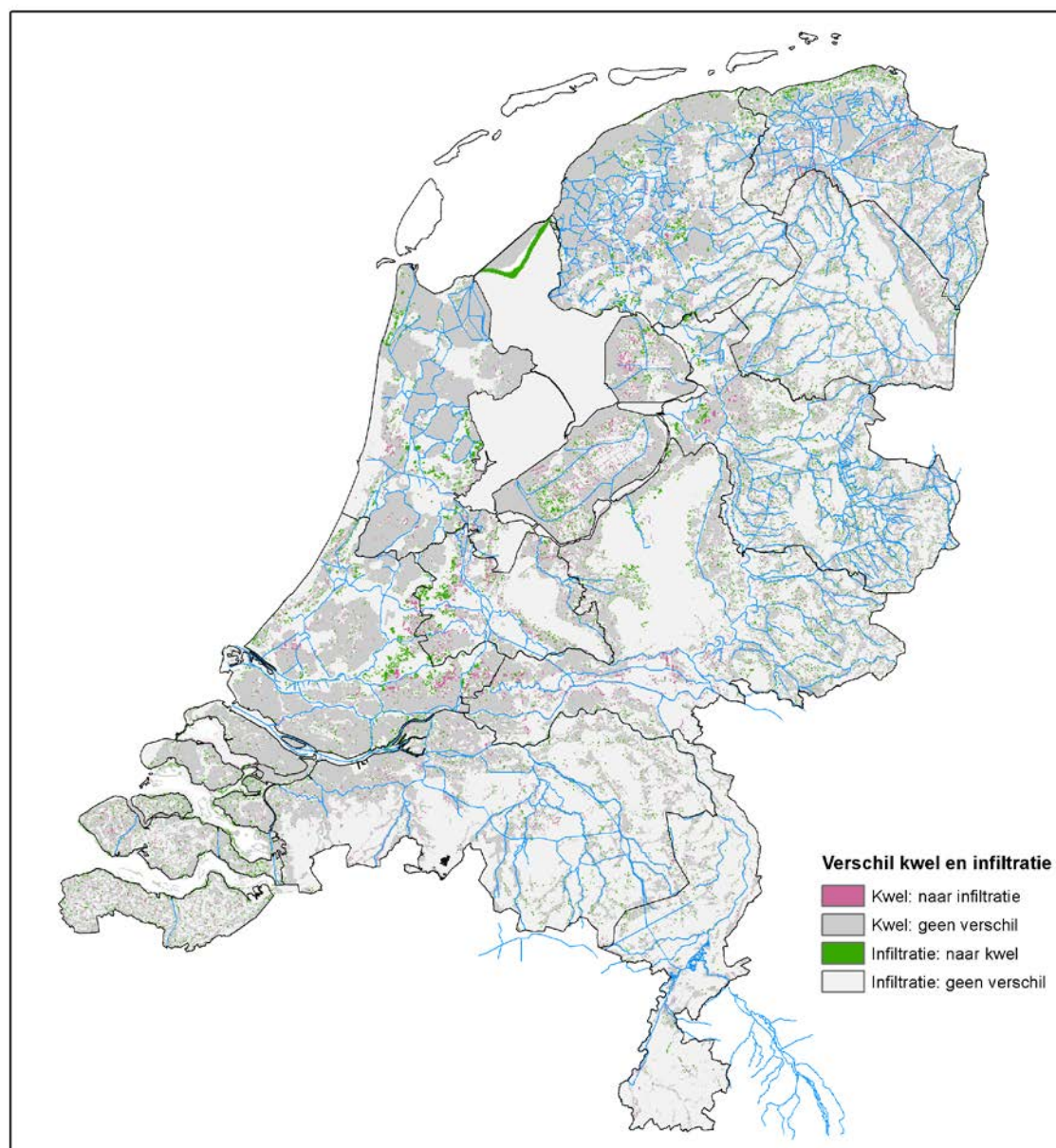
Figuur 8.25 Scenario S2050S0 in vergelijking met scenario REF2015S0: verschil in GLG.



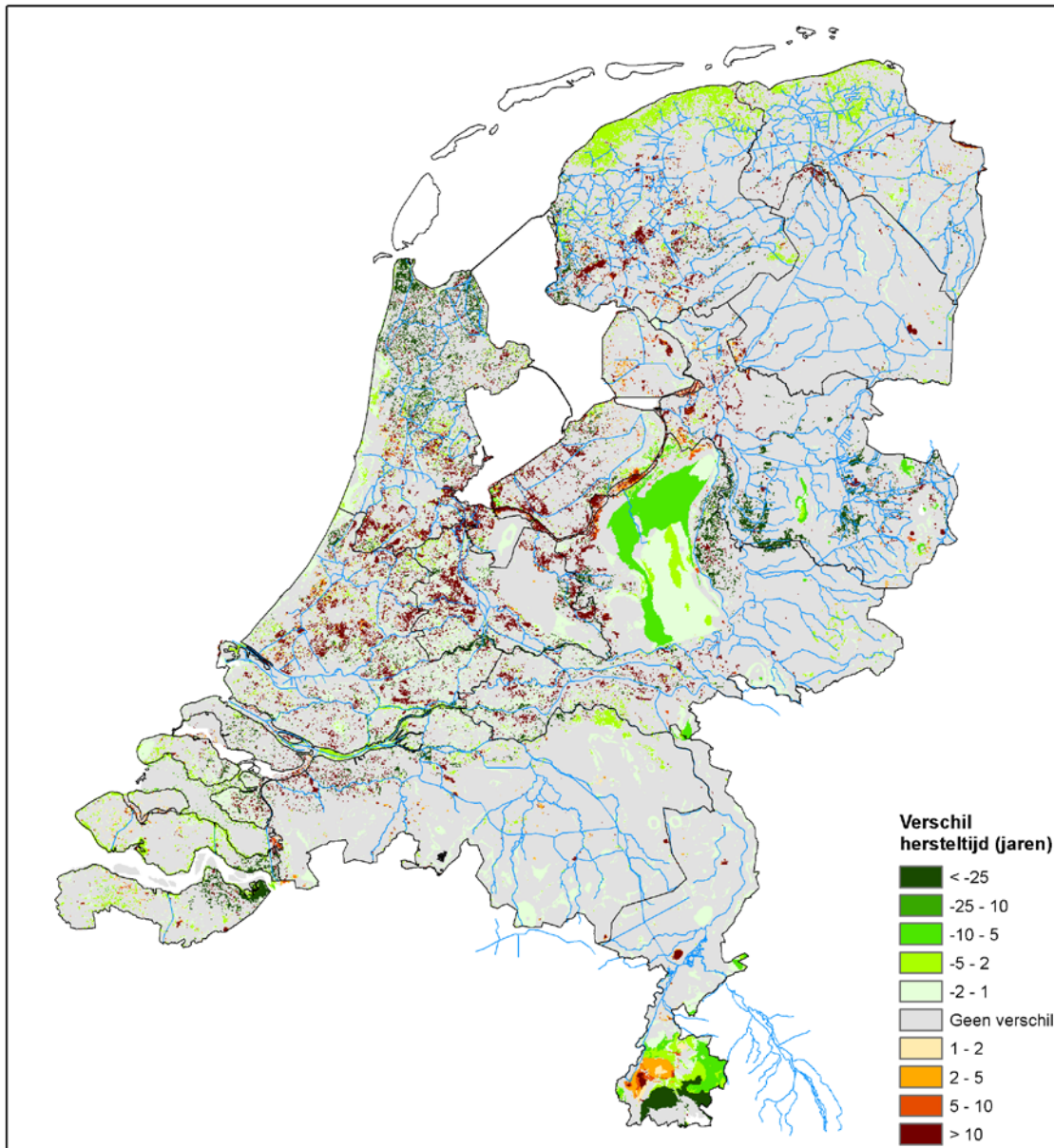
Figuur 8.26 Scenario S2050S0 in vergelijking met scenario REF2015S0: verschil in GHG.



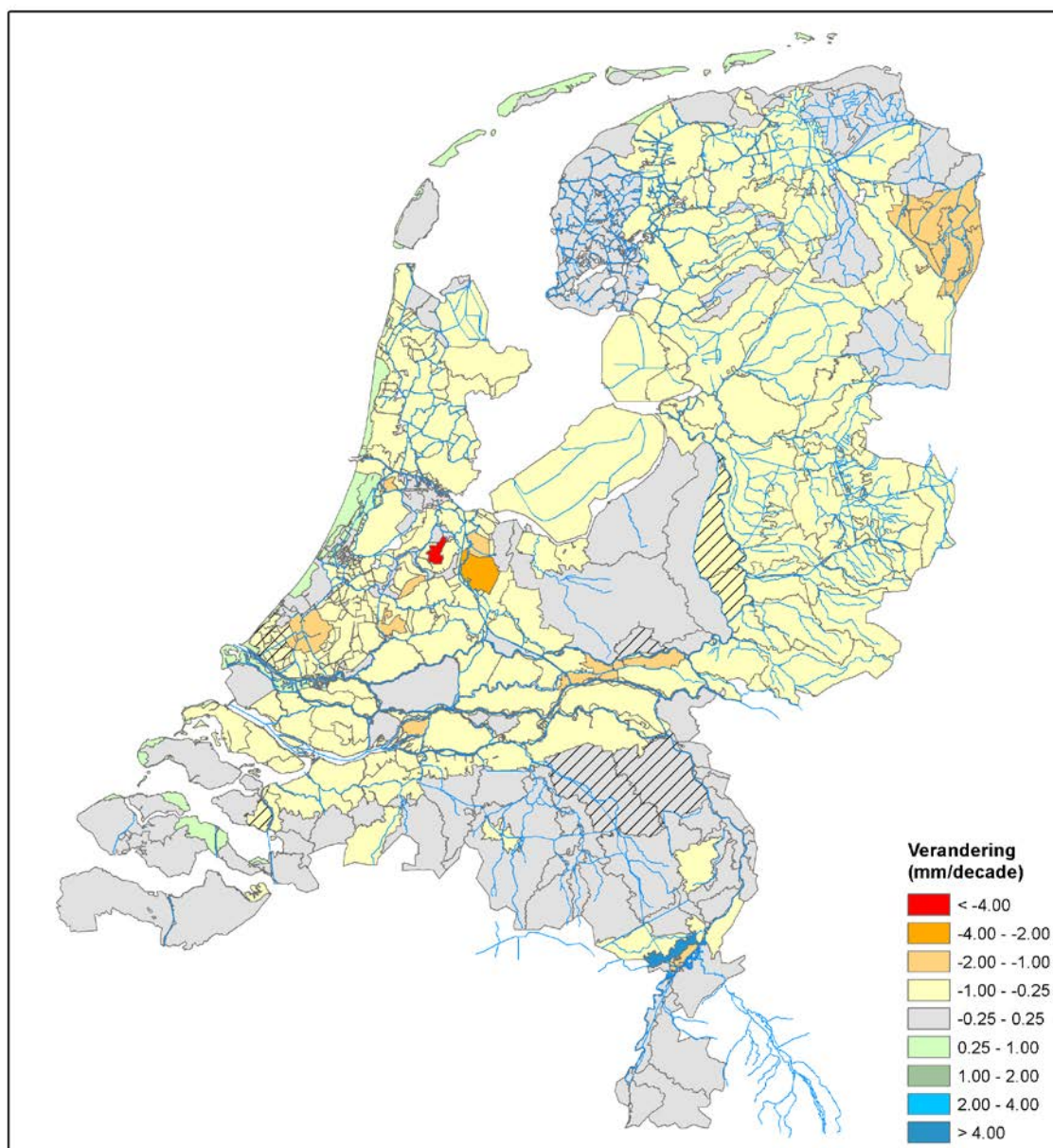
Figuur 8.27 Scenario S2050S0 in vergelijking met scenario REF2015S0: verschil in grondwaterdynamiek (GLG - GHG).



