

Sponswerking van landschappen in Nederland

Casestudie Chaamse Beken



Sponswerking van landschappen in Nederland
Casestudie Chaamse Beken

Sponswerking van landschappen in Nederland

Casestudie Chaamse Beken

Opdrachtgever	DGWB (SITO-PS 2023 KAM 13 Kennisprogramma Wateroverlast)
Contactpersoon	Marieke Hofstra
Referenties	
Trefwoorden	Sponswerking, Wateroverlast, Watertekort, Hydrologie, Systeemfunctioneren, hoge zandgronden

Documentgegevens

Versie	0.1
Datum	31-01-2024
Projectnummer	11208012-000
Document ID	11208012-000-ZWS-0005
Pagina's	41
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Eva Schoonderwoerd Vera Kingma Ruben Dahm Perry de Louw Mitali Uke Ellis Penning	
--	---	--

Samenvatting

Binnen het project 'Sponswerking van landschappen in Nederland' (Penning et al, 2024) zijn voor twee specifieke casestudies detailberekeningen gemaakt die inzicht geven in de sponswerking van specifieke landschappen. Deze technische bijlage bevat een beschrijving van de casestudy naar het effect van droogtemaatregelen in de Chaamse Beken op de sponswerking (droogte en wateroverlast situaties).

De casestudy voor de Chaamse Beken is opgestart binnen het KLIMAP-project (Klimaat Adaptatie in de Praktijk) (zie ook (Schoonderwoerd et al., 2023)). Binnen deze casestudy voor het KLIMAP project is een eerste verkenning uitgevoerd met een grondwatermodel om te onderzoeken op welke manier het gebied ingericht kan worden zodat het watersysteem leidend is en wat dit betekent voor de verschillende functies (focus op natuur en landbouw).

Door een koppeling van het grondwatermodel met een hydraulisch model op te zetten is het mogelijk om meer inzicht te krijgen in wateroverlast als gevolg van droogtemaatregelen. Dit onderzoek is een eerste verkenning voor de mogelijkheid van een offline modelkoppeling tussen een MODFLOW6-MetaSWAP grondwater- en onverzadigde zone model en een D-HYDRO 1D2D oppervlaktewater model. Het doel is om eenvoudig en snel een eerste inschatting te kunnen maken van het effect van droogtemaatregelen op wateroverlast. De huidige studie is dus een eerste inventarisatie of deze koppeling technisch haalbaar is en meer inzicht kan bieden in het effect van maatregelen op zowel droogte als wateroverlast.

Uit de casestudy kunnen de volgende belangrijke conclusies worden getrokken:

- De droogtemaatregelen zorgen voor een stijging in de grondwaterstand en lokaal voor een stijging in de kwelflux en hebben daarmee een positief effect op de verdrogingsbestrijding in natte natuurgebieden. Het verdient nog aandacht of deze stijging van de grondwaterstand en de kwelflux voldoende is voor de natuur binnen dit gebied.
- Het aanpassen van de ontwatering binnen het gebied (door ophoging van de beekbodems en het dempen van sloten binnen bufferzones rondom grondwaterafhankelijke natuur) heeft als gevolg dat er meer water wordt vastgehouden in de ondergrond. Hierdoor wordt er in de zomer minder water afgevoerd via het oppervlaktewater, waardoor de basisafvoer afneemt. Er is meer onderzoek nodig om te kijken of een andere inrichting van het watersysteem mogelijk wel kan zorgen voor een stijging van de basisafvoer. In de winter neemt de afvoer juist toe. Dit effect wordt veroorzaakt doordat de hogere grondwaterstanden leiden tot een afname van de beschikbare berging in de bodem. Ook leidt het ophogen van de beekbodems tot hogere waterstanden.
- De maatregelen zorgen ook voor een stijging van de grondwaterstand in de winter, waardoor er minder ruimte is om de neerslag te bergen in de ondergrond ('vol is vol') en grondwaterstanden eerder aan maaiveld komen. Daardoor kunnen de droogtemaatregelen zorgen tot grotere wateroverlast tijdens neerslaggebeurtenissen.
- De maatregelen zorgen voor meer afvoer over het maaiveld, omdat de grondwaterstanden vaker tot aan het maaiveld komen te staan. In de toegepaste methode zorgt dat voor een toename in het overstromingsoppervlak. Een belangrijk aandachtspunt is dat in de methodiek deze maaiveldafvoer niet meer kan herinfiltreren naar het grondwater. In realiteit zal het water dat op maaiveld blijft staan en niet afstroomt richting het oppervlaktewatersysteem wel weer infiltreren.

Uit de studie komen zowel aanbeveling voor vervolgonderzoek gericht op het verbeteren van het systeembegrip als ook aanbevelingen voor verdere verbetering van model-technische aspecten om sponswerking goed te kunnen kwantificeren.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
2	Gebiedsbeschrijving	9
3	Aanpak modellering	12
3.1	Grondwatermodel	12
3.2	Hydraulisch model	14
3.3	Koppeling grondwater model en hydraulisch model	14
4	Scenario's	16
4.1	Inrichtingsvariant met droogtemaatregelen	16
4.2	Neerslaggebeurtenissen	19
4.3	Startcondities van de modellen	20
4.3.1	Startconditie grondwatermodel	20
4.3.2	Startconditie hydraulisch model	21
5	Resultaten	23
5.1	Resultaten grondwatermodel	23
5.1.1	Langjarige reeks	23
5.1.2	Droog jaar: 2003	27
5.1.3	Effect verhoging drainagebasis grote waterlopen	28
5.1.4	Impact van verschillende neerslaggebeurtenissen	30
5.2	Resultaten hydraulische model	35
5.2.1	Overstromingskaarten	35
5.2.2	Overstromingsomvang	36
6	Conclusies en aanbevelingen	38
7	Referenties	40

1 Inleiding

Binnen het project 'Sponswerking van landschappen in Nederland' (Penning et al, 2024) zijn voor twee specifieke casestudies detailberekeningen gemaakt die inzicht geven in de sponswerking van specifieke landschappen. Voorliggend rapport bevat een beschrijving van de casestudy naar droogtmaatregelen in de Chaamse Beken en de effecten van deze maatregelen op droogte- en wateroverlastsituaties.

De casestudy voor de Chaamse Beken is gestart binnen het KlimaatAdaptatie in de Praktijk project (KLIMAP, zie ook Schoonderwoerd et al., 2023). Binnen deze casestudy voor het KLIMAP-project is een eerste verkenning uitgevoerd met als doel te verkennen op welke manier het gebied klimaatbestendig kan worden ingericht en wat dit betekent voor de verschillende functies. Om de effecten van maatregelen op de grondwaterstanden en de kwelflux te kwantificeren is gebruik gemaakt van een grondwatermodel. Er zijn twee varianten voor de inrichting van het watersysteem onderzocht die gericht zijn op het versterken van de natuur binnen het gebied. Bij de keuze van de inrichtingsvarianten was het uitgangspunt om te kijken welke aanpassingen mogelijk zijn in het watersysteem, zoals het dempen van sloten, ophogen van watergangen en stopzetten van grondwateronttrekkingen. Er is geen rekening gehouden met de vraag in hoeverre het ook haalbaar is om alle maatregelen daadwerkelijk te implementeren. In deze rapportage wordt gebruik gemaakt van één inrichtingsvariant uit deze eerdere KLIMAP studie, die door de projectgroep wordt gezien als de meest realistische variant. Binnen deze variant zijn sloten en buisdrainage verwijderd en zijn onttrekkingen voor beregening stopgezet binnen bufferzones rondom de beken en de grondwaterafhankelijke natuur, daarnaast is de drainagebasis van de beken opgehoogd.

Maatregelen om droogte te bestrijden worden in de praktijk vaak getoetst door middel van grondwatermodellen en droogtesimulaties over langere tijdsperiodes. Met het oog op klimaatverandering is het belangrijk om ook het effect van die maatregelen op de potentiële wateroverlastsituaties te toetsen. In dit onderzoek binnen het Sponswerking van Landschappen project zijn methoden verkend om de droogtmaatregelen, zoals voorgesteld in het KLIMAP-onderzoek, te evalueren op hun effect op wateroverlast als gevolg van extreme neerslaggebeurtenissen.

Regionale wateroverlast wordt in Nederland getoetst aan de hand van de NBW-normen. Deze normen zijn gebaseerd op de midden-variant van het klimaatscenario 2050 van het KNMI. Door middel van hydrologische en hydraulische modellen kan de impact van extreme neerslaggebeurtenissen op wateroverlast gemodelleerd worden en vervolgens getoetst worden aan de opgestelde normen. Het waterschap Brabantse Delta maakt gebruik van maatgevende afvoeren op basis van composiet hydrogrammen. Hierbij worden voor verschillende herhalingstijden via een statistische analyse de grootte en duur van de afvoeren berekend (Mondeel et al., 2014).

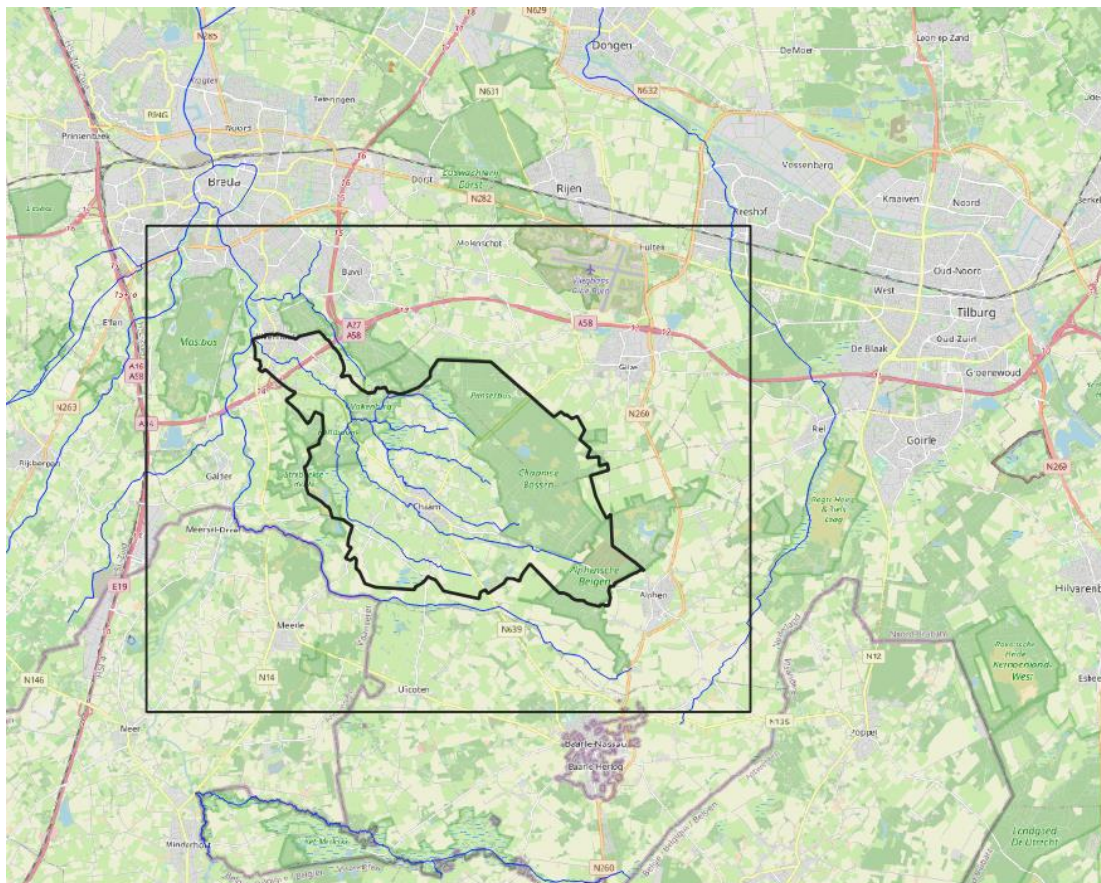
Door een koppeling van het grondwatermodel met een hydraulisch model op te zetten is het mogelijk om meer inzicht te krijgen in wateroverlast als gevolg van droogtmaatregelen. Dit onderzoek is een eerste verkenning naar de mogelijkheid van een offline modelkoppeling tussen een MODFLOW6-MetaSWAP grondwater- en onverzadigde zone model en een D-HYDRO 1D2D oppervlaktewater model. Het doel is om eenvoudig en snel een eerste schatting te kunnen maken van het effect van droogtmaatregelen op wateroverlast. De huidige studie is een eerste inventarisatie of deze koppeling technisch haalbaar is en meer inzicht kan bieden in het effect van maatregelen op zowel droogte als wateroverlast.

In hoofdstuk 2 van dit rapport wordt een beschrijving gegeven van het stroomgebied van de Chaamse beken. Vervolgens worden in hoofdstuk 3 de gebruikte modellen beschreven. De eerste paragraaf licht het grondwatermodel toe, daarna worden de specificaties van het oppervlaktewatermodel besproken en tot slot wordt beschreven op welke manier waterstromen in de modellen gekoppeld zijn. In het vierde hoofdstuk worden de doorgerekende scenario's toegelicht. Er wordt hierbij onderscheid gemaakt tussen verschillende inrichtingsvarianten, neerslaggebeurtenissen en initiële (grond)waterstanden. In hoofdstuk 5 worden de resultaten weergegeven en tot slot worden in hoofdstuk 6 de conclusies en aanbevelingen besproken.

De auteurs bedanken Marjolein Mens voor haar bijdrage aan de discussies voor het opstellen van de methodiek voor de gekoppelde droogte-wateroverlast systematiek. En daarnaast willen we ook Kees Peerdeman van Waterschap Brabantse Delta bedanken voor het gebruik van het grondwatermodel en Dimmie Hendriks en Frans Roelofsen voor de hulp en het meedenken binnen de KLIMAP case study Chaamse Beken.

2 Gebiedsbeschrijving

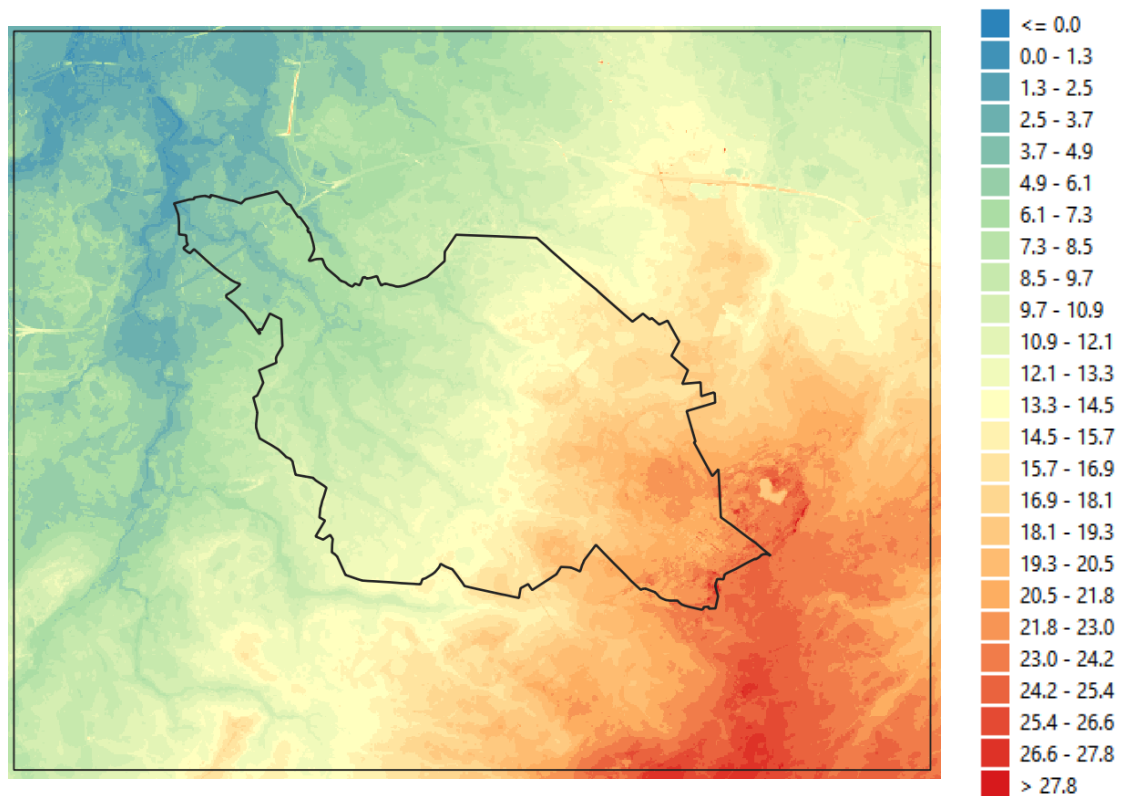
Het stroomgebied Chaamse Beken (Figuur 2-1) ligt ongeveer 4.5 km ten zuidoosten van Breda en 10 km ten zuidwesten van Tilburg. In het zuidwesten grenst het gebied vrijwel aan de Belgische grens. In het midden van het gebied ligt het dorp Chaam, waar ook een RWZI (rioolwaterzuivering) aanwezig is. Het stroomgebied van de Chaamse Beken heeft een oppervlak van ongeveer 50 km². In het noordwesten van het stroomgebied ligt de benedenloop van de Chaamse Beek, welke uitmondt in de Boven Mark. Het stroomgebied ligt volledig binnen het beheergebied van waterschap Brabantse Delta. Er zijn opgaven in het kader van KRW (Kaderrichtlijn Water) en verdrogingsbestrijding. Daarnaast is er zowel sprake van kans op wateroverlast als kans op droogte.



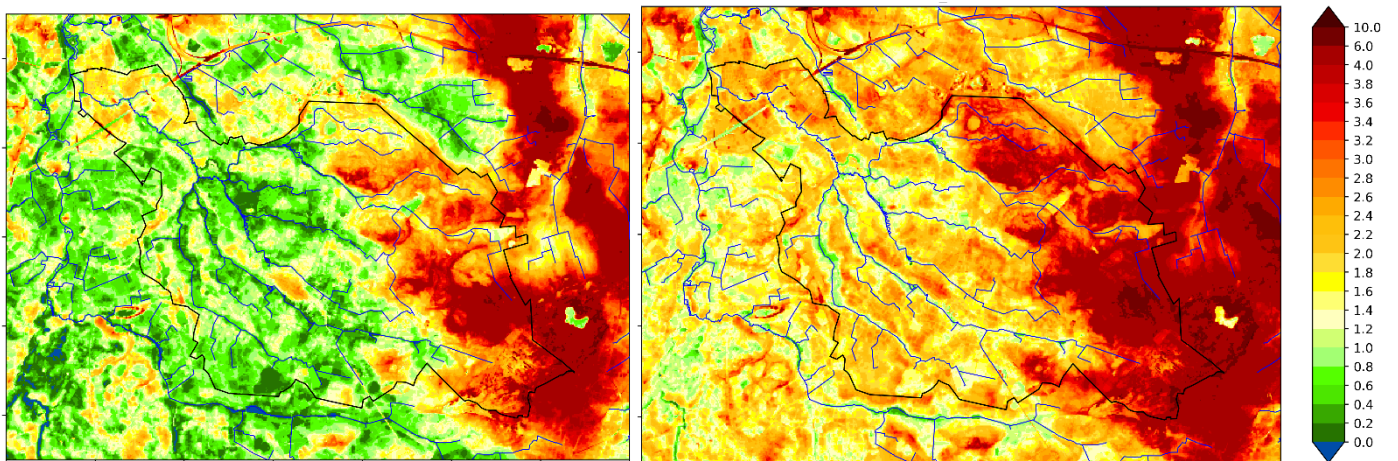
Figuur 2-1 Stroomgebied Chaamse Beken (zwarte, middelste polygoon). Het zwarte vierkant toont het modelgebied dat gebruikt is in deze casestudy. De blauwe lijnen zijn de waterlopen met een KRW-doelstelling.

Het maaiveld (Figuur 2-2) toont een sterke helling van zuidoost naar noordwest. In de zuidoostelijke punt van het stroomgebied komt de maaiveldhoogte tot aan 27 m NAP en daar waar de Chaam de Boven Mark instroomt is het maaiveld 2 m NAP. De grondwaterstanden liggen diep onder maaiveld in het hogere deel van het stroomgebied (Figuur 2-3), met grondwaterstanden tussen 3 en 6 m onder maaiveld. Het midden van het stroomgebied, waar veel beken samenkomen, heeft veel ondiepere grondwaterstand met een GHG (Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand) enkele tientallen cm onder maaiveld en een GLG rond de 1.5m-mv.

Rondom de benedenloop van de Chaamse beken, in de noordwestelijke punt van het stroomgebied, ligt het grondwater weer wat dieper vanwege de aanwezigheid van stedelijk gebied waardoor er minder water infiltreert.

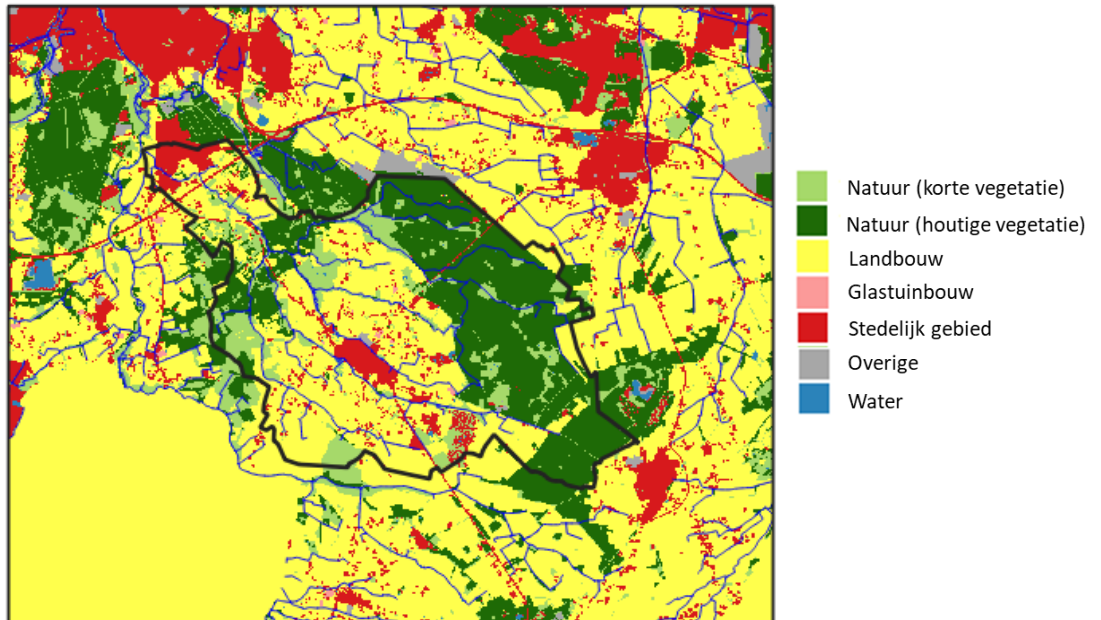


Figuur 2-2 Maaiveldhoogte (m NAP)



Figuur 2-3 GHG (links) en GLG (rechts) (m-mv) berekend met het grondwaterwatermodel in de periode 1994-2004 voor de referentiesituatie onder huidig klimaat. Zwarte lijn: stroomgebied, blauwe lijnen: hoofdwaterlopen.

In het stroomgebied zijn natuur en landbouw verweven (Figuur 2-4). Het oostelijke deel van het gebied bestaat voornamelijk uit bos. Het landgebruik van het landbouwgebied bestaat voornamelijk uit grasland en maïs. Net buiten het stroomgebied, ten noorden van de benedenloop van Chaamse Beek, ligt het Natura2000 gebied Ulvenhoutse Bos.



Figuur 2-4 Landgebruik in het modelgebied zoals opgenomen in het grondwatermodel. De onderverdeling in korte vegetatie en houtige vegetatie (bos) is gebaseerd op het Natuurbeheerplan 2022 (BIJ12, 2022) .

3 Aanpak modellering

Zoals besproken in de inleiding, wordt er in dit onderzoek voortgebouwd op de Chaamse Beken grondwatermodelstudie van het KLIMAP-project. In deze rapportage wordt één inrichtingsvariant uit dit project besproken en de resultaten getoond. De modelberekeningen voor deze inrichtingsvariant en de referentiesituatie zijn beide voor zichtjaar 2050 met sterke klimaatverandering doorgerekend, wat betekent dat een tijdreeks van neerslag en potentiële verdamping is toegepast die hoort bij het KNMI'14-WH2050 scenario. Vervolgens zijn er ook enkele neerslaggebeurtenissen doorgerekend om het effect van de droogtmaatregelen op wateroverlast te bepalen. Voor deze neerslaggebeurtenissen is zowel een grondwatermodel als een hydraulisch model gebruikt. Met het hydraulisch model is de impact van de droogtmaatregelen op overstromingsvolume en -oppervlak gemodelleerd.

3.1 Grondwatermodel

De modellering is uitgevoerd met het Brabant model van waterschap Brabantse Delta. Dit is een gekoppeld MODFLOW6-MetaSWAP model waarmee het grondwater en de onverzadigde zone doorgerekend kan worden (Hunink et al., 2021). Het modelgebied (zie het zwarte vierkant in Figuur 2-1) dat doorgerekend wordt is ongeveer 17.5x14 km. Het interessegebied (het stroomgebied Chaamse Beken) is ongeveer 11x8 km. Het model wordt doorgerekend op een resolutie van 25x25 m.

De rekenperiode van het grondwatermodel is 1993 – 2004. Deze periode is gekozen omdat er binnen deze periode ook data van klimaatscenario's (KNMI-'14 scenario's) beschikbaar was, deze waren ten tijde van de modellering namelijk alleen voor de periode 1980-2010 beschikbaar. Binnen deze periode vallen ook enkele jaren met een relatief hoge (bijv. 2001) en lage hoeveelheid (bijv. 2003) cumulatieve jaarneerslag, van 1015 mm in 2001 en 683 mm in 2003. De eerste drie jaar van het model dienen als inspeeltijd, de uitvoer wordt geanalyseerd voor de periode 1996-2004. Het grondwatermodel rekent op dagbasis voor de langjarige analyse om de effecten van de maatregelen te kwantificeren. De neerslaggebeurtenissen om het effect van de maatregelen op wateroverlast te bepalen zijn zowel in het grondwatermodel als hydraulisch model op uurbasis doorgerekend. De gebruikte neerslaggebeurtenissen hebben een herhalingsperiode van 2, 10 en 100 jaar.

De belangrijkste modelinstellingen van de referentiesituatie in het grondwatermodel zijn als volgt:

Oppervlaktewater

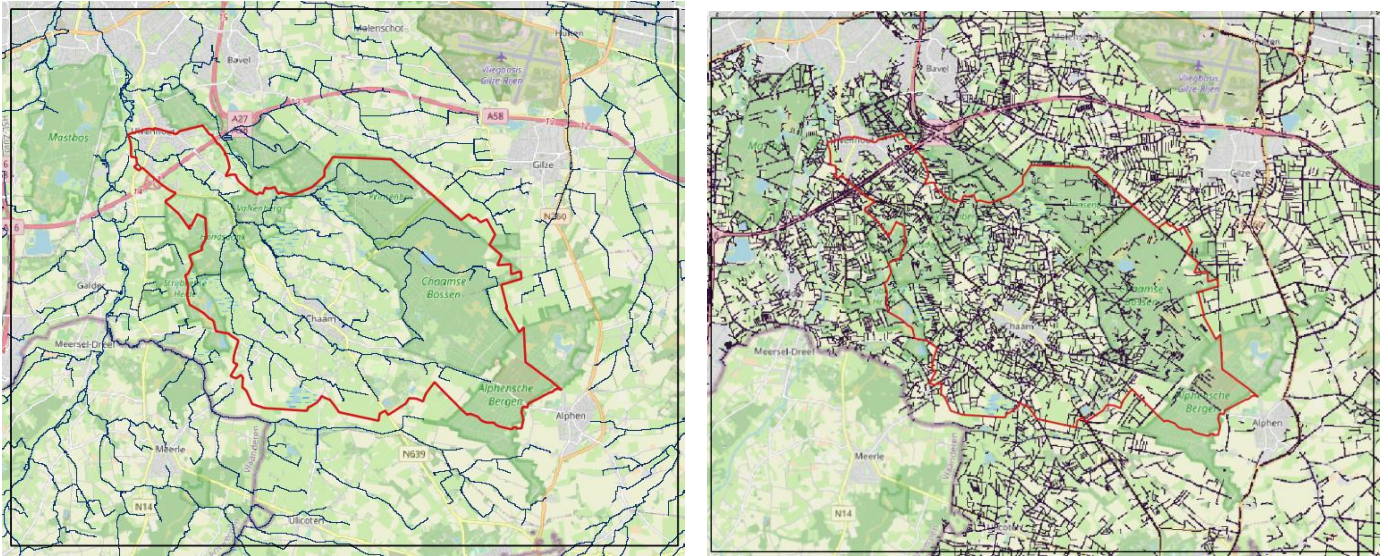
Het oppervlaktewater is geschematiseerd in grotendeels twee systemen: detailwaterlopen (sloten) en grotere leggerwaterlopen (de beken) (Figuur 3-1). De waterlopen liggen diep ten opzichte van maaiveld. Het peil in de leggerwaterlopen ligt meestal minimaal 0.6-0.9 m onder maaiveld, maar dit loopt lokaal op tot 1.5 of zelfs 2.5 m onder maaiveld. De perceelwaterlopen zijn ondieper dan de leggerwaterlopen, maar hebben grotendeels ook een diepte van 0.6-0.9m onder maaiveld. De waterlopen hebben in het model een vaste drainagehoogte in de zomer en winter. De waterlopen in het gebied kunnen alleen grondwater draineren, dus er kan geen infiltratie vanuit de waterlopen naar het grondwater plaatsvinden, wat vergelijkbaar is met een droogvallende watergang.

Maaiveld drainage en buisdrainage

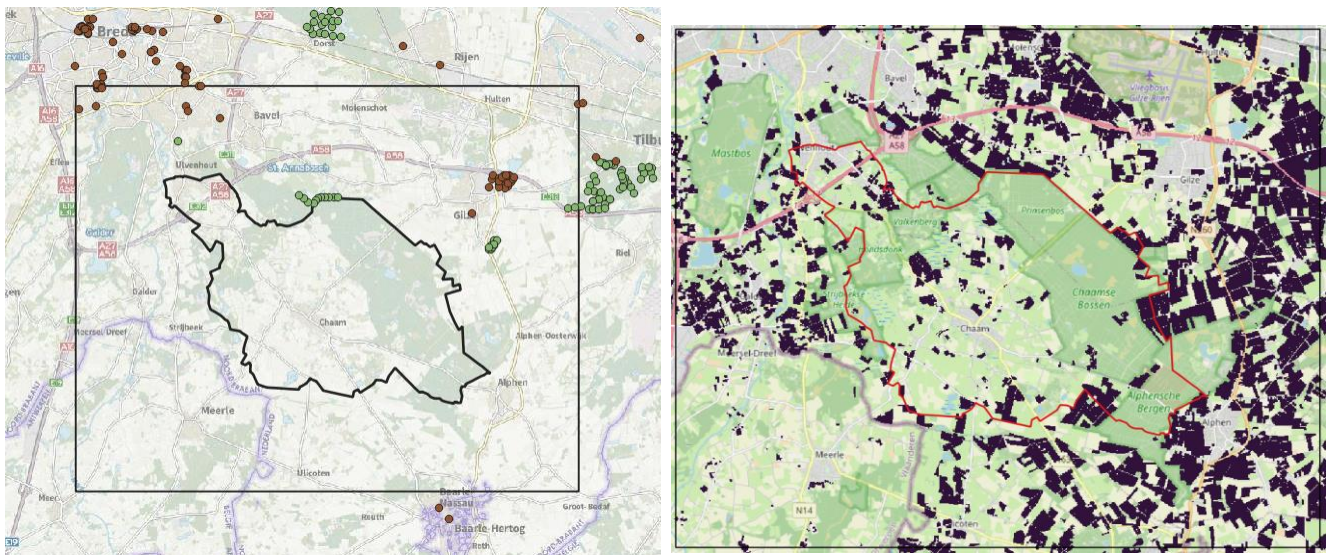
Zodra grondwater aan maaiveld komt te staan, wordt het grondwater gedraineerd / afgevoerd vanuit het grondwatermodel. Dit water is in het grondwatermodel dan weg uit het systeem, het kan niet meer herinfiltreren. Maaiveldafvoer treedt dus op als gevolg van hoge grondwaterstanden en doordat water niet kan infiltreren in gebieden met versteend oppervlak. Er wordt met het model géén maaiveldafvoer berekend als gevolg van het overschrijden van de infiltratiecapaciteit van de bodem, omdat de infiltratiecapaciteit van de bodem in het model overal zeer hoog is. In realiteit kan dit proces mogelijk wel optreden. Ook zijn er percelen in het model aanwezig die gedraineerd worden met buisdrainage.

Onttrekkingen

Er wordt in het model grondwater onttrokken voor drinkwater en industrie en voor beregening van landbouwgewassen (Figuur 3-2).



Figuur 3-1 Locatie grote waterlopen (links) en detailwaterlopen (rechts) in modelgebied van het grondwatermodel

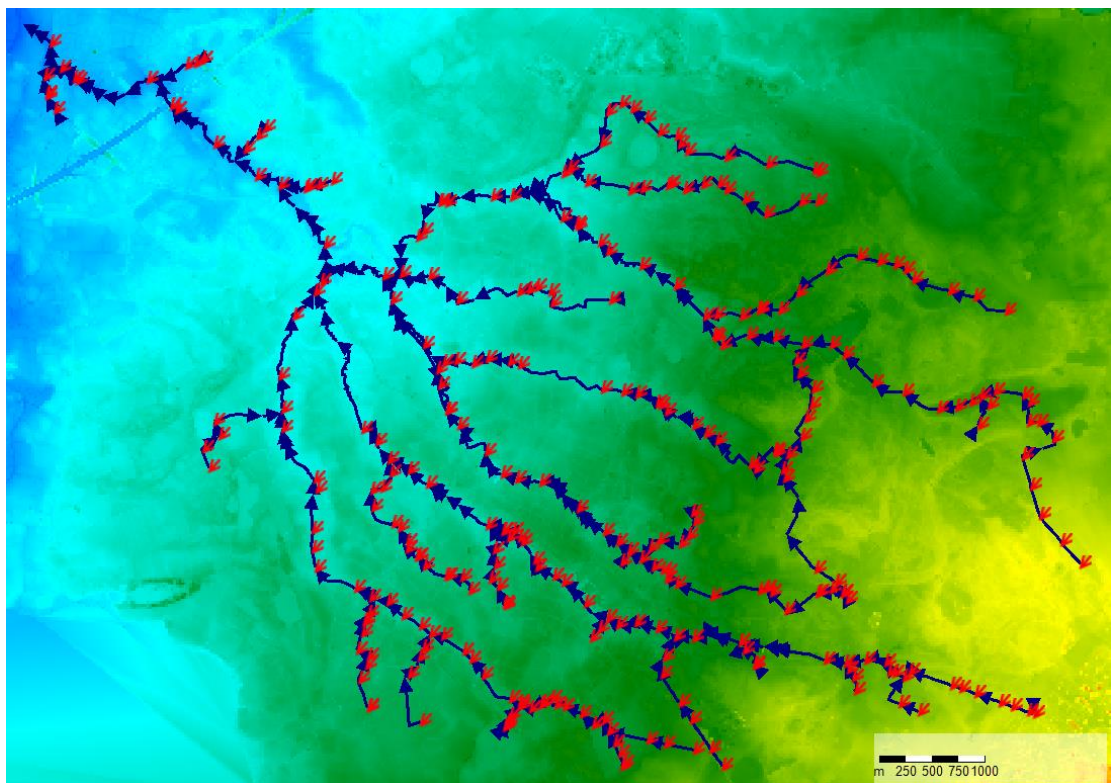


Figuur 3-2 Links: Grondwateronttrekkingen voor drinkwater (groen) en voor industrie (bruin). Rechts: locaties waar beregening vanuit grondwater plaats kan vinden

3.2 Hydraulisch model

Het hydraulische model is een D-HYDRO Suite FM 1D2D model dat is aangeleverd door het waterschap Brabantse Delta. Het model is automatisch gegenereerd door middel van D-HyDAMO, een open source python module waarmee D-HYDRO modellen kunnen worden gegenereerd aan de hand van data uit de HyDAMO database. Het aangeleverde model was een 1D schematisatie van het afvoergebied van de Chaamse Beken met daarin de primaire watergangen en bijbehorende kunstwerken. Dit model werd ongekalibreerd aangeleverd en in samenwerking met de Brabantse Delta zijn knelpunten, waaronder onrealistische ruwheden, verouderde randvoorwaarden en misplaatsing van kunstwerken, verholpen. Vervolgens is het 1D model uitgebreid met een 2D grid van 25x25 m, waarin aan de hand van data uit het Actueel Hoogtebestand Nederland het maaiveld is geschematiseerd.