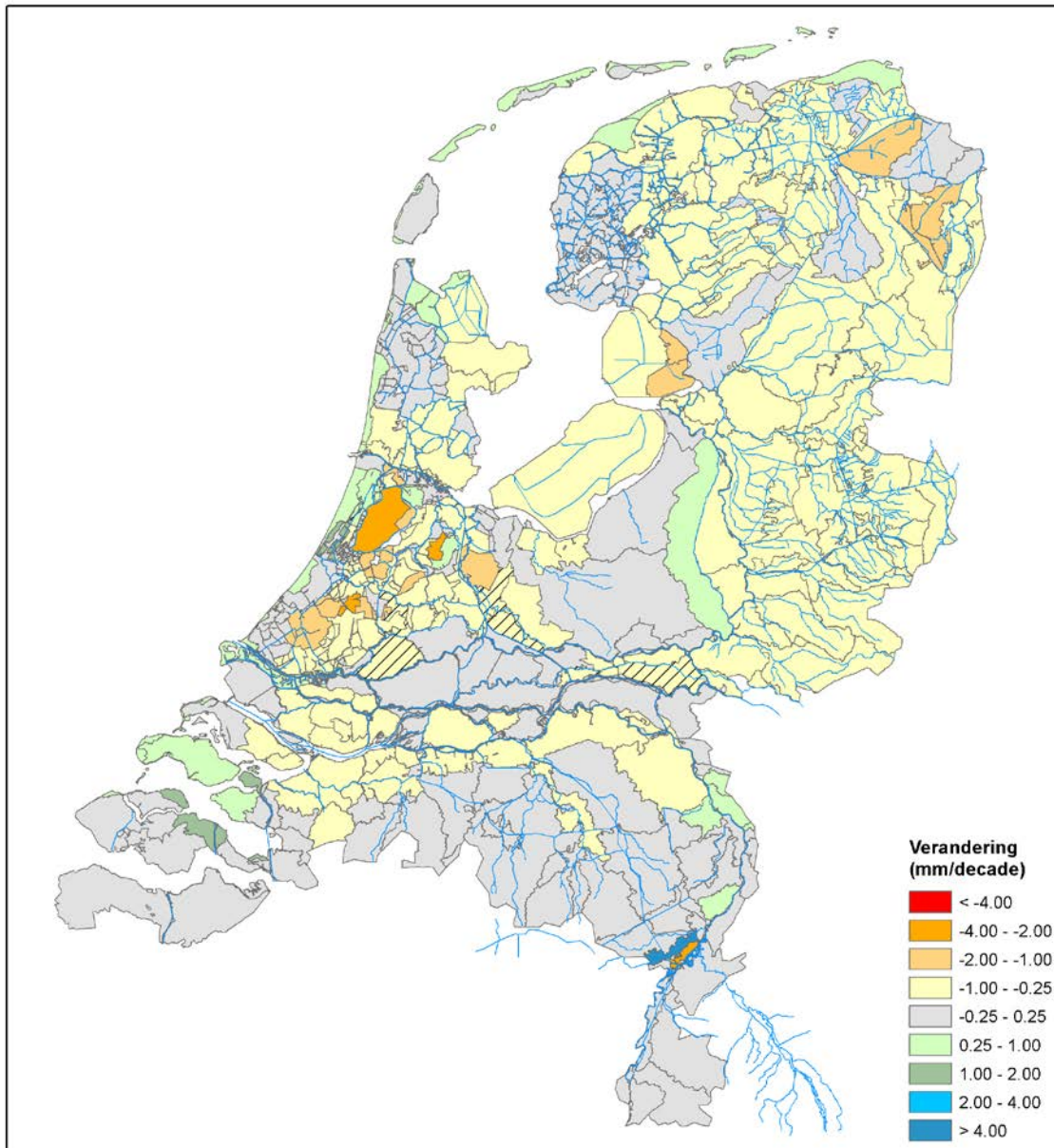
Figuur 8.28 Scenario S2050S0 in vergelijking met scenario REF2015S0: verandering van kwel naar infiltratie of vice versa.



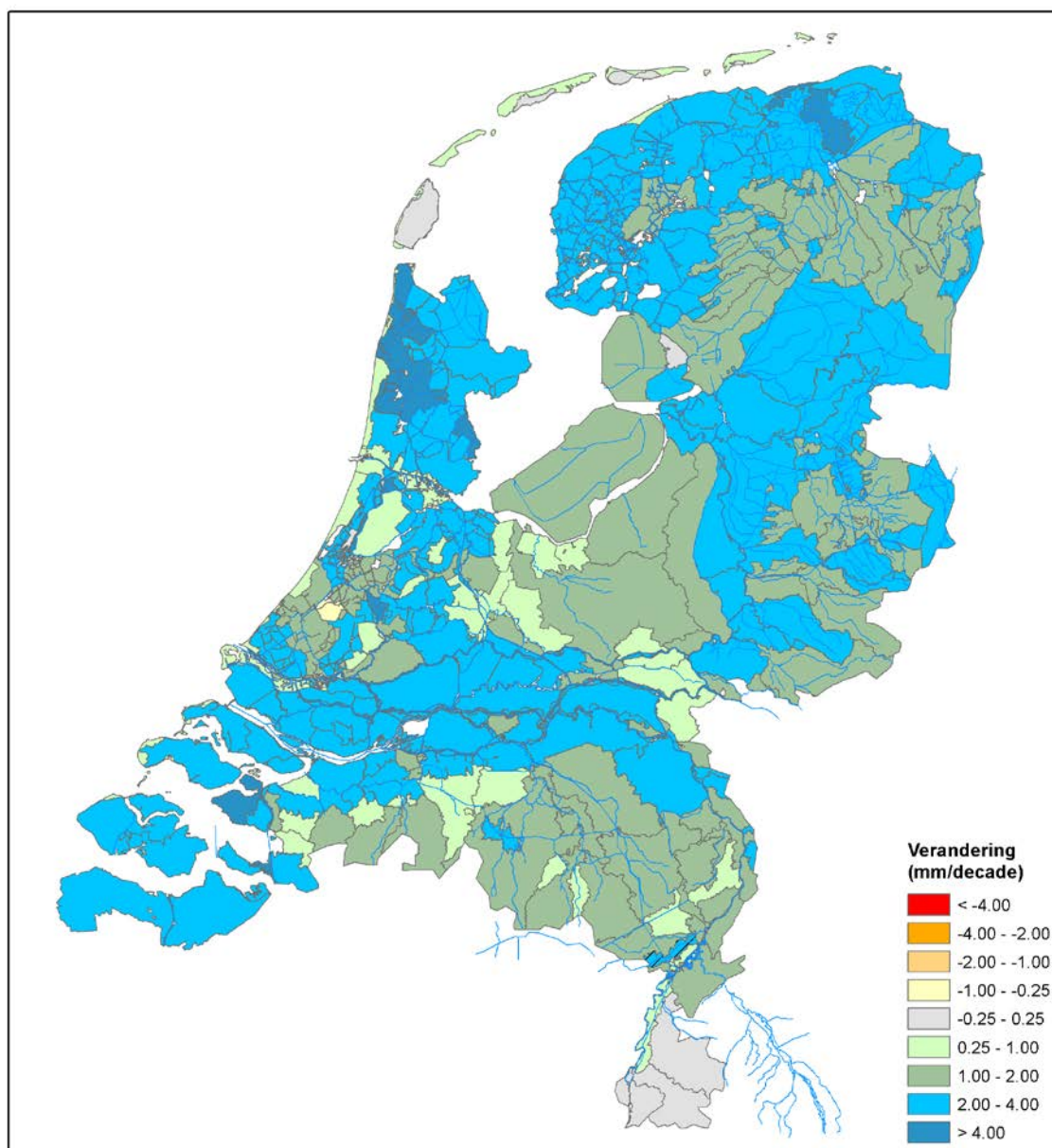
Figuur 8.29 Scenario S2050S0 in vergelijking met scenario REF2015S0: verschil in herstelperiode na diepste grondwaterstand.



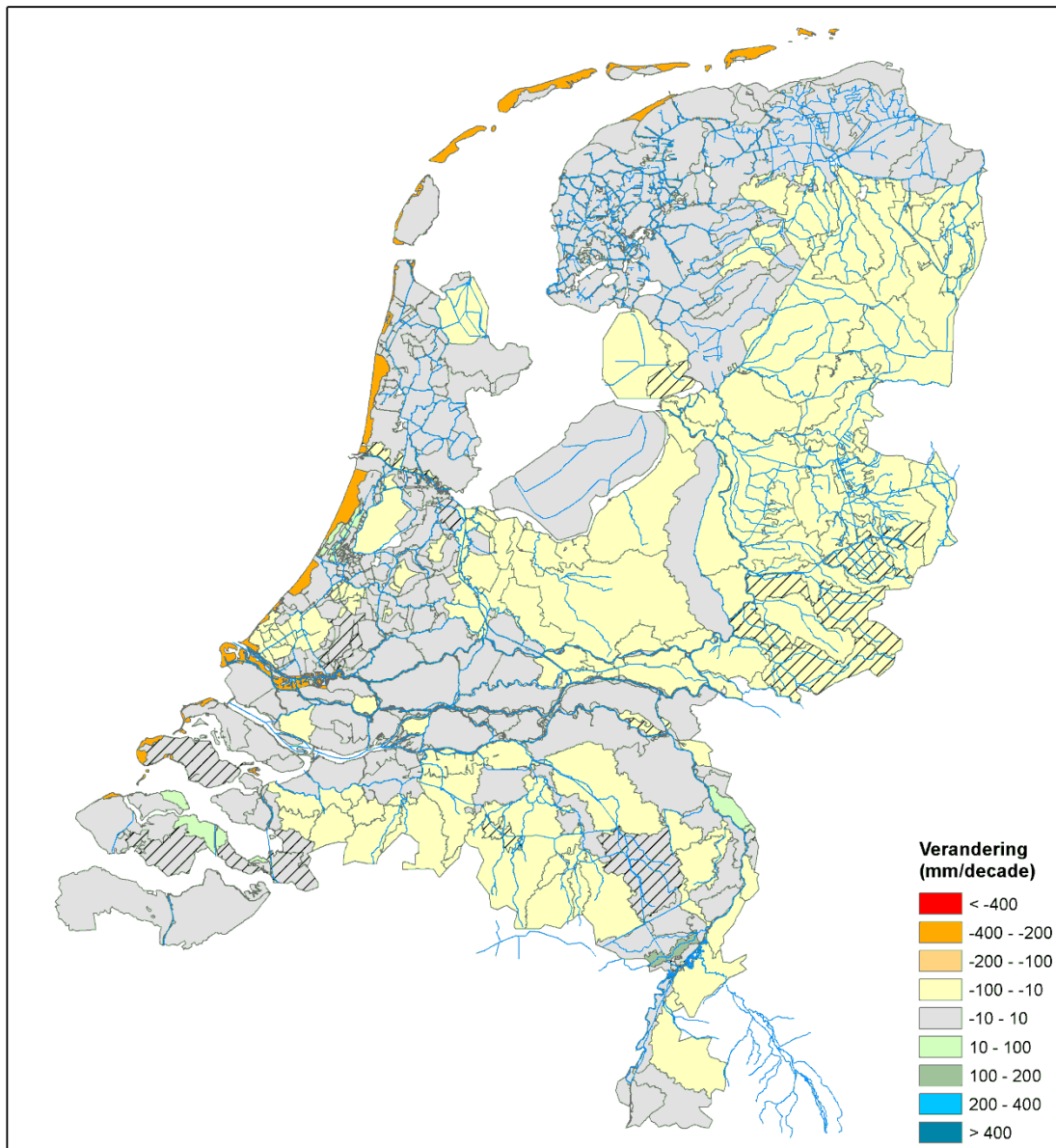
Figuur 8.30 Scenario S2050S0 in vergelijking met scenario REF2015S0: verschil in 10e percentiel afvoer. Arcering geeft een omslag van drainage naar infiltratie aan, of vice versa.



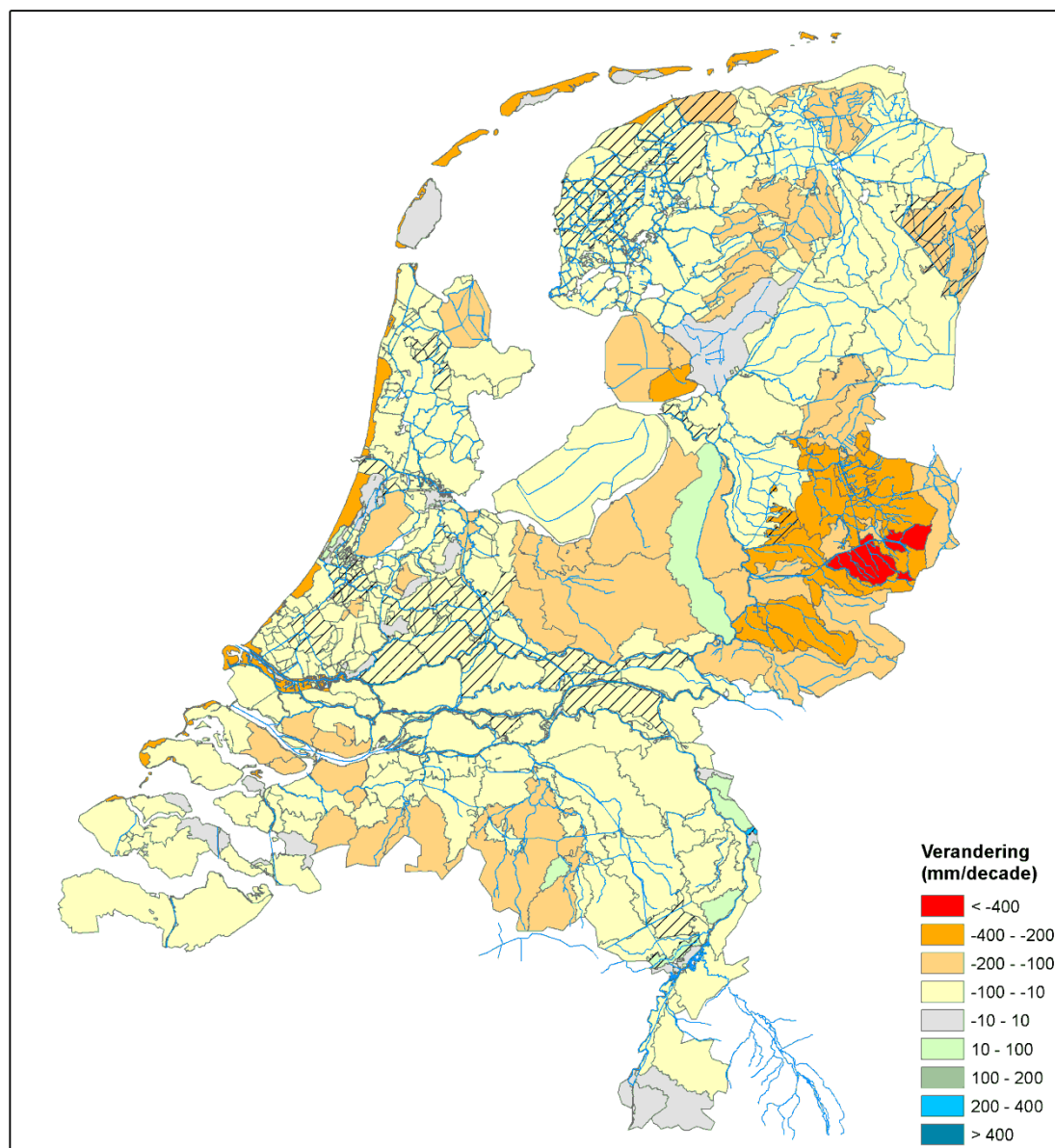
Figuur 8.31 Scenario S2050S0 in vergelijking met scenario REF2015S0: verschil in 50ste percentiel afvoer. Arcering geeft een omslag van drainage naar infiltratie aan, of vice versa.