Figuur 3-3 toont de schematisatie van het D-HYDRO model. De rode pijlen laten de laterale instroom punten zien die de locaties van het secundaire afwateringssysteem representeren. De instroom op deze punten wordt berekend met het grondwatermodel (zie hierboven). Verder bevat het systeem 250 duikers, 32 stuwen en is er voor de modellering een kering rondom de A58 geschematiseerd.



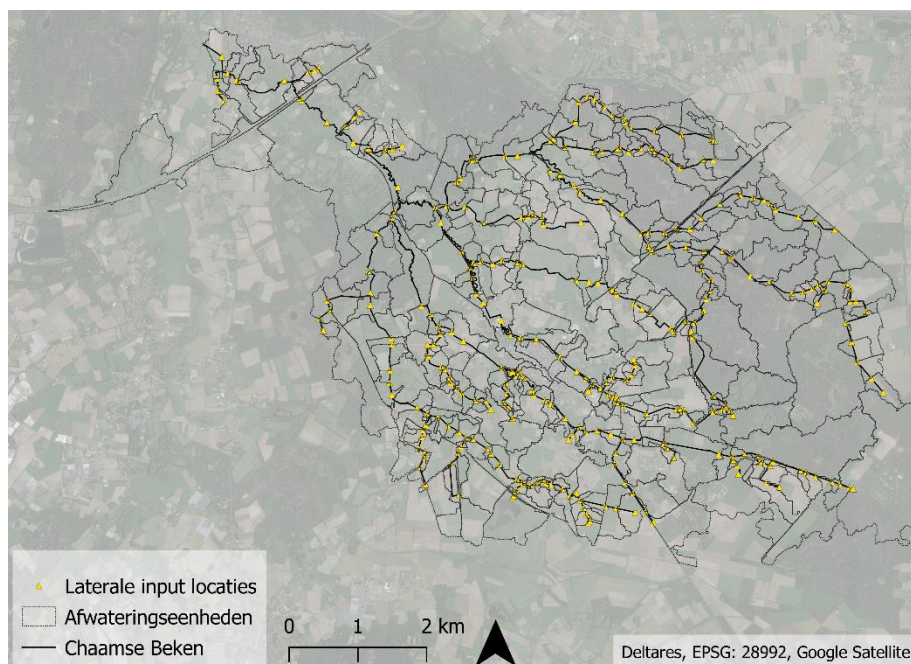
Figuur 3-3. Schematisatie van het D-HYDRO model. De blauwe lijnen tonen de geschematiseerde primaire watergangen. De rode pijlen geven de instroomlocaties van het secundaire systeem aan.

3.3 Koppeling grondwater model en hydraulisch model

Het grondwater en het oppervlaktewater worden 'offline-gekoppeld', wat betekent dat de uitvoer van het grondwatermodel wordt gebruikt als invoer voor het hydraulische model. Er vindt dus geen terugkoppeling plaats vanuit het hydraulisch model naar het grondwatermodel.

De gebruikte uitvoer van het grondwatermodel betreft alle fluxen die de verschillende componenten van het oppervlaktewatersysteem representeren in het grondwatermodel: buisdrainage, detailwaterlopen, grotere waterlopen en maaiveldafvoer. Deze componenten zorgen voor de drainage en afvoer van grondwater. De tijdseries van deze fluxen hanteren dezelfde tijdstap (uur) als het grondwatermodel.

Om de fluxen uit het grondwatermodel te koppelen aan het oppervlaktewater model is gebruik gemaakt van de afwateringseenheden van het stroomgebied zoals weergegeven in Figuur 3-4. Voor de eerste drie fluxen (buisdrainage, detailwaterlopen en grote waterlopen) is per tijdstap een sommatie gemaakt van alle gridcellen in een bepaalde afwateringseenheid. De som van die fluxen is vervolgens direct gekoppeld als laterale instroom in het 1D netwerk van het hydraulische model. Binnen deze methode wordt de vertragingstijd van de afstroming dus verwaarloosd. Voor de maaiveldafvoer is de vertragingstijd het grootst en daarom is voor deze flux uit het grondwatermodel gekozen voor een andere methode om deze te koppelen aan het hydraulische model. Per tijdstap is de flux in een bepaalde gridcel van het grondwatermodel direct geprojecteerd op dezelfde gridcel in het hydraulische model. De flux representeert water dat niet meer kan infiltreren in de bodem en dus op het maaiveld blijft staan of over het maaiveld afstroomt naar een lokale laagte of een open waterloop.

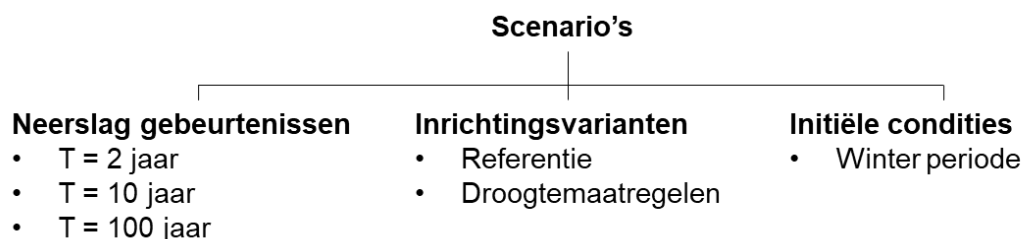


Figuur 3-4. Afwateringseenheden in het Chaamse Beken stroomgebied.

Het hydraulische model is een simpele benadering van het systeem waarin alleen primaire waterlopen zijn opgenomen. De droogtmaatregelen hebben ook impact op het hydraulische systeem (verwijderen van tertiaire waterwegen en ophogen van beekbodems) maar die maatregelen zijn nog niet doorgevoerd in het huidige hydraulische model. De impact van de droogtmaatregelen wordt dus bepaald aan de hand van hun impact op het grondwatermodel en de daaruit volgende afvoerverschillen. Hier moet rekening mee gehouden worden bij het interpreteren van de resultaten.

4 Scenario's

Voor dit onderzoek zijn verschillende scenario's onderzocht. Figuur 4-1 laat een overzicht van de onderzochte combinaties zien. In dit rapport is het zomerscenario nog buiten beschouwing gelaten, omdat wateroverlast tijdens een piekbui in de zomer voornamelijk veroorzaakt zal worden door een overschrijding van de infiltratiecapaciteit van de bodem, wat nog niet goed met het grondwatermodel berekend kan worden. Verder is er gekozen om drie herhalingstijden voor de neerslag door te rekenen en twee inrichtingsvarianten met elkaar te vergelijken: de huidige situatie en een situatie waarin droogtmaatregelen zijn getroffen. Dit hoofdstuk legt in meer detail uit hoe de scenario's tot stand zijn gekomen.



Figuur 4-1. Scenario's die zijn vergeleken binnen dit onderzoek.

4.1 Inrichtingsvariant met droogtmaatregelen

De inrichtingsvariant die wordt gebruikt binnen deze studie is de variant 'Natuur versterken' uit de KLIMAP-studie (Schoonderwoerd et al., 2023.). Zoals beschreven in deze studie:

Binnen deze variant worden er maatregelen getroffen die zorgen dat de natte natuur binnen het stroomgebied vernat ten opzichte van de huidige situatie. De maatregelen zijn daarom gericht op de gebieden in de buurt van deze natte natuur (en de KRW-waterlichamen), daarbuiten blijft de inrichting van het watersysteem gelijk aan de huidige situatie. De grondwaterafhankelijke natuurtypen die voorkomen in het modelgebied staan in Tabel 4-1, de selectie is gebaseerd op de classificering uit Ertsen (2011) en de locatie van deze natuurbeheertypen is afgeleid uit het Natuurbeheerplan 2022 (BIJ12, 2022).

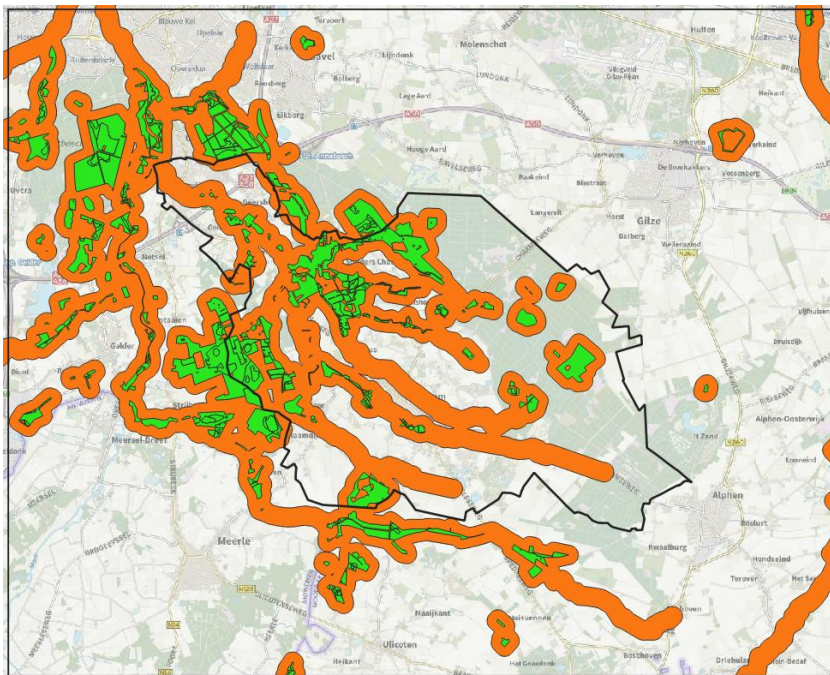
Tabel 4-1 Grondwaterafhankelijke natuurtypen die voorkomen in het modelgebied

N03.01	Beek en bron	N12.02	Kruiden- en faunarijke grasland
N04.02	Zoete plas	N12.05	Kruiden- en faunarijke akker
N05.04	Dynamisch moeras	N12.06	Ruigteveld
N06.04	Vochtige heide	N14.01	Rivier- en beekbegeleidend bos
N06.05	Zwakgebufferd ven	N14.02	Hoog- en laagveenbos
N06.06	Zuur ven of hoogveenven	N14.03	Haagbeuken- en essenbos
N10.01	Nat schraalland	N16.04	Vochtig bos met productie
N10.02	Vochtig hooiland	N17.03	Park- en stinzenbos

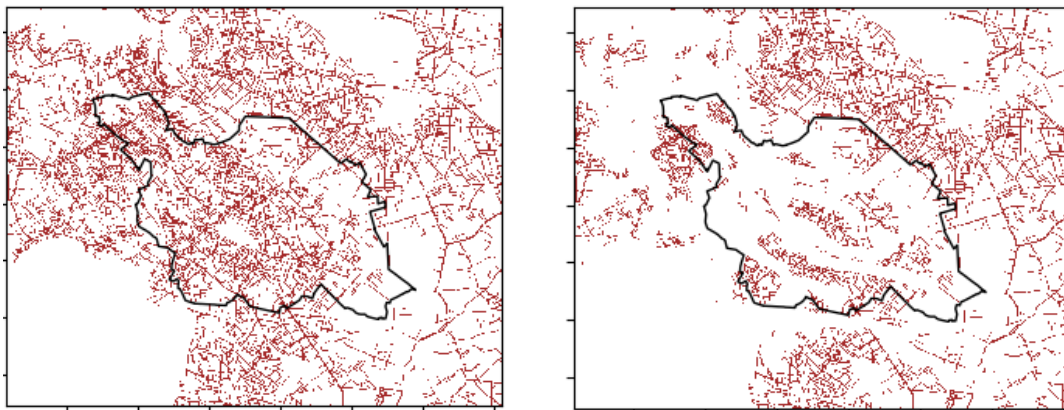
De maatregelen worden getroffen in een bufferzone van 200m rondom de natte natuurgebieden en de KRW-waterlichamen in het gebied (zie Figuur 4-2):

- Verwijder alle detailontwatering
 - alle detailwatergangen (zie Figuur 4-3)
 - Alle buisdrainage (zie Figuur 4-4)
- Geen onttrekkingen voor beregening (zie Figuur 4-5)

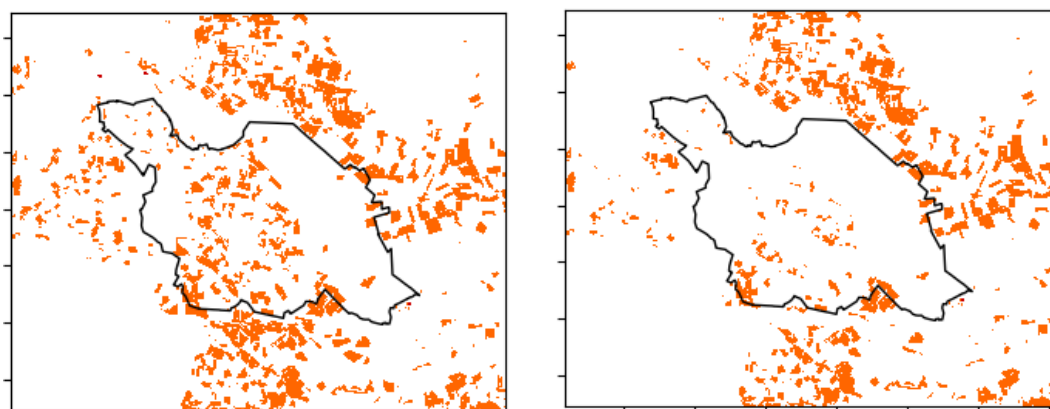
Daarnaast is alle detailontwatering in België verwijderd en is de drainagehoogte aangepast naar 0.3m-mv van een groot deel van de grote waterlopen in het gebied: grofweg alle beken met een KRW-doelstelling en de bovenlopen ervan. Dit is uiteindelijk simpel aangepakt door alle beken aan te passen naar een drooglegging van 0.3m-mv behalve in een gebied ten noordoosten van het stroomgebied. In Figuur 4-6 is de ophoging van de waterlopen te zien, deze verschilt tussen de 0.1m en ruim 1 m, de grijze waterlopen in de figuur zijn niet opgehoogd. In België zorgt de aanpassing naar een drainagebasis 0.3m-mv voor een verlaging van de drainagebasis (dit was pas later bekend, en is een ongewenste aanpassing. Bij een vervolgstudie zou het beter zijn om hier geen aanpassing door te voeren). Er zijn geen aanpassingen gedaan in de grote onttrekkingen voor drinkwater en industrie in het gebied.



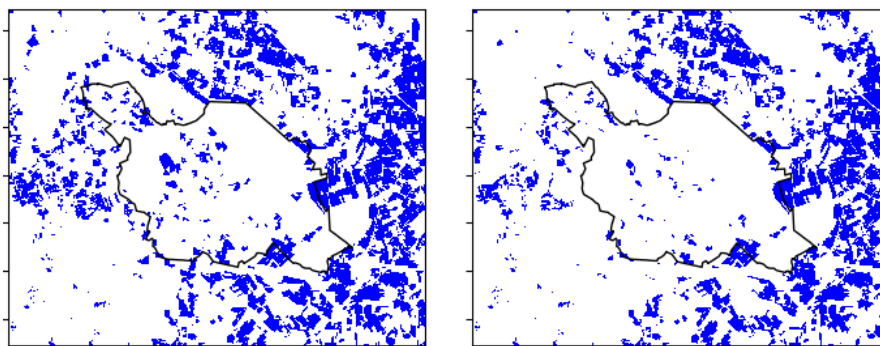
Figuur 4-2 Grondwaterafhankelijke natuur (groen) in het modelgebied In oranje de bufferzones van 200m rondom de natuur.



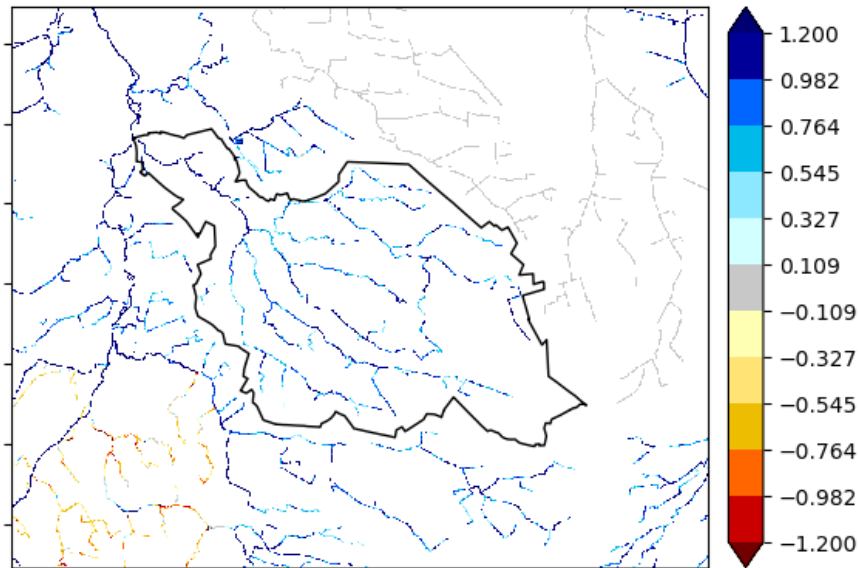
Figuur 4-3 Links: detailwatergangen in de referentiesituatie, rechts: detailwatergangen in de droogtemaatregelenvariant, waarbij de detailwatergangen in de bufferzones verwijderd zijn.



Figuur 4-4 Links: locaties met buisdrainage in de referentiesituatie, rechts: buisdrainage in de droogtemaatregelenvariant, waarbij de buisdrainage in de bufferzones verwijderd is.



Figuur 4-5 Links: locaties waar berekening uit grondwater plaatsvindt in de referentiesituatie, rechts: locaties waar berekening uit grondwater plaatsvindt in de droogtemaatregelenvariant



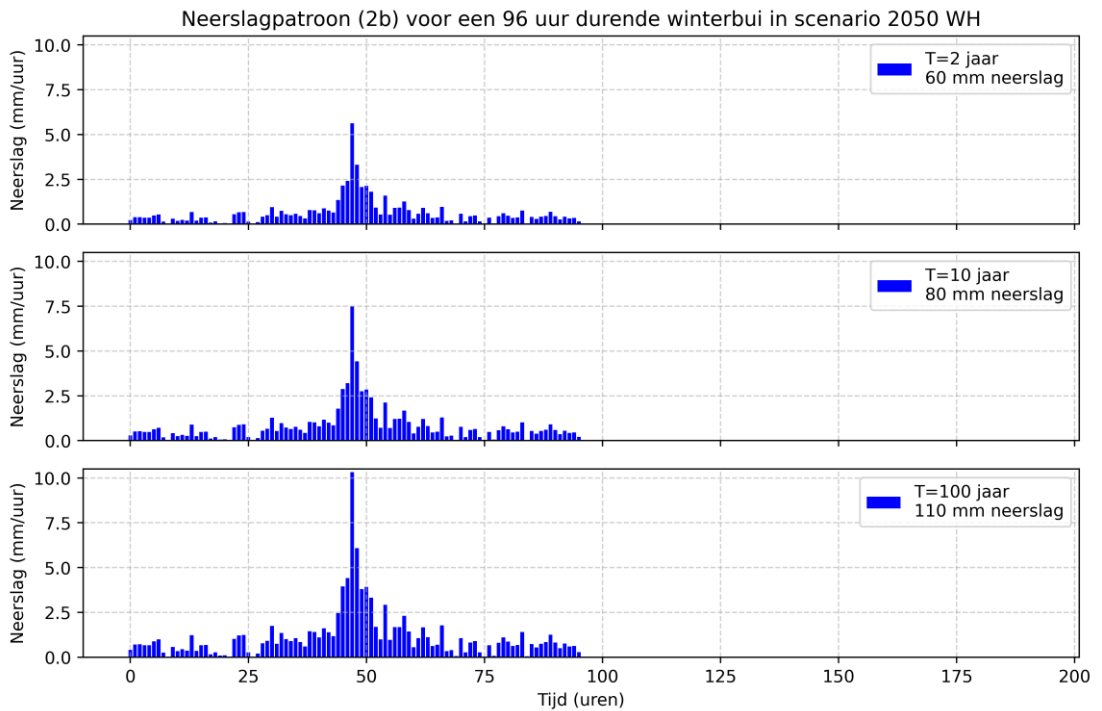
Figuur 4-6 Aanpassing drainagehoogte hoofdwaterlopen (m).

4.2 Neerslaggebeurtenissen

Om meer inzicht te krijgen in hoe de droogtmaatregelen effect hebben op de wateroverlast in het gebied, worden er enkele neerslaggebeurtenissen gemodelleerd. Er wordt gekeken naar neerslaggebeurtenissen met 3 verschillende herhalings tijden (2, 10, 100 jaar) in een wintersituatie. Deze gebeurtenissen worden zowel voor de referentiesituatie als de inrichtingsvariant met droogtmaatregelen doorgerekend om het effect van de maatregelen te kunnen bepalen. Deze herhalings tijden zijn gekozen in samenspraak met waterschap Brabantse Delta.

Voor de wintersituatie wordt de GHG gebruikt. De startconditie is de GHG en vervolgens wordt een neerslaggebeurtenis van 4 dagen op uurbasis met het grondwatermodel doorgerekend, gevolgd door 4 dagen zonder neerslag. De GHG is verschillend voor de referentiesituatie en de droogtmaatregelenvariant, waardoor de beginsituatie voor de modellering van de neerslaggebeurtenissen ook verschillend zal zijn voor deze twee varianten. Tijdens de neerslaggebeurtenis treed geen verdamping op, in de 4 dagen zonder neerslag is er een potentiële verdamping gebruikt die gemiddeld optreedt in de maanden nov-feb uit de hele analyseperiode (1994-2004).

Voor de neerslaggebeurtenissen zijn de neerslagstatistieken volgens het rapport Neerslagstatistiek en – reeksen voor het waterbeheer van STOWA gebruikt (STOWA, 2019). Uit dit onderzoek volgen neerslagvolumes- en intensiteiten voor zowel het huidige klimaat als voor de klimaatscenario's zoals bepaald door het KNMI. Er wordt onderscheid gemaakt tussen jaarstatistieken en winterstatistieken. In dit onderzoek is voor de wintersituatie gekozen om een vierdaagse bui te gebruiken met een neerslagvolume dat past bij het 2050 WH centrum scenario. De selectie van een vierdaagse bui is gemaakt door het waterschap op basis van de verwachting dat buien die in vier dagen een maximum bereiken de meeste impact hebben. Aansluitend bij bestaande methodes van het waterschap zijn de herhalings tijden van 2, 10 en 100 jaar meegenomen. Dit komt neer op respectievelijk 60, 80 en 110 mm neerslag binnen 96 uur. In een bijlage van het STOWA rapport worden de neerslagpatronen beschreven waarin het neerslagvolume verdeeld wordt over de bepaalde periode. Er is gekozen voor het winter neerslagpatroon type 1b met een 96 uur durende bui. Figuur 4-7 laat zien wat het verloop van de buien voor elke herhalings tijd is.



Figuur 4-7. Neerslagpatroon per herhalingsijd (2 jaar, 10 jaar en 100 jaar).

4.3 Startcondities van de modellen

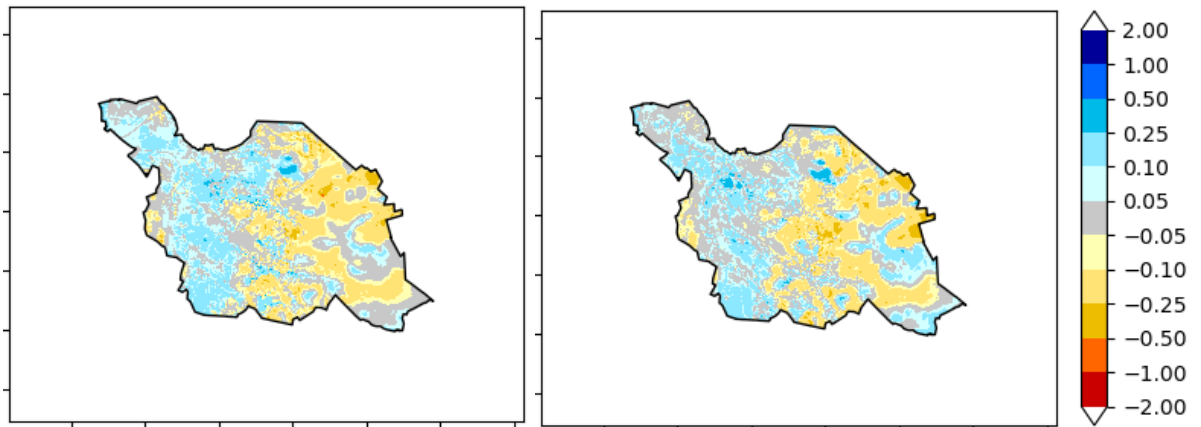
4.3.1 Startconditie grondwatermodel

Omdat het grondwatermodel een gekoppeld model voor grondwater en onverzadigde zone betreft, moet de startconditie voor de verzadigde én onverzadigde zone een soort 'GHG-situatie' zijn. Voor de verzadigde zone is de GHG te bepalen uit de tijdreeks van de grondwaterstanden, maar voor de onverzadigde zone is dit ingewikkelder. Daarom is er een analyse uitgevoerd op welke dag uit de gehele modelperiode van het grondwatermodel (1996-2004, met sterke klimaatverandering) de grondwaterstand het meest overeenkomt met de GHG (1996-2004, met sterke klimaatverandering). De grondwaterstanden en de situatie van de onverzadigde zone van deze dag is vervolgens gebruikt als beste benadering van de GHG-situatie.

De selectie van de dag die het meest op de GHG-situatie lijkt is als volgt:

- 1 Per dag in de modelperiode wordt het verschil tussen de grondwaterstanden op die dag en de GHG berekend voor iedere cel in het stroomgebied.
- 2 Vervolgens wordt de mediaan en de standaarddeviatie van deze verschillen berekend.
- 3 De dag waarop zowel de mediaan als de standaarddeviatie laag is, is gebruikt als GHG-benadering.

Als gevolg van deze aanname is dus niet de exacte GHG gebruikt als startconditie, de afwijking van de GHG van de varianten staat in Figuur 4-8 en Tabel 4-2. De grondwaterstanden in het westen van het stroomgebied zijn iets hoger (10-25cm) dan de GHG situatie, terwijl de grondwaterstanden in het oosten van het stroomgebied iets lager zijn dan de GHG situatie.



Figuur 4-8 Links: Afwijking (in meter) van de grondwaterstand ten opzichte van de GHG. Links: afwijking op 16-1-2002 voor de referentiesituatie, rechts: afwijking op 7-1-2002 voor de maatregelvariant. Een positieve waarde betekent een overschatting van de grondwaterstand ten opzichte van de GHG. Deze grondwaterstand startconditie wordt gebruikt als beste benadering voor de GHG situatie, omdat zowel de mediaan als de standaarddeviatie van de afwijking relatief klein is. (zie ook de toelichting in Tabel 4-2)

Tabel 4-2 Statistiek van de 5 dagen waar de grondwaterstanden in het stroomgebied de kleinste afwijking vertonen ten opzichte van de GHG voor de referentiesituatie (bovenste tabel) en maatregelvariant (onderste tabel). Voor de referentiesituatie is de grondwaterstand op 16-1-2002 gekozen als beste benadering van de GHG, gebaseerd op de combinatie van de laagste mediaan en standaard deviatie.

	Gemiddelde afwijking	Mediane afwijking	Standaard deviatie van de mediane afwijking
16-1-2002	-0.005	0.002	0.114
17-1-2002	-0.016	-0.008	0.113
19-1-2002	-0.011	-0.005	0.114
15-1-2002	-0.013	-0.007	0.116
18-1-2002	-0.017	-0.010	0.114

	Gemiddelde afwijking	Mediane afwijking	Standaard deviatie van de mediane afwijking
7-1-2002	-0.009	0.001	0.121
11-1-2002	0.004	0.004	0.115
8-1-2002	-0.003	0.003	0.120
6-1-2002	-0.016	-0.003	0.122
12-1-2002	0.011	0.012	0.116

4.3.2 Startconditie hydraulisch model

Het model is geïnitieerd door een initiële waterdiepte van 0.2 meter aan te nemen in alle waterlopen en het model voor 2 dagen te runnen met de input van een constant halve maatgevende afvoer op de lateralen in het model. Een halve maatgevende afvoer komt ongeveer 10 à 20 dagen per jaar voor.

Lateralen zijn de locaties waar het tertiaire systeem instroomt op in het primaire systeem. De benedenstroomse randvoorwaarde is onbekend doordat er kortgeleden aanpassingen zijn uitgevoerd in het systeem. Waar het benedenstroomse debiet eerst gestuurd was, is het nu volledig afhankelijk van de condities in de Mark. Daarom is een waterstandsrand van 1.4 m NAP opgelegd die de waterstand in de Mark representeert.

Bij het initialisatie model zijn 'restart files' weggeschreven aan het einde van elke gemodelleerde dag. Deze bestanden slaan informatie op over de waterstanden en stroomsnelheden in de nodes en kunstwerken die later gebruikt kunnen worden als startcondities in de door te rekenen scenario's. Voor het initialisatie model is de restart file gebruikt van het moment waarop de evenwichtssituatie was bereikt.

5 Resultaten

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de modellering van de Chaamse Beken casestudy besproken. Eerst zullen de resultaten van de langjarige reeks getoond worden, waarvan de berekeningen uitgevoerd zijn binnen het KLIMAP-project (Schoonderwoerd et al., 2023.) en waarvan de belangrijkste bevindingen worden overgenomen in deze rapportage. Daarna wordt de analyse van de neerslaggebeurtenissen gerapporteerd en besproken.

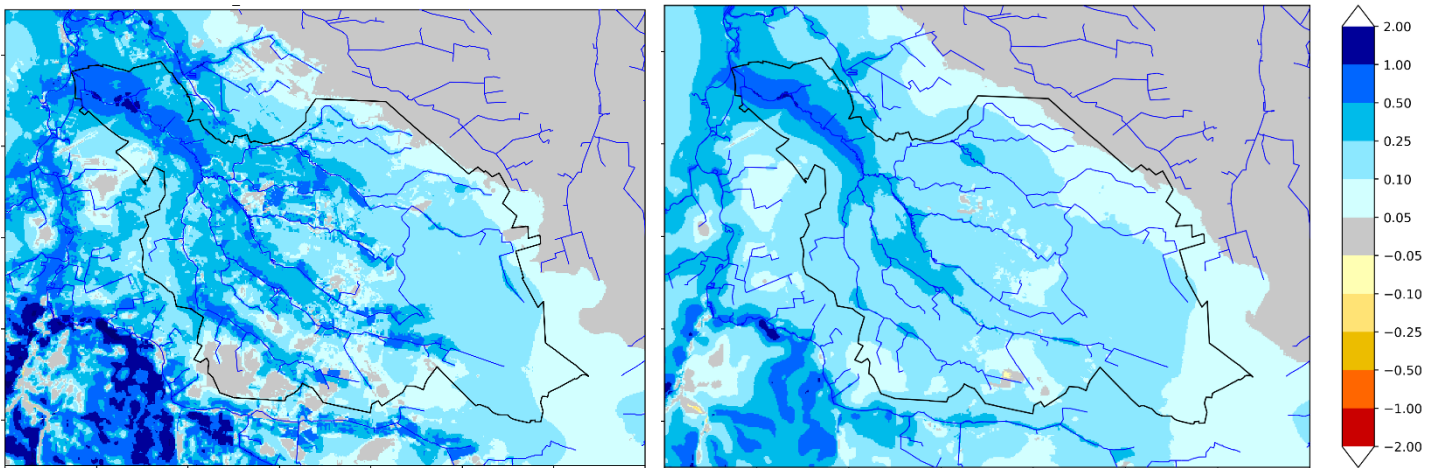
5.1 Resultaten grondwatermodel

5.1.1 Langjarige reeks

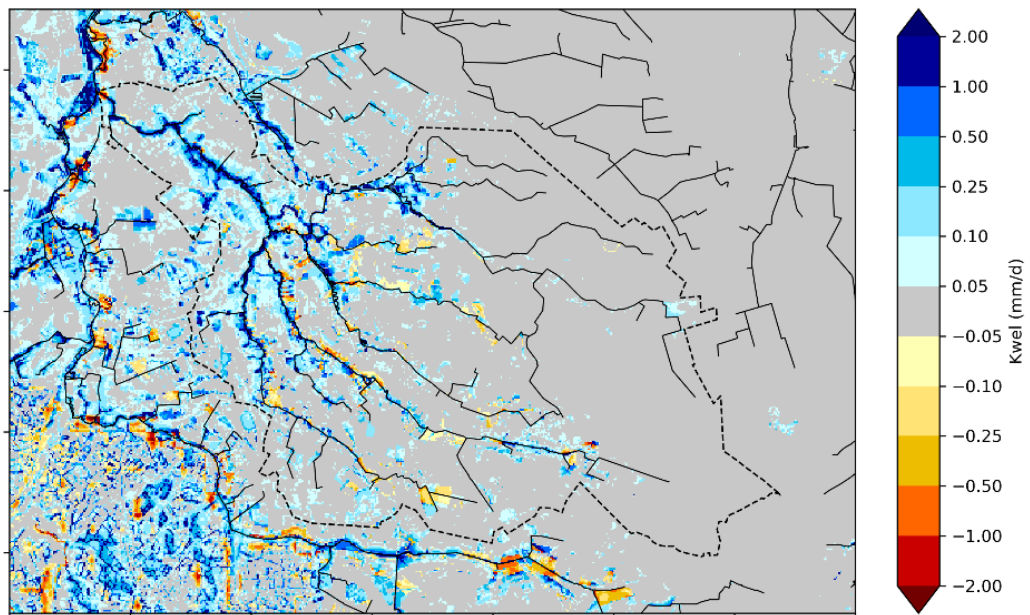
Figuur 5-1 toont de verandering in gemiddelde laagste grondwaterstand (GLG) en gemiddelde hoogste grondwaterstand (GHG) in de inrichtingsvariant ten opzichte van de referentiesituatie. In het hele stroomgebied vindt vernatting plaats, ten noordoosten van het stroomgebied verandert er weinig. Dit is logisch, aangezien er in dit gebied ook geen aanpassingen zijn gedaan. In de bufferzones (zie Figuur 4-2), waar de maatregelen toegepast zijn, zijn de grootste veranderingen te zien. Maar ook buiten de bufferzones is er een stijging van de GHG en GLG tot wel 25 cm.