Figuur 8.32 Scenario S2050S0 in vergelijking met scenario REF2015S0: verschil in 90ste percentiel afvoer. Arcering geeft een omslag van drainage naar infiltratie aan, of vice versa.

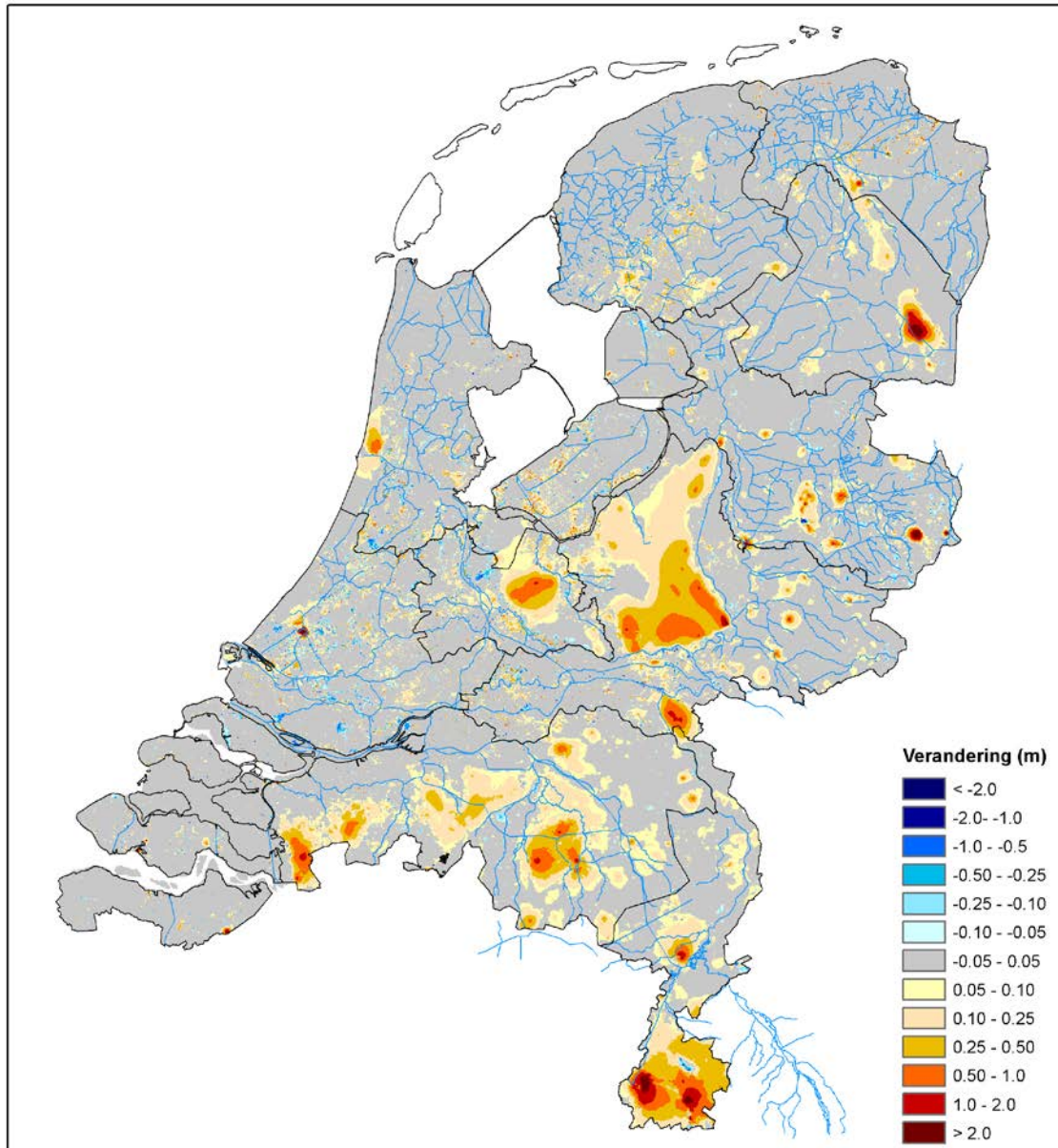


Figuur 8.33 Scenario W2050S0 in vergelijking met scenario REF2015S0: verschil in 10ste percentiel afvoer voor de zomer (juli, augustus, september). Arcering geeft een omslag van drainage naar infiltratie aan, of vice versa.

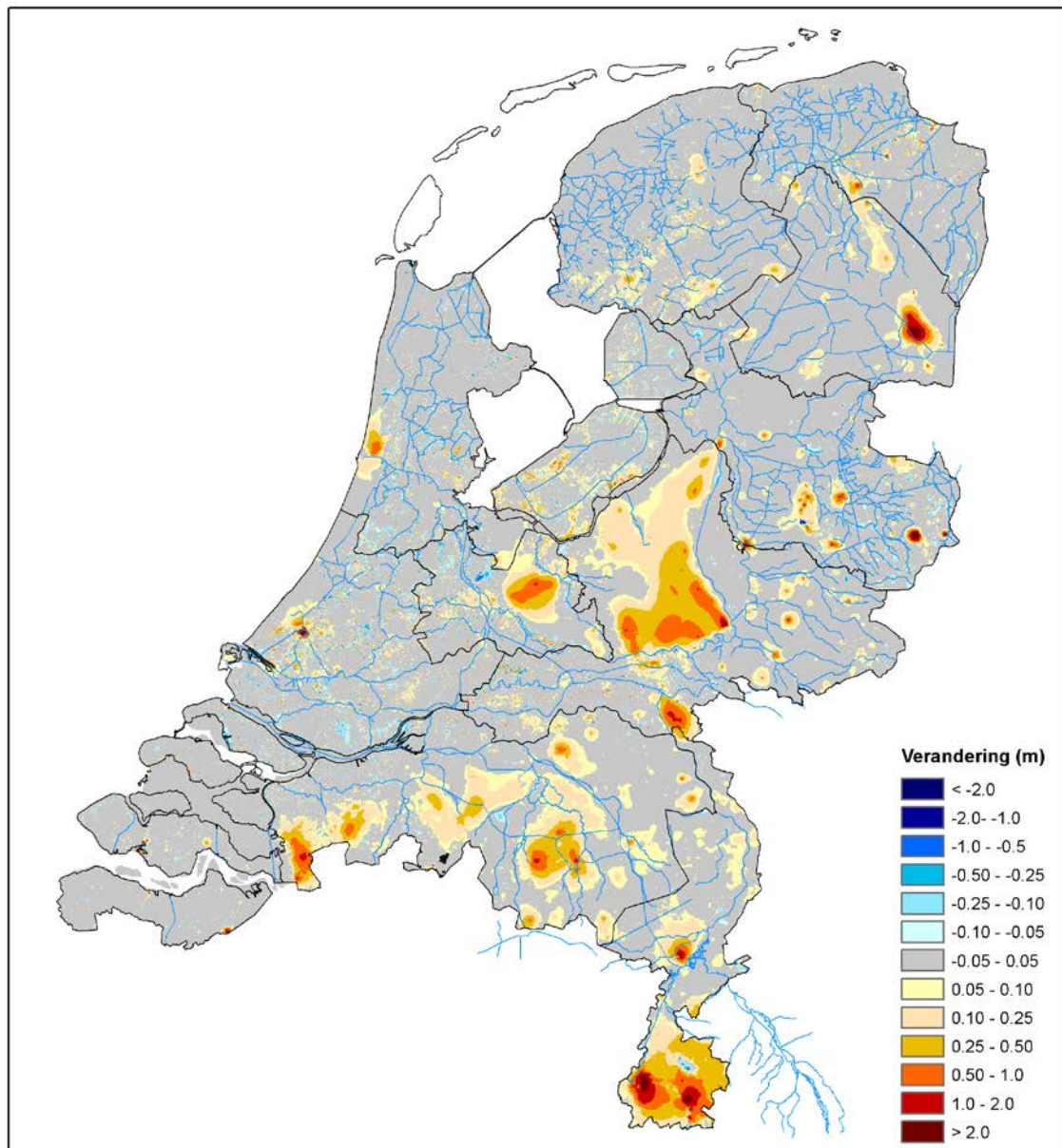


Figuur 8.34 Scenario W2050S0 in vergelijking met scenario REF2015S0: verschil in 90ste percentiel afvoer voor de zomer (juli, augustus, september). Arcering geeft een omslag van drainage naar infiltratie aan, of vice versa.

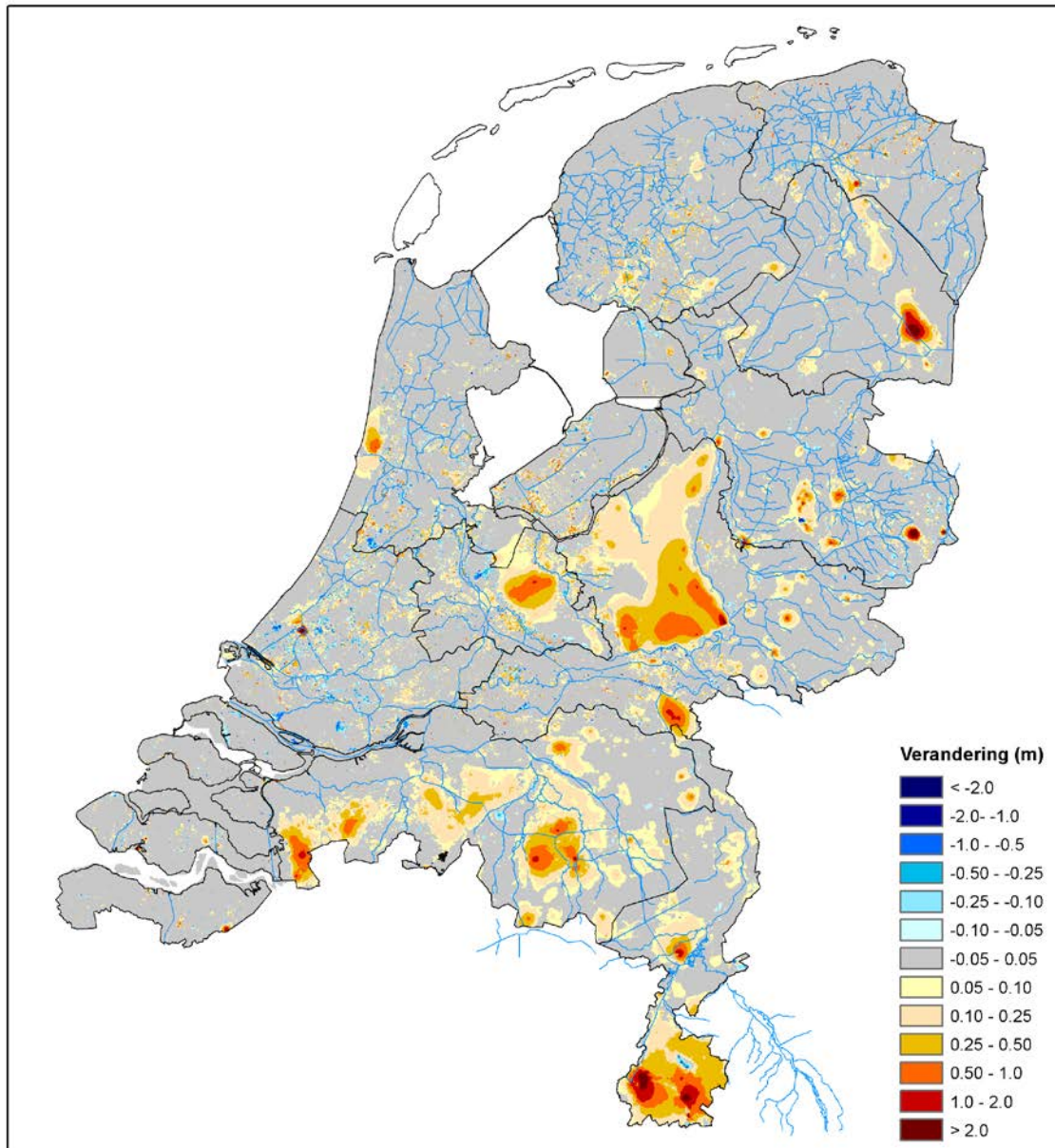
B.3 Verschil tussen Warm2050 en Stoom2050 (NWM S0 som)