In Figuur 5-3 wordt voor 3 locaties getoond hoe het grondwaterstandsverloop er gemiddeld in een jaar uitziet, onder de referentie en de inrichtingsvariant met droogtemaatregelen (let op de y-as verschilt in de 3 figuren). Hieruit blijkt dat een grondwaterstandstijging van enkele dm plaatsvindt, maar dat de grondwaterstand vaak nog diep ligt en dus ook onder de droogtemaatregelenvariant nog diep zal liggen (vooral locatie C). Het grootste effect is te zien in het noordwesten van het stroomgebied bij locatie A, zoals ook te zien is in het kaartje van Figuur 5-1, dit is omdat de benedenloop van de Chaamse Beken sterk is opgehoogd. Tevens is te zien dat het effect van de maatregelen in de variant in de zomer en in de winter ongeveer gelijk is. Figuur 5-3 toont ook de bandbreedte door middel van een 5- en 95-percentiel, deze bandbreedte varieert tussen 0.5m in de zomer bij locatie A tot bijna 2m in de zomer op locatie B. De verschillen tussen jaren kunnen dus groot zijn.

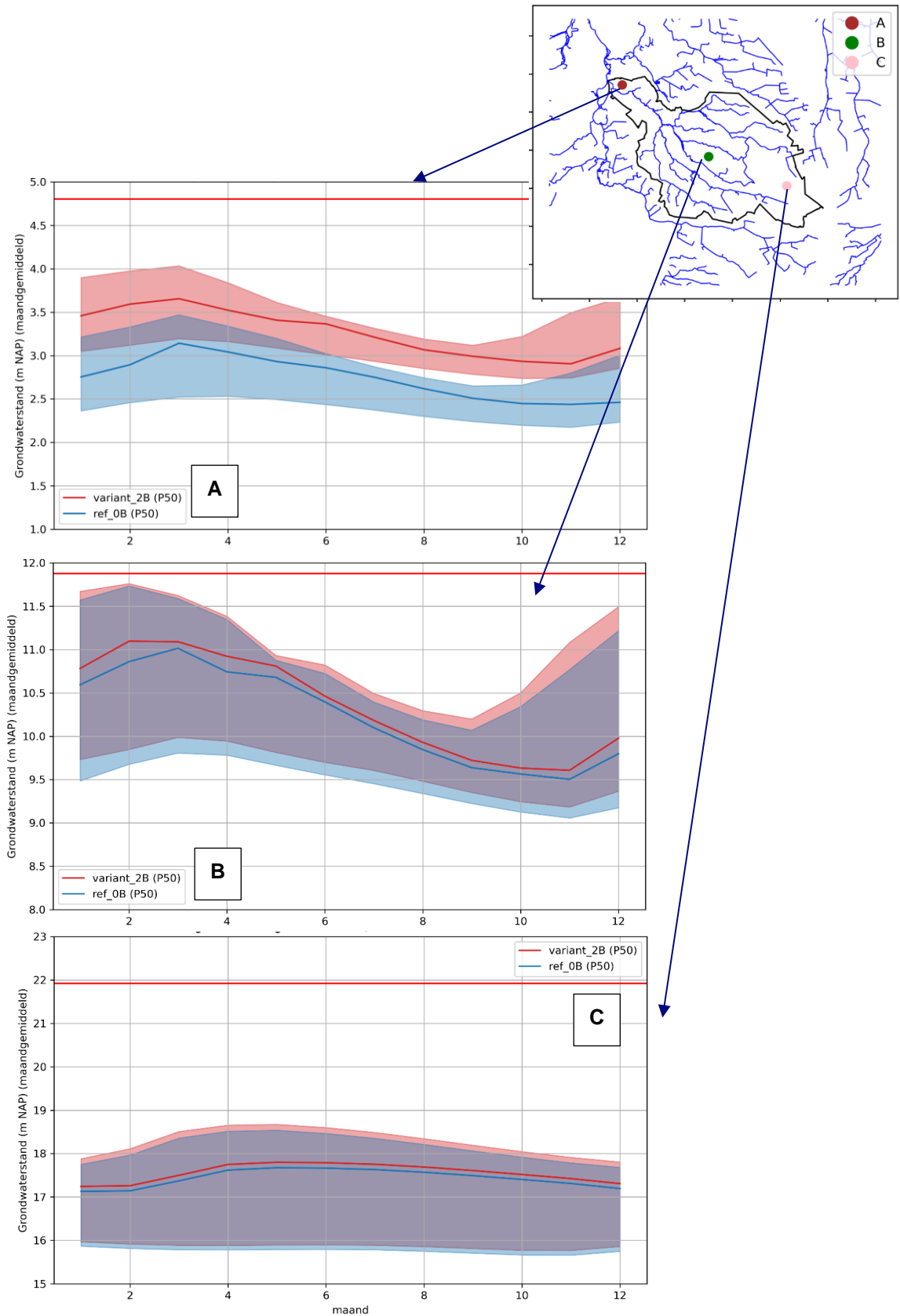
Rondom de benedenlopen van de beken neemt de gemiddelde kwel (Figuur 5-2) en de zomerkwel toe (niet getoond). In de rest van het gebied vindt wegzijging plaats, die iets afneemt in de droogtemaatregelenvariant.



Figuur 5-1 Verandering van de GHG (links) en GLG (rechts) (m) in de inrichtingsvariant met droogtemaatregelen ten opzichte van de referentiesituatie (zichtjaar 2050 met sterke klimaatverandering). Een blauwe kleur geeft een stijging van de grondwaterstand aan, een gele tot rode kleur geeft een daling aan.



Figuur 5-2 Verandering gemiddelde kwel (mm/d)

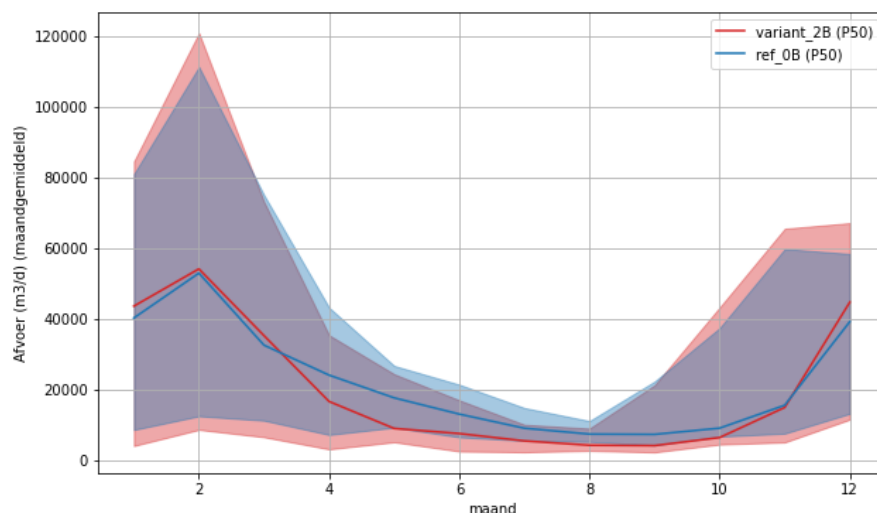


Figuur 5-3 Gemiddelde grondwaterstand en 5-95 percentiel van de grondwaterstand in m NAP (gemiddeld over periode 1996-2004) per maand op 3 verschillende locaties voor de referentie (blauw) en inrichtingsvariant met droogtemaatregelen (rood). De horizontale rode lijn geeft de maaiveldhoogte op die locatie weer. (let op, de y-as verschilt)

De gebiedseigen afvoer vanuit het stroomgebied wordt per tijdstap berekend vanuit de modeluitvoer als som van alle grondwaterdrainage door verschillende waterlopen en ontwateringsmiddelen in het stroomgebied (buisdrainage, detailwaterlopen, grote waterlopen, maaiveldafvoer). Hierbij geldt dat grondwater dat in een bovenloop gedraineerd wordt, direct tot de gebiedsafvoer gerekend wordt. De bandbreedte van het jaarlijkse afvoerpatroon van de referentie en inrichtingsvariant met droogtemaatregelen wordt getoond in Figuur 5-4. Ten opzichte van de referentiesituatie wordt de winterafvoer grilliger: er komen zowel hogere als lagere afvoeren voor in de wintermaanden, maar gemiddeld gezien neemt de winterafvoer iets toe. In de zomermaanden is de afvoer in de inrichtingsvariant met droogtemaatregelen lager dan in de referentie. Dit is te verklaren doordat de verdamping in het gebied iets toeneemt en ook stroomt er meer grondwater ondergronds weg (naar buiten het gebied) en komt dit niet meer in de waterlopen terecht.

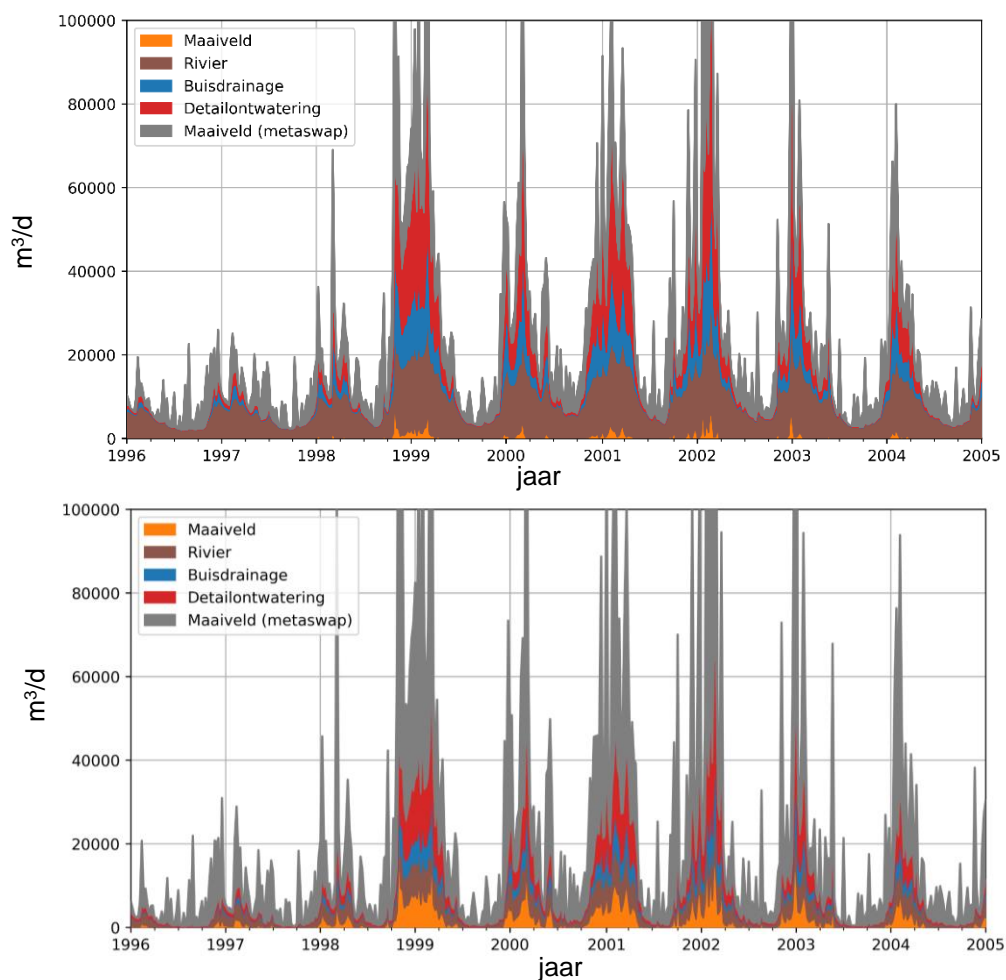
Figuur 5-5 laat de verdeling zien van de afvoeren over de verschillende ontwateringssystemen in beide scenario's, waarbij de afvoer van deze systemen gestapeld is. In de referentiesituatie is te zien dat het grootste aandeel van de afvoer uit het stroomgebied afkomstig is uit het detailwatersysteem (rood), de buisdrainage (blauw) en van de drainage door de grotere waterlopen ('rivier', bruin). In de zomerperiode draineren het detailwatersysteem en de buisdrainage niet, en is de drainage door de grotere waterlopen ook lager. In de referentie is het aandeel maaiveldafvoer (oranje en grijs) vrij laag. De figuren tonen twee fluxen voor maaiveldafvoer (oranje en grijs), welke samen de totale maaiveldafvoer weergeven. De twee fluxen zijn aanwezig omdat in het model gebruikt in de KLIMAP-studie een gedeelte van de maaiveldafvoer door MetaSWAP berekend werd en een gedeelte door MODFLOW.

Door de maatregelen in de maatregelenvariant verandert het patroon van drainage per systeem. Het dempen van de detailwatergangen en buisdrainage in de bufferzones zorgt dat deze systemen ook minder draineren (er zijn immers minder locaties waar deze drainage kan plaatsvinden). Het ophogen van de grote waterlopen zorgt ervoor dat het grondwaterpeil al eerder onder de drainagebasis komt te liggen, waardoor er geen drainage meer plaatsvindt. In de inrichtingsvariant neemt de maaiveldafvoer wel sterk toe. Een kanttekening hierbij is wel dat maaiveldafvoer direct tot de gebiedsafvoer wordt meegerekend en dit water dus direct uit het systeem verwijderd is. In realiteit zal het water mogelijk langer op maaiveld geborgen worden en weer kunnen herinfiltreren.



Figuur 5-4 Bandbreedte van de maandgemiddelde afvoeren (m³/dag) van de inrichtingsvariant (rood) en de referentiesituatie zonder klimaatverandering (blauw). De dikke lijn toont het gemiddelde van de hele modelperiode van de maandgemiddelde waarden, de vlakken erom heen geven het 5-percentiel en 95-

percentiel aan



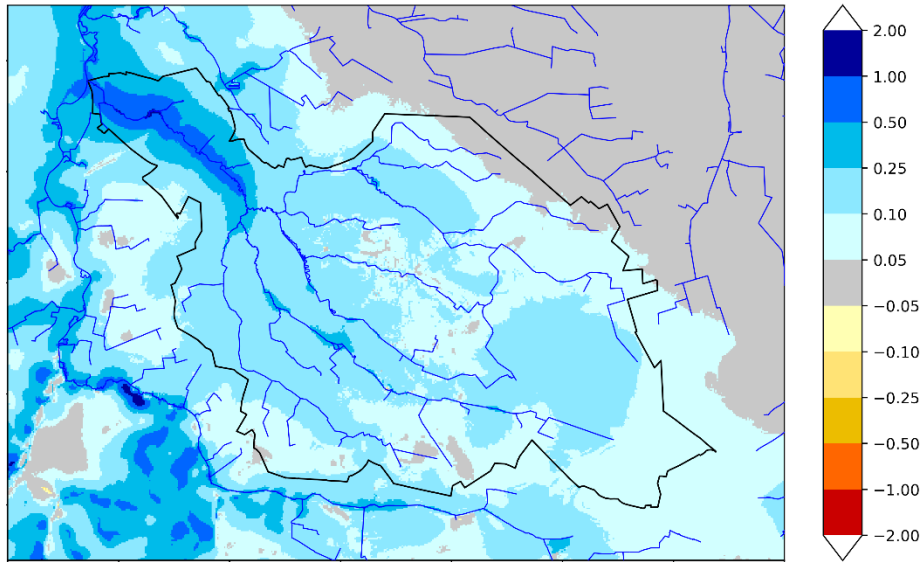
Figuur 5-5 Gestapelde grafiek van de weekgemiddelde afvoer (m³/d) per rivier- of drainagesysteem in het stroomgebied in de referentie (boven) en inrichtingsvariant (onder). De twee maaiveldafvoer fluxen geven in gezamenlijk de totale maaiveldafvoer weer.

5.1.2

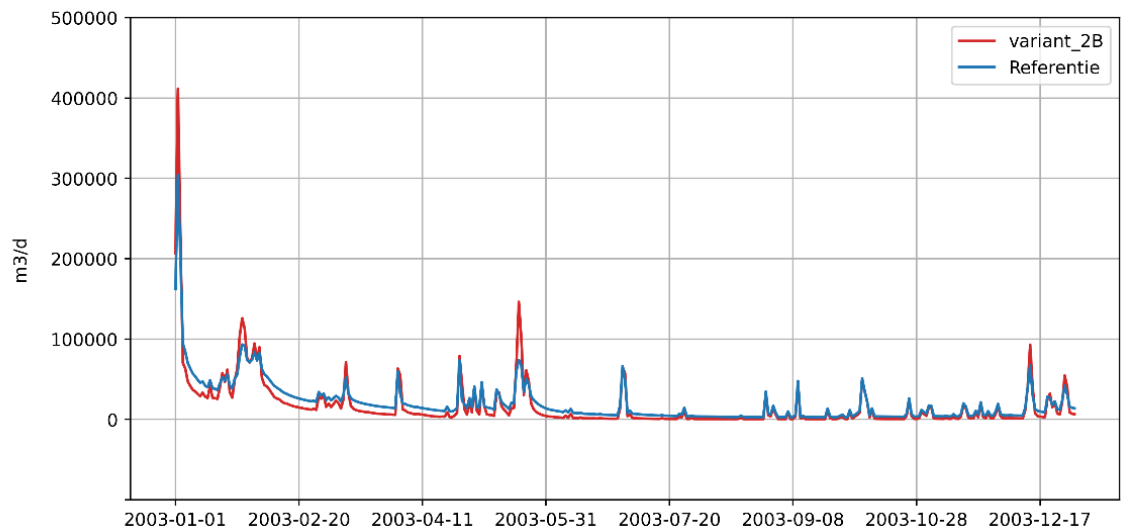
Droog jaar: 2003

Het effect van de maatregelen op de LG3 (het gemiddelde van de drie laagste grondwaterstanden in een jaar) wordt getoond in Figuur 5-6. De LG3 neemt op veel locaties toe met meer dan 10 cm, tot maximaal 1 m. Dit effect is zeer vergelijkbaar met het effect op de GLG. Het effect op de LG3 is lokaal iets kleiner dan de GLG.

De gebiedsafvoer zakt in de zomer, maar ook in de winter tussen neerslagperiodes in, verder uit dan de referentiesituatie. In de winter is de piekafvoer juist hoger dan de referentiesituatie (Figuur 5-7). Dit patroon is dus ook vergelijkbaar met het langjarige effect.



Figuur 5-6 Verandering van de gemiddeld laagste jaarlijkse grondwaterstand (LG3) (m) in 2003 (droog jaar) in de droogtemaatregelenvariant. Het betreft een hydrologisch jaar, de periode 1-4-2003 – 31-3-2004. Een blauwe kleur geeft een stijging van de grondwaterstand aan

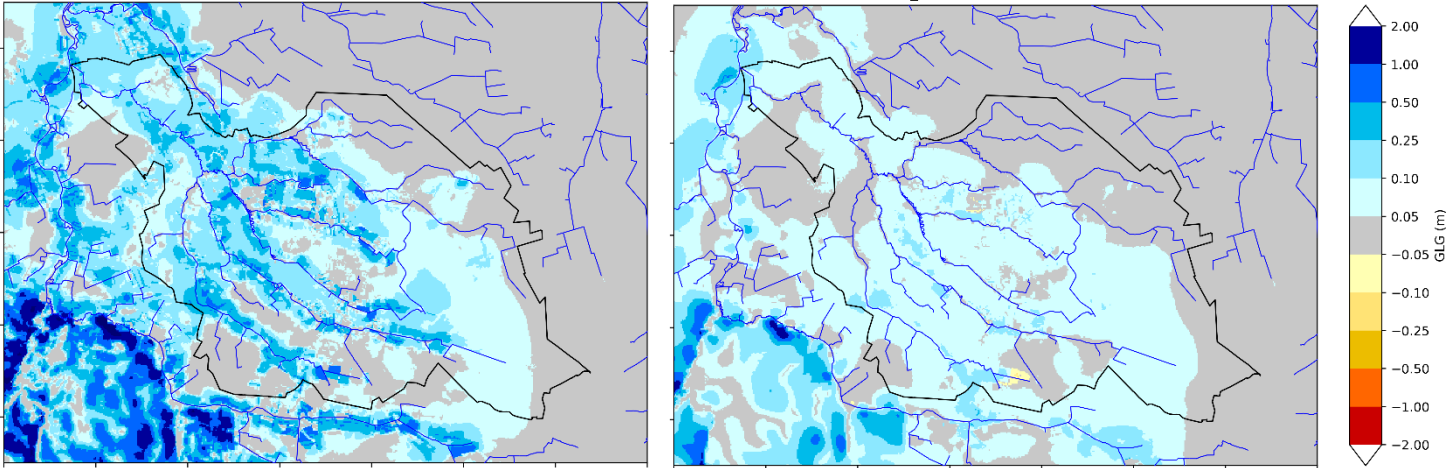


Figuur 5-7 Gebiedsafvoer in 2003 voor referentie (blauw) en de inrichtingsvariant met droogtemaatregelen (rood). De laagste afvoeren bij de inrichtingsvariant zijn net iets hoger dan 0 (ongeveer 400 m³/d)

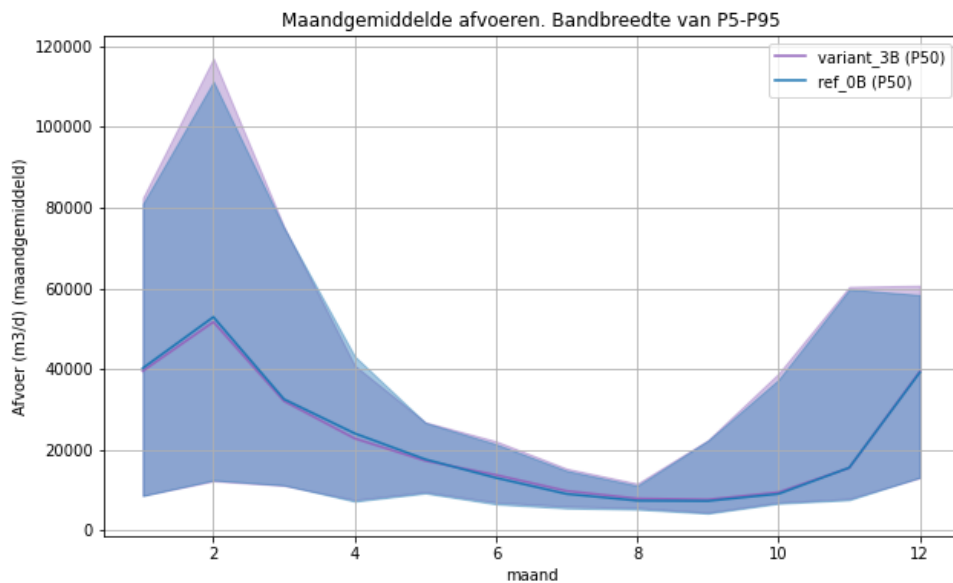
5.1.3 Effect verhoging drainagebasis grote waterlopen

Het ophogen van de drainagebasis in de grote waterlopen heeft een groot effect op het jaarlijkse afvoerpatroon en de grondwaterstand. Daarom is ook bekeken wat het effect op de sponswerking zou zijn wanneer er geen beekbodemverhoging wordt toegepast. In dat geval is de stijging van de GHG en GLG aanzienlijk lager (Figuur 5-8). De GLG stijgt nog maar maximaal 10 cm. De jaarlijkse gebiedsafvoer is vrijwel gelijk aan de referentiesituatie (Figuur 5-9), er wordt wel meer water als maaiveldafvoer afgevoerd en minder door buisdrainage en detailwaterlopen ten opzichte van de referentiesituatie.

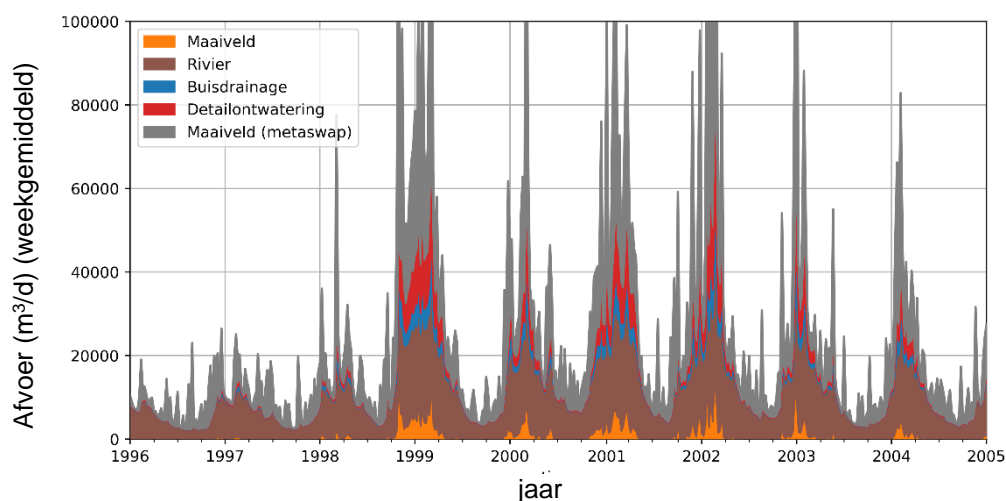
Dit resultaat geeft aan dat het ophogen van de beken in de modellering (zoals beschreven in het begin van dit hoofdstuk) zorgt voor een stijging van de grondwaterstand, maar dat dit wel leidt tot een afname in de basisafvoer in de zomer en een stijging in de piekafvoeren in de winter. Er is wel meer onderzoek nodig om dit effect beter te begrijpen. Zo treed er veel maaiveldafvoer waarbij het water direct uit het systeem verwijderd wordt, terwijl in realiteit een deel van dit water weer zal herinfiltreren. Ook kan er nader onderzocht worden of er een andere inrichting van het watersysteem beter geschikt is om wel voor hoge zomer-grondwaterstanden én een verhoging van de basisafvoer te zorgen.



Figuur 5-8 Verandering van de GHG (links) en GLG (rechts) (m) in variant 3 ten opzichte van de referentiesituatie met sterke klimaatverandering. Een blauwe kleur geeft een stijging van de grondwaterstand aan, een gele tot rode kleur geeft een daling aan.



Figuur 5-9 Bandbreedte van de maandgemiddelde afvoeren (m3/dag) van variant 3 (paars) en de referentiesituatie zonder klimaatverandering (blauw). De dikke lijn toont het gemiddelde van de hele modelperiode van de maandgemiddelde waarden, de vlakken erom heen geven het 5-percentiel en 95-percentiel aan.



Figuur 5-10 Gestapelde grafiek van de weekgemiddelde afvoer (m³/d) per rivier- of drainagesysteem in het stroomgebied in variant 2 onder sterke klimaatverandering

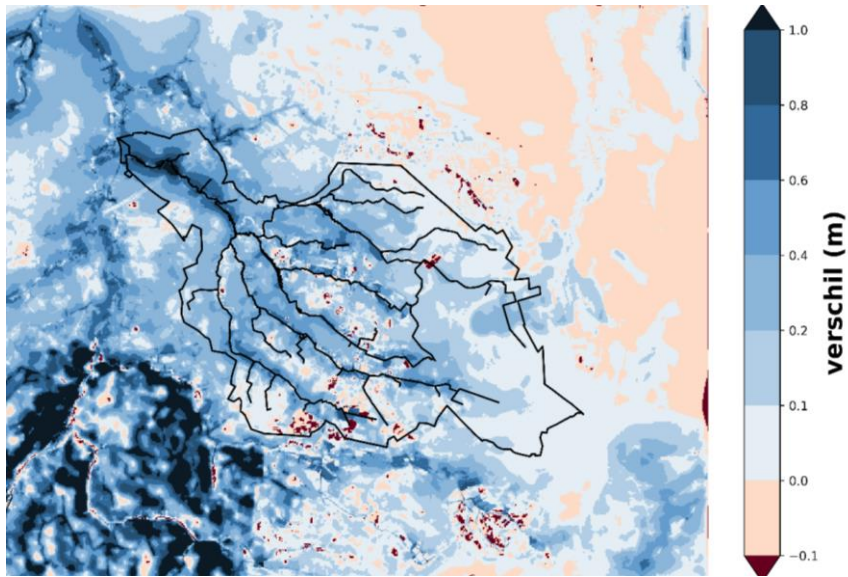
5.1.4 Impact van verschillende neerslaggebeurtenissen

Om beter te begrijpen hoe de droogtemaatregelen effect hebben op wateroverlast, zijn er neerslaggebeurtenissen doorgerekend met het grondwatermodel dat offline gekoppeld is aan het hydraulisch model. In dit hoofdstuk worden de resultaten van het grondwatermodel getoond, eerst worden de effecten op de grondwaterstand besproken en daarna de effecten op de afvoeren uit de verschillende oppervlaktewater- en drainagesystemen.

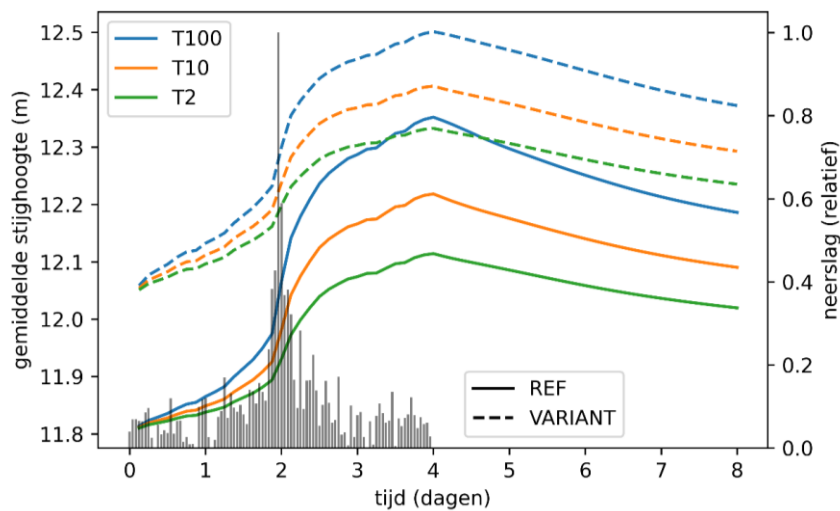
In Figuur 5-12 is samengevat hoe de freatische grondwaterstanden gemiddeld in het stroomgebied veranderen tijdens en na de neerslaggebeurtenissen. De GHG is gemiddeld 25cm hoger in de inrichtingsvariant met droogtemaatregelen ten opzichte van de referentie (zie ook Figuur 5-11), dus de startconditie voor de neerslaggebeurtenis is ook hoger. Daarna stijgt de grondwaterstand tijdens een neerslaggebeurtenis en daalt weer nadat de neerslag gestopt is. In Figuur 5-13 wordt het verloop van de grondwaterstand getoond voor drie verschillende locaties. Dit geeft aan dat de grondwaterstand per locatie anders reageert op het neerslaggebeurtenis. Bij locatie A begint de grondwaterstand pas te stijgen na de grote piek van de neerslaggebeurtenis. Locatie A ligt ook in een dorp (Ulvenhout) met een gedeelte verhard oppervlak. Daardoor wordt een deel van het water al direct afgevoerd en komt het niet ten goede aan de grondwaterstand. Daarnaast duurt het ook even voordat het water, dat eerst in de onverzadigde zone terecht komt, ook daadwerkelijk het grondwater bereikt. Bij locatie B komt de grondwaterstand snel aan maaiveld, dit water wordt gedraineerd en de grondwaterstand kan niet meer verder stijgen (de grondwaterstand kan immers niet verder stijgen dan tot aan het maaiveld). Bij locatie C ligt de grondwaterstand erg diep en is er nauwelijks effect te zien van de neerslaggebeurtenis, de grondwaterstand stijgt erg langzaam en deze stijging is nog steeds bezig aan het eind van de modelrun.

De gemiddelde stijging is hoger in de referentiesituatie dan onder de inrichtingsvariant met droogtemaatregelen, dit komt omdat de grondwaterstanden niet verder kunnen stijgen dan de maaiveldhoogte, wat in de droogtemaatregelenvariant op meer plekken gebeurt. Dit effect is duidelijk te zien op locatie B in Figuur 5-13: de grondwaterstand stijgt het snelste bij de T100-gebeurtenis onder de maatregelenvariant met droogtemaatregelen en is na 1.5 op maaiveldhoogte en kan niet verder stijgen.

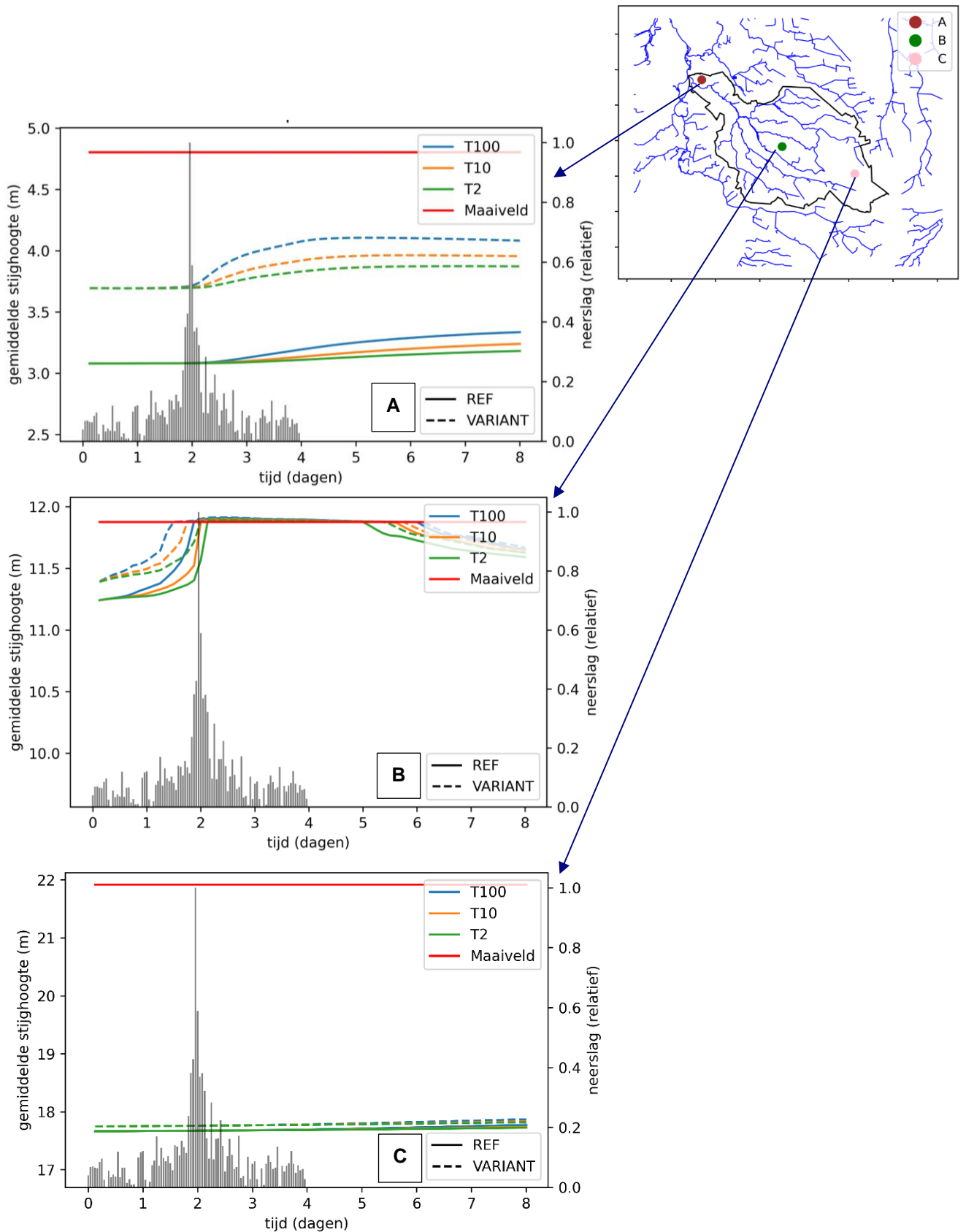
Onder de referentie is de grondwaterstand bij de start van de neerslag nog iets lager, waardoor de grondwaterstand verder kan stijgen dan bij de droogtemaatregelenvariant, maar uiteindelijk komt ook hier het grondwater tot aan maaiveld en stijgt de grondwaterstand niet meer verder. Alle neerslag wordt dan als maaiveldafvoer afgevoerd.