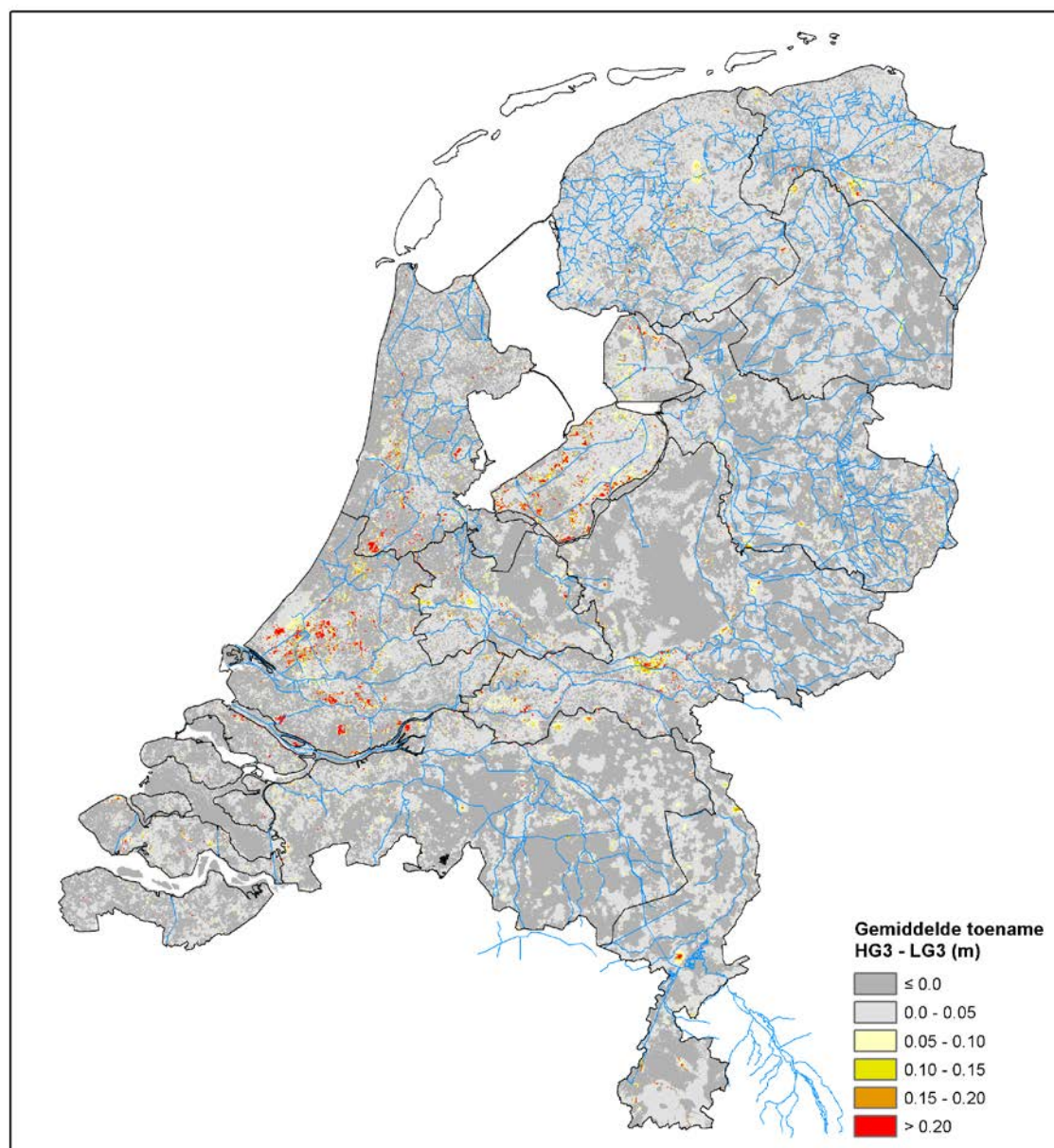
Figuur 8.35 Scenario S2050S0 in vergelijking met scenario W2050S0: verschil in GVG.



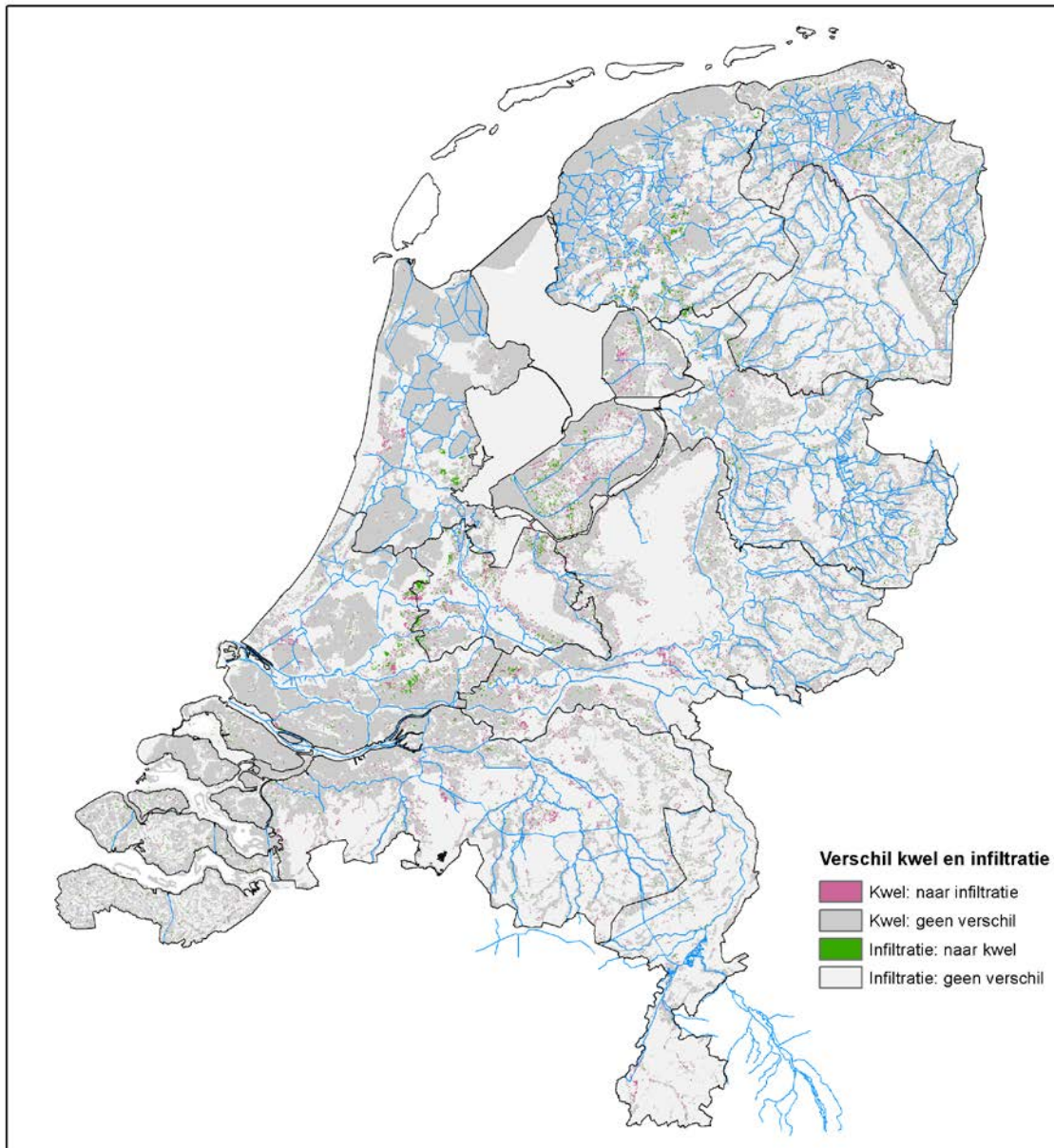
Figuur 8.36 Scenario S2050S0 in vergelijking met scenario W2050S0: verschil in GLG.



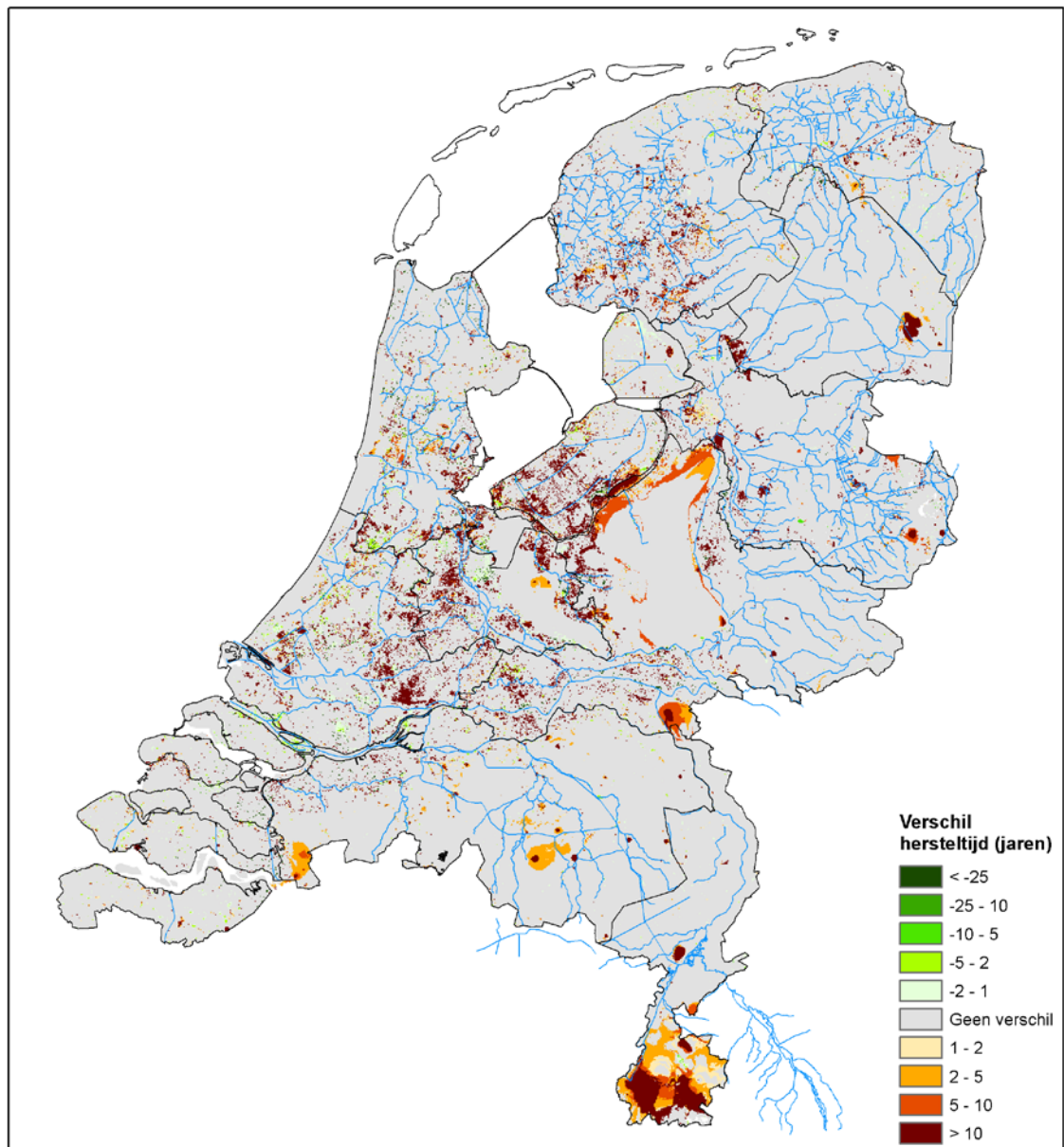
Figuur 8.37 Scenario S2050S0 in vergelijking met scenario W2050S0: verschil in GHG.



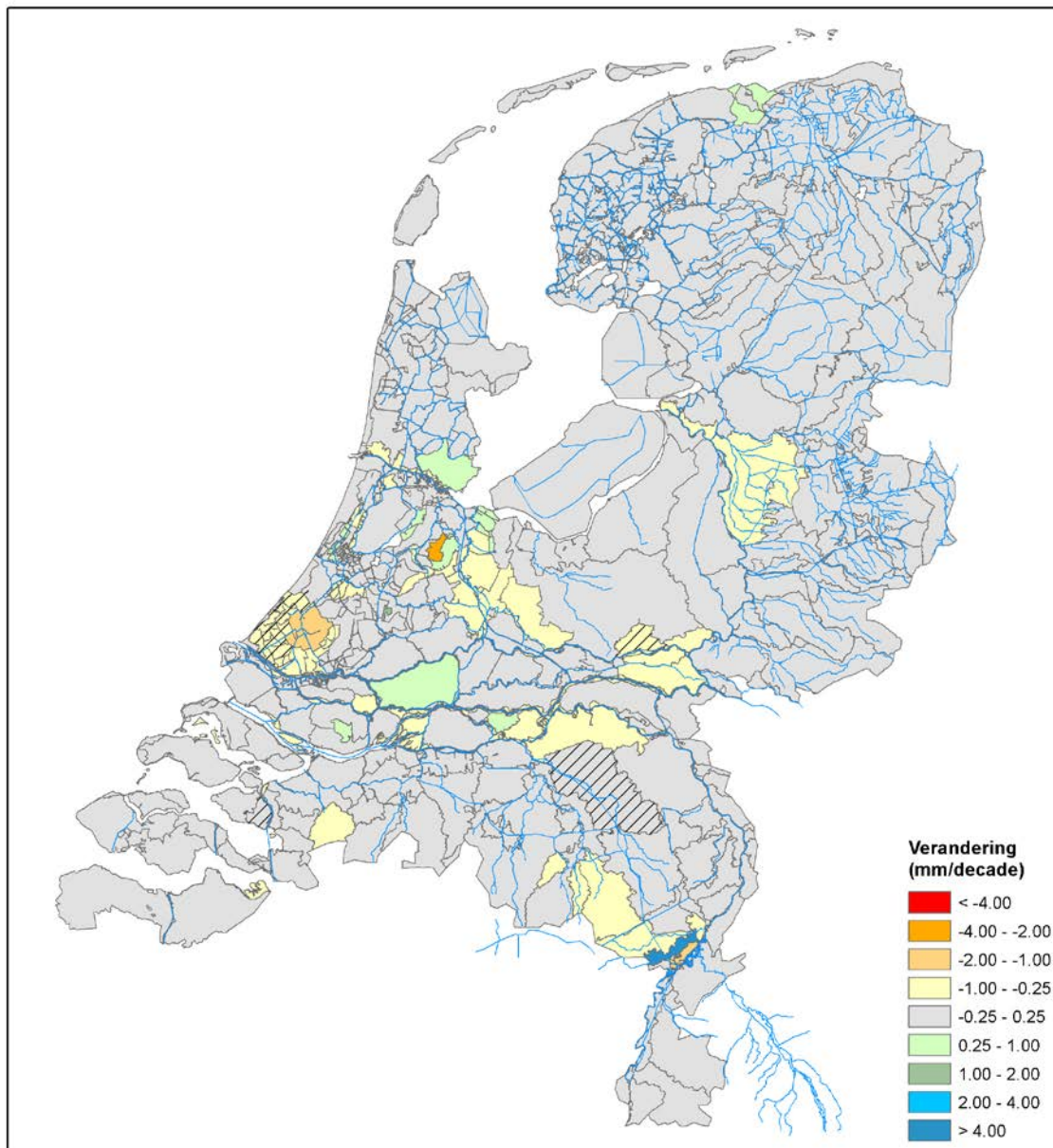
Figuur 8.38 Scenario S2050S0 in vergelijking met scenario W2050S0: verschil in grondwaterdynamiek (GLG - GHG).