Figuur 5-11 Verschil tussen de initiële grondwaterstand van de referentie en inrichtingsvariant met droogtemaatregelen. Bij een blauwe kleur is de grondwaterstand in de droogtemaatregelenvariant hoger, bij een rode kleur is de grondwaterstand in de inrichtingsvariant lager dan de referentie.

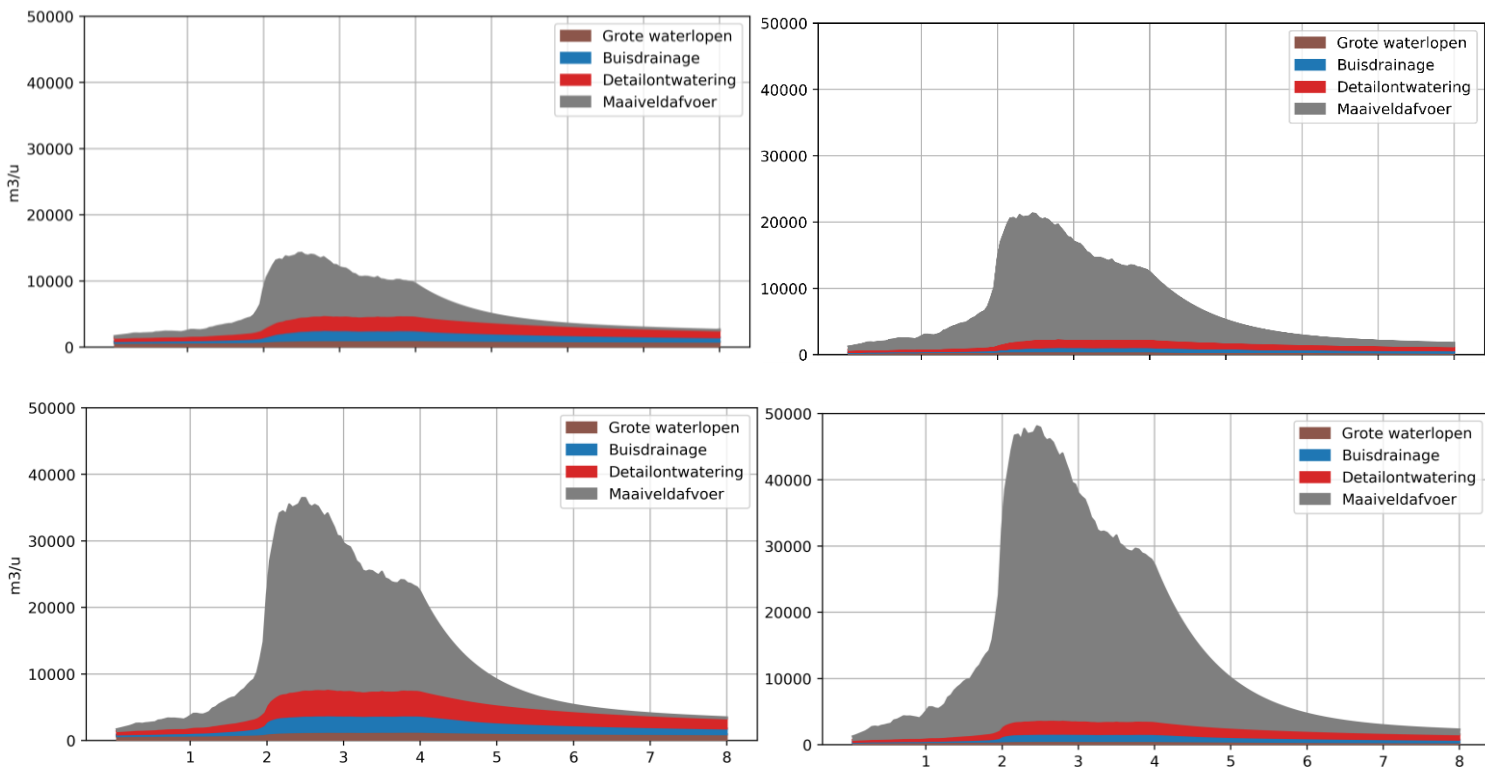


Figuur 5-12 Gemiddelde (freatische) grondwaterstand in de bovenste modellaag in het hele stroomgebied. Doorgetrokken lijn is de referentiesituatie, gestippelde lijn de inrichtingsvariant met droogtemaatregelen. De drie kleuren geven de herhalingstijden (2, 10 en 100 jaar) van de neerslagebeurtenis weer



Figuur 5-13 Grondwaterstandsverloop in de bovenste modellaag tijdens de simulatie voor 3 locaties. Doorgetrokken lijn is de referentiesituatie, gestippelde lijn de inrichtingsvariant met droogtemaatregelen. De drie kleuren geven de herhalings tijden (2, 10 en 100 jaar) van de neerslagegebeurtenis weer. Bij locatie C (onderste figuur) liggen de lijnen van de verschillende herhalings tijden vrijwel op elkaar

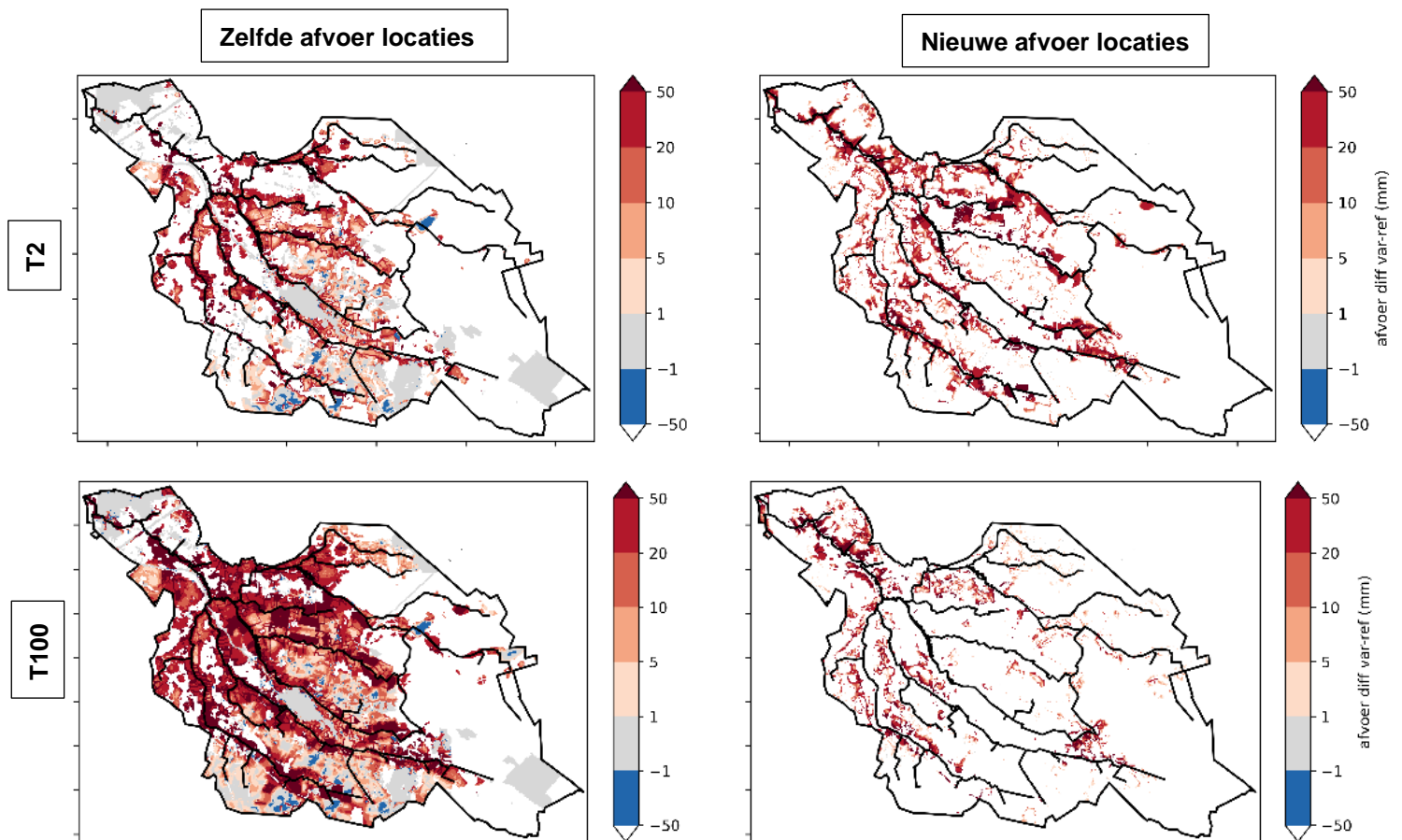
In Figuur 5-14 staan de gestapelde grafieken van de afvoer uit de verschillende drainagesystemen binnen het stroomgebied. De linkerkolom is de referentiesituatie, de rechterkolom de inrichtingsvariant met droogtmaatregelen en de bovenste rij is de T2-neerslaggebeurtenis, de onderste rij de T100. Duidelijk is te zien dat een toename in totale afvoer voornamelijk veroorzaakt wordt door een toename in maaiveldafvoer. Maaiveldafvoer treed op wanneer de grondwaterstand tot aan maaiveld komt en in stedelijk gebied waar water niet kan infiltreren op verhard oppervlak. Er wordt geen maaiveldafvoer berekend door het model als gevolg van het overschrijden van de infiltratiecapaciteit van de bodem (de infiltratiecapaciteit van de bodem is in het hele model zeer hoog). Bij de maatregelenvariant zijn sloten en buisdrainage gedeeltelijk gedempt en de grote waterlopen opgehoogd. Hierdoor draineren deze systemen relatief weinig. Doordat de grondwaterstand (aan het begin van de neerslaggebeurtenis) in de variant al hoger is, komt het water sneller aan maaiveld en wordt er meer water direct afgevoerd. Na afloop van de neerslaggebeurtenis neemt de maaiveldafvoer het snelste af, maar het duurt nog wel enkele dagen voordat de maaiveldafvoer helemaal stopt, omdat de grondwaterstanden nog steeds zeer hoog (tot aan maaiveld) blijven. Bij T100 onder de maatregelenvariant is er nog steeds een kleine hoeveelheid drainage aan maaiveld aan het eind van de simulatie, 4 dagen nadat de neerslag is gestopt. Ook hier is het belangrijk om opnieuw de kanttekening te plaatsen dat maaiveldafvoer direct tot afvoer uit het watersysteem wordt meegerekend en dat dit water niet meer kan herinfiltreren. In realiteit zal het water mogelijk langer op maaiveld geborgen worden en weer kunnen herinfiltreren.



Figuur 5-14 Gestapelde afvoer (m³/u) (x-as: dagen) van de verschillende ontwateringssystemen binnen het Chaamse Beken stroomgebied tijdens een modelrun met een neerslaggebeurtenis (tijdens de eerste vier dagen). Bovenste rij: T2-event, onderste rij: T100-event. Linker kolom: referentie, rechter kolom: inrichtingsvariant met droogtmaatregelen

De toename in maaiveldafvoer (als gevolg van grondwater dat tot aan het maaiveld komt) (voor T2 en T100) is geplot in Figuur 5-15.

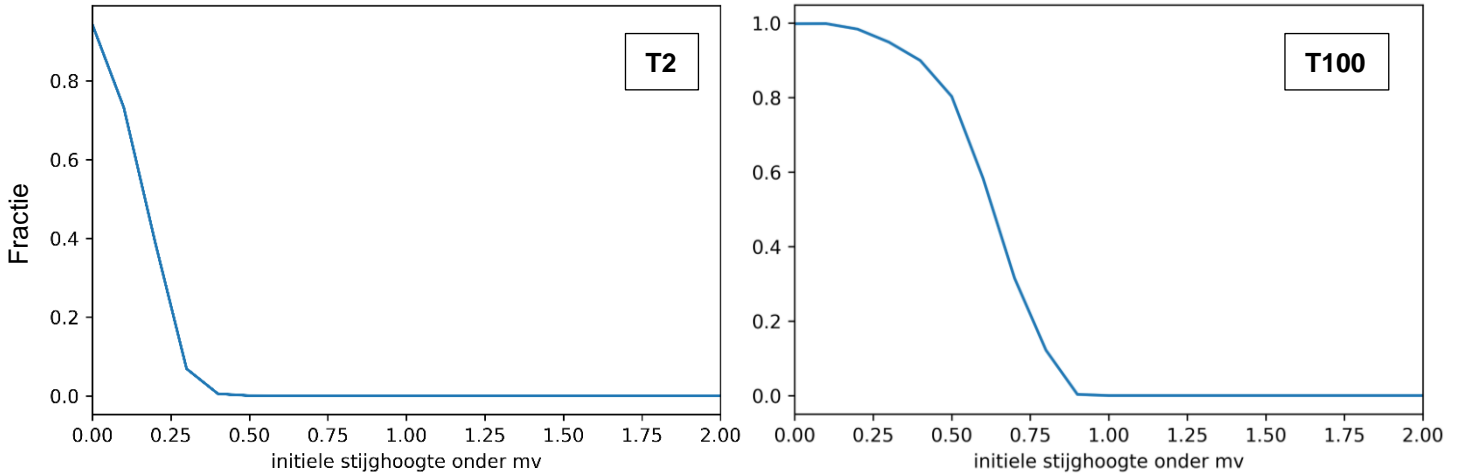
De linker kolom toont de verandering in maaiveldafvoer op locaties waar zowel in de referentie als de droogtemaatregelenvariant maaiveldafvoer optreedt. De rechter kolom zijn nieuwe locaties waar maaiveldafvoer optreedt. Bij de T2-neerslaggebeurtenis treedt er maaiveldafvoer op rondom de beken, deze neemt toe onder de droogtemaatregelenvariant en het gebied met maaiveldafvoer breidt zich uit. Bij de T100-neerslaggebeurtenis treedt er in het grootste deel van het gebied (behalve in de hoogste delen) maaiveldafvoer op in de referentiesituatie. Door de droogtemaatregelen neemt de maaiveldafvoer toe (voor veel gebieden een toename van 20-50 mm totaal over de 8 dagen), maar het gebied breidt zich niet veel verder uit. In gebieden met verhard oppervlak (stedelijk gebied), blijft de maaiveldafvoer gelijk. Dit komt omdat de maaiveldafvoer hier veroorzaakt wordt doordat niet alle neerslag kan infiltreren. De hoeveelheid afvoer wordt dan bepaald door de hoeveelheid neerslag, welke gelijk is onder beide scenario's, en niet door de grondwaterstand.



Figuur 5-15 Toename (rood) of afname (blauw) in totale maaiveldafvoer onder de inrichtingsvariant met droogtemaatregelen (bij de grijze gebieden blijft de maaiveldafvoer gelijk). De linker kolom toont de verandering op de locaties waar in de referentie ook al maaiveldafvoer optreedt, de rechterkolom toont de nieuwe locaties met maaiveldafvoer. De bovenste rij is het T2-neerslaggebeurtenis, de onderste rij het T100-event.

Om een nog beter beeld te krijgen van het effect van de initiële grondwaterstand op de maaiveldafvoer, is in Figuur 5-16 de fractie van cellen waarbij maaiveldafvoer optreedt geplott voor de referentiesituatie (alleen voor de cellen zonder verhard oppervlak). De cellen met een initiële grondwaterstand van 0m-mv hebben onder de T2 en T100 herhalingstijden (vrijwel) altijd maaiveldafvoer. Bij de T2 neerslaggebeurtenis treedt er geen maaiveldafvoer meer op wanneer de initiële grondwaterstand dieper is dan 0.4m-mv.

Wanneer de neerslag intenser is (T100-neerslaggebeurtenis), komt ook bij de diepere initiële grondwaterstanden maaiveldafvoer voor. Pas bij een grondwaterstand dieper dan 0.9m-mv zal er geen maaiveldafvoer meer optreden. Dit betekent dus dat bij een initiële grondwaterstand van 0.9m-mv voldoende ruimte is in de bodem om het water te bergen, terwijl bij een ondiepere grondwaterstand deze ruimte onvoldoende is en zal een deel van de neerslag over het maaiveld afstromen.



Figuur 5-16 Fractie van de modelcellen per initiële grondwaterstand waar uiteindelijk maaiveldafvoer optreedt. Cellen met een initiële grondwaterstand van 0m-mv hebben (vrijwel) altijd maaiveldafvoer, terwijl bij 1m-mv er geen maaiveldafvoer optreedt

5.2 Resultaten hydraulische model

Het hydraulische model is gebruikt om de impact van de verschillende scenario's op de wateroverlast weer te geven. In deze paragraaf worden de resultaten van dit model besproken en wordt verder ingegaan op de opvallende verschillen tussen de toetsing die het waterschap gebruikt voor wateroverlast en de methode die in dit onderzoek is toegepast.