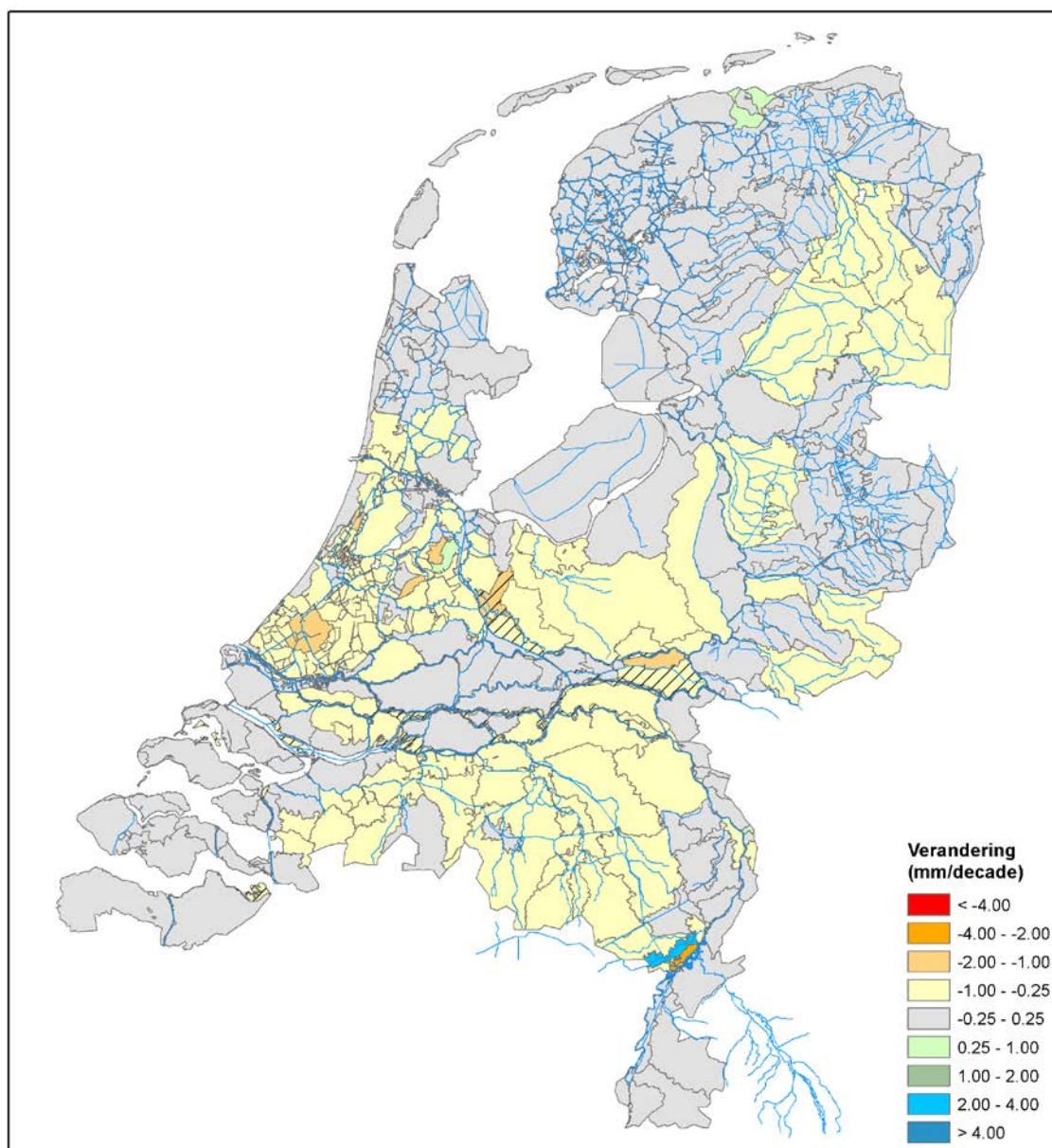
Figuur 8.39 Scenario S2050S0 in vergelijking met scenario W2050S0: verandering van kwel naar infiltratie of vice versa.



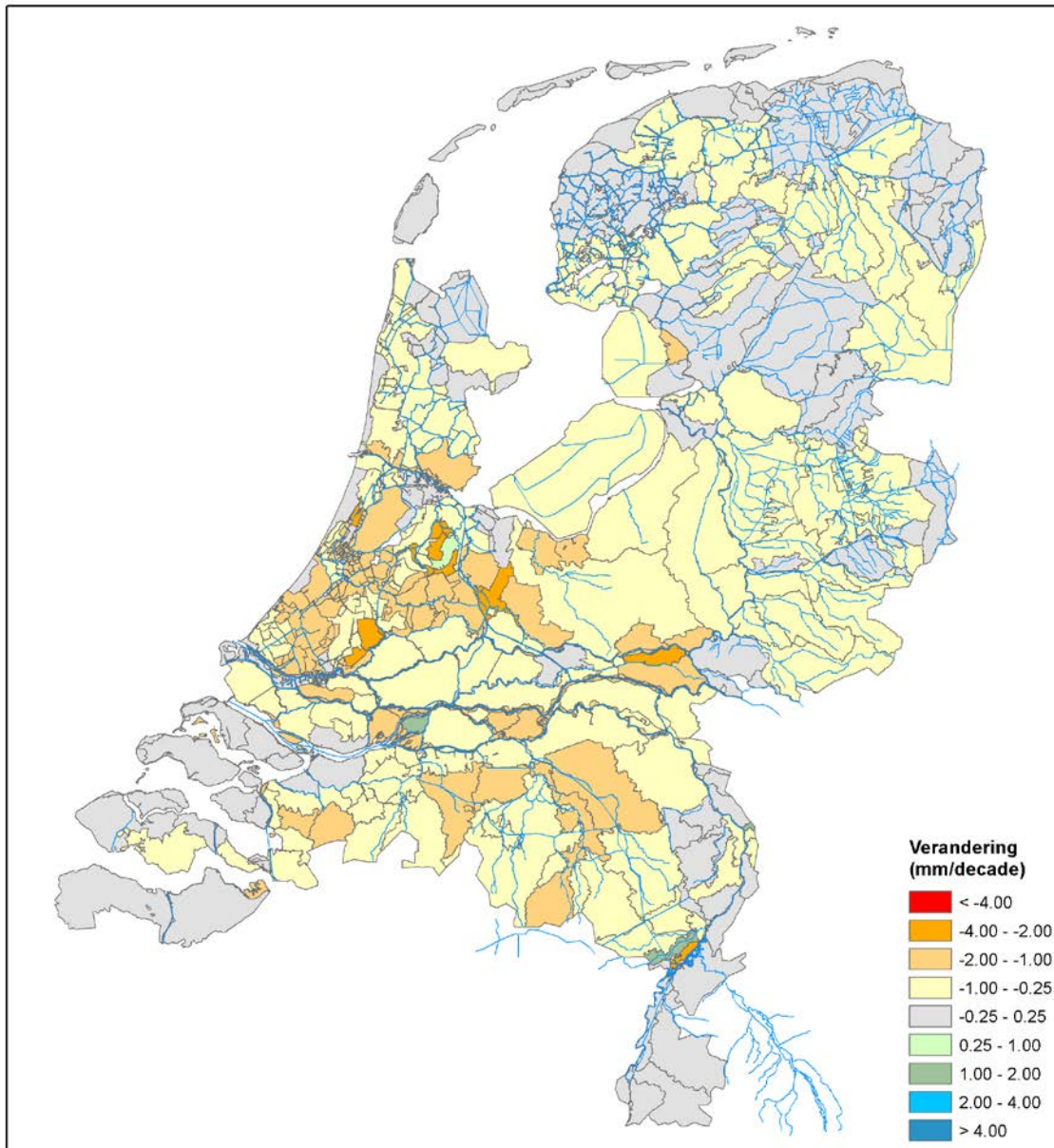
Figuur 8.40 Scenario S2050S0 in vergelijking met scenario W2050S0: verschil in herstelperiode na diepste grondwaterstand.



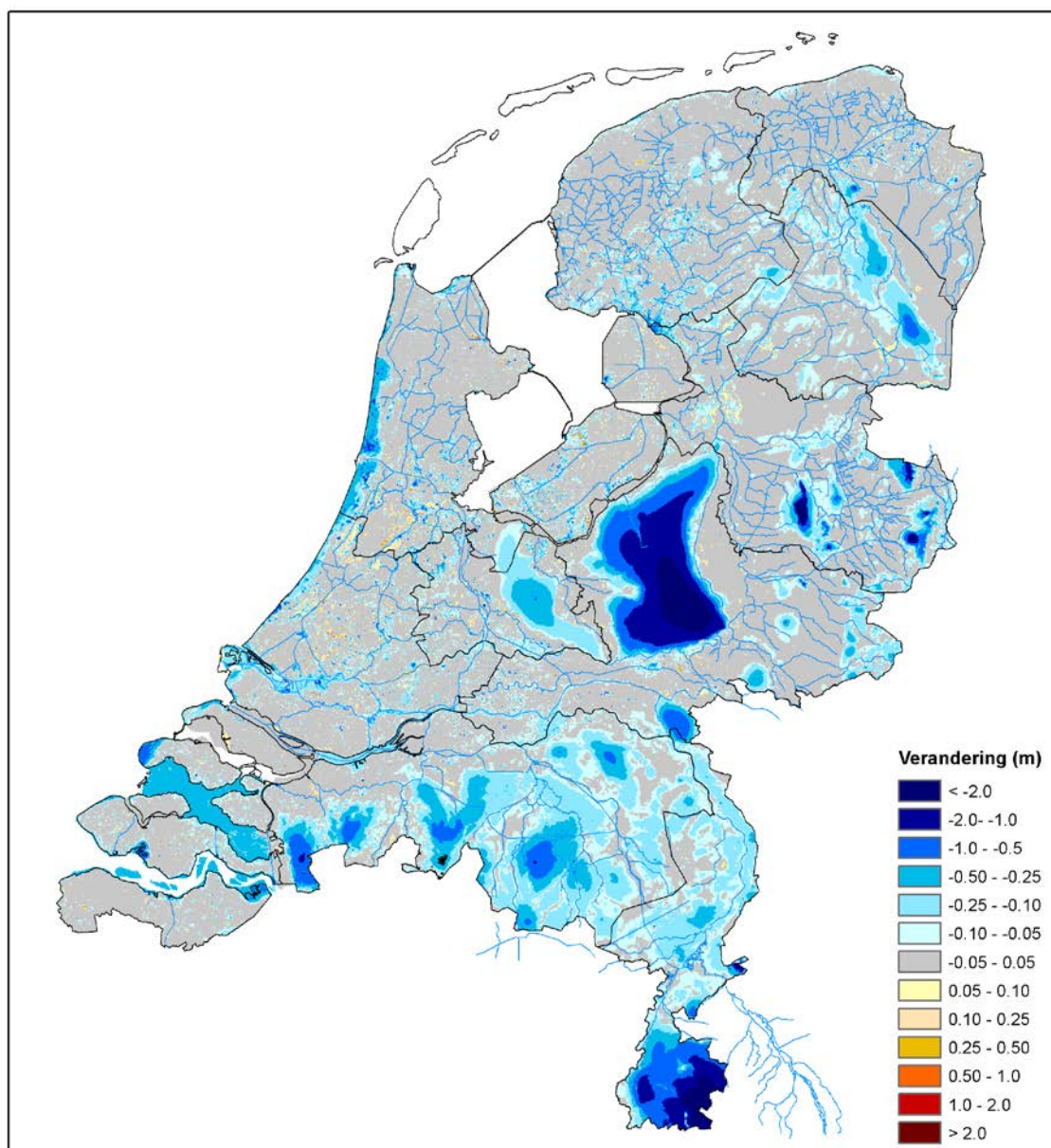
Figuur 8.41 Scenario S2050S0 in vergelijking met scenario W2050S0: verschil in 10e percentiel afvoer. Arcering geeft een omslag van drainage naar infiltratie aan, of vice versa.



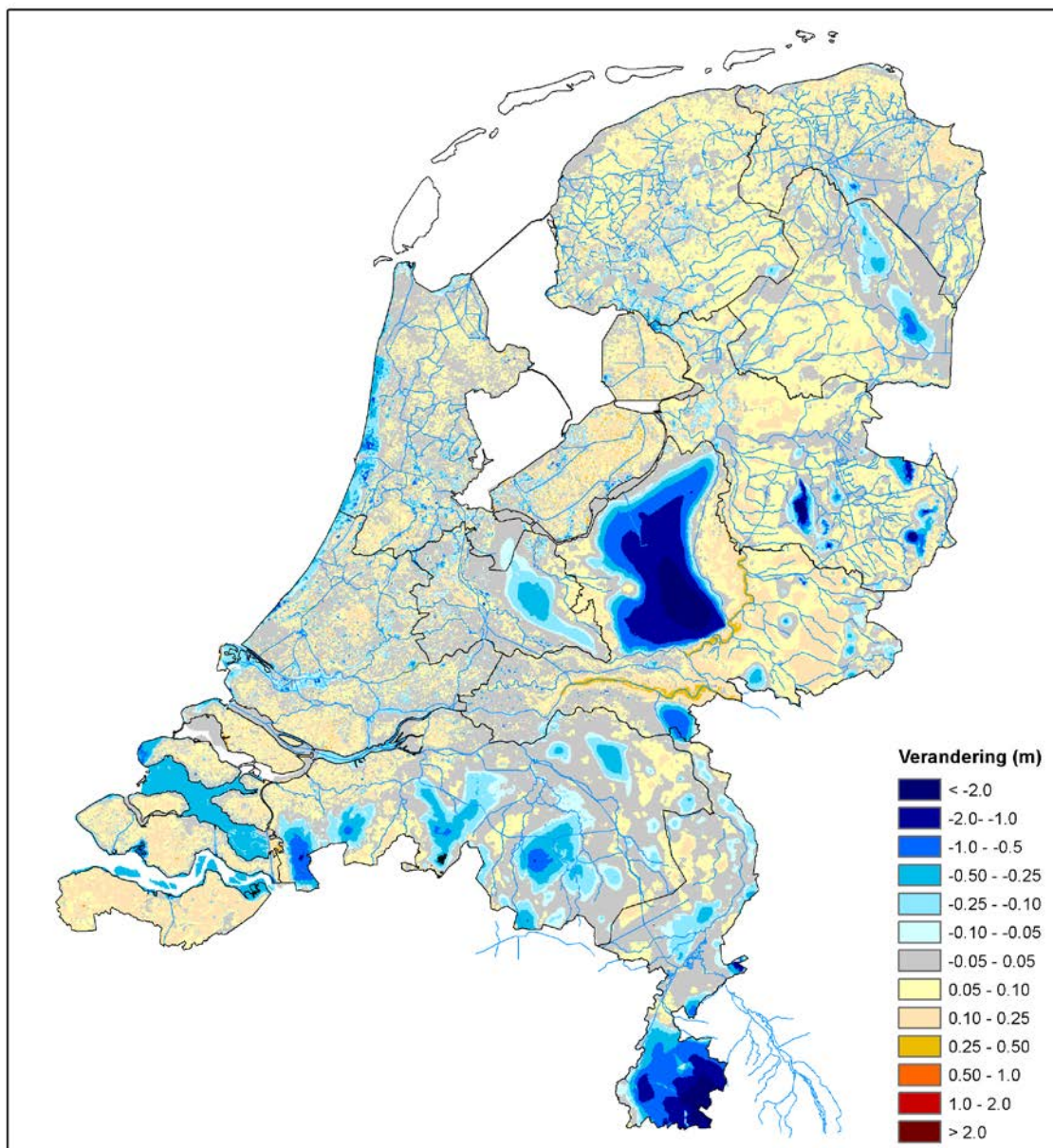
Figuur 8.42 Scenario S2050S0 in vergelijking met scenario W2050S0: verschil in 50ste percentiel afvoer. Arcering geeft een omslag van drainage naar infiltratie aan, of vice versa.



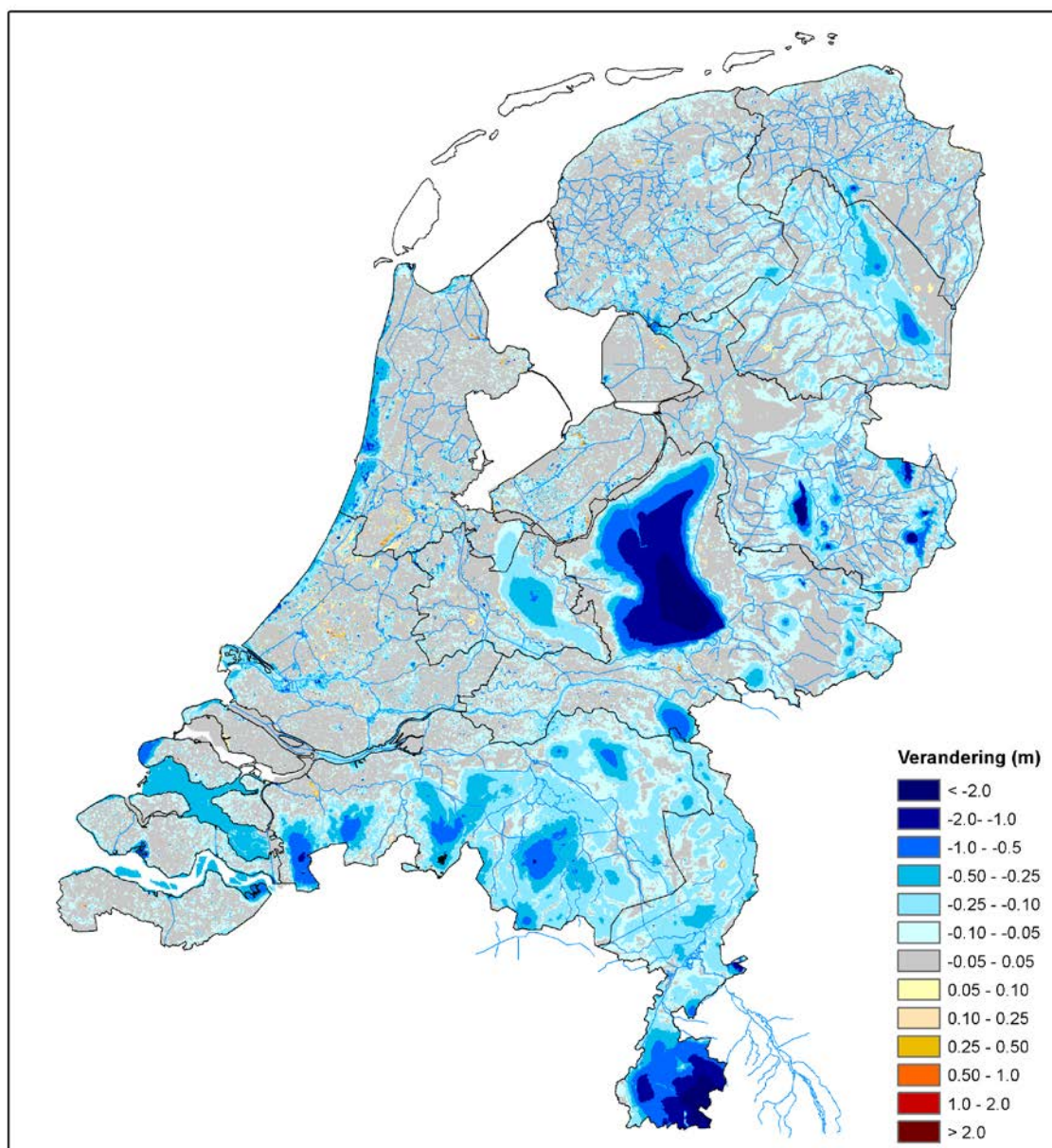
Figuur 8.43 Scenario S2050S0 in vergelijking met scenario W2050S0: verschil in 90ste percentiel afvoer. Arcering geeft een omslag van drainage naar infiltratie aan, of vice versa.

B.4 Effect van Warm2050(NWM S1 som)

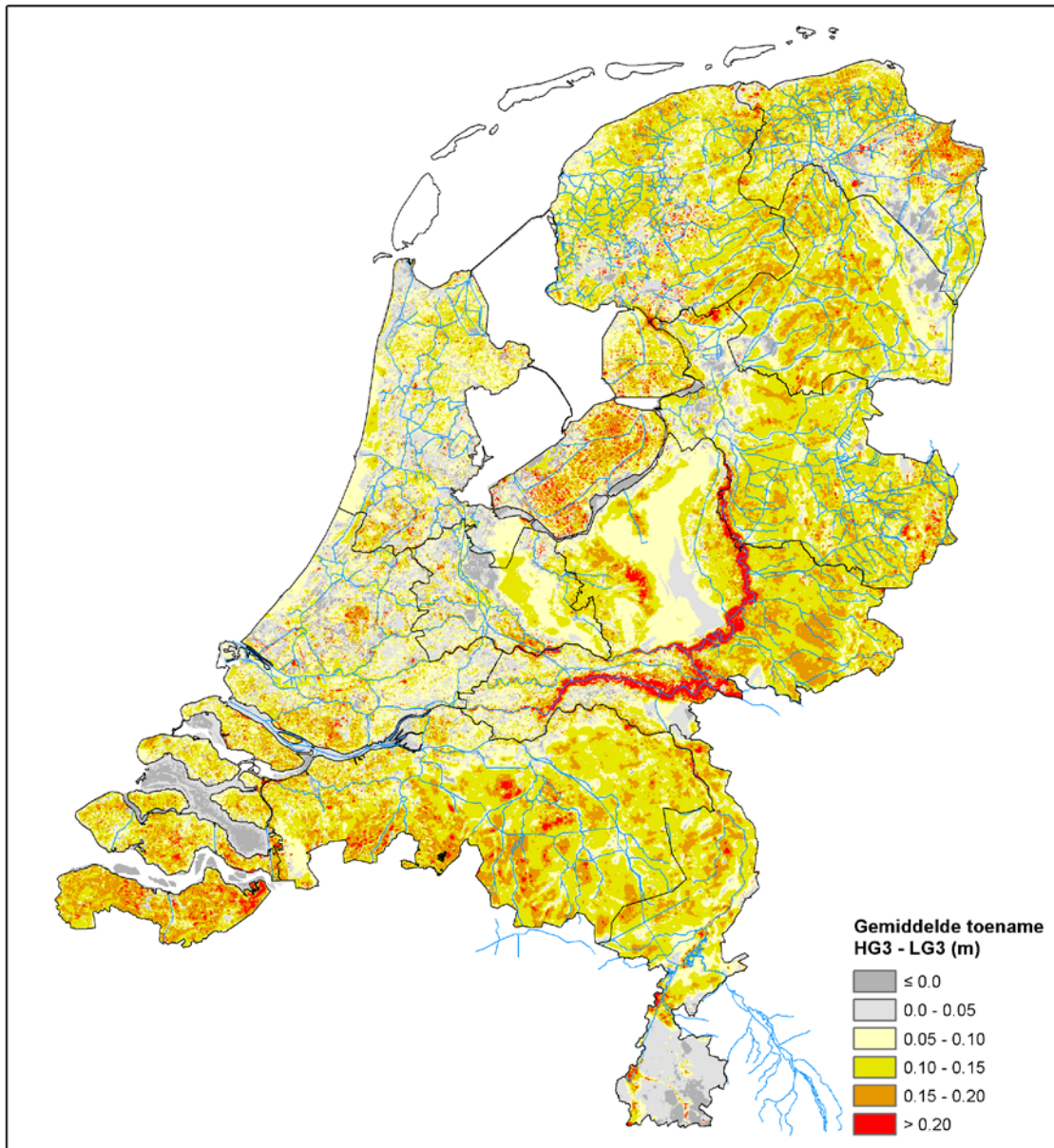
Figuur 8.44 Scenario W2050S1 in vergelijking met scenario REF2015S1: verschil in GVG.



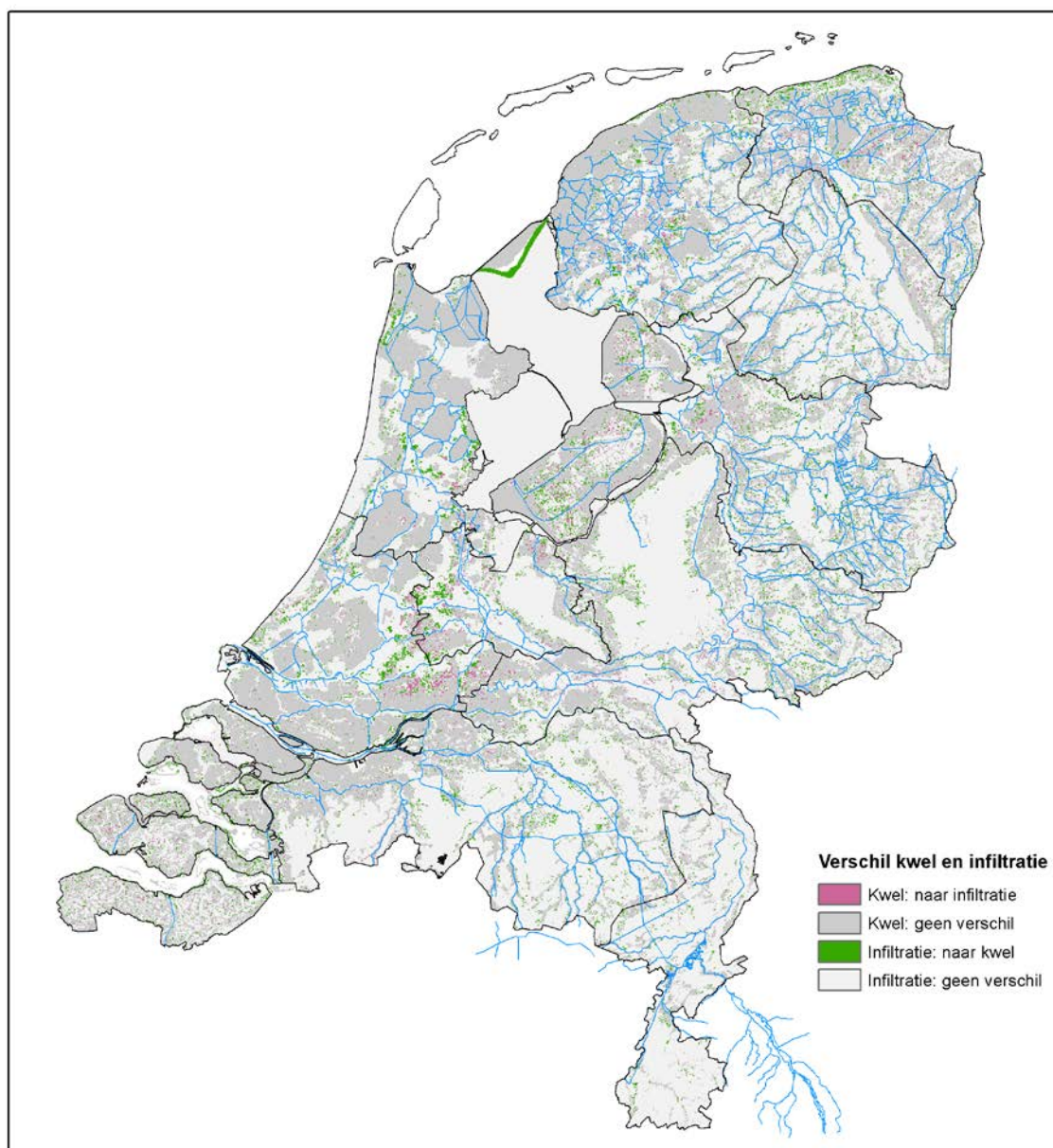
Figuur 8.45 Scenario W2050S1 in vergelijking met scenario REF2015S1: verschil in GLG.



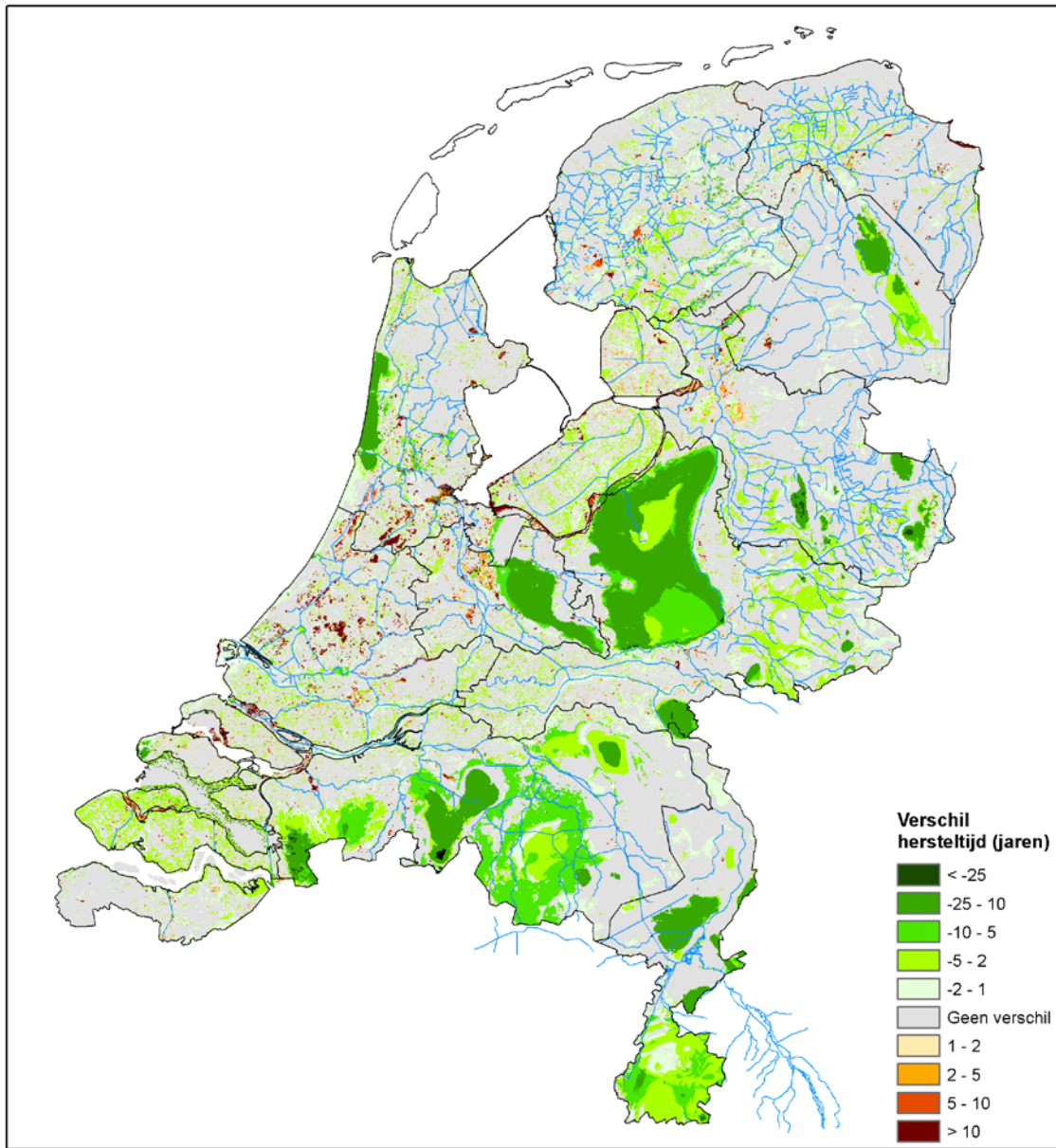
Figuur 8.46 Scenario W2050S1 in vergelijking met scenario REF2015S1: verschil in GHG.



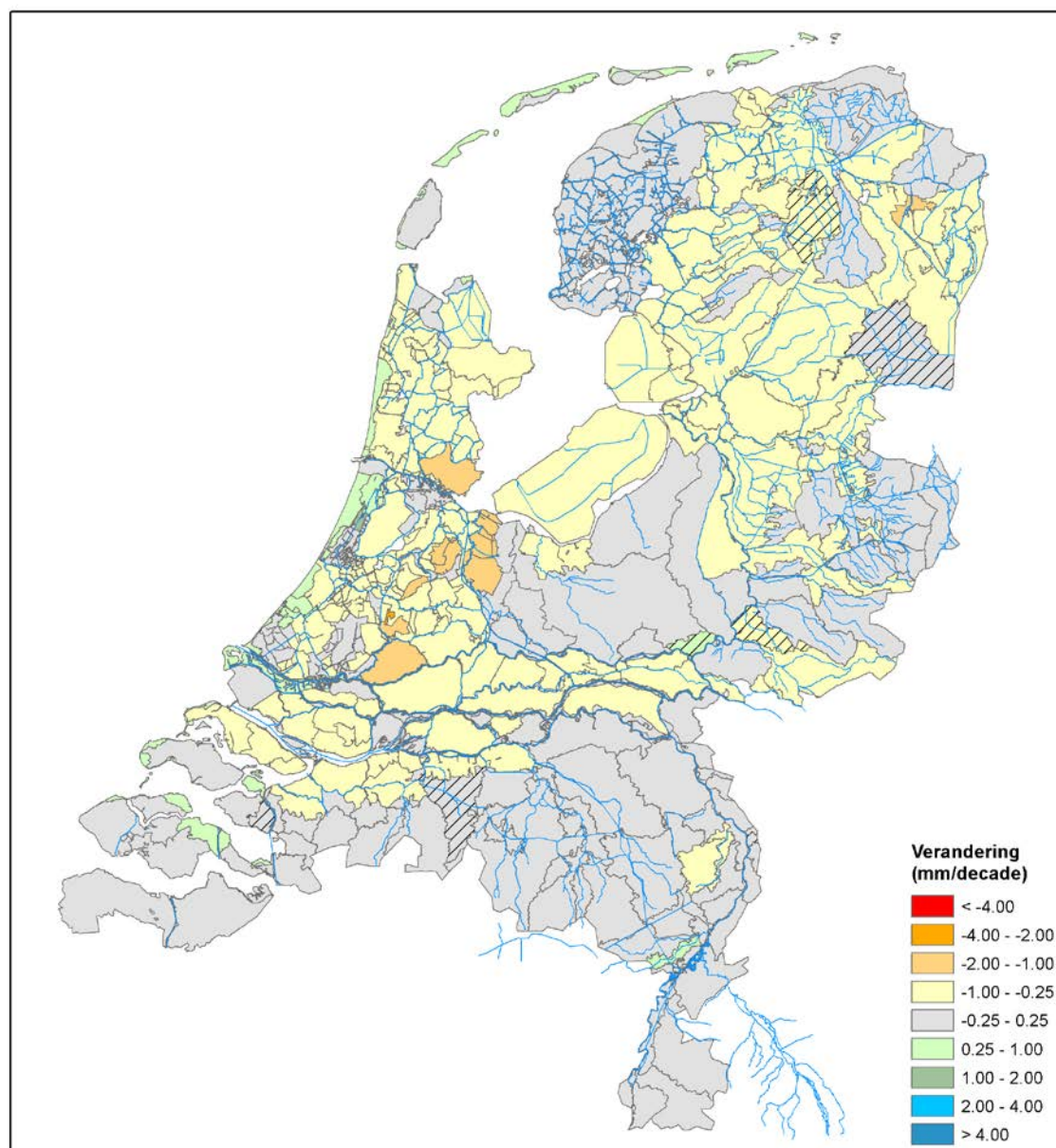
Figuur 8.47 Scenario W2050S1 in vergelijking met scenario REF2015S1: verschil in grondwaterdynamiek (GLG - GHG).



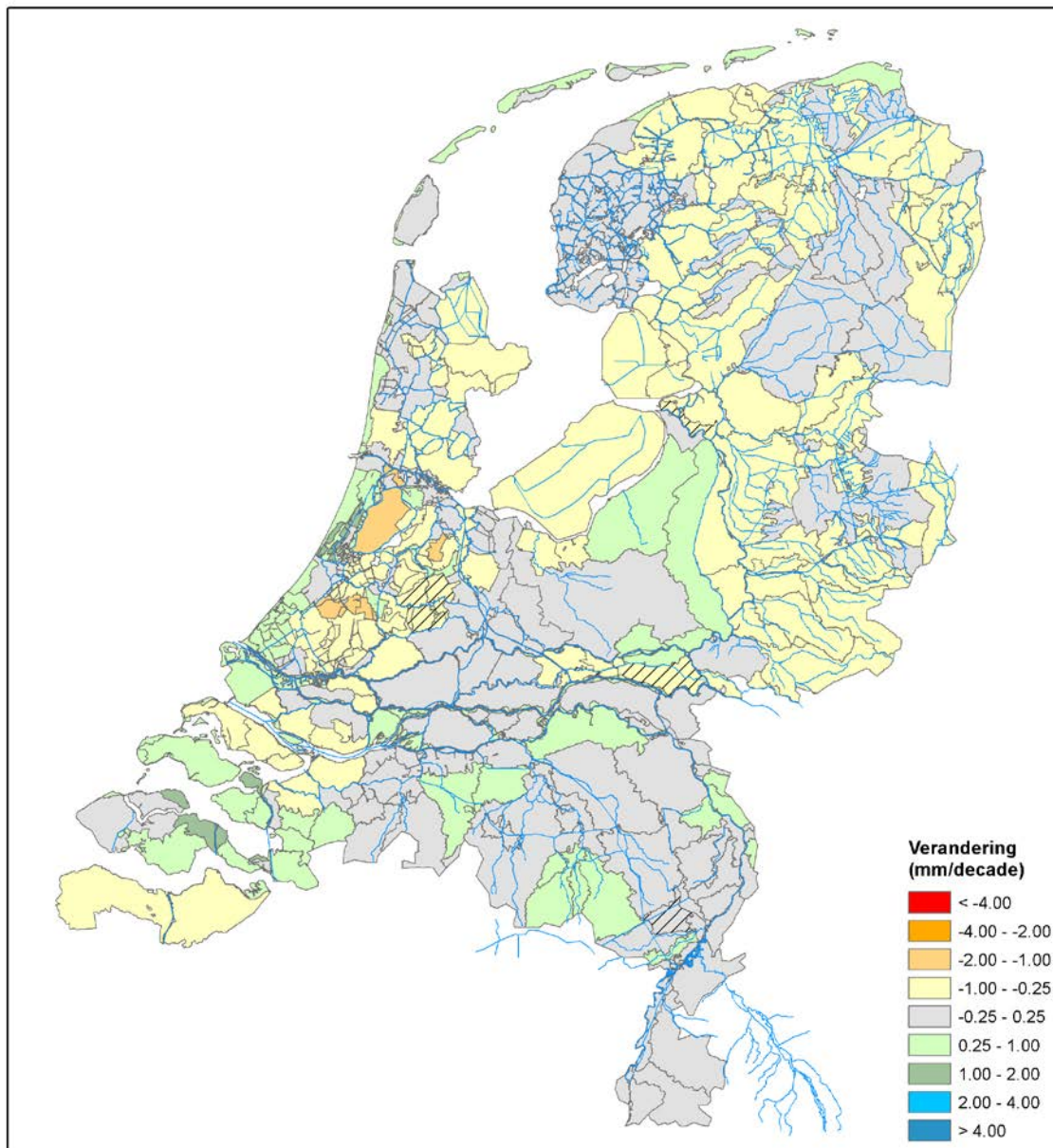
Figuur 8.48 Scenario W2050S1 in vergelijking met scenario REF2015S1: verandering van kwel naar infiltratie of vice versa.



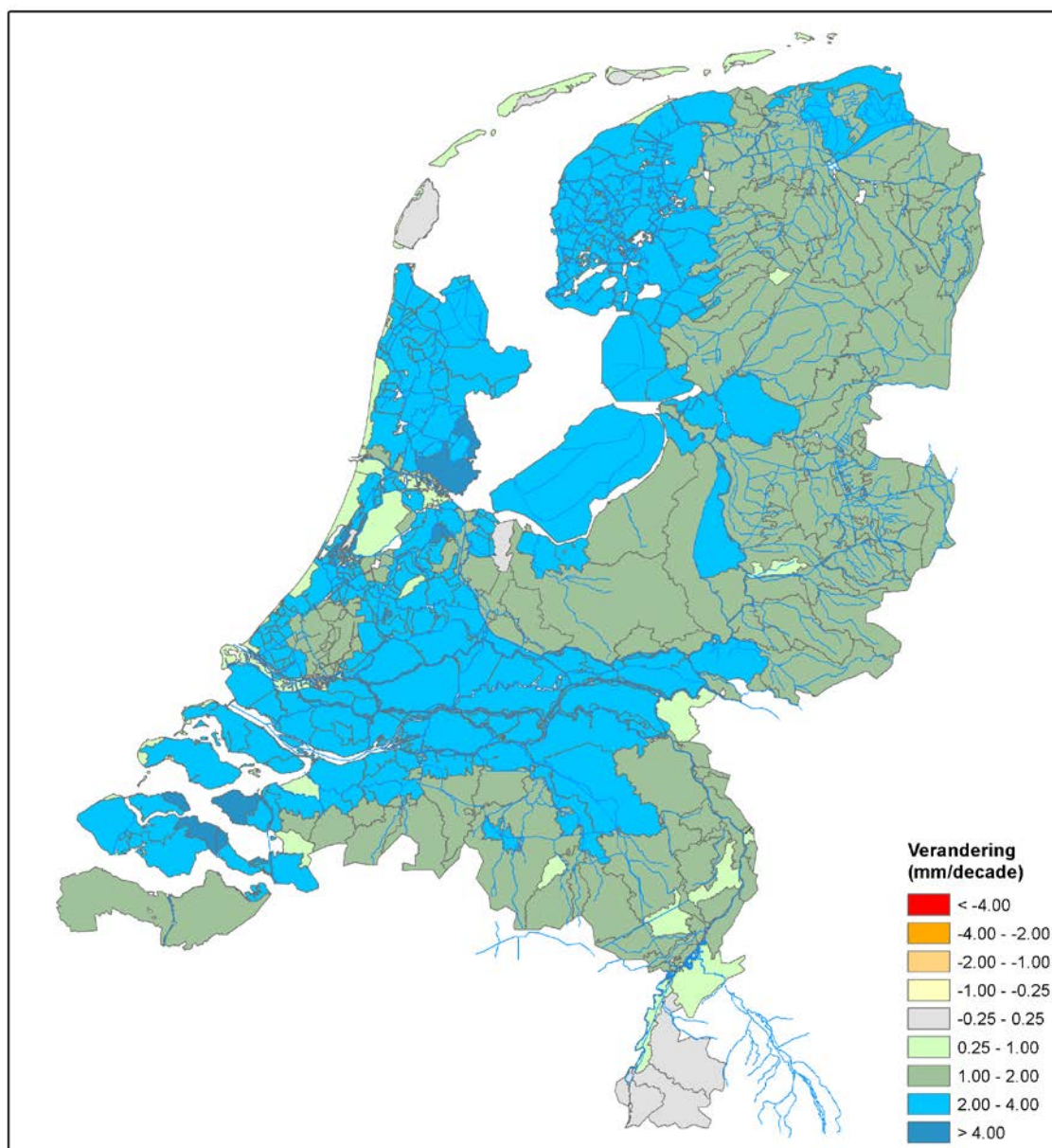
Figuur 8.49 Scenario W2050S1 in vergelijking met scenario REF2015S1: verschil in herstelperiode na diepste grondwaterstand.



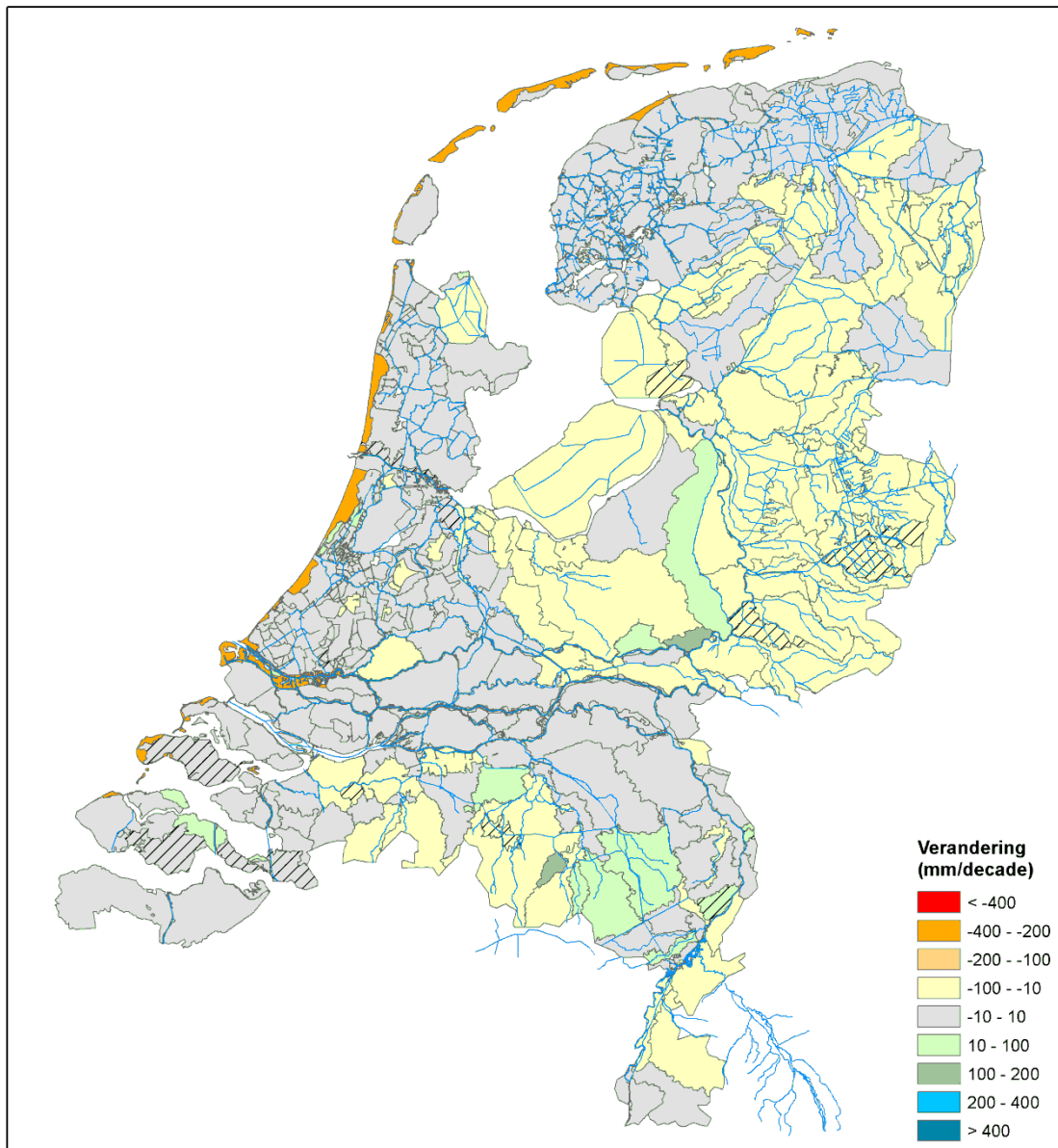
Figuur 8.50 Scenario W2050S1 in vergelijking met scenario REF2015S1: verschil in 10e percentiel afvoer. Arcering geeft een omslag van drainage naar infiltratie aan, of vice versa.



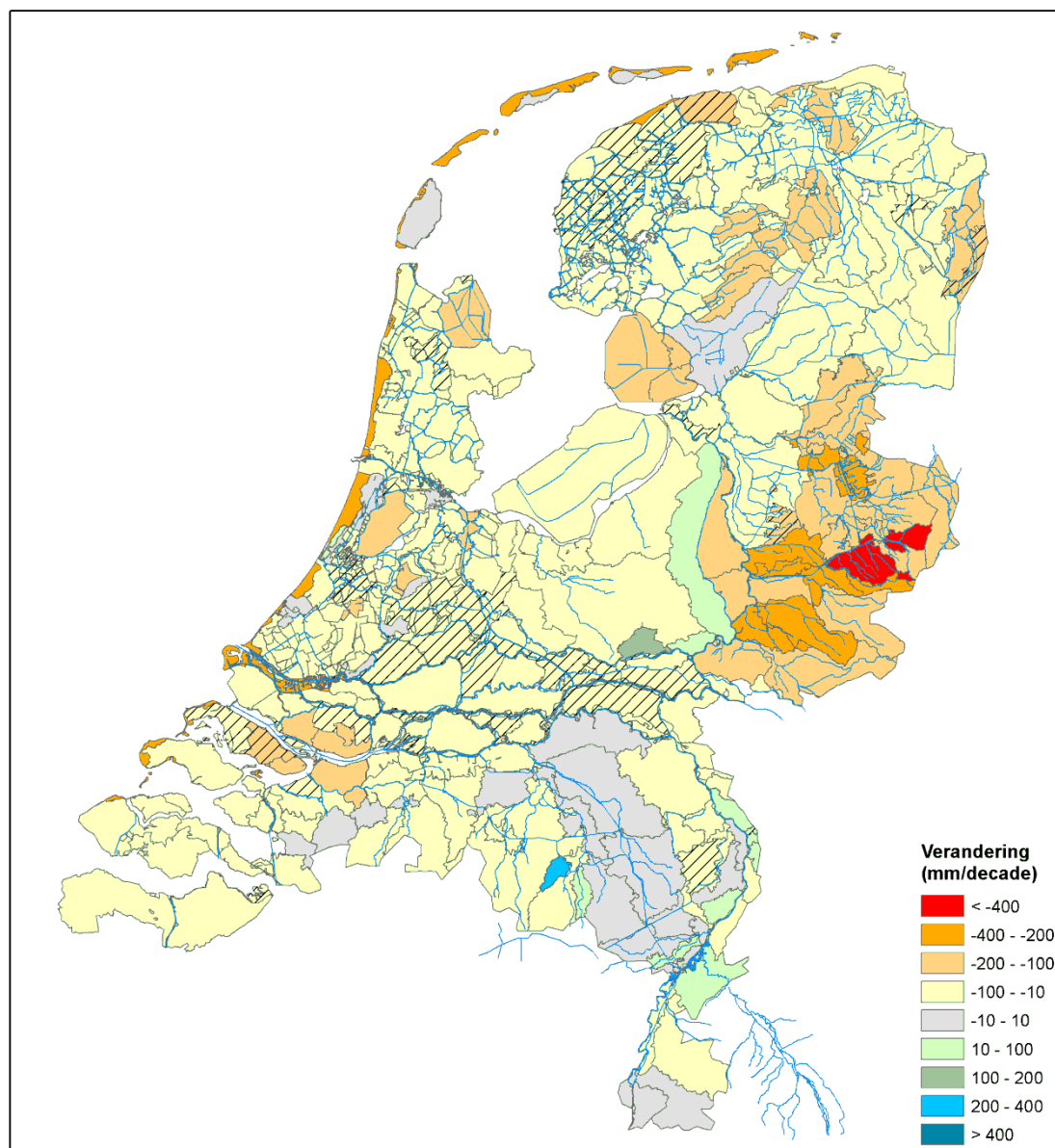
Figuur 8.51 Scenario W2050S1 in vergelijking met scenario REF2015S1: verschil in 50ste percentiel afvoer. Arcering geeft een omslag van drainage naar infiltratie aan, of vice versa.



Figuur 8.52 Scenario W2050S1 in vergelijking met scenario REF2015S1: verschil in 90ste percentiel afvoer. Arcering geeft een omslag van drainage naar infiltratie aan, of vice versa.



Figuur 8.53 Scenario W2050S1 in vergelijking met scenario REF2015S0: verschil in 10ste percentiel afvoer voor de zomer (juli, augustus, september). Arcering geeft een omslag van drainage naar infiltratie aan, of vice versa.



Figuur 8.54 Scenario W2050S1 in vergelijking met scenario REF2015S0: verschil in 90ste percentiel afvoer voor de zomer (juli, augustus, september). Arcering geeft een omslag van drainage naar infiltratie aan, of vice versa.