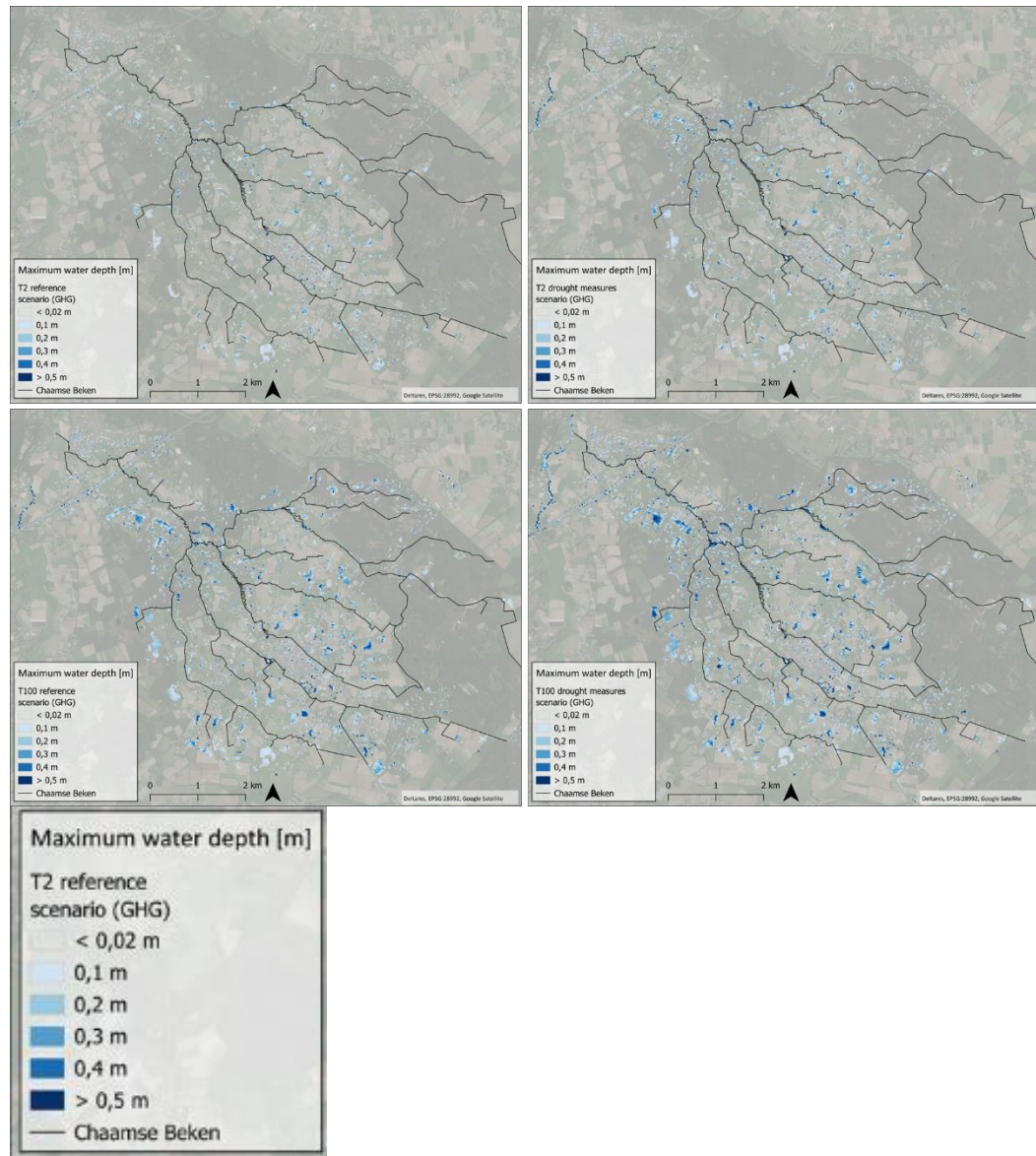
5.2.1 Overstromingskaarten

Voor de verschillende herhalingstijden zijn de fluxen uit het grondwatermodel toegevoegd aan het hydraulische model. Figuur 5-14 laat de omvang van deze fluxen zien voor verschillende inrichtingsvarianten en herhalingstijden. Wat opvalt in de figuur is dat de maaiveldafvoer de grootste bijdrage levert tijdens de piekafvoer.

Doordat er geen herinfiltratie vanuit het hydraulische model naar het grondwatermodel mogelijk is, zal er een overschatting van de hoeveelheid water op het maaiveld worden gemaakt. Wanneer de grondwaterstanden weer dalen, zal in werkelijkheid het water dat op maaiveld blijft staan alsnog kunnen infiltreren in de grond, waar in het model het water op het maaiveld blijft liggen met plasvorming als gevolg.

In Figuur 5-17 zijn de waterdieptes te zien van de twee scenario's (referentie en droogtemaatregelen) als gevolg van de T=2 jaar bui en de T=100 jaar bui. De figuren laten zien dat er veel water op het maaiveld blijft liggen en dat de overstromingen veroorzaakt worden door plasvorming na de neerslag en nauwelijks door overstroming vanuit de beken. Opvallend is dat de bovenste figuren (T=2) aanzienlijk lagere waterdieptes en overstromingsoppervlak laten zien vergeleken met de onderste figuren (T=100).

Dit is het gevolg van de intensere bui. In de linker figuren (referentie scenario) ten opzichte van de rechter figuren (droogte maatregelen) is te zien dat de waterdieptes en het overstromingsoppervlak ook toeneemt als gevolg van de droogte maatregelen. Dit komt onder andere door de hoge grondwaterstanden die ontstaan in dit scenario. Mogelijk treed er wel meer overstroming op vanuit de beken zelf, wanneer ook in het hydraulische model een beekbodempverhoging wordt ingevoerd.

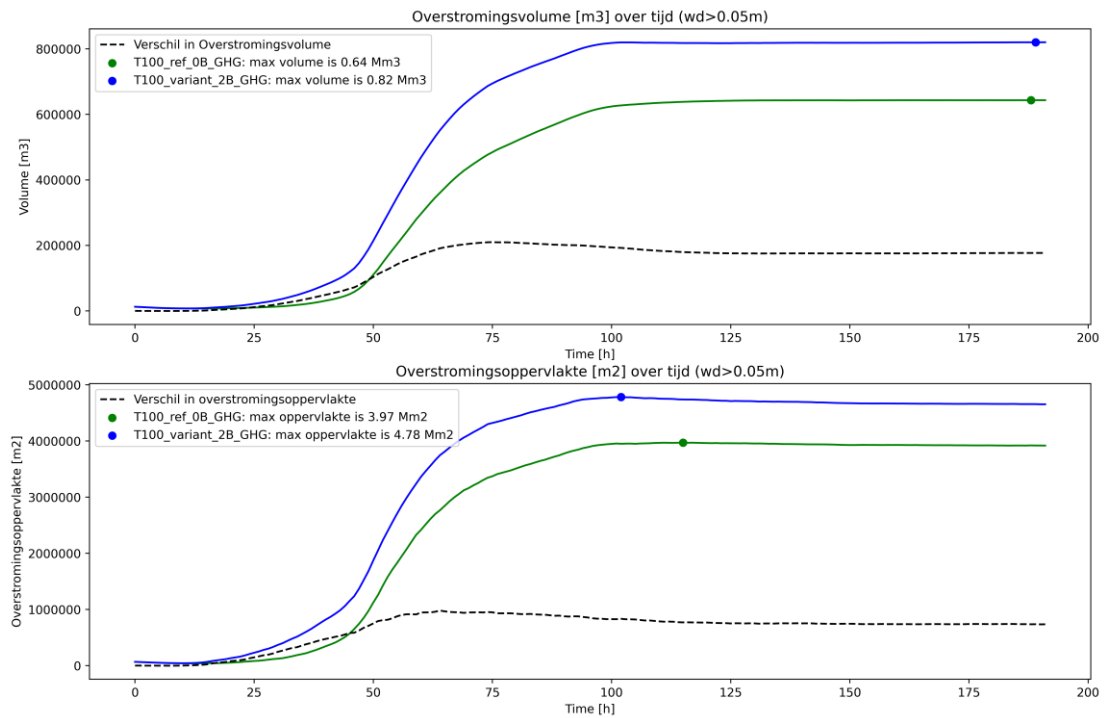


Figuur 5-17. Waterdieptes voor de T2 (boven) en T100 (onder) herhalingstijden voor het scenario met (rechts) en zonder (links) droogtmaatregelen. Legenda is onderin uitvergroot weergegeven

5.2.2 Overstromingsomvang

Naast de waterdieptes is ook de omvang van de overstroming onderzocht. Figuur 5-18 laat het totale volume (bovenste figuur) en de omvang van het water (onderste figuur) op land zien over de tijd voor de T=100 neerslagebeurtenis. Het eerste wat opvalt is dat zowel het volume als de omvang van de overstroming toenemen wanneer de droogtmaatregelen in het grondwatermodel zijn geïmplementeerd. Daarnaast is ook te zien dat beide parameters nauwelijks afnemen over de tijd, ook in de vier dagen nadat de neerslag gestopt is.

Dit wordt voor een groot deel veroorzaakt door de gekozen methode om de maaiveldafvoer via het 2D grid te koppelen terwijl er in het hydraulische model alleen een primair 1D watersysteem zit. Het gevolg is dat er plasvorming ontstaat op het maaiveld (zie ook Figuur 5-17) dat in praktijk via secundaire en tertiaire waterlopen (welke afwezig zijn in het hydraulische model) af zal stromen naar het primaire systeem. Ook is er geen verdamping geïmplementeerd in het hydraulische model.



Figuur 5-18. Overstromingsvolume (boven) en -omvang (onder) vergelijking tussen het referentiescenario (groen) en het scenario met droogtmaatregelen (blauw) voor de T=100 jaar neerslaggebeurtenis. De punten geven de maxima aan voor de verschillende grafieken.

6 Conclusies en aanbevelingen

Uit de casestudy kunnen de volgende belangrijke conclusies worden getrokken:

- De droogtemaatregelen zorgen voor een stijging van de grondwaterstand en lokaal voor een stijging in de kwelflux, wat een positief effect zal hebben op natuur in vooral grondwaterafhankelijke natuurgebieden (oftewel natte natuurgebieden). De natuur in deze gebieden heeft vaak last van wegvallende kwelfluxen of grondwaterstanden die vaak in de zomer te ver uitzakken. Het verdient nog aandacht of deze stijging van de grondwaterstand en de kwelflux voldoende is voor de natuur binnen dit gebied.
- Het aanpassen van de ontwatering binnen het gebied heeft als gevolg dat er meer water wordt vastgehouden in de ondergrond. Hierdoor wordt er in de zomer minder water afgevoerd, waardoor de basisafvoer afneemt. In de winter neemt de afvoer (en dan vooral de piekafvoer) juist toe, en daarmee ook de wateroverlast bij neerslaggebeurtenissen. Dit effect wordt veroorzaakt doordat de hogere grondwaterstanden leiden tot een afname van de bergingscapaciteit van de bodem (de spons zit al verder vol op het moment dat het gaat regenen). Er is meer onderzoek nodig om te kijken of een andere inrichting van het watersysteem mogelijk wel kan zorgen voor een stijging van de basisafvoer in de zomerperiode.
- De maatregelen zorgen voor meer maaiveldafvoer in het grondwatermodel. In de toegepaste methode zorgt dat voor een toename in het overstromingsoppervlak. Een belangrijk aandachtspunt is dat in de methodiek deze maaiveldafvoer niet meer kan herinfiltreren naar het grondwater. In realiteit zal het water dat op maaiveld blijft staan en niet afstroomt richting het oppervlaktewatersysteem na afloop van de bui wel weer infiltreren.

Voor vervolgonderzoek worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- In de zomersituatie kunnen flinke buien mogelijk ook zorgen voor wateroverlast. Dit is dan gerelateerd aan de infiltratiecapaciteit van de bodem. Als de neerslagintensiteit groter is dan de infiltratiecapaciteit van de bodem, vindt er maaiveldafvoer plaats. Om het effect van deze zomerbuien te onderzoeken, dient het grondwatermodel aangepast te worden zodat de infiltratiecapaciteit ook goed geschematiseerd wordt. Dit betekent in ieder geval dat de infiltratiecapaciteit een realistischere waarde moet krijgen.
- De toegepaste modelkoppeling van het grondwatermodel met een hydraulisch model werkt goed voor een eerste verkenning van het effect van maatregelen op wateroverlast, maar er kunnen nog enkele verbeteringen doorgevoerd worden in de koppeling tussen het grondwatermodel en hydraulisch model:
 - Het grondwatermodel wordt nu niet beïnvloed door het hydraulisch model. Om dit te verbeteren kunnen de berekende waterstanden uit het hydraulische model weer opnieuw toegepast worden in het grondwatermodel als peilverhoging. Op die manier simuleert het grondwater ook een realistischere situatie waarbij de waterpeilen toenemen door de regenbuien. In de huidige modellering gebeurt dit niet (de waterpeilen blijven constant), waardoor de hoeveelheid water dat gedraineerd wordt overschat wordt.
 - Een verdere verbetering kan gehaald worden door gebruik te maken van een 'online' gekoppeld grondwater en hydraulisch model.
- Er is geen validatie geweest van de resultaten. Om meer inzicht te krijgen in hoeverre de huidige resultaten realistisch zijn, kan de methodiek mogelijk toegepast worden voor een casus waar wel data beschikbaar is voor validatie, bijvoorbeeld bij gebieden waar al vergelijkbare maatregelen getroffen zijn.

- Het landgebruik speelt een belangrijke rol in de mate van de sponswerking van het gebied. In deze analyse zijn er geen veranderingen gedaan in het landgebruik, maar het kan interessant zijn om ook het effect van landgebruiksveranderingen (andere gewassen, minder verhard oppervlak, van bos naar korte vegetatie of vice versa, etc.) te onderzoeken. Dit is wel onderzocht in de casestudie voor de Geul.

Verdere modelverbeteringen van het hydraulisch model:

- Het huidige hydraulische model representeert het primaire systeem in de huidige situatie. Om de droogtemaatregelen beter te kunnen simuleren is het belangrijk om de maatregelen die effect hebben op het hydraulische systeem ook te implementeren in het 1D model:
 - De tertiaire waterwegen moeten worden toegevoegd in het referentie model zodat de impact van het verwijderen van deze waterwegen zichtbaar wordt.
 - De verhoging van de bodem niveaus in de waterlopen moet worden geïmplementeerd. Deze verhoging moet vervolgens ook gecompenseerd worden in de breedte om, indien gewenst, dezelfde afwateringscapaciteit te behouden.
- De benedenstroomse randvoorwaarde is momenteel een constante waterstand in de Mark van 1.4m NAP. In werkelijkheid zal deze waarde ook neerslag afhankelijk zijn en zal de Mark tijdens de neerslaggebeurtenissen naar verwachting voor meer opstuwung zorgen dan tijdens een droge periode. Er zijn nieuwe meetinstrumenten geplaatst in het benedenstroomse gedeelte van de Chaamse Beek waaruit we in de toekomst een beter beeld kunnen krijgen van de benedenstroomse randvoorwaarde.
- De ruwheid van het 2D grid in het hydraulische model heeft momenteel een constante waarde. Er is informatie beschikbaar over de verschillende landtypes in het gebied waardoor het mogelijk is om een gedistribueerde weerstandkaart te maken. Hierdoor zal het water op de geasfalteerde ondergronden sneller afstromen dan in de beboste gebieden.
- Om een beter begrip te krijgen van de verschillen tussen de huidige toetsing en onderzochte methode is het belangrijk om in verder overleg met het Waterschap Brabantse Delta de verschillen te bespreken die we zien in de overstromingskaarten.

Een belangrijke aanvullende conclusie uit deze studie is dat we moeten zorgen voor een consistente methode/toetsing om alle aspecten (zowel droogte als wateroverlast, als de impact op biodiversiteit en waterkwaliteit) te kunnen toetsen in plaats van de maatregelen los van elkaar te beoordelen. Zeker omdat een groot deel van de waterlopen in het casestudiegebied vallen onder KRW-waterlichamen is het belangrijk te realiseren dat droogtemaatregelen ook effect kunnen hebben op de doelen die binnen de KRW worden gesteld. Wanneer de basisafvoer in het gebied door voorgestelde droogtemaatregelen wordt verminderd, moet ook een afweging worden gemaakt of dit wenselijk is vanuit dit aanvullende perspectief.

7 Referenties

- BIJ12 (2022) Vastgesteld natuurbeheerplan 2022, gedownload via <https://www.bij12.nl/onderwerpen/natuur-en-landschap/subsidiestelsel-natuur-en-landschap/het-natuurbeheerplan/>
- Ertsen, A.C.D. (2011) OGOR natuur in Brabant 2010. Hydrologische randvoorwaarden voor Brabantse natuurbeheertypen
- Hunink, J., T. op den Kelder & F. Roelofsen (2021) Grondwaterinstrumentarium iMOD Brabantse Delta. Deltares rapport
- Schoonderwoerd, E., K. Peerdeman, K. Vink, D. Hendriks, A. Jeuken, F. Roelofsen, M. Mulder en J. Nijp (2023, in prep.) KLIMAP Case study Chaamse Beken – Kwantificeren water, landbouw en natuur. KLIMAP Rapportage in voorbereiding
- Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA) (2019). Neerslagstatistiek en -reeksen voor het waterbeheer 2019 (STOWA Rapport 2019-19). ISBN 978.90.5773.860.9.
- Mondeel, H., Peerdeman, K., Moorman, J., & Mantje, W. (2014). "Methode-Willems" voor toetsing aan wateroverlastnormen NBW. H2O-online: <https://www.h2owaternetwerk.nl/vakartikelen/methode-willems-voor-toetsing-aan-wateroverlastnormen-nbw>.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl