A network diagram consisting of various sized light blue circles connected by thin white lines, set against a solid blue background. The circles vary in size and are scattered across the page, with some larger circles acting as hubs.

Bedrijfstakonderzoek
BTO 2022.062 | November 2022

**Invloed van ingrepen in
de waterhuishouding
op berekende
verlagingseffecten door
grondwaterwinning**

Bedrijfstakonderzoek

KWR

Bridging Science to Practice

Rapport

Invloed van ingrepen in de waterhuishouding op de berekende verlagingseffecten door grondwaterwinning

BTO 2022.062 | November 2022

Dit onderzoek is onderdeel van het collectieve Bedrijfstakonderzoek van KWR, de waterbedrijven en Vewin.

Opdrachtnummer

402045/176

Projectmanager

Ir. M.L. (Martin) van der Schans

Opdrachtgever

BTO - Thematisch onderzoek - Bronnen en omgeving

Auteurs

Dr. ir. D.G. (Gijsbert) Cirkel, Dr. ir. M.H.J. (Marjolein) van Huijgevoort, J. (Janine) de Wit MSc.

Kwaliteitsborger

Dr. ir. R.P. (Ruud) Bartholomeus

Projectbegeleidingsgroep

Jan -Jaap Buijse (Vitens), Jan-Phillip Witte (FWE), Jeroen Castelijns (Brabant Water), Florian Knappers (Oasen)

Verzonden naar

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten en is openbaar.

Keywords

waterhuishouding, drinkwaterwinning, historische hydrologie, ruilverkaveling, beekverbetering, verdroging

Jaar van publicatie
2022

Meer informatie

dr. ir. Gijsbert Cirkel
T 030-6069734
E Gijsbert.Cirkel@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
F +31 (0)30 60 61 165
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl

KWR

November 2022 ©

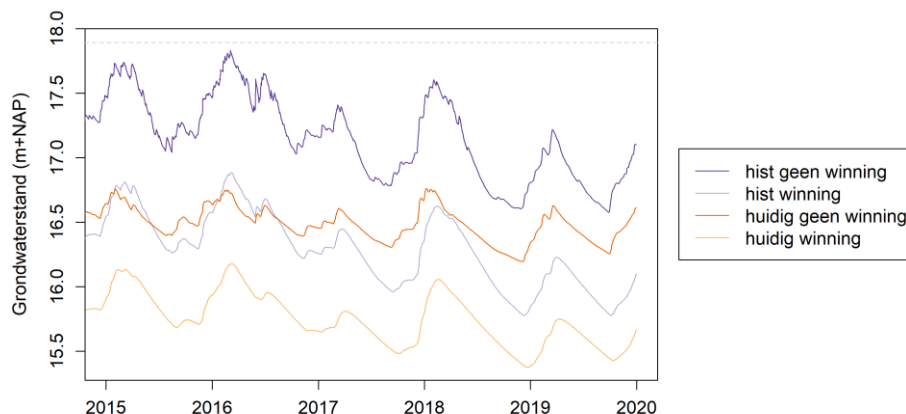
Alle rechten voorbehouden aan KWR. Niets uit deze uitgave mag - zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van KWR - worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier.

Managementsamenvatting

Invloed van ingrepen in de waterhuishouding op berekende verlagingseffecten door grondwaterwinning

Dr. ir. Gijsbert Cirkel, Dr. ir. Marjolein van Huijgevoort, Janine de Wit MSc

In deze studie is onderzocht hoe aanpassingen aan het af- en ontwateringsstelsel en beregening doorwerken op de freatische grondwaterstanden en op de berekeningen van het effect van een grondwaterwinning. Met andere woorden: heeft de winning een ander effect bij andere dimensies van het af- en ontwateringsstelsel? De resultaten van het onderzoek dragen bij aan een duurzame inpassing van grondwateronttrekkingen in het watersysteem. Uit de berekeningen blijkt dat freatische grondwaterstanden bij een grondwaterwinning en een af- en ontwateringsstelsel met historische dimensies langer op een hoger niveau blijven. Het is dus mogelijk om water langer in het systeem vast te houden door de af- en ontwatering aan te passen. Wel blijkt de aan de winning toe te wijzen grondwaterstandsverlaging groter in deze situatie. Dit wordt veroorzaakt door verschillen in grondwateraanvulling. Bij omvorming naar een historisch af- en ontwateringsstelsel treedt minder verdampingsreductie op als gevolg van te droge condities en daardoor is er minder grondwateraanvulling binnen de onttrekkingskegel van een winning. Dit effect is uiteraard afhankelijk van de positie van de winning in de hydrologische gradiënt en prominent in het intermediaire deel. Lokale aanpassing van de af- en ontwatering rond een winning blijkt hier een effectieve mitigerende maatregel voor verlagingseffecten. Beregening uit grondwater heeft een fors effect op het verlagingseffect van de winning. Een niet beregend perceel binnen de invloed van een grondwaterwinning mist de compensatie van de transpiratiereductie door beregening, heeft te maken met verlagingseffecten van de beregeningsonttrekking(en) op buurpercelen en wordt tevens geconfronteerd met een versterkt effect van de winning op de grondwaterstanden. Hierdoor ontstaat een extra prikkel om ook te gaan beregenen waardoor de druk op het watersysteem verder toeneemt.



Met het conceptuele grondwatermodel berekend grondwaterstandsverloop (m+NAP) nabij een grondwaterwinning voor de historische en de huidige af- en ontwatering. De gestippelde grijze lijn is het lokale maaiveld.

Belang: Inzicht in effecten veranderingen waterhuishouding cruciaal

De hoge zandgronden zijn de afgelopen jaren geconfronteerd met droogte maar hebben al tientallen jaren te kampen met verdroging. Deze verdroging is mede veroorzaakt door in de vorige eeuw uitgevoerde aanpassingen aan het af- en ontwateringssysteem

gericht op het snel afvoeren van water en optimaliseren van landbouwproductie. De vraag doet zich voor of het effect van een grondwateronttrekking anders is bij een historisch af- en ontwateringsstelsel (minder intensief ontwaterd) dan in de huidige situatie (intensief ontwaterd). Ook is het de vraag of door herstel naar de historische dimensies van het af- en ontwateringsstelsel

water langer vast kan worden gehouden om daarmee droogte te mitigeren.

Aanpak: Conceptuele modelberekeningen

Alvorens scenarioberekeningen te kunnen uitvoeren is inzicht in zowel de waterhuishoudkundige situatie voorafgaand aan de aanpassingen als de effecten van de aanpassingen nodig. Hiervoor is een literatuurstudie uitgevoerd (BTO 2022.061). Op basis van de gevonden informatie uit de literatuurstudie zijn vervolgens verkennende berekeningen uitgevoerd, startend met eenvoudige analytische balanssommen, via SWAP-berekeningen naar uiteindelijk een conceptueel regionaal iMod-model, representatief voor een gebied in Oost-Nederland. Met deze berekeningen is het effect van de veranderingen in de af- en ontwatering op de freatische grondwaterstanden en het effect van een grondwaterwinning in beeld gebracht.

Resultaten: Sterke daling grondwaterstanden door intensieve ontwatering

Zowel de (schaarse) metingen als de modelsimulaties wijzen op verlagingen van meerdere decimeters. De effecten zijn hierbij het grootst op de hoogste (ondiepste) grondwaterstanden en, minder groot, maar nog steeds aanzienlijk op de laagste standen. Het is echter niet zo dat door herstel van de historische dimensies van het af- en ontwateringsstelsel droogte geen probleem meer zal vormen. Uit de regionale berekeningen komt naar voren dat in droge jaren (2018-2020) de standen ook bij de historische af- en ontwatering ver kunnen uitzakken. Hoewel de freatische grondwaterstanden bij de historische af- en ontwatering hoger zijn is het wineffect (i.e. de aan de winning toe te schrijven verlaging van de freatische grondwaterstand) groter in onze modelsimulaties. Dit wordt veroorzaakt door het beter op peil blijven van de vochtcondities in de wortelzone bij de historische dimensies van het af- en ontwateringsstelsel waardoor minder verdampingsreductie en minder grondwateraanvulling optreedt; het effect van een grondwaterwinning op de gewasproductie is echter kleiner in deze situatie. De totale jaarlijkse afvoer naar het oppervlaktewater neemt bij een grondwaterwinning van 4 miljoen m³/j gemiddeld over de hele periode af met 3.86 miljoen m³/j en 3.54 miljoen m³/j voor respectievelijk de huidige situatie en

historische dimensies van het af- en ontwateringssysteem. In de huidige situatie gaat de grondwateronttrekking meer ten koste van de afvoer dan bij de historische dimensies van het af- en ontwateringssysteem.

Berekening uit grondwater blijkt een fors effect te hebben op het verlagingsbeeld van de winning. Een agrariër die niet beregent, krijgt hierdoor bij beregenende burenen te maken met een groter verlagingseffect van de winning en met de lokale verlagingseffecten van de beregeningsonttrekkingen van zijn burenen.

Uit bovenstaande blijkt het belang van een goede schatting van de grondwateraanvulling voor het kwantificeren van het effect van een winning. Door aanpassingen in het af- en ontwateringsstelsel is het mogelijk om water uit natte periodes langer vast te houden en vertraagd te laten afvoeren. Uiteraard komt dit bij grootschalige toepassing wel met de prijs van langduriger nattere omstandigheden en zelfs inundaties in de lage delen van het landschap. Lokale aanpassing van af- en ontwatering binnen de onttrekkingskegel van de winning blijkt een effectieve mitigerende maatregel zonder dat extreme vernatting optreedt in de lage delen.

Toepassing: Water vasthouden loont

Uit het onderzoek komt naar voren dat met het terugbrengen van de historische dimensies van af- en ontwatering (ondiepere sloten, grotere slootafstanden geen buisdrainage) water beter kan worden vastgehouden en freatische grondwaterstanden op een hoger peil kunnen worden gebracht. Omdat dergelijke aanpassingen ook gepaard kunnen gaan met wateroverlast is maatwerk nodig. Op basis van de resultaten blijkt dat vooral lokale aanpassing van de af- en ontwatering binnen de onttrekkingskegel perspectief biedt omdat sterke vernatting in lage delen van het landschap dan uitblijft.

Het Rapport

Dit onderzoek is beschreven in het rapport *Invloed van ingrepen in de waterhuishouding op berekende verlagingseffecten door grondwaterwinning* (BTO 2022.062).

Inhoud

Managementsamenvatting	3
Inhoud	5
1 Inleiding	7
1.1 Aanleiding	7
1.2 Doel en aanpak	8
1.3 Leeswijzer	9
2 Drainagefuncties en tijdsafhankelijke processen op perceelschaal	10
2.1 Drainagefuncties	10
2.1.1 Materiaal en methode	10
2.1.2 Resultaten	12
2.1.3 Discussie simpele analytische benadering	13
2.2 Tijdsafhankelijke processen op perceelschaal	13
2.2.1 Materiaal en methode	13
2.2.2 Effect oppervlaktewatersysteem zonder invloed van een regionaal systeem	14
2.2.3 Invloed van diepe stijghoogteveranderingen op de GxG in de huidige en historische waterhuishoudkundige situatie	15
2.2.4 Effecten op droogte- en zuurstofstress	18
2.2.5 Discussie tijdsafhankelijke modellering op perceelsschaal	20
3 Analyse op landschapsschaal, berekeningen met een regionaal model	22
3.1 Inleiding	22
3.2 Materiaal en methode	22
3.3 Resultaten regionale modelanalyse	31
3.3.1 Effecten van veranderingen in het af- en ontwateringsstelsel	31
3.3.2 Invloed van de grondwaterwinning op freatische standen	33
3.3.3 Invloed op verdamping	34
3.3.4 Invloed op afvoer via het af- en ontwateringssysteem	34
3.3.5 Effect van de positie van de winning in het landschap	36
3.3.6 Berekening	37
3.3.7 Lokale aanpassing aan waterhuishouding	38
3.4 Discussie regionale modellering	41
3.4.1 Scenarioberekeningen	41

3.4.2	Invloed aanpassing waterhuishouding op freatische standen en waterbalans	41
3.4.3	Effect van de winning in de historische en huidige waterhuishoudkundige situatie	42
3.4.4	Effect van berekening	42
4	Conclusies en aanbevelingen	44
4.1	Conclusies	44
4.2	Aanbevelingen	46
5	Referenties	47
I	Resultaten conceptueel regionaal model	49

1 Inleiding

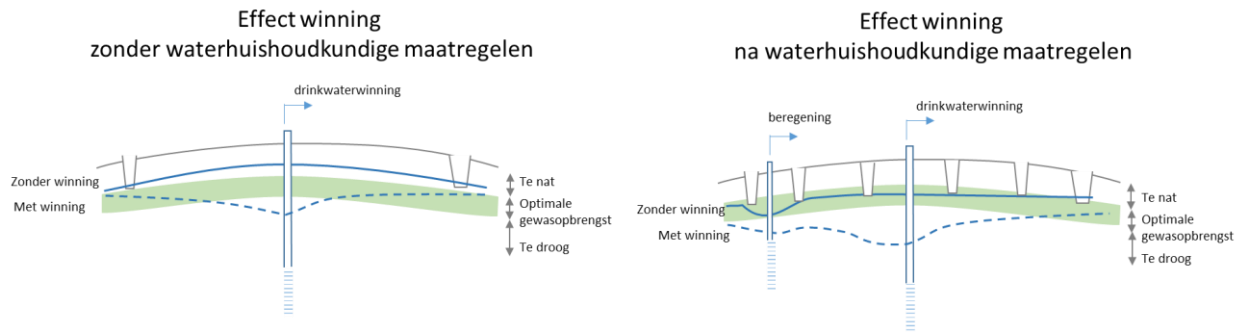
1.1 Aanleiding

Het winnen van grondwater heeft, afhankelijk van de geohydrologische situatie, in meer of mindere mate invloed op de freatische grondwaterstanden en daarmee op de vochthuishouding van de bodem. Bij de locatiekeuze en inrichting van nieuwe winvelden voor drinkwaterproductie wordt getracht deze invloed te minimaliseren of te compenseren. Zo kunnen andere gebruiksfuncties binnen de invloedssfeer van een grondwaterwinning aanspraak maken op compensatie, indien kan worden aangetoond dat hun activiteiten negatief worden beïnvloed door de effecten van de winning. Bij het vaststellen van de invloed wordt doorgaans uitgegaan van de huidige landschapsinrichting, huidige klimatologische omstandigheden en huidige waterhuishouding. Veel grondwaterwinningen bestaan echter al decennia. Bovengenoemde aspecten kunnen dan ook sterk veranderd zijn sinds de start van een winning.

Het effect van veranderingen in landgebruik en toegenomen landbouwproductie en hiermee samenhangende veranderingen in de grondwateraanvulling op freatische grondwaterstanden is uitgebreid beschreven in Witte et al. (2015) en Witte et al. (2019) voor de provincie Noord Brabant. Uit deze studies blijkt dat door toegenomen gewasproductie (mede door intensievere af- en ontwatering), uitbreiding van stedelijk gebied en sterke toename van het areaal bos een grondwaterstandsval is opgetreden van 20-30 cm over de periode 1950-2010. Ook bleek dat de gesimuleerde verlaging door grondwaterwinningen mede afhankelijk is van de grondwateraanvulling en daarmee van de (toegenomen) gewasproductie. Deze toegenomen gewasproductie is mogelijk gemaakt door aanpassingen in de af- en ontwatering waardoor wateroverlast sterk is afgenomen. In Cirkel en Krajenbrink (2022) is een literatuuroverzicht gegeven van veranderingen die hebben plaatsgevonden in de waterhuishouding en de effecten hiervan op grondwaterstanden. Uit deze studie blijkt dat sinds het einde van de 19e eeuw, maar in het bijzonder sinds 1950, dus ten tijde van de aanvang van de meeste drinkwaterwinningen, substantiële veranderingen hebben plaatsgevonden in de af- en ontwateringsstelsels in Nederland. Deze ingrepen hebben een fors effect gehad op de freatische grondwaterstanden. Schattingen van dit effect lopen uiteen van enkele centimeters tot meerdere decimeters, afhankelijk van lokale omstandigheden.

Deze aanpassingen van de af- en ontwateringsstelsels hebben ook plaatsgevonden in de directe omgeving van de grondwaterwinningen. De vraag is dan ook welk effect deze ingrepen in de waterhuishouding hebben op de freatische grondwaterstanden en hoe deze ingrepen de doorwerking van grondwateronttrekking beïnvloeden. In Figuur 1 is deze gedachtegang conceptueel weergegeven.

De afgelopen droge jaren (2018-2020, 2022) hebben aangetoond dat de waterbeschikbaarheid ook in Nederland onder druk staat (o.a. Van den Eertwegh et al., 2021). Droogte zal in Nederland in de toekomst vaker gaan voorkomen (KNMI, 2014; Philip et al., 2020). Er zijn ingrijpende maatregelen nodig om de watervoorziening in Nederland op orde te houden. In de watertransitie, waartoe opgeroepen is door de drinkwaterbedrijven (<https://www.drinkwaterplatform.nl/oproep-waterbedrijven-tot-compleet-nieuwe-blik-op-watervoorziening/>) en die is ondersteund door de Unie van Waterschappen en natuurorganisaties, zal zowel het wateraanbod vergroot moeten worden, als de watervraag moeten worden vermindert. Om meer water vast te houden en dus het wateraanbod te vergroten zijn structurele en grootschalige aanpassingen aan het watersysteem nodig (Projectteam Droogte Zandgronden Nederland, 2021). In deze studie kijken we in hoeverre het terugbrengen van de historische dimensies van het af- en ontwateringsstelsel het wateraanbod kan vergroten en daarmee ook het wineffect kan mitigeren. Hierbij worden de effecten van zowel regionale als meer lokale aanpassingen rondom de winning onderzocht. Ten slotte is aanvullend onderzocht hoe berekening doorwerkt op het wineffect.



Figuur 1 Conceptueel effect van een winning op het grondwater zonder en met waterhuishoudkundige maatregelen (i.e. aanpassing af- en ontwateringsstelsel).

1.2 Doel en aanpak

In deze studie onderzoeken we in aanvulling op de studie van Witte et al. (2015) hoe aanpassingen in de waterhuishouding (i.e. ingrepen in het af- en ontwateringsstelsel) doorwerken op de freatische grondwaterstanden. Ook onderzoeken we in hoeverre deze veranderingen in de waterhuishouding van invloed zijn op de berekeningen van het effect van een grondwaterwinning op de freatische grondwaterstanden. Met andere woorden: heeft de winning een ander effect bij een andere af- en ontwatering? Hiertoe worden (model)berekeningen uitgevoerd om deze effecten inzichtelijk te maken, waarbij verschillende scenario's worden verkend. Met dit onderzoek beoogt het project bij te dragen aan een duurzamere inpassing van grondwateronttrekkingen in het watersysteem.

We onderzoeken hierbij specifiek de volgende vragen:

- Wat is het effect van de wijzigingen in het oppervlaktewatersysteem op freatische grondwaterstanden?
- Is het wineffect op de freatische grondwaterstanden anders bij een minder intensief ontwateringssysteem dan bij het huidige?
- Hoe werkt landbouwberegening uit grondwater door op het wineffect?
- Kan door terugbrengen van een minder intensief ontwateringssysteem het wineffect worden gemitigeerd?

Definities: In de studie vergelijken we situaties met een intensief af- en ontwateringssysteem representatief voor de huidige situatie met situaties met een meer extensief af- en ontwateringssysteem representatief voor de situatie van voor de ruilverkavelingen. In de rapportage wordt dit verder aangeduid met respectievelijk de 'huidige waterhuishoudkundige situatie' en de 'historische waterhuishoudkundige situatie'.

Voorliggende studie richt zich specifiek op de effecten van af- en ontwatering en nadrukkelijk niet op het exact reproduceren van de historische toestand van het watersysteem. Gewaseigenschappen, onttrekking, neerslag en potentiële verdamping zijn dan ook gelijk gehouden in de scenario's.

Om beter inzicht te krijgen in wat er speelt is gestart met een analytische verkenning van de doorwerking van drainagefuncties. Vervolgens is met een SWAP-model onderzocht hoe deze (niet-lineaire) processen tijdsafhankelijk doorwerken op perceelschaal. Ten slotte is met iMod een synthetiserende analyse uitgevoerd op landschapsschaal. Deze laatste stap bleek cruciaal om terugkoppelingen op landschapsschaal mee te kunnen nemen in de analyse en in het bijzonder om effecten op diepe grondwaterstanden goed in beeld te krijgen. Het

gaat hierbij nadrukkelijk om het verkrijgen van inzicht in processen en niet om absolute effecten. Er is dan ook geen specifiek gebied doorgerekend, maar virtuele situaties met kenmerken van pleistoceen Nederland (specifiek Oost-Gelderland). Er is gekozen voor deze regio omdat van deze regio de beste (zij het schaarse) informatie over de historische af- en ontwatering beschikbaar is.

1.3 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt onderzocht hoe (niet-lineaire) drainagefuncties (tijdsafhankelijk) doorwerken op freatische grondwaterstanden en droogte- en natschade (zuurstofstress) op perceelschaal. In hoofdstuk 3 wordt de analyse uitgebreid met terugkoppelingen op landschapsschaal door de inzet van een conceptueel iMod model met eigenschappen van een regio in Oost-Gelderland. In hoofdstuk 4 wordt afgesloten met het beantwoorden van de bovengenoemde onderzoeksvragen, algemene conclusies en een aantal aanbevelingen.

2 Drainagefuncties en tijdsafhankelijke processen op perceelschaal

2.1 Drainagefuncties

2.1.1 Materiaal en methode

Als eerste stap is onderzocht hoe wijzigingen in de relatie tussen freatische grondwaterstand en drainage doorwerken op de freatische standen. Hiervoor is gebruik gemaakt van simpele analytische vergelijkingen gebruik makend van een (virtuele) sinusvormige grondwateraanvulling en de van den Akker methode (2014; 2015) voor de drainagefunctie. Voor de Achterhoek zijn gemeten drainagefuncties beschikbaar (Massop & de Wit, 1994). We nemen één van deze relaties -een relatie gemeten bij Beltrum- als startpunt voor de analyse.

De grondwateraanvulling (R) (mm/d) is als volgt omschreven:

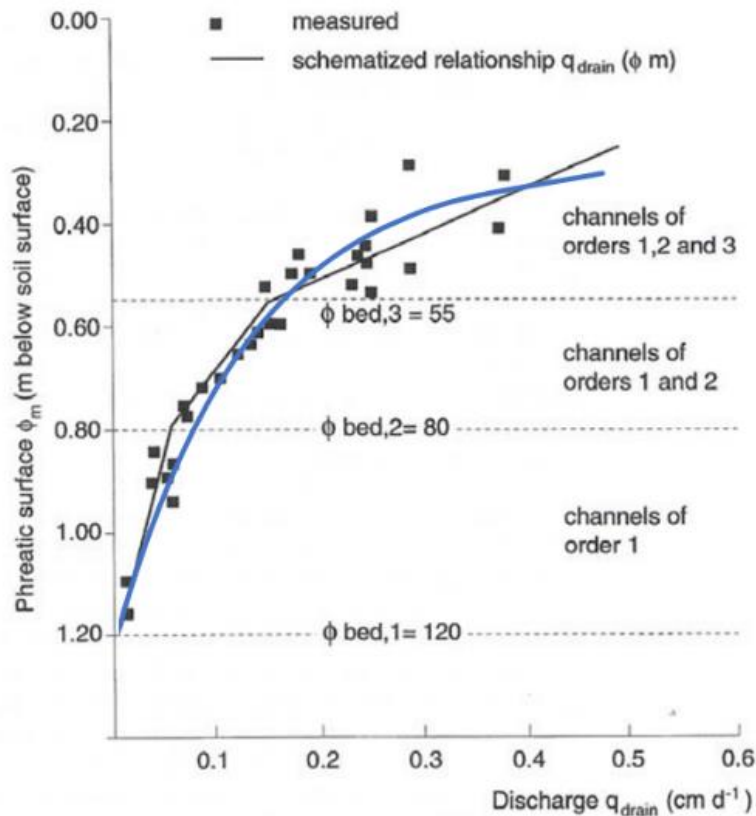
$$R(t) = 1 + 2\sin \left\{ \pi * \left(\frac{t + \frac{365}{4}}{0.5 * 365} \right) \right\}.$$

Resultierend in een maximale grondwateraanvulling van 3 mm/d in de winter en -1 mm/d in de zomer. De drainage U (mm/d) als functie van de freatische grondwaterstand h is als volgt omschreven (Van den Akker, 2014; 2015):

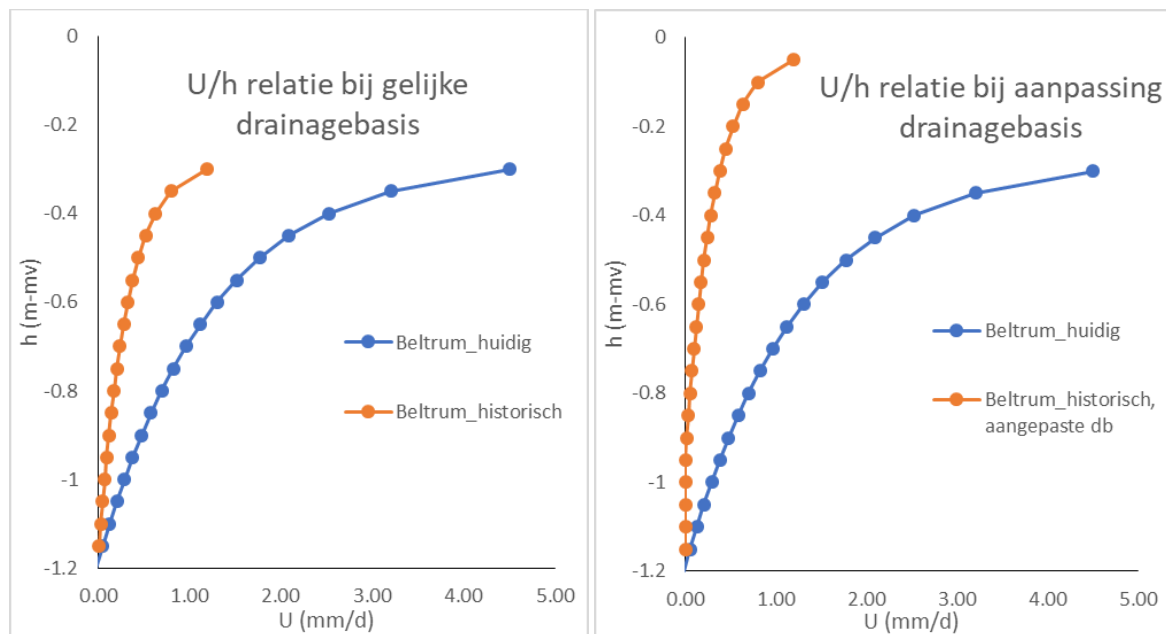
$$U(h) = \frac{1}{2}j + \frac{a}{c} \left\{ \ln \left(\frac{-h + m_v + b}{-a} \right) \right\},$$

j (mm/d) is hierin de waarde van U als $h - m_v$ gelijk is aan b , a (m) en b (m) zijn constanten, c (m/d) is de weerstand van een onderliggende scheidende laag en m_v is de maaiveldhoogte ten opzichte van een referentieniveau.

De drainagefunctie is vervolgens gefit op een door Massop & de Wit (1994) gemeten drainagerelatie voor Beltrum (Figuur 2). De situatie bij Beltrum is representatief voor veel locaties in de Achterhoek na de ruilverkaveling. De volgende waarden zijn hiermee vastgelegd: $a = -0.15$ m, $b = 0.28$ m, $c = 120$ d en $j = 4.5$ mm/d. Vervolgens is de gefitte functie aan de hand van kengetallen uit Massop & van der Gaast (2007) geschaald naar de historische situatie (Figuur 3). Om het grondwaterstandsverloop te berekenen is uitgegaan van een simpel balansmodel met een begingrondwaterstand van 0.6 m- m_v op $t=0$. Hiermee kon relatief snel een stabiel grondwaterstandsverloop worden verkregen. Om de analyse niet te compliceren en omdat winningen in Oost-Gelderland relatief vlak draaien is het effect van een grondwaterwinning in deze versimpelde benadering als een constante lekterm (wegzijging) van 0.1 mm/d meegenomen. Voor de historische situatie is gebruik gemaakt van de U/h relatie met aangepaste drainagebasis.



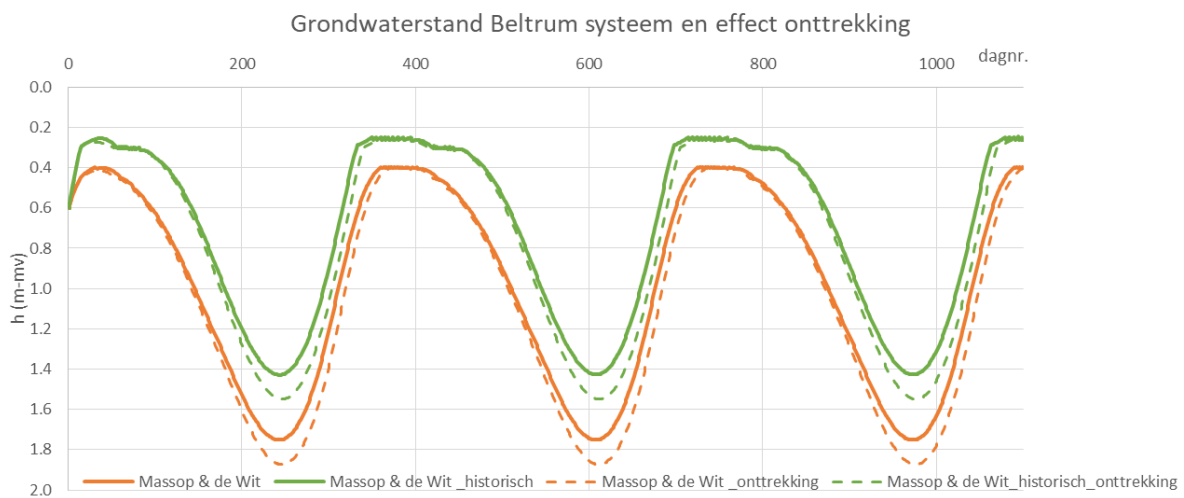
Figuur 2 Relatie tussen fretatische grondwaterstand en afvoer naar het oppervlaktewatersysteem gemeten bij Beltrum (Massop & de Wit, 1994). De blauwe lijn is de gefitte Van de Akker functie.



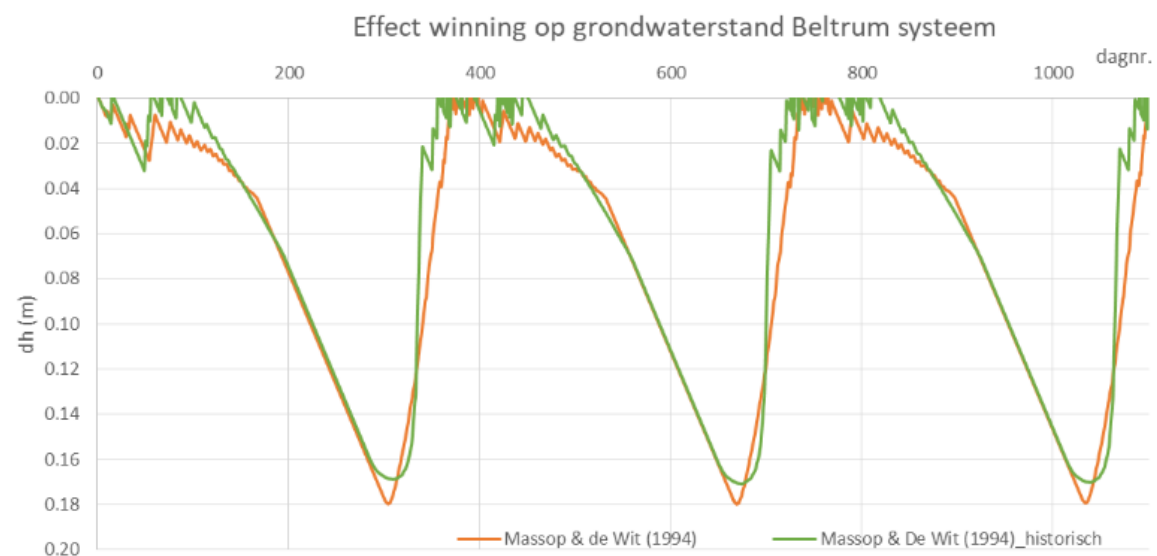
Figuur 3 Op basis van kentallen uit Massop & van der Gaast (2007) voor de historische waterhuishoudkundige situatie geschaalde drainagefunctie voor Beltrum (Figuur 2), i.e. aanpassing slootafstand (links). In de rechterfiguur is tevens de drainagebasis aangepast.

2.1.2 Resultaten

Het aanpassen van de drainagefunctie naar een situatie representatief voor de historische waterhuishoudkundige situatie heeft een fors effect op de freatische grondwaterstanden (Figuur 4). De hoogste grondwaterstanden stijgen met ca. 15 cm terwijl de laagste grondwaterstanden met ca. 30 cm stijgen. Verder opvallend is de langere periode met ondiepe grondwaterstanden in de historische waterhuishoudkundige situatie. Het gaat hierbij om een iets eerdere start van hoge grondwaterstanden in de herfst, maar vooral om langdurige natte omstandigheden in het voorjaar. Het toepassen van een constante lekterm als proxy voor het effect van een winning heeft vooral effect in het zomerseizoen (gestippelde lijnen, Figuur 4) met tot ca. 18 cm diepere standen aan het einde van de zomerperiode. Verschillen in het effect van de winning tussen de historische en huidige drainagefunctie zijn bij deze aanpak beperkt met kortdurend enkele cm diepere standen in de zomer bij de huidige drainagefunctie en iets langdurigere natte periodes voor de historische situatie (Figuur 5).



Figuur 4 Grondwaterstandsverloop volgens de simpele analytische benadering voor de huidige en historische waterhuishoudkundige situatie zowel met als zonder onttrekking (uitgedrukt als constante lekterm van 0.1 mm/d).



Figuur 5 Effect van de winning (als constante lekterm) op de grondwaterstand in zowel de huidige als historische situatie.

2.1.3 Discussie simpele analytische benadering

Het niveau van de freatische grondwaterstanden wordt in de beschreven aanpak sterk bepaald door het drainagestelsel. De berekende verschillen in het effect van een winning zijn bij deze aanpak klein en zijn vooral zichtbaar op de hoge standen. In de aanpak is uitgegaan van een constante flux naar een onderliggend pakket. In werkelijkheid is deze flux afhankelijk van het potentiaalverschil tussen het freatische en het diepere (bepompte) watervoerende pakket en de verticale hydraulische weerstand daartussen. De wegzijging en daarmee het wineffect zal dan ook niet constant zijn over het jaar, maar afhankelijk van de fluctuaties in de freatische grondwaterstand die weer afhankelijk zijn van het drainagesysteem. Dus hoewel deze aanpak een indruk geeft van het effect van een andere drainagefunctie op het verloop van de freatische standen is de methode te simpel om de invloed op het wineffect mee te bepalen. Bij de in de volgende paragraaf gepresenteerde uitkomsten van de 1D perceelschaal modellering met SWAP is gebruik gemaakt van een stijghoogte randvoorwaarde aan de onderzijde van het model. Aandachtspunt bij deze laatste aanpak is echter dat deze stijghoogte relatief arbitrair moet worden gekozen, maar in werkelijkheid mede afhankelijk is van de waterhuishoudkundige situatie hoger en lager in het watersysteem.

2.2 Tijdsafhankelijke processen op perceelschaal

2.2.1 Materiaal en methode

Om meer grip te krijgen op niet-lineaire tijdsafhankelijke processen zijn simulaties uitgevoerd met een dynamisch 1D Soil, Water, Atmosphere, Plant (SWAP) model (Kroes et al., 2017). In SWAP wordt de stroming in een verticaal profiel numeriek doorgerekend en wordt interactie met oppervlaktewater via analytische vergelijkingen of via in tabellen gevatte relaties meegenomen. Deze tabellen maken het mogelijk om te rekenen met gemeten drainagefuncties zoals beschreven in de vorige paragraaf. Een voorbeeld van een dergelijke aanpak is de methode zoals gehanteerd door Massop en Van der Gaast (2007) in een studie naar de historische hydrologie van de Baakse beek. In het SWAP-model worden bodemvochtcondities en actuele verdamping deterministisch gemodelleerd. Hierdoor is het mogelijk om droogte- en zuurstofstress te berekenen. Ten slotte is het mogelijk om een variabele (regionale) stijghoogte als onderrandvoorwaarde in te voeren.

Ook voor het SWAP model is gebruik gemaakt van de gefitte drainagefunctie voor de locatie Beltrum (Figuur 2). Wel is getracht nu ook andere kenmerken van de relatie in meer detail mee te nemen (Tabel 1). Het bodemtype voor deze locatie is omschreven als voornamelijk pRn59 (Leek-/woudeerdgrond zavel). De meest voorkomende grondwatertrap is gt III*, daarbij hoort een GHG van 25-40 cm -mv en GLG van 80-120 cm -mv. In de SWAP-modellen is als onderrand een sinusvormige stijghoogte randvoorwaarde opgelegd met een amplitude van 60 cm. Als weerstand is op basis van de gefitte Beltrum-situatie een weerstand aangehouden van 120 dagen.

Tabel 1: Opzet SWAP modellering voor locatie Beltrum

	Invoer
Bodemopbouw	De toplaag is een B2 horizont, de onderste laag is een O2 horizont. De bodemfysische eigenschappen zijn overgenomen van de Staringreeks (2018).
Meteorologie	KNMI AWS station Twente (nr. 290). Dagelijkse neerslaggegevens met daarbij de duur van de bui zijn meegenomen in SWAP. Het KNMI AWS Station Hupsel (nr. 283) ligt dichterbij Beltrum, maar dit station heeft geen neerslaggegevens in 1990, 1991, en 1992.
Gewas-input	Het wortelprofiel is een blok profiel met een worteldiepte van 30 cm.
Gewasgroei model	De SWAP simulaties zijn met het simpele gras model uitgevoerd.

Er zijn drie verschillende SWAP-drainage schematisaties doorgerekend:

- 1) de huidige waterhuishoudkundige situatie (huidig)
- 2) een historische waterhuishoudkundige situatie met aangepaste drainageweerstand (historisch)
- 3) een historische waterhuishoudkundige situatie met aangepaste drainageweerstand en verhoogde drainagebasis +25 cm (historisch_db)

Met deze schematisaties zijn verschillende scenario's doorgerekend (Tabel 2). De SWAP kolommen zijn 5 meter diep. Als startpositie (huidig_abstr) is uitgegaan van een stijghoogte op de onderrand van -75 cm +mv. Vervolgens is met behulp van de drie verschillende schematisaties een reeks simulaties gemaakt waarbij de stijghoogte op de onderrand varieert tussen -5cm en -200cm +mv. Vervolgens zijn voor alle simulaties de GxG's (x=L voor laagste, x=H voor hoogste, x=V voor voorjaar), droogstress en zuurstofstress bepaald.

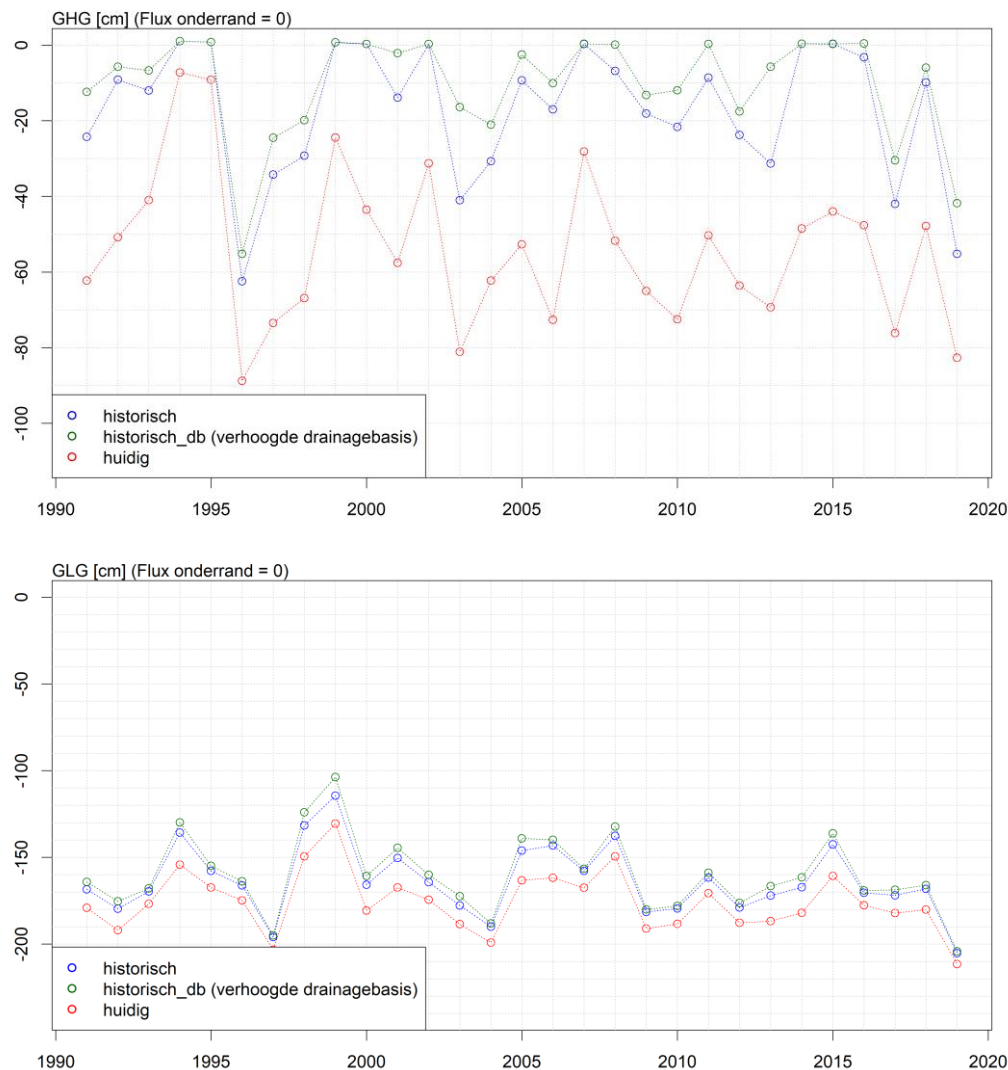
Tabel 2: Scenario's doorgerekend met SWAP.

Scenario	Onderrandvoorwaarde	Gemiddelde waarde van de diepe stijghoogte	Drainagefunctie
	SWBOTB*	AQAVE [cm]	
Huidig	6 (Bottom flux equals zero)	-	Beltrum_huidig
Historisch	6 (Bottom flux equals zero)	-	Beltrum_historisch
Huidig_abstr	3 (Calculate bottom flux from hydraulic head of deep aquifer*)	Range tussen -25 en -125 cm+mv (stapjes van 5 cm)	Beltrum_huidig
Historisch_abstr	3 (Calculate bottom flux from hydraulic head of deep aquifer*)	Range tussen -25 en -125 cm+mv (stapjes van 5 cm)	Beltrum_historisch
Historisch_db	6 (Bottom flux equals zero)	-	Beltrum_historisch, aangepaste db
Historisch_db_abstr	3 (Calculate bottom flux from hydraulic head of deep aquifer)	Range tussen -25 en -125 cm-mv (stapjes van 5 cm)	Beltrum_historisch, aangepaste db

*diepe stijghoogte: SHAPE = 1.0, RIMLAY = 120.0 d, AQAMP = 60.0 cm, AQTMAX = 90.0 d

2.2.2 Effect oppervlaktewatersysteem zonder invloed van een regionaal systeem

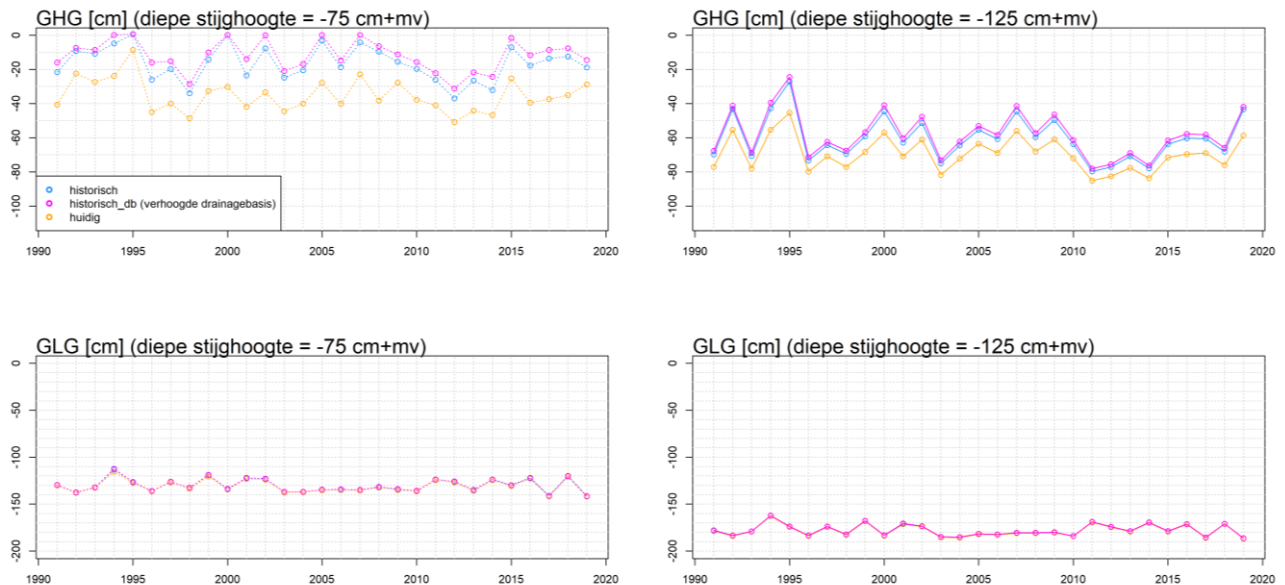
Als eerste stap is een situatie doorgerekend zonder invloed van een regionaal grondwatersysteem i.e. geen stroming over de onderrand van het model. Het freatische grondwaterstandsverloop wordt dan geheel bepaald door de bodemfysische parameters, neerslag en verdamping en het drainagesysteem. Aanpassing van de waterhuishouding naar de historische situatie heeft een fors effect op de freatische grondwaterstanden (Figuur 6). Het grootste effect wordt veroorzaakt door herstel van de vroegere hogere drainageweerstand (i.e. het vergroten van de slootafstand); het aanvullend verhogen van de drainagebasis heeft een beperkt extra effect. Veranderingen zijn zowel zichtbaar in de hoogste standen (tot maximaal ca. 60 cm stijging) als in de laagste standen (tot ca. 25 cm stijging). Het GLG effect is dus duidelijk beperkter dan het effect op de GHG. De gesimuleerde situatie heeft een zekere analogie met het Hupsel-stroomgebied waar zich een dun freatisch watervoerend pakket op een afsluitende laag bevindt. Historische metingen daar (Cirkel en Krajenbrink, 2022) wijzen eveneens op een flink effect op de hoogste standen en een beperkter effect op de laagste standen.



Figuur 6: Gemodelleerde (jaarlijkse) 'GHG' en 'GLG' voor de drie schematisaties (zie Tabel 2) uitgaande van een dichte onderrand.

2.2.3 Invloed van diepe stijghoogteveranderingen op de GxG in de huidige en historische waterhuishoudkundige situatie

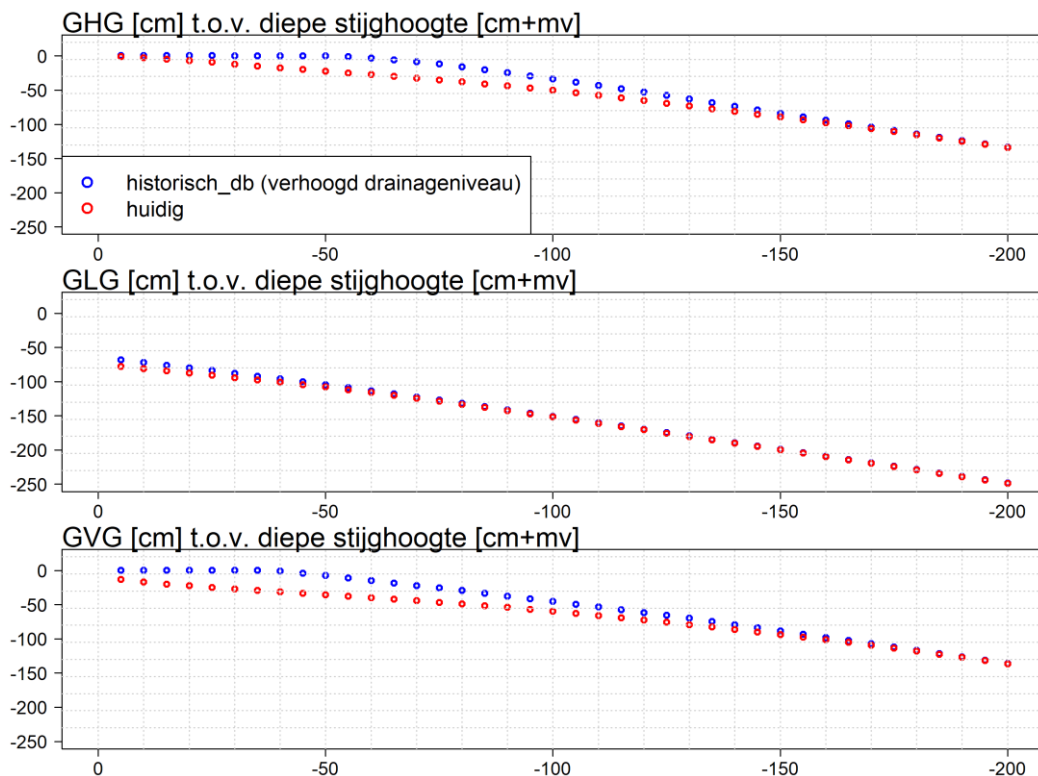
In de meeste gebieden in hoog-Nederland is er echter een zekere mate van interactie tussen het freatische systeem en een (onderliggend) groter regionaal systeem. Onttrekkingen vinden in de regel plaats uit dit onderliggende systeem. Om dit mee te nemen zijn de drie schematisaties doorgerekend met een stijghoogte op de onderrand van respectievelijk gemiddeld -75 cm+mv en -125 cm+mv bij een verticale hydraulische weerstand van 120 d. Direct zichtbaar is de invloed van de opgelegde diepere stijghoogte op het niveau van zowel de gemiddeld hoogste als gemiddeld laagste standen (Figuur 7) ten opzichte van de situatie met een dichte onderrand. Verder opvallend is het vrijwel wegvallen van het effect van de drainage naar het oppervlaktewatersysteem op de jaarlijkse gemiddeld laagste standen (de GLG is vrijwel gelijk in alle drie de scenario's). Bij een stijghoogte op de onderrand van -75 cm+mv zijn nog enkele cm verschil berekend, in de situatie met een stijghoogte van -125 cm-mv (stijghoogteniveau onder de drainagebasis van het Beltrum-systeem) is geen effect van de verschillende drainagescenario's meer zichtbaar op de laagste standen.



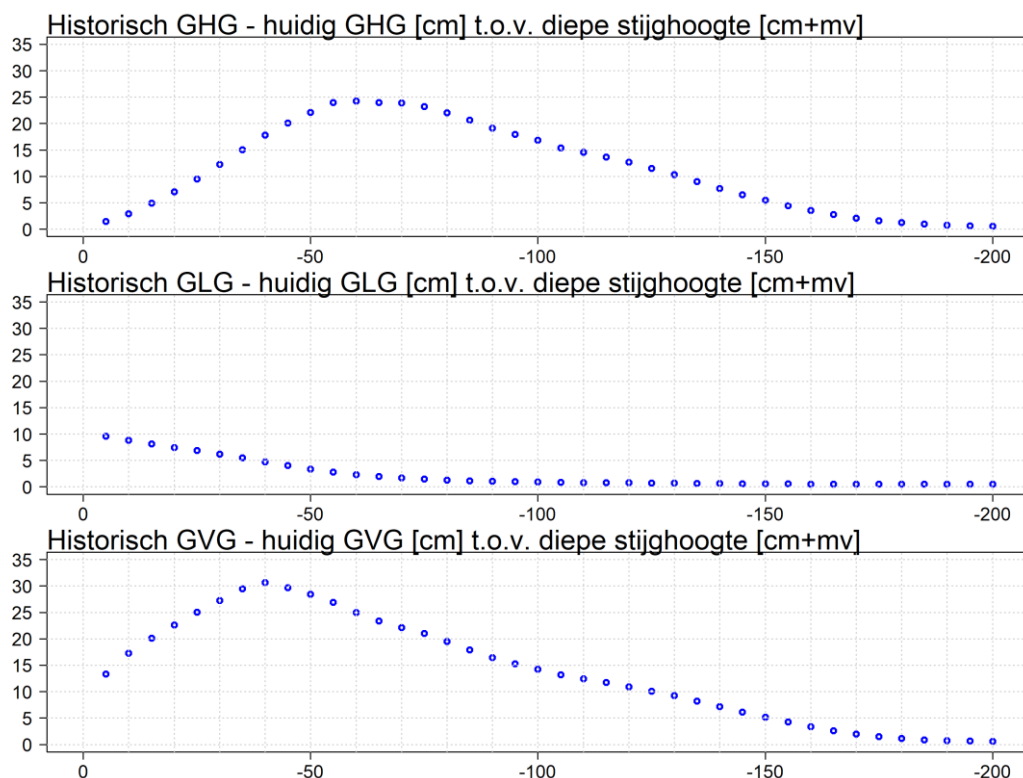
Figuur 7: Gemodelleerde (jaarlijkse) 'GHG' en 'GLG' voor drie schematisaties met een sinusvormig stijghoogteverloop op de onderrand van gemiddeld respectievelijk -75 cm+mv en -125 cm+mv.

Op de hoogste standen is wel duidelijk een invloed zichtbaar van het de aanpassen van de drainageweerstand en drainagebasis aan de hand van historische kenmerken van het af- en ontwateringsstelsel (Figuur 7). In de historische situatie zijn de hoogste standen tot ca. 30 cm hoger bij een stijghoogte van -75 cm+mv en tot ca. 20 cm hoger bij een stijghoogte van -125 cm+mv. Het effect van een verandering in de drainageweerstand en drainagebasis blijkt dus af te nemen bij diepere onderliggende stijghoogtes. Om dit effect in meer detail te verkennen is het effect van de stijghoogte in stapjes van 5 cm doorgerekend. Deze simulaties geven ook inzicht in de doorwerking van een verlaging in het watervoerende pakket op de freatische standen in zowel de historische als de huidige situatie. In een groot bereik van gemiddelde diepe stijghoogtes treden duidelijke verschillen op tussen de huidige en de historische waterhuishoudkundige situatie voor de langjarig (30 jaar) berekende GHG en GVG (Figuur 8). In de historische situatie is de wintersituaties aanzienlijk natter en blijven de freatische grondwaterstanden hoog tot in het voorjaar. Het effect op de GLG is beduidend kleiner en treedt alleen op als de gemiddelde diepe stijghoogte zich boven de drainagebasis bevindt. De mate van doorwerking van de aanpassingen in de waterhuishoudkundige situatie blijkt niet-lineair afhankelijk van de gemiddelde diepe stijghoogte. Verschillen tussen de historische en huidige waterhuishoudkundige situatie zijn klein bij diepe gemiddelde stijghoogtes en laten een duidelijk maximum zien bij een bepaalde gemiddelde diepe stijghoogte (Figuur 9).

Het grootste verschil in (over 30 jaar berekend) GHG-effect treedt op bij een gemiddelde diepe stijghoogte van 60 cm-mv en loopt op tot 25 cm. Het grootste GVG-effect treedt op bij gemiddelde diepe stijghoogtes van 40 cm-mv en bedraagt 30 cm. Het effect van verandering in de waterhuishoudkundige situatie op de GLG is maximaal (10 cm) bij diepe stijghoogtes rond maaiveld en neemt snel af bij diepere stijghoogtes. Vanaf een diepe stijghoogte van ca. 85 cm-mv is een effect op de GLG in deze modelopzet afwezig.



Figuur 8 Gemodelleerde langjarig berekende GHG, GLG en GVG (y-as) als functie van de gemiddelde stijghoogte op de onderrand (x-as).



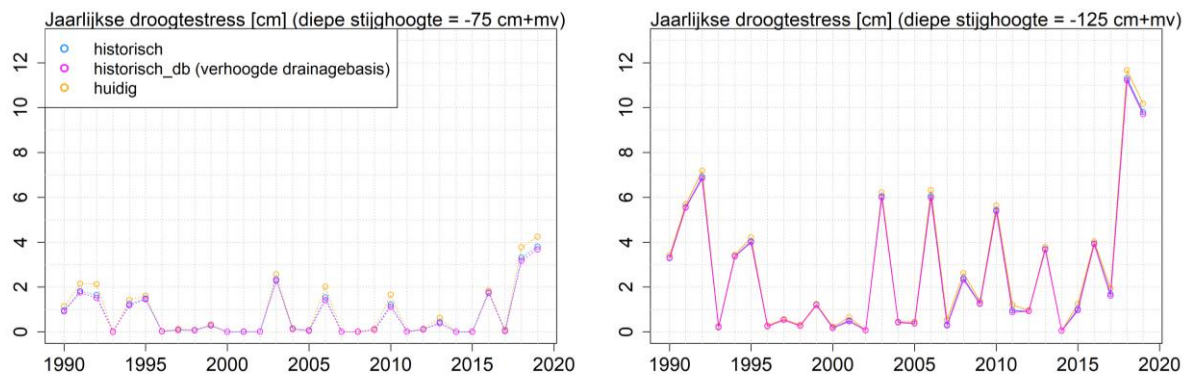
Figuur 9 Verschillen tussen langjarig berekende GHG, GLG en GVG in de historische en huidige situatie (y-as) als functie van de gemiddelde diepe stijghoogte op de onderrand (x-as).

Hoe veranderingen in de waterhuishoudkundige situatie (af- en ontwatering) in combinatie met een verandering in de diepe stijghoogte doorwerken op de freatische grondwaterstand is dus afhankelijk van de uitgangssituatie van de diepe stijghoogte in relatie tot de geometrie van de drainagemiddelen. Als in deze casus de gemiddelde diepe stijghoogte daalt van 100 cm-mv naar 120 cm -mv door bijvoorbeeld een onttrekking, daalt de GLG evenveel in de historische en huidige situatie (19 cm). Op de GHG en de GVG is het effect van deze daling echter iets groter in de historische situatie: respectievelijk -17 en -26 cm t.o.v. -14 en -21 cm in de huidige situatie. Bij een stijghoogtedaling bij een ondiepe stijghoogte op de onderrand als uitgangssituatie (bijv. van 20 naar 40 cm-mv) is het effect echter andersom en treedt in de historische situatie slechts een zeer beperkte daling van de GHG en GVG op: respectievelijk -1.6 en -0.2 cm terwijl de GVG in de huidige situatie daalt met 9 cm. Wel daalt de GLG in dit bereik iets sterker in de historische situatie dan in de huidige situatie (15 cm vs. 13 cm).

2.2.4 Effecten op droogte- en zuurstofstress

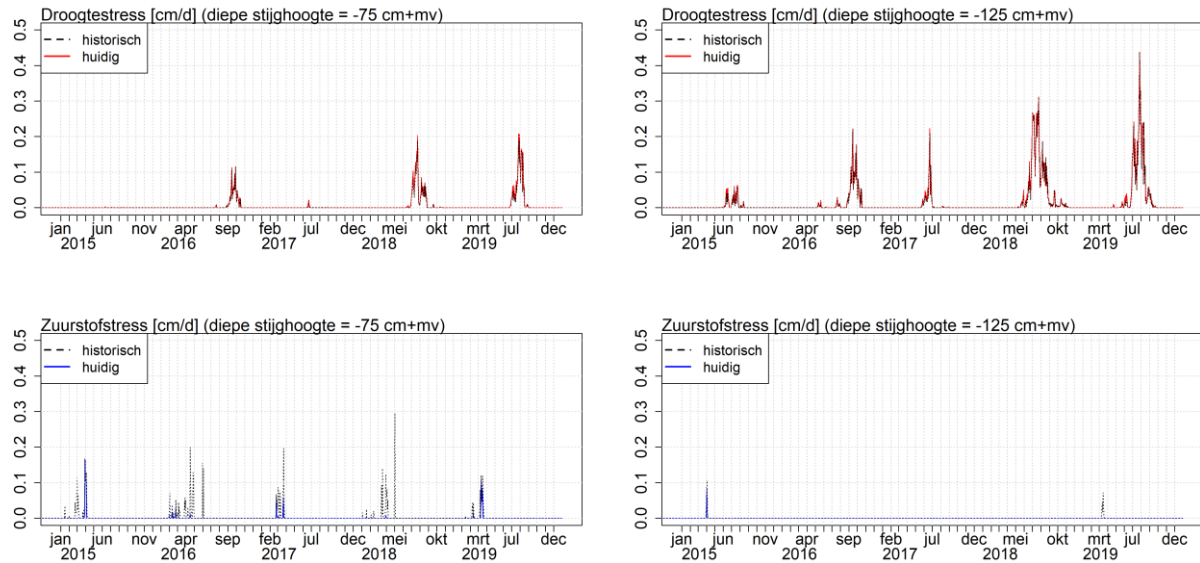
De transpiratiereductie door te droge (droogtestress) en te natte (zuurstofstress) omstandigheden wordt ook door SWAP berekend. De modelsimulaties zijn uitgevoerd met het statische grasgroei-model, dat willen zeggen dat alleen directe effecten op de transpiratiereductie zichtbaar zijn. Bijvoorbeeld, de wortels hebben het hele jaar dezelfde worteldiepte en de worteldiepte wordt niet beïnvloed door droogte- of zuurstofstress. Hierdoor is het effect van bijvoorbeeld verminderde wortelgroei in het voorjaar door te natte omstandigheden op de rest van het groeiseizoen niet meegenomen. Ook geldt dat voor de huidige en historische situatie de potentiële transpiratie gelijk is. Door aanpassingen in de waterhuishouding wordt alleen de actuele transpiratie beïnvloedt.

Allereerst is de cumulatieve jaarlijkse droogtestress berekend voor de drie in paragraaf 2.2.1 genoemde drainage schematisaties: historisch, historisch met verhoogde drainagebasis en huidige drainagebasis en -weerstand, zowel met een stijghoogte onderrand van -75 cm +mv als met een stijghoogte onderrand van -125 cm +mv (Figuur 10). De jaarlijkse droogtestress neemt logischerwijs toe bij drogere profielen (stijghoogte op de onderrand van -125 cm +mv) t.o.v. nattere profielen (stijghoogte op de onderrand van -75 cm +mv). Het verschil tussen de totale jaarlijkse droogtestress met een historische of huidige drainagefunctie is voor deze (relatief natte) casus klein en alleen zichtbaar in 'droge' jaren zoals 2006 en de periode 2018-2019.



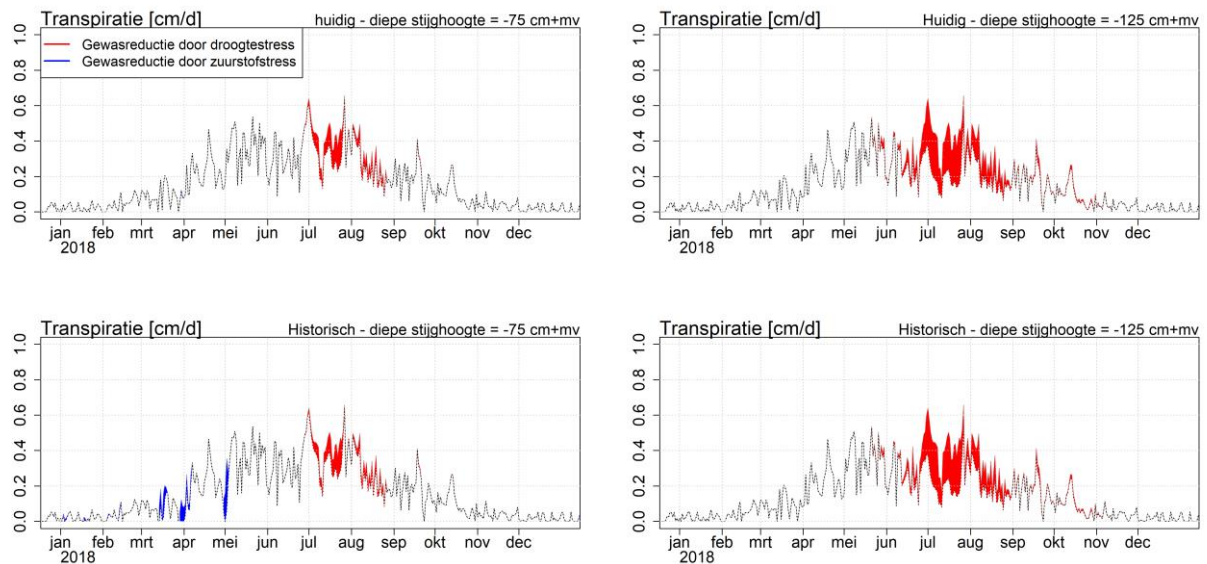
Figuur 10: Jaarlijkse droogtestress berekend met SWAP bij een gemiddelde diepe stijghoogte van -75 cm+mv (links), en met een gemiddelde diepe stijghoogte op de onderrand van -125 cm+mv (rechts). Op de y-as staat de jaarlijkse droogtestress weergegeven.

De totale jaarlijkse droogtestress is gespecificeerd naar de gemodelleerde droogtestress per dag voor de periode 2015 – 2019, daarnaast is ook de dagelijkse zuurstofstress weergegeven (Figuur 11). Ook in deze figuur is duidelijk te zien dat de dagelijkse droogtestress logischerwijs toeneemt bij een droger profiel als gevolg van een diepere stijghoogte in het onderliggende pakket. Daarnaast is er, ook logischerwijs, meer zuurstofstress in een natter profiel (gemiddelde stijghoogte op de onderrand = -75 cm +mv) dan een droger profiel (gemiddelde stijghoogte op de onderrand = -125 cm +mv). Het model met een historische drainagefunctie geeft, zeker bij hogere stijghoogtes in het onderliggende pakket, meer zuurstofstress dan in de huidige situatie.



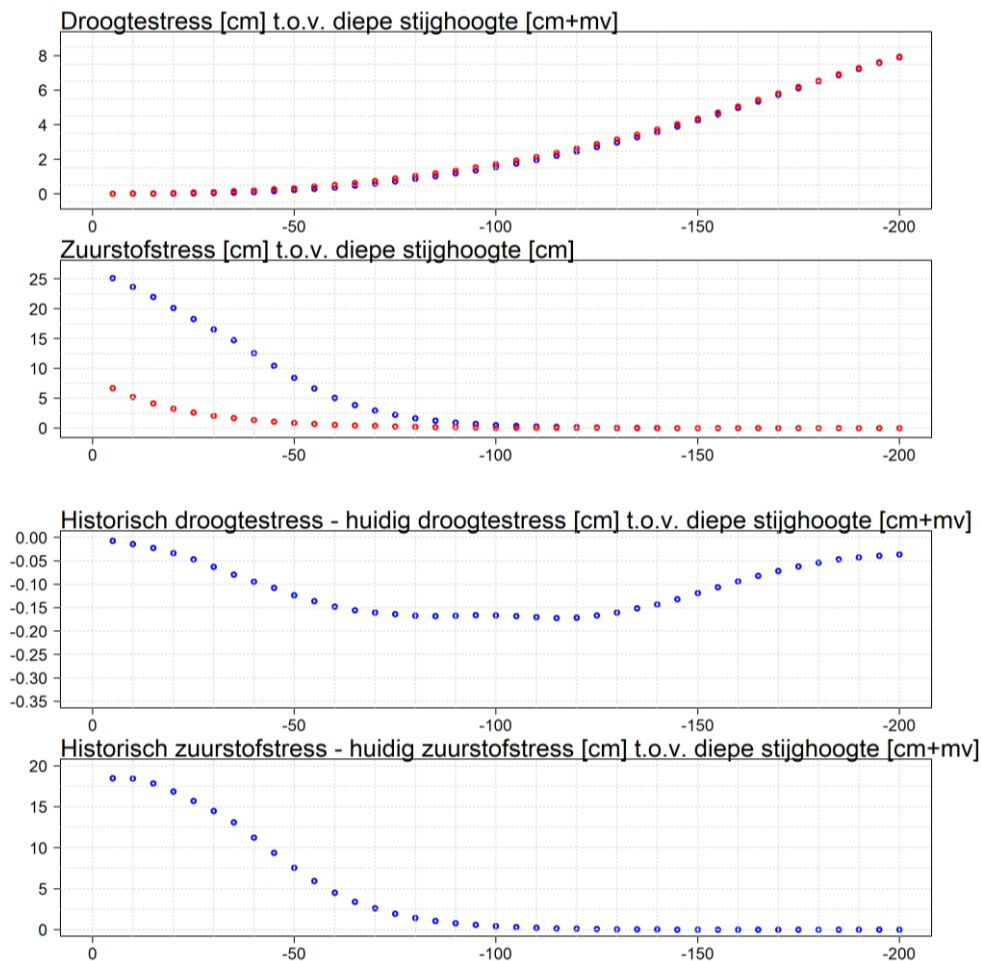
Figuur 11: Gesimuleerde droogte- en zuurstofstress met SWAP bij een gemiddelde diepe stijghoogte van -75 cm+mv (links), en een gemiddelde diepe stijghoogte van -125 cm+mv (rechts). Beide figuren geven de stress voor een historische, en huidige drainagesysteem weer.

Als gevolg van droogte- en zuurstofstress treedt transpiratiereductie (actuele transpiratie < potentiële transpiratie) op. De transpiratiereductie gesimuleerd met een simpel gewasgroeimodel (zoals in deze studie is gebruikt) kan vergeleken worden met opbrengstreductie (Kroes et al., 2017). Oftewel: een transpiratiereductie van 20 % staat gelijk aan ± 20 % gewasderiving. Het jaar 2018 is gedetailleerd bekeken, omdat hier zowel verschillen in droogte- als zuurstofstress zichtbaar zijn tussen de verschillende simulaties (Figuur 12).



Figuur 12: Gemodelleerde actuele en potentiële transpiratie met SWAP voor een natter profiel (AQAVE = -75 cm+mv) en een droger profiel (AQAVE = -125cm+mv), beide met een historisch en huidig drainageniveau. Gewasreductie treedt op als gevolg van droogtestress (rode vlakken) en zuurstofstress (blauwe vlakken).

Als gevolg van het huidige, verlaagde, drainageniveau treedt er 's winters en in het voorjaar in natte profielen minder zuurstofstress op, het effect op de droogtestress is echter beperkt in dit voorbeeld (Figuur 13). De droogtestress neemt 's zomers, logischerwijs, beduidend toe als het gehele profiel droger wordt door een lagere diepe stijghoogte op de onderrand. De langjarig berekende droogtestress is in het huidige systeem (beperkt) toegenomen t.o.v. het historische systeem, waarbij het verschil zowel afneemt bij hoge als lage waarden van de stijghoogte op de onderrand (Figuur 13). De zuurstofstress is juist sterk afgenomen in huidige systeem t.o.v. het historische systeem. Het verschil in optredende droogtestress tussen de historische en huidige situatie is in deze simulaties beperkt. Het effect op de berekende zuurstofstress is veel groter in situaties met een hoge waarde van de stijghoogte op de onderrand.



Figuur 13 Met SWAP berekende droogte- en zuurstofstress in de huidige en historische situatie, bij verschillende waarden van de stijghoogte op de onderrand. Absolute waarden en verschillen tussen de huidige en historische situatie.

2.2.5 Discussie tijdsafhankelijke modellering op perceelsschaal

De verandering van de historische situatie naar de huidige situatie resulteert in fors lagere GHG's en GVG's. Het effect op de GLG is in deze simulaties beperkt tot situaties met stijghoogtes op de onderrand boven de drainagebasis. Het effect van de aanpassing van de waterhuishouding op langjarig berekende droogteschade is in deze simulaties beperkt. Wel is er een fors effect zichtbaar op de zuurstofstress. Als wordt gekeken naar het effect van een stijghoogtedaling door bijvoorbeeld een onttrekking in de historische en huidige situatie dan blijkt het effect van een stijghoogtedaling op de GXG afhankelijk te zijn van het startniveau van de diepe stijghoogte. Het beperkte GLG-effect is verklaarbaar omdat de diepere freatische standen, afhankelijk van de voedingsweerstand, meer of minder sterk worden bepaald (gebufferd) door de (opgelegde) stijghoogte op de onderrand. In werkelijkheid treden er terugkoppelingen op naar het regionale systeem waarbij de daar optredende stijghoogtes

mede bepaald worden door kwel en wegzijging naar en uit het freatische systeem. Deze kwel en wegzijging is weer een functie van onder meer drainage naar het oppervlaktewatersysteem en neerslag en verdamping en zal van plaats tot plaats verschillen in het landschap. Op basis van de uitgevoerde SWAP simulaties kan dus niet worden gesteld dat het effect van aanpassingen in de waterhuishouding op de GLG beperkt zal zijn. Een vergelijkbare problematiek speelde bij de analyse van de hydrologie in het Baakse beek stroomgebied (Van der Gaast en Massop, 2007) waar eveneens stijghoogtes hard zijn opgelegd en bepaalde waarden voor de historische situatie zijn aangenomen (Cirkel en Krajenbrink, 2022). De enige manier om meer zicht te krijgen op de GLG effecten is het expliciet modelleren van deze terugkoppelingen op landschapsschaal. Om meer gevoel voor te krijgen voor het effect van terugkoppelingen naar het regionale systeem op de optredende laagste standen is besloten een conceptueel regionaal MODFLOW model (iMod) op te stellen met kenmerken van pleistoceen (oost) Nederland.

3 Analyse op landschapsschaal, berekeningen met een regionaal model

3.1 Inleiding

Uit de vorige hoofdstukken blijkt dat voor het verkennen van effecten op de laagste standen terugkoppelingen (kwel en wegzijging) naar het regionale systeem in de modellering meegenomen moeten worden. In dit hoofdstuk verkennen we de effecten van aanpassingen in de waterhuishouding daarom met behulp van een conceptueel driedimensionaal grondwatermodel op landschapsschaal. Met behulp van dit model vergelijken we een situatie met een intensief af- en ontwateringssysteem kenmerkend voor de huidige situatie (aangeduid als “huidige waterhuishoudkundige situatie”) met een situatie met een veel extensiever af- en ontwateringsstelsel (aangeduid als “historische waterhuishoudkundige situatie”). Deze situaties worden toegepast op zowel het gehele modeldomein als op een deelgebied rond de grondwaterwinning.

Onder afwatering verstaan we hier watervoerende, grotere sloten met peilbeheer gericht op het afvoeren van water uit een gebied. Met ontwatering worden kleinere sloten bedoeld, die niet altijd watervoerend zijn en gericht op drainage van percelen. Specifiek kijken we naar het effect van de winning op hoge en lage freatische grondwaterstanden bij beide situaties. De kenmerken van deze extensieve af- en ontwatering zijn ontleend aan de situatie van voor de grootschalige landinrichtingsprojecten. Er is hiervoor gekozen om zo een referentie te hebben voor een ‘ander’ minder intensief af- en ontwateringsstelsel, die richting geeft voor eventuele toekomstige aanpassingen aan de waterhuishouding.

De modellering richt zich op het in beeld brengen van effecten van aanpassingen in de af- en ontwatering en is niet gericht op het exact reproduceren van de historische hydrologische toestand. Landgebruik wordt bijvoorbeeld gelijk gehouden in beide situaties. De resultaten geven inzicht in de effectiviteit en gevolgen van aanpassingen van het oppervlaktewatersysteem rond winningen en geven handvatten voor het robuuster maken van het watersysteem. Ten slotte is onderzocht wat de effecten zijn van berekening en extra drainage binnen het invloedsgebied van de grondwaterwinning.

3.2 Materiaal en methode

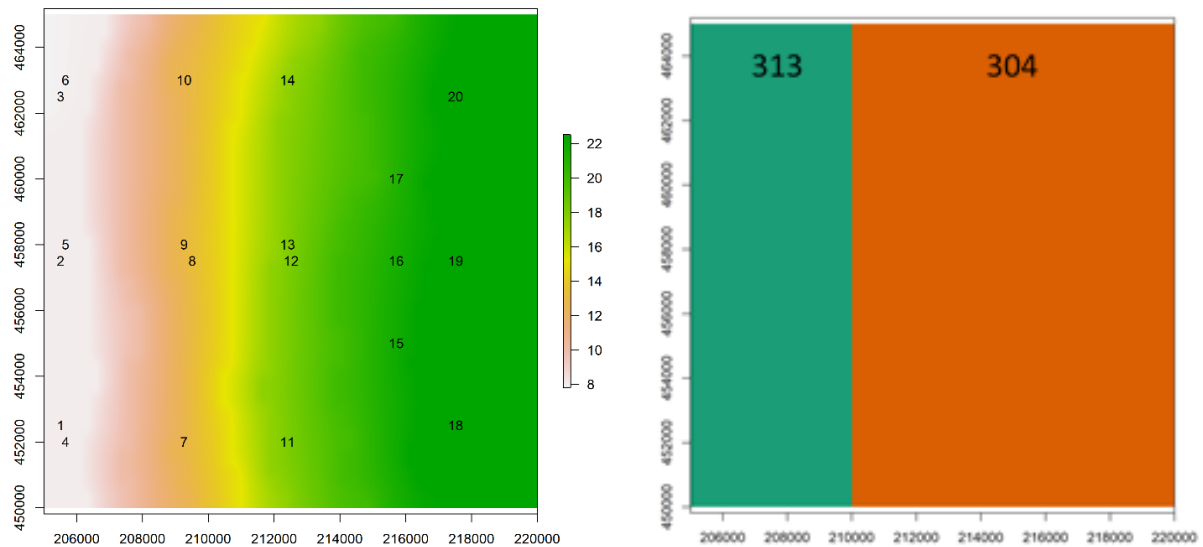
Voor de regionale analyse naar de effecten van veranderingen in de ontwatering is gebruik gemaakt van een grondwatermodel voor een hypothetische regio (Daldegan Balduino, 2020). Het model is opgezet in iMod versie 5.0 (Deltares, 2019), hierin wordt de grondwatermodelcode MODFLOW (Harbaugh, 2005) gecombineerd met een modelcode voor de bodem-vegetatie-atmosfeer interactie, MetaSWAP (Van Walsum & Veldhuizen, 2011). Het regionale grondwatermodel is gebaseerd op karakteristieken voor Oost Nederland en geeft een schematische weergave van een licht hellend gebied in de regio Hoge Zandgronden.

Modelopzet

Het domein van het model is 15 bij 15 km met een resolutie van 25 bij 25 m (Figuur 14). De helling is gemiddeld 0.001 in oost-west richting, maar is niet constant over het modeldomein, waardoor (zeer) lokaal nattere plekken kunnen ontstaan. Dagelijkse data van het KNMI station Deelen zijn gebruikt als input voor het model voor neerslag en referentieverdamping. Het model simuleert grondwaterstanden van 1-1-1990 tot 31-12-2019. De eerste vijf jaar worden gebruikt als inlooperperiode en resultaten worden getoond vanaf 1-1-1995.

Bodem en landgebruik

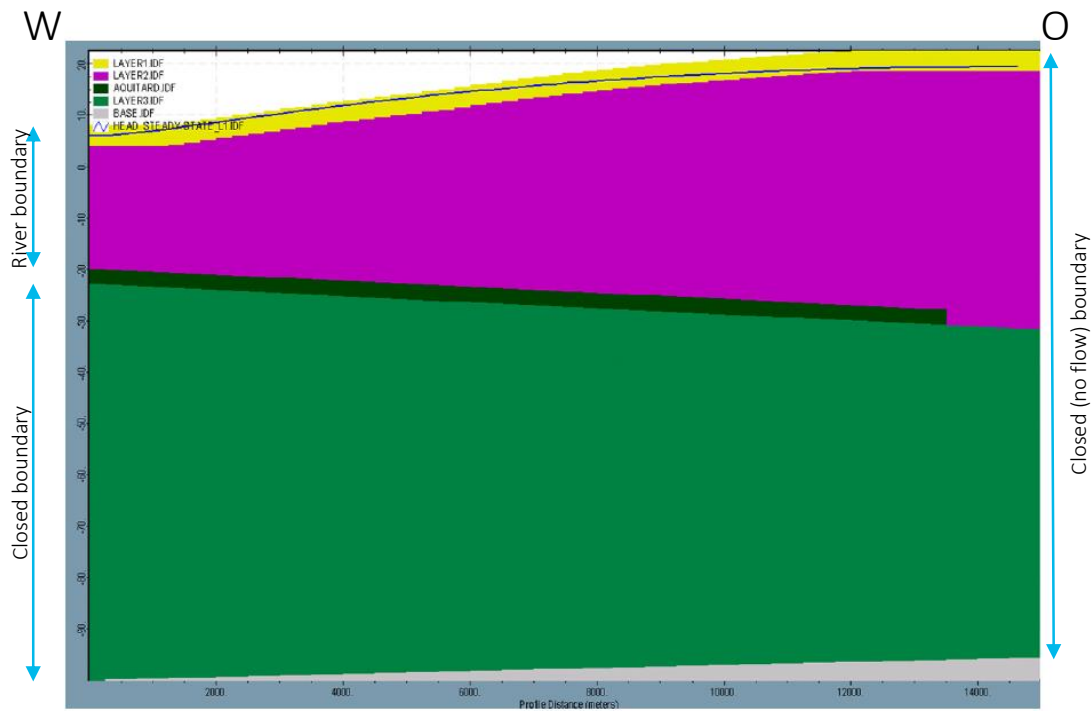
De bodemtypes in het model zijn gebaseerd op informatie uit Van der Gaast & Massop (2007) voor de Baakse Beek en kenmerkend voor Oost Nederland. De meest voorkomende schematisatie-eenheden in de Baakse Beek zijn: podzolgrond in zwak lemig fijn zand op het bovenste deel van de helling (2900309) en beekerdgrond in sterk lemig fijn zand onderaan de helling (2900313). De schematisatie-eenheden zijn vertaald naar de BOFEK2012 eenheden zwak lemige (podzol)grond (304) en lemige (beekerd)grond (313). Het westelijke deel van het model heeft een bodemtype beekerdgrond tot 1/3 van het model, het overige deel heeft een bodemtype podzolgrond (Figuur 14). Het landgebruik bestaat uit agrarisch grasland.



Figuur 14 Maaiveldhoogte in het model en locaties van de tijdseries voor grondwaterstanden (links) en verdeling van de twee bodemtypes in het model (rechts).

Ondergrond

De ondergrond is in het model geschematiseerd als drie watervoerende pakketten met een scheidende laag tussen laag 2 en 3 (Figuur 15). De lagen zijn gebaseerd op een versimpelde doorsnede uit Regis II v2.2 voor een gebied tussen Zutphen en Lochem. De eerste laag is de Boxtel-formatie, de tweede laag de Kreftenheye-formatie en de derde laag de Oosterhout-formatie. De scheidende laag is gebaseerd op de kleilenzen in de Oosterhout-formatie en ontbreekt in het meest oostelijke deel van het modeldomein. De eerste twee lagen vormen samen het freatische waterpakket, de derde laag is een half-afgesloten aquifer. De doorlatendheden van de lagen zijn gebaseerd op de genoemde formaties. De toegepaste horizontale doorlatendheden zijn 6.25 (laag 1), 75 (laag 2) en 7.5 (laag 3) m/d. Aan de westelijke kant wordt het model voor de bovenste twee lagen begrensd door een beek/riviertje; de derde laag heeft een 'no-flow' grens. De begrenzing aan de andere kanten van het model is een 'no-flow' grens.



Figuur 15 Schematisatie van de ondergrond in het model.

Winning

Er is een freatische winning van 4 miljoen m³/jr toegevoegd aan het model met een gelijke verdeling van de onttrekking over het jaar. Bij de meeste winningen in Oost Nederland is de variatie in winningshoeveelheid over het jaar namelijk beperkt. Verder maakt een constante onttrekking het eenvoudiger om effecten van de winning te duiden. Er zijn drie verschillende scenario's voor de locatie van de winning doorgerekend. De winning is geplaatst bij locatie 8, locatie 12 en locatie 16 (Figuur 14).

Huidige waterhuishoudkundige situatie

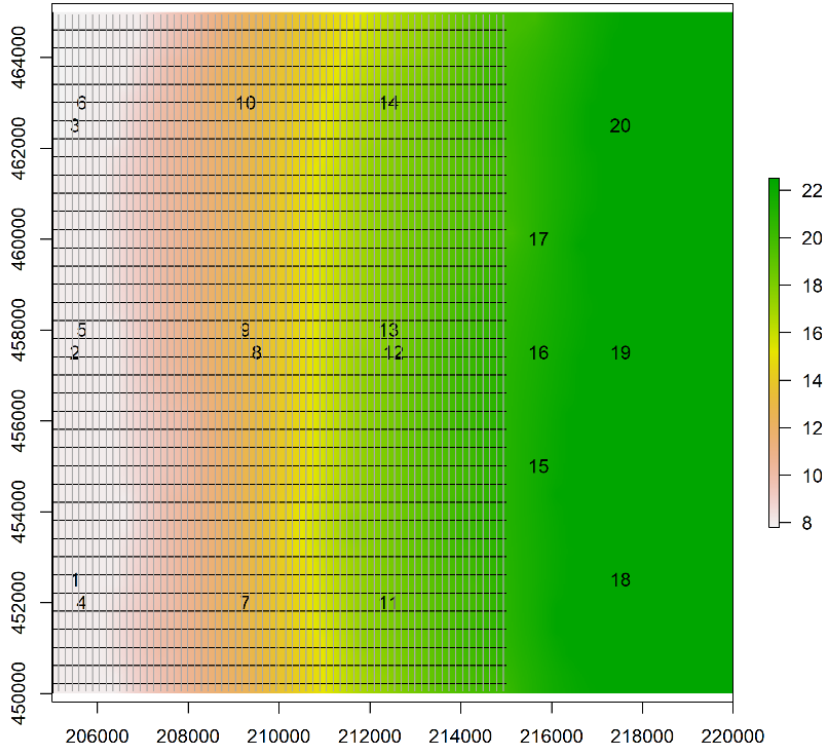
Voor het scenario met de huidige waterhuishoudkundige situatie is het af- en ontwateringssysteem is vormgegeven op basis van karakteristieken uit Van der Gaast et al. (2006). Er zijn geen sloten toegevoegd op het hoogst gelegen deel van de helling (Figuur 16). In de huidige waterhuishoudkundige situatie zijn de slootafstanden voor de beekeerdgrond en podzolgrond gelijk, de peilen zijn wel verschillend (

Tabel 3). We hebben de grote afwateringsloten in het model toegevoegd als “river”. Op deze manier kan een peil opgelegd worden. Een “river” kan niet droogvallen in het model. Om wateraanvoer vanuit deze sloten naar het grondwater te voorkomen is de infiltratiefactor op 0 gezet. De ontwatering is als “drainagesystem” toegevoegd, hiervoor worden geen peilen opgelegd en deze systemen kunnen wel droogvallen. De beek/rivier op de grens van het model heeft een bodemhoogte van 4 m-mv en hetzelfde peil als de afwatering in de beekerdgrond in zowel de huidige als historische situatie. Deze beek/rivier op de linker modelrand kan wel infiltreren met een infiltratiefactor van 0.5.

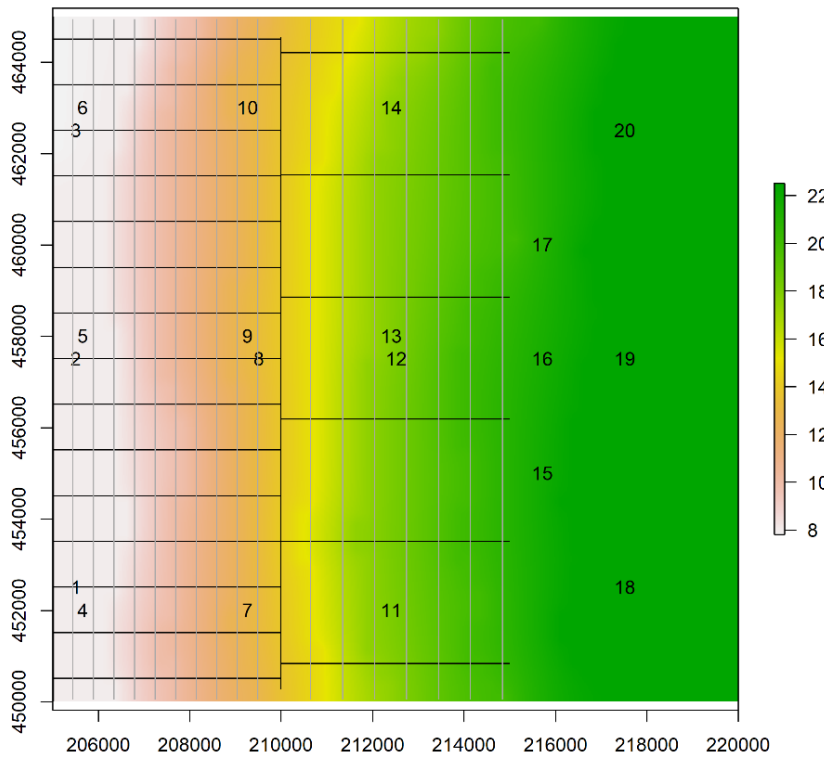
Historische waterhuishoudkundige situatie

De kenmerken van het af- en ontwateringssysteem voor de historische waterhuishoudkundige situatie zijn gebaseerd op gegevens uit Van der Gaast & Massop (2007) op basis van de meest voorkomende schematisatie-eenheden (

Tabel 3 en Figuur 17). Ook voor de historische waterhuishoudkundige situatie is er geen af- en ontwateringssysteem toegevoegd aan het hoogst gelegen deel. In de historische waterhuishoudkundige situatie zijn de slootafstanden wel verschillend voor de schematisatie-eenheden en aanmerkelijk groter dan in de huidige waterhuishoudkundige situatie. Er is geen onderscheid gemaakt tussen een zomer- en winterpeil in de historische waterhuishouding (Van der Gaast & Massop, 2007).



Figuur 16 Ligging van het af- en ontwateringssysteem in de huidige waterhuishoudkundige situatie.



Figuur 17 Ligging van het af- en ontwateringssysteem in de historische waterhuishoudkundige situatie.

Tabel 3 Kenmerken van het af- en ontwateringssysteem in de historische en huidige waterhuishouding

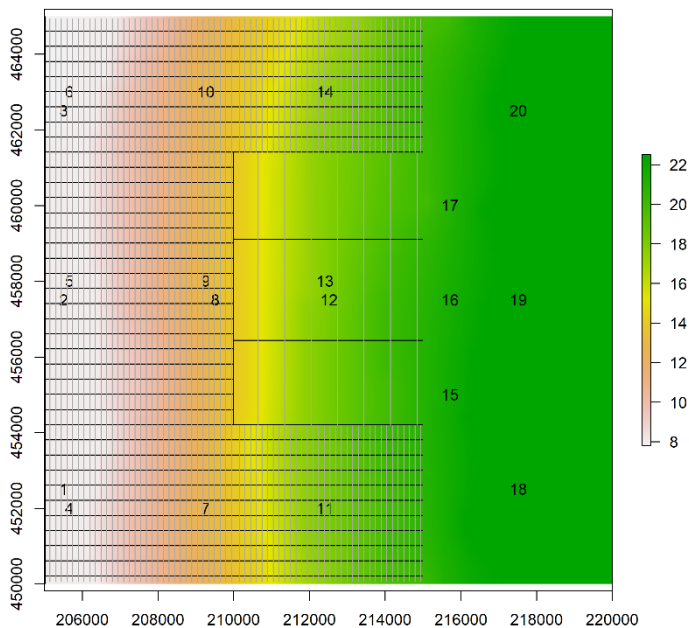
		Historisch			Huidig		
		Beekeerd 1	Beekeerd 2	Podzol	Beekeerd 1	Beekeerd 2	Podzol
Afwatering	Slootafstand (m)	1000	1000	2675	400	400	400
	Bodemhoogte (m -mv)	0.60	0.85	1.2	2.1	2.1	2.1
	Zomerpeil (m -mv)	0.50	0.75	1.1	0.8	1	1.4
	Winterpeil (m -mv)	0.50	0.75	1.1	0.8	1.3	1.45
Ontwatering	Slootafstand (m)	450	450	700	150	150	150
	Bodemhoogte (m -mv)	0.5	0.6	0.7	0.50	0.80	0.80

Lokale aanpassing waterhuishoudkundige situatie binnen invloedgebied winning

Een freatische winning zal freatische grondwaterstanden lokaal (fors) verlagen. Het af- en ontwateringssysteem zou daarom rond de winning wellicht logischerwijs minder intensief kunnen zijn. Om de effecten hiervan te onderzoeken zijn de volgende twee scenario's doorgerekend met en zonder winning:

1. *Huidige waterhuishoudkundige situatie met lokale aanpassing naar historische waterhuishoudkundige situatie*

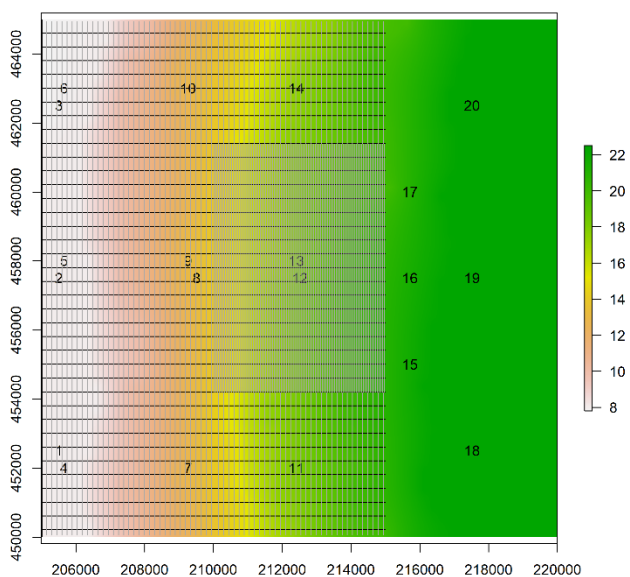
Door de verlaging van de grondwaterstand binnen het invloedgebied van een winning zal er minder drainage nodig zijn en dus een minder intensief slotenstelsel. Om dit te simuleren hebben we binnen het invloedgebied van de winning de eigenschappen voor ontwatering en afwatering aangepast naar de kenmerken van de historische waterhuishouding (Figuur 18). Het invloedgebied is gekozen op basis van de 5 cm verlagingcontour zoals berekend voor een winning op locatie 12 in de huidige waterhuishoudkundige. Om praktische redenen is de 5 cm contour versimpeld naar een rechthoek op basis van de uiterste grenzen van het contourvlak.



Figuur 18 Ligging van het af- en ontwateringssysteem in het scenario met een lokale aanpassing naar de historische waterhuishoudkundige situatie rond de winlocatie.

2. Huidige waterhuishoudkundige situatie met lokaal extra drainage

Bij het bepalen van de droogteschade door een winning wordt ook rekening gehouden met vermeden natschade. Als er maatregelen genomen worden op een perceel om natschade te voorkomen, wordt compensatie van vermeden natschade niet meer meegenomen in de berekening van de droogteschade. Dit zou een prikkel kunnen zijn voor het aanleggen van extra (ondiepe) ontwatering. Vraag is echter of hiermee extra verdroging wordt veroorzaakt. In dit scenario wordt gesimuleerd wat het effect is van extra drainage binnen het invloedgebied van de winning. Er is extra ontwatering gesimuleerd door ontwateringsmiddelen te modelleren om de 50 meter in plaats van 150 meter op een diepte van 80 cm (Figuur 19). Het invloedgebied is gelijk aan het vorige scenario en gebaseerd op de effecten van winning in de huidige waterhuishoudkundige situatie.



Figuur 19 Ligging van het af- en ontwateringssysteem in het scenario met een lokaal extra drainage.

Invloed berekening

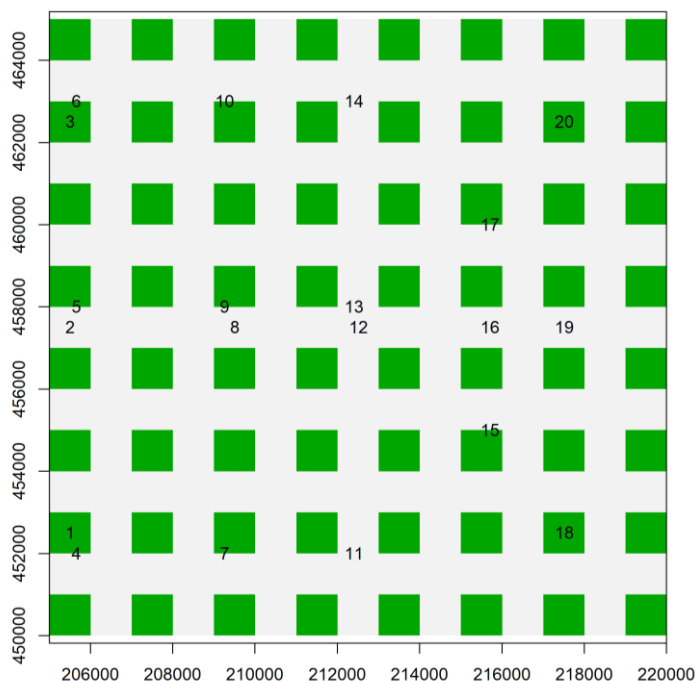
In de modelberekeningen wordt in eerste instantie niet berekend om alleen het effect van de waterhuishoudkundige situatie op de effecten van de winning te bepalen. Vanuit de begeleidingsgroep was er echter behoefte om gevoel te krijgen van de orde van grootte van berekeningseffecten op de freatische grondwaterstanden. Belangrijke vraag hierbij was wat de uitstralingseffecten zijn van beregeningsonttrekkingen en hoe deze zich verhouden tot de grondwateronttrekking voor drinkwaterproductie.

Om de invloed van berekening te onderzoeken zijn twee scenario's toegevoegd. Het gaat hierbij om berekening in de huidige waterhuishoudkundige situatie met en zonder winning. Voor de instellingen van de berekening zijn de standaardinstellingen in MetaSWAP voor agrarisch gras overgenomen:

- Gift: 25 mm
- Duur: 0.25d
- Rotatie: 10 dagen

Om de effecten van wel of geen berekening te onderzoeken is er voor gekozen om in bepaalde blokken wel en in bepaalde blokken niet te beregenen. Hiermee is het mogelijk om het totale effect van berekening te berekenen, maar ook om lokale effecten van berekening op niet beregende percelen te onderzoeken. De gebieden binnen het modeldomein waar berekening plaats kan vinden zijn met groene blokken weergegeven in Figuur 20.

Berekening is weersafhankelijk en zal pas bij een bepaalde waarde van de drukhoogte in de wortelzone worden aangezet. In dit onderzoek zijn de standaardinstellingen in MetaSWAP gebruikt. Het bleek in de gebruikte Imod-versie niet mogelijk om de berekening in meerdere gridcellen toe te wijzen aan één onttrekkingspunt. De onttrekkingen voor berekening vinden daarom plaats in alle gridcellen waar de berekening toegepast wordt uit het freatisch grondwater. Dat betekent dat er een overschatting is van het aantal putjes, omdat normaal meerdere percelen vanuit één grondwaterput berekend worden. De onttrekking is hierdoor in het model dus meer diffuus dan in werkelijkheid het geval zal zijn.



Figuur 20 Beregende gebieden (groene blokken) binnen het modeldomein.

Overzicht doorgerekende scenario's

Met de modellen zijn de volgende scenario's doorgerekend:

1. Historische waterhuishoudkundige situatie zonder winning*

2. Historische waterhuishoudkundige situatie met winning (winning op locatie 8 (scenario 2a), 12 (scenario 2b*) en 16 (scenario 2c))
3. Huidige waterhuishoudkundige situatie zonder winning*
4. Huidige waterhuishoudkundige situatie met winning (winning op locatie 8 (scenario 4a), 12 (scenario 4b*) en 16 (scenario 4c))
5. *Huidige waterhuishoudkundige situatie zonder winning met verandering landgebruik¹*
6. *Huidige waterhuishoudkundige situatie met winning met verandering landgebruik (winning op locatie 12)¹*
7. Huidige waterhuishoudkundige situatie zonder winning met berekening*
8. Huidige waterhuishoudkundige situatie met winning met berekening (winning op locatie 12)*
9. Huidige waterhuishoudkundige situatie zonder winning met lokale aanpassing naar historische waterhuishoudkundige situatie*
10. Huidige waterhuishoudkundige situatie met winning met lokale aanpassing naar historische waterhuishoudkundige situatie (winning op locatie 12)*
11. Huidige waterhuishoudkundige situatie zonder winning met lokaal extra drainage*
12. Huidige waterhuishoudkundige situatie met winning met lokaal extra drainage (winning op locatie 12)*

*) Natschade door zuurstofstress wordt voor deze scenario's meegenomen in het model. Voor deze scenario's is gekozen om natschade mee te nemen, omdat uit een eerdere modelverkenning met alle scenario's zonder natschade bleek dat in deze situaties het grootste verschil zichtbaar was tussen de grondwaterstanden. Winningen op locatie 8 en 16 bleken minder beïnvloed te worden door aanpassingen in de waterhuishouding en daarom zijn de modelberekeningen (mede gezien het beschikbare budget) niet herhaald voor deze scenario's.

¹ Het omzetten van het gewas in MetaSWAP naar naaldbos bleek geen/beperkt effect te hebben op de verdamping. Binnen deze studie kon niet achterhaald worden waardoor dit wordt veroorzaakt. Om deze reden zijn scenario 5 en 6 niet verder uitgewerkt.

3.3 Resultaten regionale modelanalyse

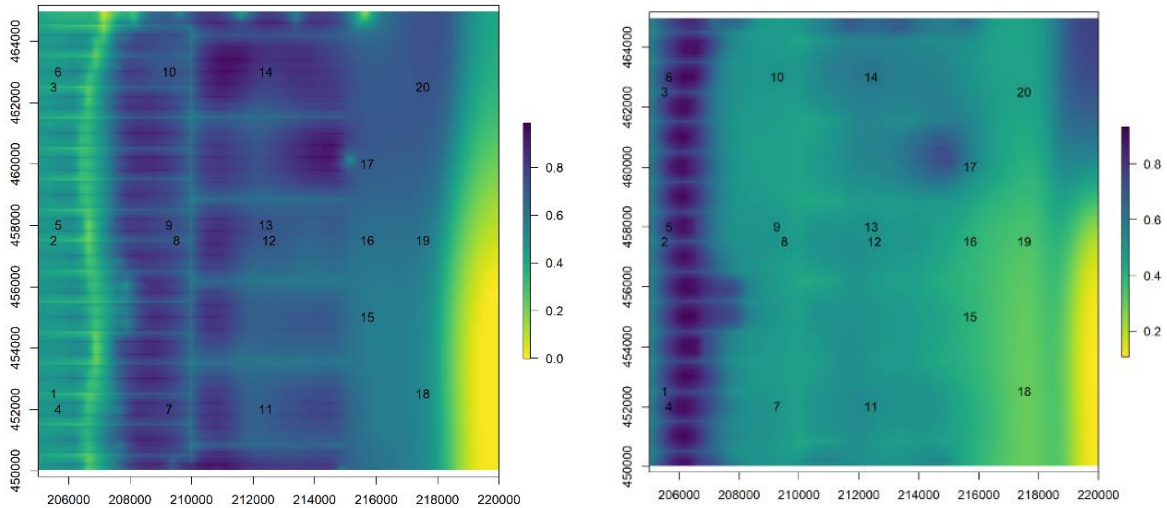
3.3.1 Effecten van veranderingen in het af- en ontwateringsstelsel

Grootschalige aanpassingen van het af- en ontwateringsstelsel hebben in onze schematische weergave van het Oost-Nederlandse landschap een fors effect op de freatische grondwaterstanden. De grondwaterstandsverschillen tussen scenario's met de huidige waterhuishoudkundige situatie en met de historische variëren ongeveer tussen 20 en lokaal 100 cm afhankelijk van de ligging in het landschap en de positie van ont- en afwateringssloten in de historische en huidige waterhuishoudkundige situatie in het model (Figuur 21 en Figuur 22).

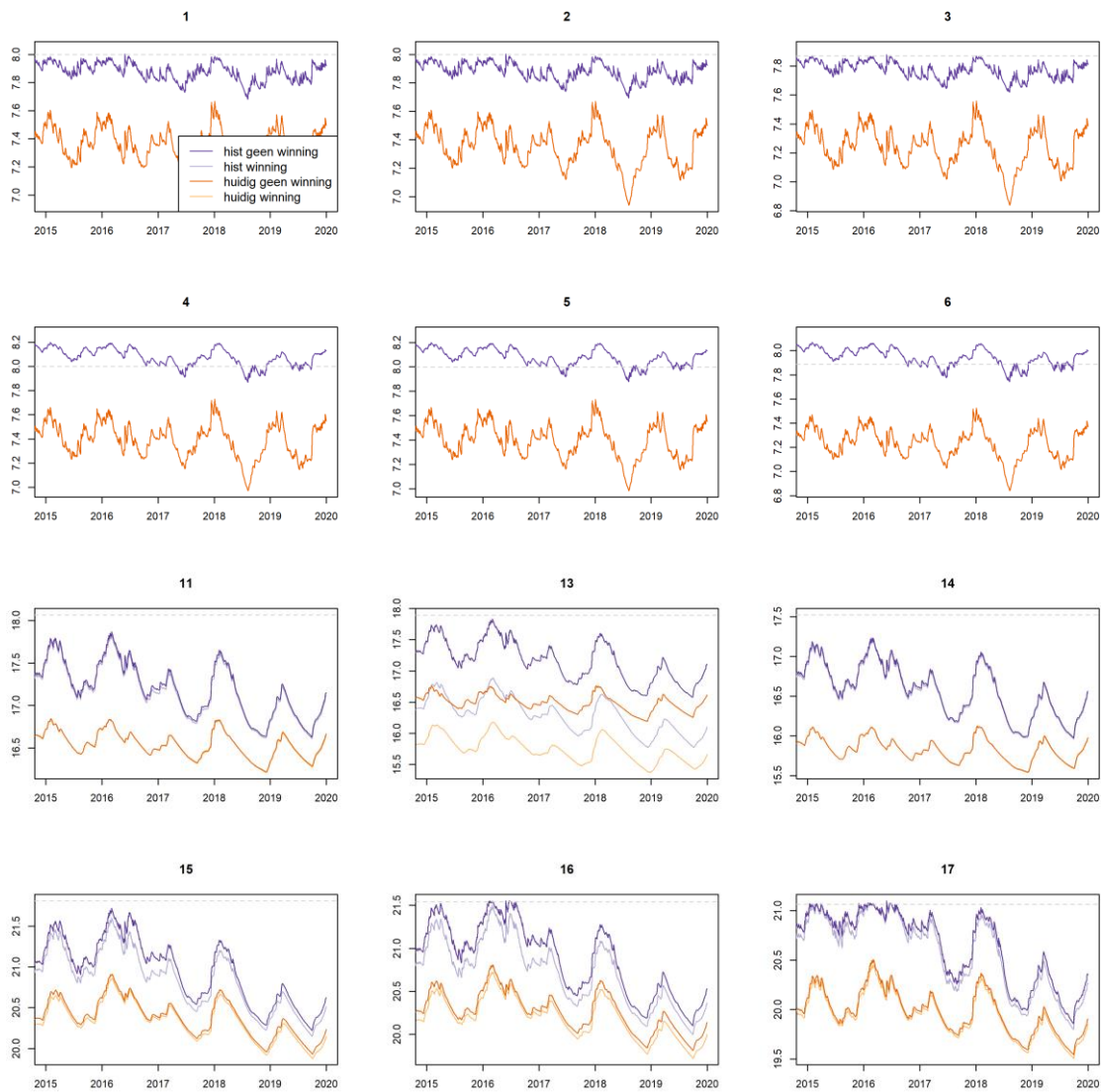
In Figuur 22 en Bijlage I.I zijn gesimuleerde grondwaterstandsreeksen weergegeven voor de locaties zoals aangegeven in Figuur 14 voor de historische en huidige waterhuishoudkundige situatie (scenario's 1, 2b, 3 en 4b). De winning bevindt zich bij deze reeksen op locatie 12. Tijdseries voor een langere periode (1995-2019) en andere posities van de winning zijn opgenomen in Bijlage I.III. Typisch droge en natte jaren zijn terug te zien in het verloop van de grondwaterstanden: 2003, 2018 (droog) en 1998 (nat). Uit de reeksen blijkt dat het freatisch vlak zich in de historische waterhuishoudkundige situatie enkele decimeters hoger bevindt dan in de huidige situatie en in de lage delen van het model met beekerdgronden (locaties 1 t/m 6) langdurig rond of boven maaiveld in winter en voorjaar. Met name op de meetpunten verder van de waterlopen af (locatie 4, 5 en 6) is dit het geval; de grondwaterstand blijft in sommige jaren zelfs constant boven maaiveld op deze plekken. Op locaties in het hoger gelegen, extensiever ontwaterde, deel (bijv. 15, 16 en 17 en in mindere mate 18, 19 en 20) nemen de verschillen tussen de simulaties met de historische waterhuishouding en de huidige waterhuishouding af tijdens droge jaren.

In Figuur 21 zijn de ruimtelijke verschillen in grondwaterstand tussen de historische en huidige situatie zonder winning weergegeven voor een dag in de winter (1-1-2018) en in de zomer (1-7-2018). De verschillen zijn groter in de winter dan in de (zeer droge) zomersituatie. Verder is in de winter heel duidelijk het af- en ontwateringsstelsel terug te zien, terwijl in de zomer de verschillen gelijkmatiger zijn. Het ontwateringsstelsel heeft minder invloed op de diepere grondwaterstanden in deze droge zomer, omdat de grondwaterstanden onder de bodem van de watergangen uitzakken. Parallel aan de beek/rivier aan de linkerzijde van het model is een duidelijk patroon zichtbaar met kleinere verschillen in de winter en juist grotere verschillen in de droge zomer van 2018. Dit patroon bevindt zich op de rand van het laagste deel van het model waar ook in de historische waterhuishoudkundige situatie al relatief veel sloten aanwezig zijn. Verschillen in de winter zijn hierdoor beperkt. Het patroon in de zomer schrijven wij toe aan hogere toestroming van grondwater (kwel) naar de laagste delen in de historische waterhuishoudkundige situatie in combinatie met een hogere drainagebasis. Hierdoor zakken de laagste standen in de historische waterhuishoudkundige situatie minder diep weg.

Door de hogere grondwaterstanden in de historische waterhuishoudkundige situatie is de actuele verdamping gemiddeld over het hele gebied lager, omdat verdampingsreductie door te natte condities ontstaat in de laaggelegen delen. In de hooggelegen delen neemt de verdamping gemiddeld over de hele periode juist toe in de historische situatie ten opzichte van de huidige situatie, omdat minder verdampingsreductie door droogtestress optreedt (Figuur 40, Figuur 41, Figuur 42, Figuur 43).



Figuur 21 Verschillen in grondwaterstand (m) tussen de historische en huidige waterhuishoudkundige situatie zonder winning (scenario 1 en 3) voor een wintersituatie (1-1-2018, links) en een zomersituatie (1-7-2018, rechts). Een positief getal betekent een hogere grondwaterstand in de historische waterhuishoudkundige situatie.



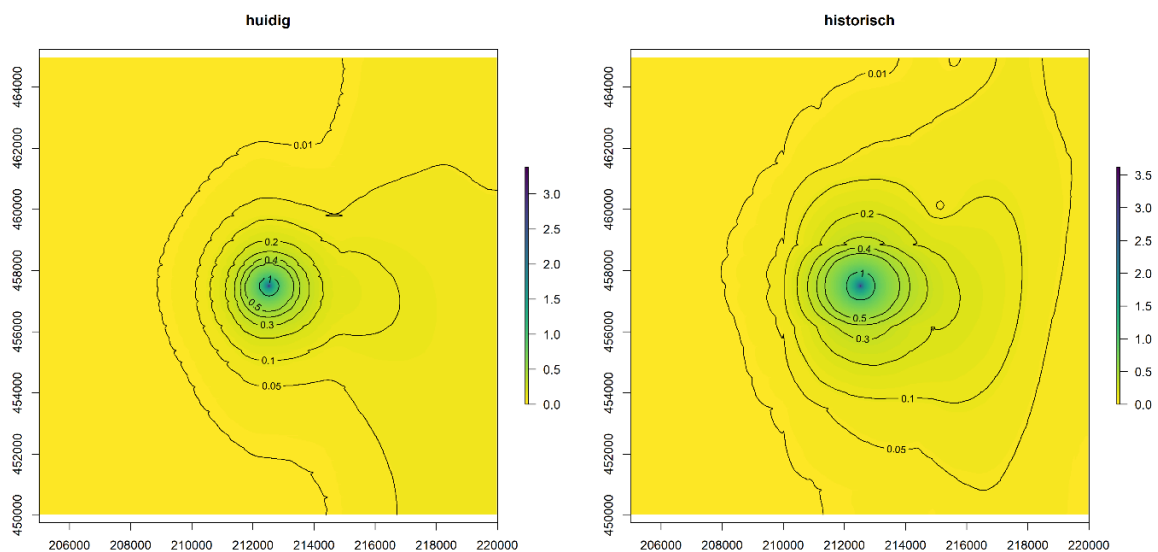
Figuur 22 Gesimuleerde grondwaterstanden (m +NAP) voor een deel van de locaties voor de scenario's in historische (paarse lijnen) en huidige (oranje lijnen) waterhuishoudkundige situatie zonder winning en met winning bij locatie 12 (scenario's 1, 2b, 3 en 4b). Gestippelde grijze lijn geeft het maaiveld weer.

3.3.2 Invloed van de grondwaterwinning op freatische standen

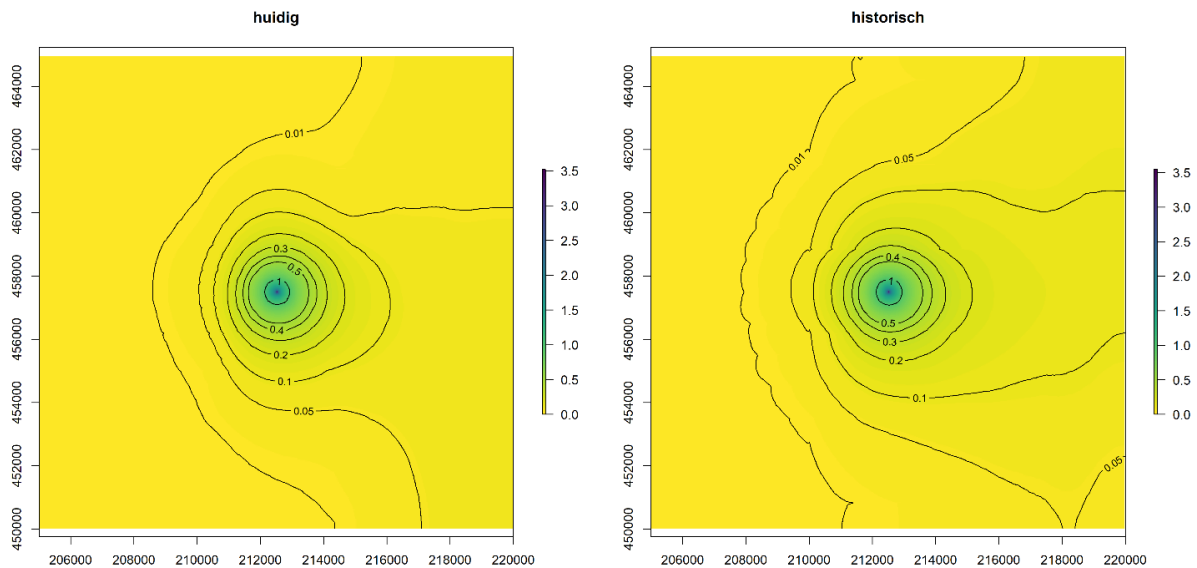
De invloed van de winning op freatische grondwaterstanden is in zowel de historische als huidige waterhuishoudkundige situatie duidelijk zichtbaar. Op de locatie van de winning is de maximale daling door de onttrekking rond de 3.5 meter. De absolute niveaus van de grondwaterstanden binnen de onttrekkingskegel verschillen wel sterk tussen de huidige en historische waterhuishoudkundige situatie. Nabij de winning is in natte jaren het freatisch niveau met winning in de historische waterhuishoudkundige situatie vergelijkbaar met het niveau zonder winning in de huidige waterhuishoudkundige situatie (locatie 13 in Figuur 37, bijlage I.I). De winning heeft dus in natte jaren in de historische waterhuishoudkundige situatie een vergelijkbaar effect als de diepe af- en ontwatering in de huidige waterhuishoudkundige situatie. In droge jaren zakken de grondwaterstanden echter nabij de winning ook in de historische waterhuishoudkundige situatie diep weg, waarbij het verschil met de huidige waterhuishoudkundige situatie afneemt. De standen bereiken in onze simulaties echter niet het (lage) niveau van de huidige waterhuishoudkundige situatie met winning.

Hoewel het niveau van de freatische grondwaterstanden in de historische waterhuishoudkundige situatie ook rond de winning aanzienlijk hoger is, is het effect van de winning op de freatische grondwaterstanden wat groter in de historische waterhuishoudkundige situatie dan in de huidige situatie. In de huidige waterhuishoudkundige situatie met winning bedraagt het oppervlak binnen de 5 cm contour van de GHG daling 75.5 km², in de historische waterhuishoudkundige situatie met winning gaat het hierbij om een oppervlakte van 94.3 km² (Figuur 23). Het oppervlak binnen de GLG-verlagingscontour van 5 cm bedraagt in de huidige waterhuishoudkundige situatie 73.5 km² en in de historische waterhuishoudkundige situatie 107.3 km² (Figuur 24). Dus hoewel in een situatie met een winning en historische waterhuishoudkundige situatie de grondwaterstandsniveaus structureel hoger liggen, is het verlagingseffect van de winning groter.

Deze verschillen in het effect van de winning worden veroorzaakt door verschillen in de grondwateraanvulling als gevolg van veranderingen in verdampingsreductie. Ten opzichte van de huidige situatie is in de historische waterhuishoudkundige situatie door de hogere grondwaterstanden zowel met als zonder winning de gemiddelde verdamping over de hele periode hoger in het invloedgebied van de winning (Figuur 42, Bijlage I.II); er treedt namelijk minder droogte en daarmee minder transpiratiereductie op. Door de gemiddeld hogere verdamping neemt de grondwateraanvulling in het invloedgebied van de winning af, waardoor de effecten van de winning (uitgedrukt als 5 cm contour) over een groter oppervlak zichtbaar zijn, ofwel de onttrekkingskegel is groter. Dit effect is eenvoudig te simuleren met de analytische formule van Verruijt voor onttrekking uit een freatisch pakket met aanvulling (Verruijt, 1970).



Figuur 23 Verskil in GHG waarden (in meters, periode 1995-2019) tussen simulaties zonder winning en met winning voor zowel de huidige als de historische waterhuishoudkundige situatie (winning op locatie 12 binnen het modeldomein). Een positief getal betekent een hogere grondwaterstand in de situatie zonder winning.



Figuur 24 Verskil in GLG waarden (in meters, periode 1995-2019) tussen simulaties zonder winning en met winning voor zowel de huidige als de historische waterhuishoudkundige situatie (winning op locatie 12 binnen het modeldomein). Een positief getal betekent een hogere grondwaterstand in de situatie zonder winning.

3.3.3 Invloed op verdamping

De verdamping blijft in de hoge gelegen delen van het model (invloedgebied winning) bij de historische ont- en afwatering altijd hoger of gelijk aan die in de huidige waterhuishoudkundige situatie tijdens droge en gemiddelde jaren (Figuur 41). In natte jaren is de verdamping in de historische waterhuishoudkundige situatie lager doordat natschade optreedt. De grondwaterstanden zijn op dat moment zo hoog dat het gewas zuurstofstress ondervindt en niet optimaal kan verdampen.

Door de grondwaterstandsverlagingen als gevolg van de winning neemt de verdamping in de buurt van de winning af. In droge jaren is dit verschil in de historische waterhuishoudkundige situatie verhoudingsgewijs groter dan in de huidige waterhuishoudkundige situatie. Dit effect is bijvoorbeeld zichtbaar in 2018 (Figuur 45 en voor locatie 13 in Figuur 42). Dit heeft ook zijn weerslag op de afvoer van grondwater naar het oppervlaktewaterstelsel zoals wordt besproken in de volgende paragraaf (par. 3.3.4).

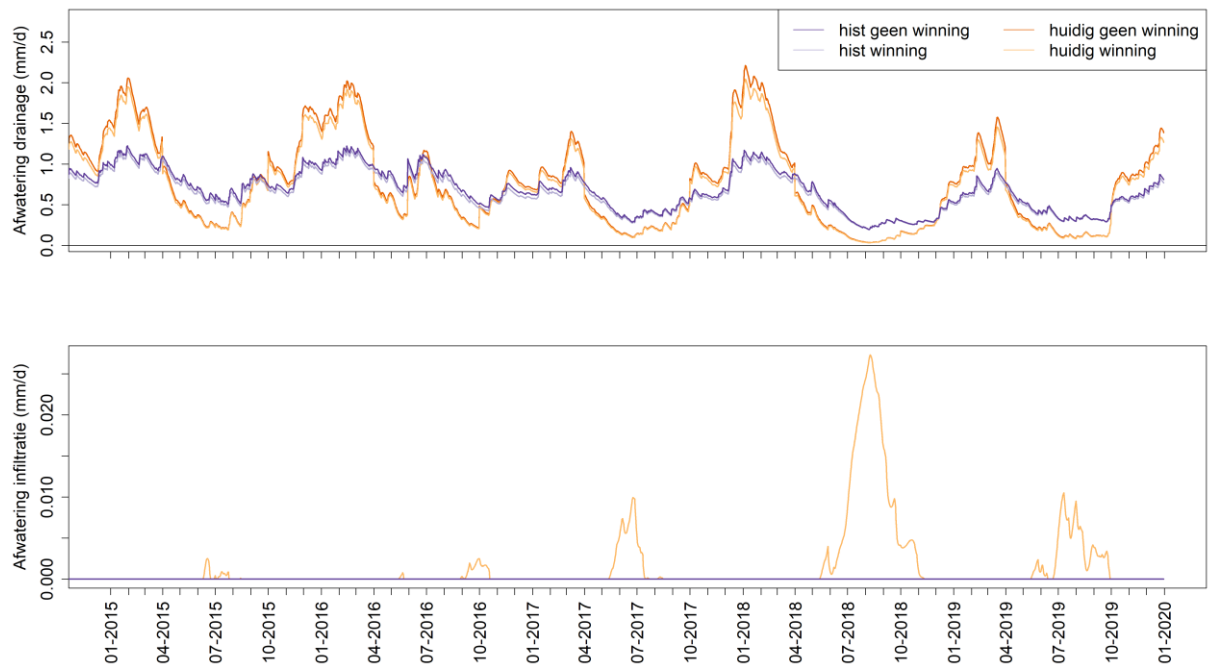
3.3.4 Invloed op afvoer via het af- en ontwateringssysteem

De verschillen in verdamping worden (naast het effect op het invloedsgebied van de winning) gecompenseerd door een verandering in de afvoer van grondwater naar het af- en ontwateringssysteem. In de huidige waterhuishoudkundige situatie wordt in de winter meer grondwater afgevoerd via de dieper insnijdende afwateringssloten dan in het historische systeem en in de zomer juist minder water (Figuur 25 en Figuur 26). Via de ontwateringssloten wordt meer water afgevoerd in de historische waterhuishoudkundige situatie dan in de huidige waterhuishoudkundige situatie, maar de totale hoeveelheid is klein ten opzichte van de afvoer via het afwateringssysteem. In de huidige situatie zijn de grondwaterstanden regelmatig te diep voor drainage naar de ontwateringssloten. In totaal wordt in de historische waterhuishoudkundige situatie met winning meer grondwater via het af- en ontwateringssysteem afgevoerd dan in de huidige waterhuishoudkundige situatie met winning. Gemiddeld over de hele periode gaat het hierbij om een verschil van 1.67 miljoen m³/j (Figuur 27). Dit verschil wordt veroorzaakt door de lage verdamping in de historische waterhuishoudkundige situatie in de laaggelegen delen door natschade (Figuur 40); door de lagere verdamping komt meer water ten goede aan de afvoer.

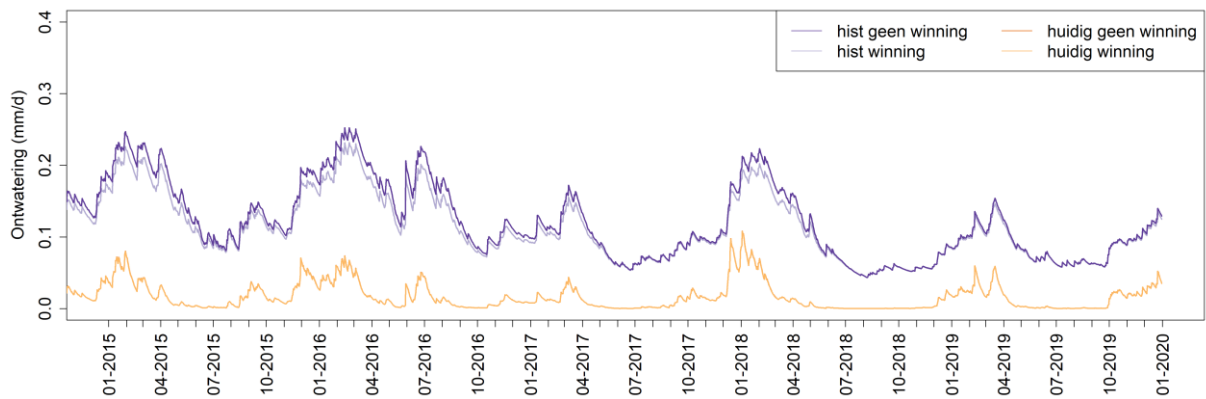
Gedurende droge zomers vindt infiltratie plaats vanuit de beek/rivier op de westrand van het modeldomein in de huidige situatie. De totale geïnfiltreerde hoeveelheid is echter zeer klein ten opzichte van de drainage.

In de fluxen naar het afwateringsstelsel is in de huidige waterhuishoudkundige situatie duidelijk het effect zichtbaar van verschillen in zomer- en winterpeil. Het ingaan van het winterpeil op 1 oktober zorgt voor een tijdelijke hogere flux naar het afwateringsstelsel. Bij het overgaan naar zomerpeil (1 april) daalt de flux direct. In de historische waterhuishoudkundige situatie is geen sprake van een apart zomer- en winterpeil.

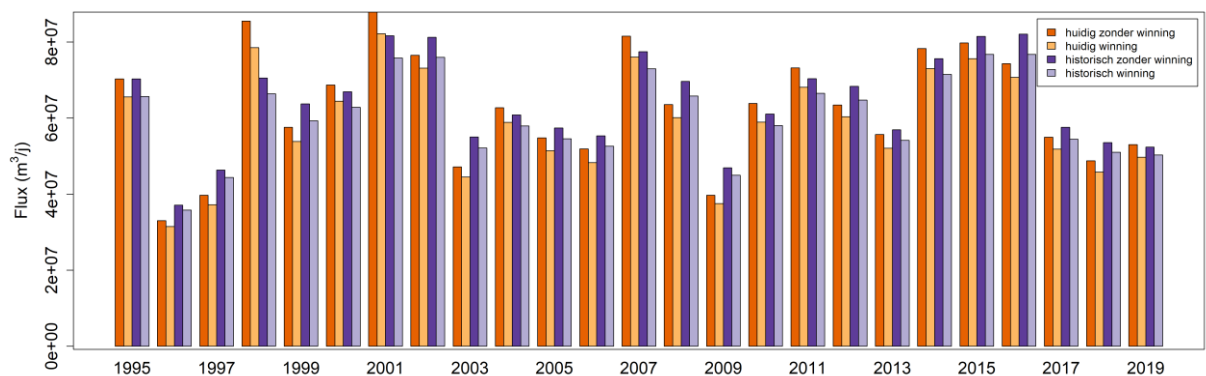
In zowel de historische als huidige waterhuishoudkundige situatie neemt, zoals verwacht mag worden, de totale afvoer van oppervlaktewater als gevolg van de winning af (Figuur 28). Er is wel een grote variatie in afname tussen de jaren zichtbaar, deze variatie wordt bepaald door verschillen in de meteorologische condities tussen de jaren. In de historische waterhuishoudkundige situatie is de afname vooral zichtbaar in het ontwateringsstelsel, in de huidige waterhuishoudkundige situatie juist in het afwateringsstelsel. De totale jaarlijkse flux naar het oppervlaktewater neemt bij een grondwaterwinning van 4 miljoen m³/j gemiddeld over de hele periode af met 3.86 miljoen m³/j en 3.54 miljoen m³/j voor respectievelijk de huidige en historische waterhuishoudkundige situatie. In de historische waterhuishoudkundige situatie vindt dus meer transpiratiereductie plaats als gevolg van de winning dan in de huidige situatie (zie Figuur 45, met als voorbeeld 2018). Deze verminderde transpiratie komt ten goede aan de afvoer. Met andere woorden, in de huidige waterhuishoudkundige situatie gaat de grondwateronttrekking meer ten koste van de afvoer (vermindering transpiratie is klein) dan in de historische waterhuishoudkundige situatie (vermindering transpiratie is groot). De actuele verdamping in het invloedgebied van de winning is gemiddeld over de periode nog wel steeds hoger in de historische situatie dan in de huidige situatie (Figuur 41 en Figuur 43); in de huidige situatie is zonder de winning de transpiratie al lager dan in de historische situatie. De winning heeft geen effect op de infiltratieflux uit de rivier op de rand van het modeldomein (0 mm verschil tussen de simulaties met en zonder winning).



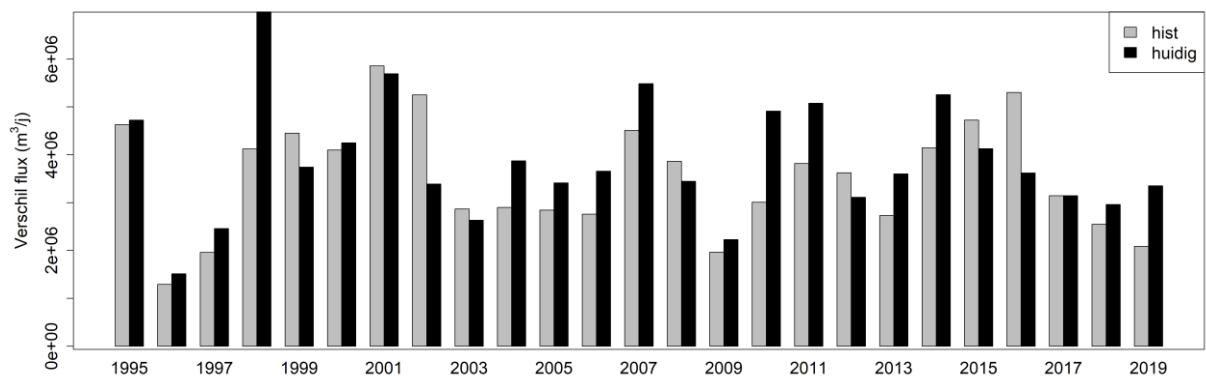
Figuur 25 Flux van en naar het afwateringsstelsel in de scenario's 1, 2b, 3 en 4b met winning op locatie 12.



Figuur 26 Flux naar het ontwateringsstelsel in de scenario's 1, 2b, 3 en 4b met winning op locatie 12.



Figuur 27 Totale jaarlijkse flux (m^3/j) naar het af- en ontwateringsstelsel in de scenario's 1, 2b, 3 en 4b.

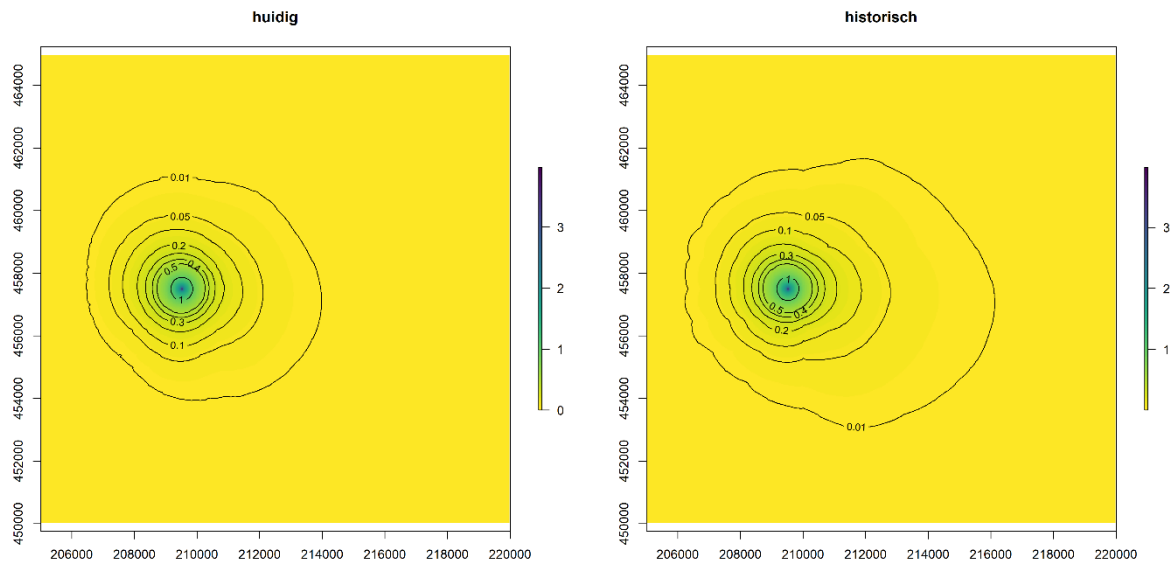


Figuur 28 Verschil in totale flux naar het af- en ontwateringsstelsel (m^3/j) voor de historische waterhuishoudkundige situatie zonder en met winning (grijs) en voor de huidige waterhuishoudkundige situatie zonder en met winning (zwart).

3.3.5 Effect van de positie van de winning in het landschap

Het effect van de winning op de freatische grondwaterstanden is zowel in de huidige als de historische waterhuishoudkundige situatie sterk afhankelijk van de locatie van de winning. Als de winning in het lagergelegen deel plaatsvindt, is het verschil in GLG en GHG-daling tussen de historische en huidige waterhuishoudkundige situatie kleiner. In de historische waterhuishoudkundige situatie treedt voor de GHG een verlaging van 5 cm of meer op over een oppervlak van 23.4 km² ten opzichte van 13.6 km² in de huidige waterhuishoudkundige situatie. Voor de GLG (Figuur 29) gaat het om een oppervlak van 21 km² in de historische waterhuishoudkundige situatie en 17.4 km² in de huidige waterhuishoudkundige situatie. Dit is wederom toe te schrijven aan de verdamping: ten opzichte van de huidige situatie is in de historische waterhuishoudkundige situatie door de hogere grondwaterstanden zowel met als zonder winning de gemiddelde verdamping over de hele periode hoger (en de grondwateraanvulling lager) in het invloedgebied van de winning (sectie 3.3.2). De verschillen in verdamping tussen de historische en huidige waterhuishoudkundige situatie zijn in het lager gelegen, nattere deel veel kleiner dan op de helling (Figuur 46 bijlage I.II). Hierdoor is er ook weinig verschil in

grondwateraanvulling rond de locatie van de winning. De verschillen in het effect van de winning zijn daarom ook kleiner dan bij de winning op locatie 12.

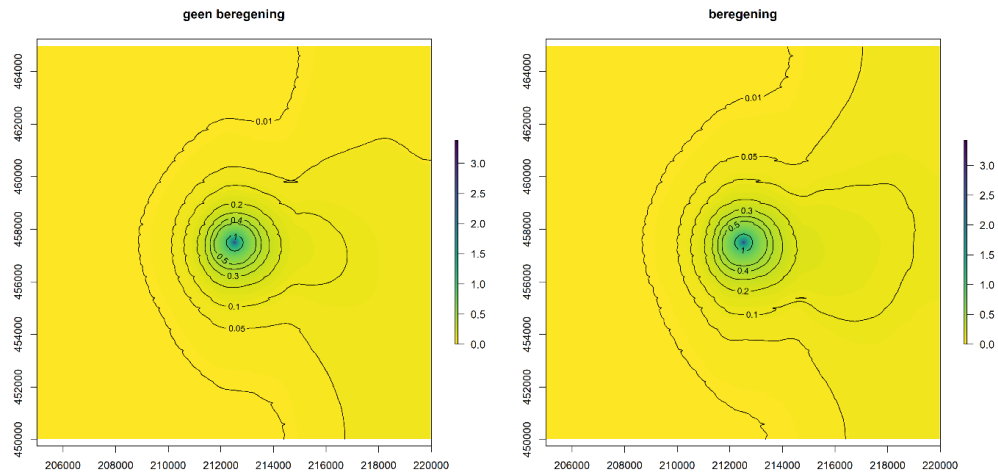


Figuur 29 Verschil in GLG waarden (in meters, periode 1995-2019) tussen simulaties zonder winning en met winning op locatie 8 voor de historische en huidige waterhuishoudkundige situatie (scenario 1 en 2a, 3 en 4a). Een positief getal geeft een hogere grondwaterstand in de situatie zonder winning aan.

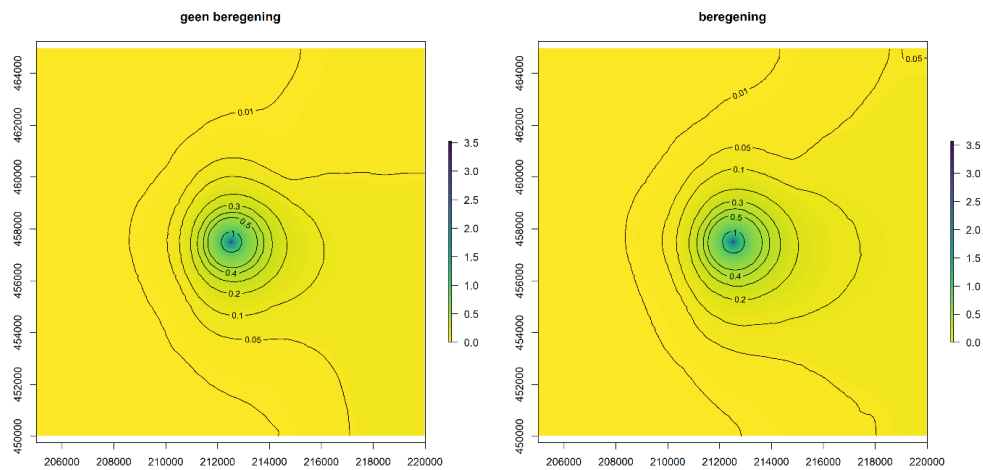
3.3.6 Berekening

Wanneer berekening uit grondwater toegepast wordt in de modelsimulaties, neemt de invloed van de winning op de grondwaterstanden toe (Figuur 30 en Figuur 31). Het oppervlak met een verlaging van de GLG van 5 cm of meer neemt toe van 73.5 km² naar 94.0 km². Het oppervlak met een GHG verlaging van 5 cm of meer neemt toe van 75.5 km² naar 96.6 km². De extra verlaging wordt deels veroorzaakt door de onttrekking voor berekening. Echter, aangezien de hoeveelheid onttrokken water voor berekening in het model afhangt van de vochtcondities, wordt deze hoeveelheid mede bepaald door de grondwaterstandsverlaging door de winning. Er kan hierdoor geen onderscheid gemaakt worden tussen verlaging door de winning en verlaging door extra onttrekkingen voor berekening.

Deels kan echter ook hier het effect weer worden verklaard uit een verandering van de grondwateraanvulling. De verdamping op de beregende percelen neemt toe en daarmee de grondwateraanvulling af (indirect via de lokale onttrekking) (Figuur 48, Bijlage I.II locaties 17, 18 en 20). Op locaties met berekening is de verdamping en daarmee de gewasproductie hoger dan in de situatie zonder berekening. Een agrariër die niet beregent uit grondwater terwijl zijn burens dat wel doen (bijvoorbeeld op locaties 15, 16 en 19) heeft echter een grotere verdampingsreductie en dus lagere opbrengst door de grondwaterstandsverlaging als gevolg van de onttrekkingen van de burens. De verdampingsreductie op deze percelen is (in ons scenario) echter kleiner dan de verdampingstoename en onttrekking van de beregende percelen, waardoor op de schaal van het intrekgebied van de winning de grondwateraanvulling afneemt. Deze afname van de grondwateraanvulling versterkt het effect van de grondwaterwinning. Niet-beregende agrariërs worden dus geconfronteerd met een groter effect van de winning door naburige wel-beregende agrariërs.



Figuur 30 Verschil in GHG waarden (in meters, periode 1995-2019) tussen simulaties zonder winning en met winning op locatie 12 voor situatie met berekening en zonder berekening (scenario 1 en 2b, 7 en 8). Een positief getal geeft een hogere grondwaterstand in de situatie zonder winning aan.



Figuur 31 Verschil in GLG waarden (in meters, periode 1995-2019) tussen simulaties zonder winning en met winning op locatie 12 voor situatie met berekening en zonder berekening (scenario 1 en 2b, 7 en 8). Een positief getal geeft een hogere grondwaterstand in de situatie zonder winning aan.

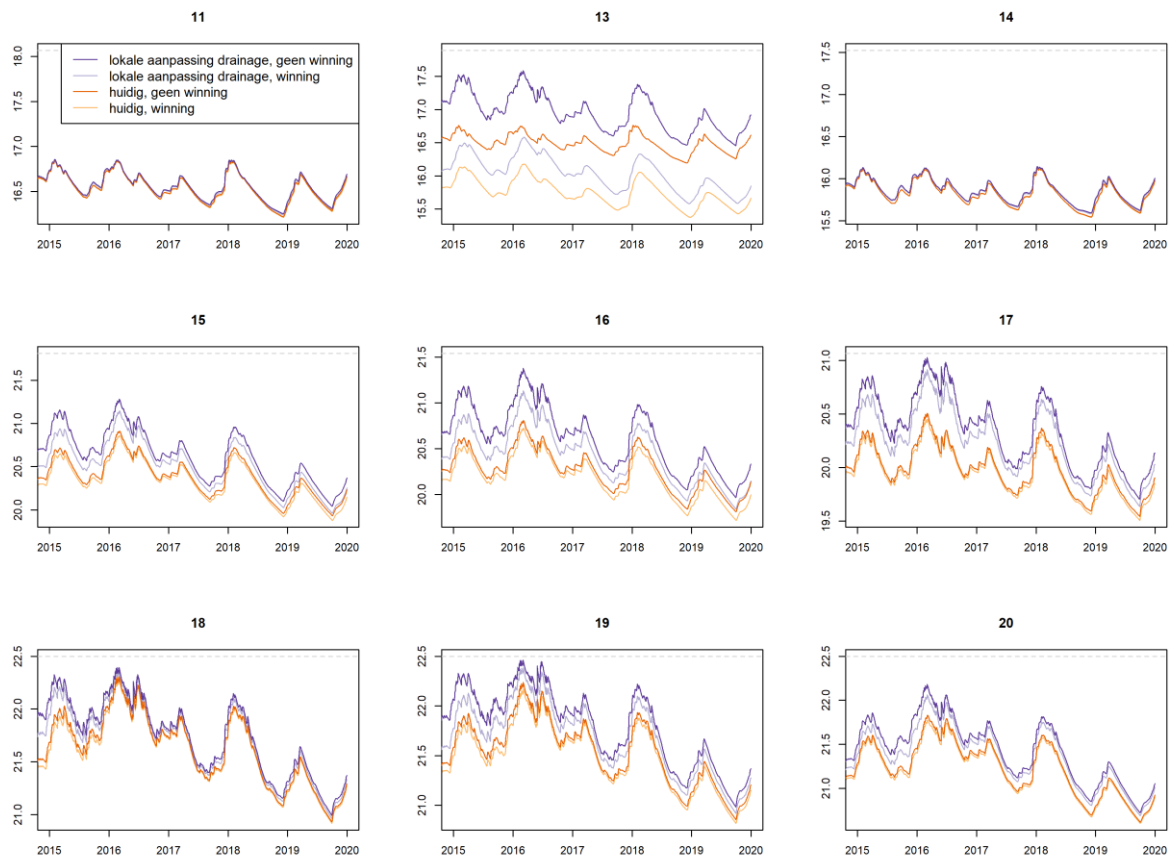
3.3.7 Lokale aanpassing aan waterhuishouding

Grootschalige aanpassing van af- en ontwatering op landschapsschaal is wellicht niet overal realistisch en zal in de lage delen van het landschap voor vernatting zorgen. Lokale maatregelen rond de winning zijn mogelijk wel haalbaar. Er zijn twee scenario's doorgerekend met alleen lokale aanpassingen aan de waterhuishouding rond de winning op locatie 12.

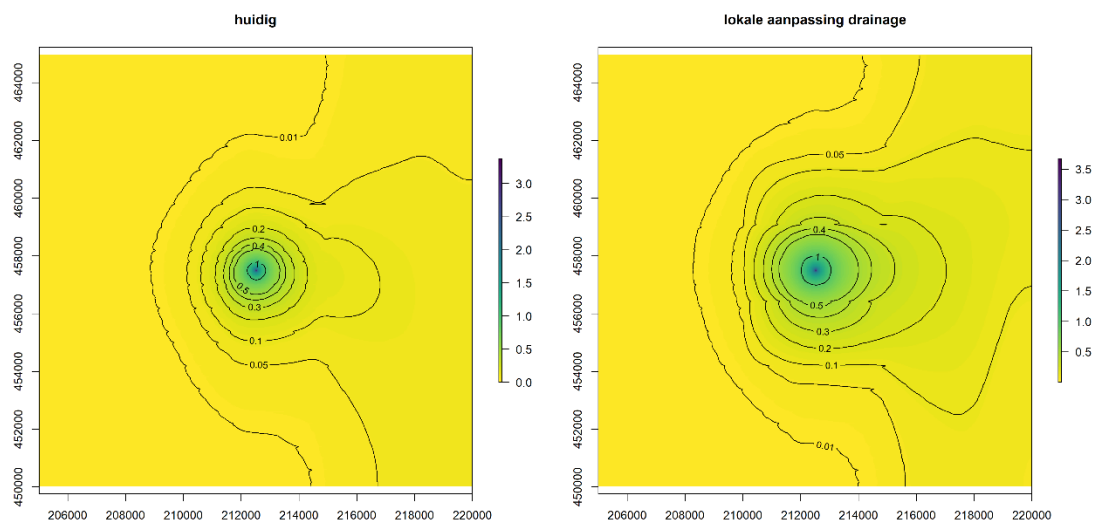
1. Huidige waterhuishoudkundige situatie met lokale aanpassing naar historische waterhuishoudkundige situatie

Door de lokale afname in de dichtheid van het af- en ontwateringsstelsel nemen de grondwaterstanden toe in het gebied rond de winning en in de hoger gelegen delen (Figuur 32). De verschillen zijn minder groot dan bij aanpassingen in het hele model domein, maar bereiken nog steeds waarden van enkele decimeters. Hoewel de absolute grondwaterstanden hoger zijn, is het effect van de winning op grondwaterstandsverlagingen ook bij alleen lokale aanpassingen groter. De oppervlakte binnen de 5 cm contour voor de GHG neemt toe van 75.5 naar 110.4 km² (Figuur 33). Voor de GLG neemt de oppervlakte toe van 73.5 naar 109 km² (Figuur 34). Voor de GLG is dit een vergelijkbare toename als bij een aanpassing over het hele model domein (107.3 km²), voor de GHG is dit nog een extra toename ten opzichte van de aanpassing in het hele model domein (94.3 km²). Door de lokale aanpassing treedt er minder natschade op, waardoor de totale verdamping in het gebied rond de winning en de

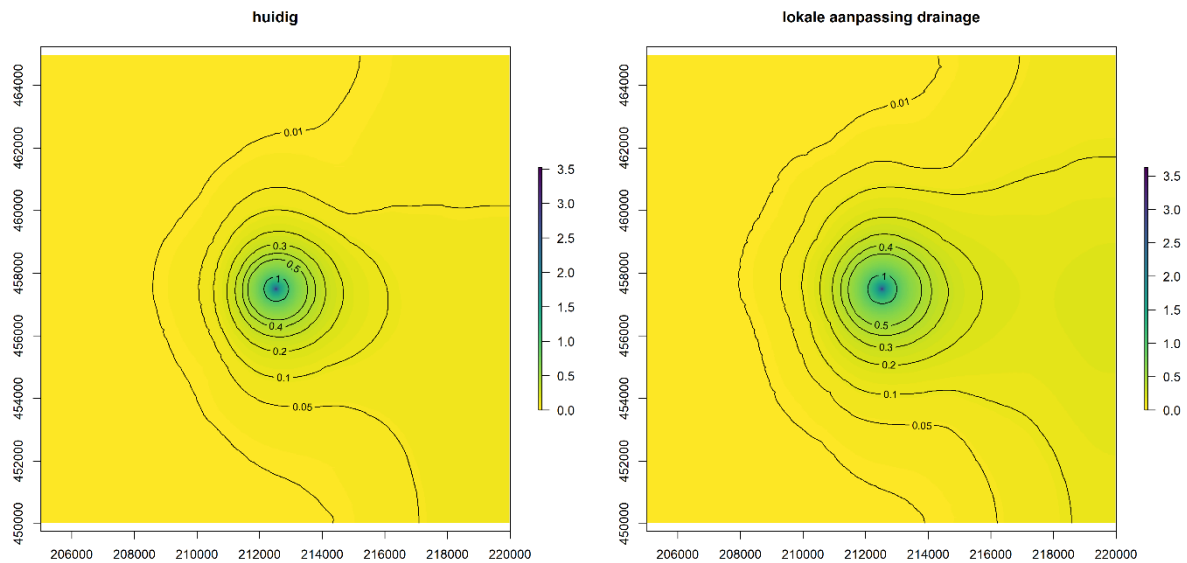
hoger gelegen delen hoger is (Figuur 49) en de grondwateraanvulling lager. Dit vergroot de oppervlakte waarin effect van de winning plaatsvindt.



Figuur 32 Gesimuleerde grondwaterstanden (m +NAP) voor de scenario's met lokale aanpassing (paarse lijnen) en zonder (oranje lijnen) zonder winning en met winning bij locatie 12 (scenario's 9, 10, 3 en 4b) voor een deel van de locaties. Gestippelde grijze lijn geeft het maaiveld weer.



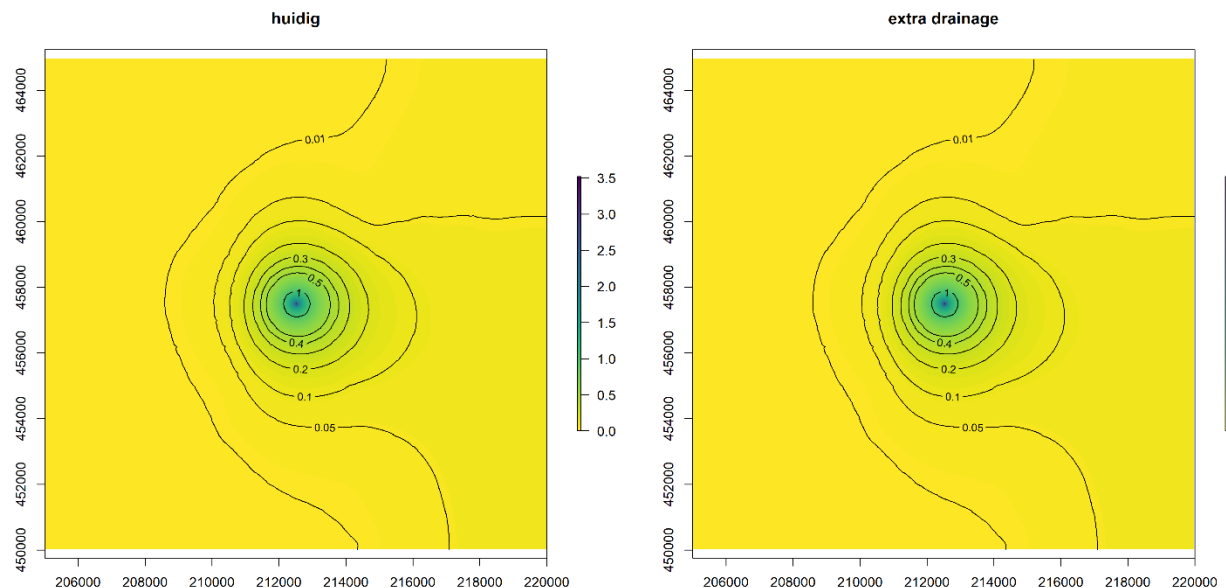
Figuur 33 Verschil in GHG waarden (in meters, periode 1995-2019) tussen simulaties zonder winning en met winning voor de huidige waterhuishoudkundige situatie en de huidige waterhuishoudkundige situatie met een lokale aanpassing naar de historische waterhuishouding (verschil tussen scenario 3 en 4b en tussen scenario 9 en 10). Een positief getal geeft een hogere grondwaterstand in de situatie zonder winning aan.



Figuur 34 Verskil in GLG waarden (in meters, periode 1995-2019) tussen simulaties zonder winning en met winning voor de huidige waterhuishoudkundige situatie en de huidige waterhuishoudkundige situatie met een lokale aanpassing naar de historische waterhuishouding (verschil tussen scenario 3 en 4b en tussen scenario 9 en 10). Een positief getal geeft een hogere grondwaterstand in de situatie zonder winning aan.

2. Huidige waterhuishoudkundige situatie met lokaal extra drainage

De extra drainage in het invloedgebied van de winning heeft vrijwel geen effect op de grondwaterstanden in het gebied (Figuur 35). Het oppervlak van het 5 cm contourgebied voor de GLG blijft gelijk met 73.5 km² en voor de GHG neemt het oppervlak af van 75.5 km² naar 75.4 km². De grondwaterstanden in het gebied met aanpassingen blijven vrijwel continu onder het drainageniveau waardoor nagenoeg geen effecten optreden van intensivering van de drainage.



Figuur 35 Verskil in GLG waarden (in meters, periode 1995-2019) tussen simulaties zonder winning en met winning voor de huidige waterhuishoudkundige situatie (links) en de huidige waterhuishoudkundige situatie met lokaal (rond de winning) extra drainage (rechts) (verschil tussen scenario 3 en 4b en tussen scenario 11 en 12). Een positief getal geeft een hogere grondwaterstand in de situatie zonder winning aan.

3.4 Discussie regionale modellering

3.4.1 Scenarioberekeningen

Met behulp van een regionaal model is getracht meer inzicht te verkrijgen in de effecten van veranderingen in de waterhuishouding op het effect van een drinkwaterwinning inclusief regionale terugkoppelingen. Hiervoor is uitgegaan van een gebied met kenmerken van pleistoceen (Oost) Nederland. Net zoals de modelstudies beschreven in Cirkel en Krajenbrink (2022) gaat het hierbij nadrukkelijk om scenario's. De studie is gericht op het in beeld brengen van effecten van een anders vormgegeven af- en ontwateringsstelsel met het historische systeem als referentie. Er is niet getracht om de gehele historische hydrologische situatie exact na te bootsen, neerslag en potentiële verdamping zijn bijvoorbeeld in de scenario's gelijk gehouden. Met het regionale model is onderzocht wat de verschillen in freatische standen zijn tussen een situatie met de historische waterhuishoudkundige situatie en een situatie met de huidige waterhuishoudkundige situatie. Vervolgens is onderzocht in hoeverre een ander verlagingsspatroon wordt gevonden voor een winning in de historische waterhuishoudkundige situatie. Ten slotte is gezien de sterke toename van berekening uit grondwater onderzocht hoe deze berekeningseffecten doorwerken op niet beregende gebieden, zowel met als zonder invloed van een drinkwaterwinning.

3.4.2 Invloed aanpassing waterhuishouding op freatische standen en waterbalans

In lijn met de in Cirkel en Krajenbrink (2022) genoemde studies ligt het freatische vlak in de historische waterhuishoudkundige situatie enkele decimeters hoger dan in de huidige situatie. In het gebied met de bekeerdersgronden bevindt het freatisch vlak zich in de winter langdurig aan- of boven maaiveld in de historische waterhuishoudkundige situatie. In de huidige waterhuishoudkundige situatie bevinden de freatische standen zich in dit gebied ook in de winter beneden maaiveld. Als in de historische waterhuishoudkundige situatie watergangen droogvallen zakken de freatische standen eveneens diep weg. Dit is in de modelsimulaties bijvoorbeeld zichtbaar in de jaren 2018-2020. Op een aantal locaties neemt het verschil tussen de standen voor de simulaties met de huidige waterhuishouding en die met de historische waterhuishouding sterk af gedurende deze periode. De verklaring hiervoor is het terugvallen naar de regionale drainagebasis (i.e. de rivier/beek en naastgelegen lage delen in het model) als de lokale watergangen droogvallen. Dit effect is in lijn met het door Bon (1967) en Warmerdam (1967) in de jaren 1960 gemeten (Cirkel & Krajenbrink, 2022) en met de SWAP-simulaties (par. 2.2.3) gevonden afnemende effect van aanpassingen in de waterhuishouding bij diepe standen. Groot verschil met de SWAP-simulaties is echter dat in het regionale model ook de laagste standen zijn gedaald. Het regionale model geeft hiermee een realistischer beeld omdat extra ontwatering lager in het systeem doorwerkt op plekken hogerop. De ordegrrootte (enkele dm) van de berekende dalingen sluit goed aan bij de op basis van historisch kaartmateriaal van grondwatertrappen afgeleide dalingen door Knotters & Jansen (2005).

Als wordt ingezoomd op de waterbalanstermen blijkt dat op jaarbasis in de historische waterhuishoudkundige situatie beduidend meer neerslag uit het systeem verdwijnt door verdamping dan in de huidige waterhuishoudkundige situatie in het gebied rond de winning. In de huidige waterhuishoudkundige situatie wordt dit verschil in hoeveelheid water afgevoerd door met name het diepere afwateringssysteem; het gaat hierbij vooral om afvoer in de nattere periodes van het jaar (herfst/winter). De afvoer van het afwateringssysteem verdubbelt in bepaalde perioden in de huidige waterhuishoudkundige situatie ten opzichte van de historische waterhuishoudkundige situatie. Dit is in lijn met de observaties van Bon (1967) waar de afvoer meer dan 100% toenam na 'verbetering' van het beekstelsel. Het ontwateringssysteem valt gedurende langere periodes droog in de huidige waterhuishouding, terwijl dit systeem in de historische waterhuishouding vrijwel altijd watervoerend blijft. Water wat valt in het natte halfjaar wordt in de historische waterhuishoudkundige situatie dus langer vast gehouden en komt ten goede aan diffuse afvoer, (langdurig) hogere grondwaterstanden en verdamping. Hiertegenover staat echter wel dat zeker in het laaggelegen bekeerdersgrondegebied de grondwaterstanden langdurig aan of zelfs boven maaiveld staan. Ook deze resultaten zijn in lijn met historische observaties in Oost-Nederland.

3.4.3 Effect van de winning in de historische en huidige waterhuishoudkundige situatie

Als met een voor Oost-Nederlandse drinkwaterwinningen representatieve hoeveelheid wordt onttrokken, ontstaat een onttrekkingskegel met een maximale diepte van iets meer dan 3.5 meter. Het absolute niveau van de freatische grondwaterstanden verschilt echter sterk tussen de huidige en historische waterhuishouding en tussen droge en natte jaren. In natte jaren is het niveau in het hart van de winning in de historische waterhuishoudkundige situatie vergelijkbaar met het niveau zonder winning in de huidige waterhuishoudkundige situatie (situatie met winning midden in het gebied). In droge jaren zakken de freatische standen ook in de historische waterhuishoudkundige situatie met winning diep weg. Bij voortdurende droogte daalt het freatisch niveau zelfs in de richting van het niveau van de huidige waterhuishoudkundige situatie met winning. Aanpassingen van de waterhuishouding richting de historische waterhuishoudkundige situatie zijn dus als compensatie alleen effectief als er voldoende grondwateraanvulling optreedt.

Het belang van grondwateraanvulling wordt nog sterker duidelijk als we het effect van de winning (i.e. de aan de winning toe te schrijven verlaging van de grondwaterstand) beschouwen. Een winning die start in de historische waterhuishoudkundige situatie blijkt een groter verlagingseffect te veroorzaken dan een winning die start in de huidige waterhuishoudkundige situatie (opp. binnen 5 cm GLG verlagingscontour is 73.5 km² in de huidige en 107.3 km² in de historische waterhuishoudkundige situatie). Dit wordt veroorzaakt door het beter op peil blijven van de vochtcondities in de wortelzone in de historische waterhuishoudkundige situatie waardoor minder verdampingsreductie en minder grondwateraanvulling optreedt; het effect op de gewasproductie is dus kleiner in de historische waterhuishoudkundige situatie. Bovenstaande is berekend voor de winning halverwege het model. Als de winning in het laaggelegen natte deel van het model wordt geplaatst treden de verschillen nog steeds op maar zijn die aanzienlijk kleiner (opp. binnen 5 cm GLG verlagingscontour respectievelijk 17.4 vs. 21 km²). De totale jaarlijkse flux naar het oppervlaktewater neemt bij een grondwaterwinning van 4 miljoen m³/j gemiddeld over de hele periode af met 3.86 miljoen m³/j en 3.54 miljoen m³/j voor respectievelijk de huidige en historische waterhuishoudkundige situatie. Met andere woorden, in de huidige waterhuishoudkundige situatie gaat de grondwateronttrekking meer ten koste van de afvoer dan in de historische waterhuishoudkundige situatie.

Een freatische winning zal freatische grondwaterstanden lokaal (fors) verlagen. Het is dan ook vooral interessant om te onderzoeken of lokale ingrepen in de waterhuishouding effectief kunnen zijn. Uit de modelberekeningen blijkt dat ook het alleen binnen het invloedsgebied van de winning aanpassen van de af- en ontwatering een fors effect heeft op de freatische grondwaterstanden. Door de lokale afname in de dichtheid van het af- en ontwateringsstelsel nemen de grondwaterstanden toe in het gebied rond de winning en in de hoger gelegen delen. De verschillen zijn minder groot dan bij aanpassingen in het hele modeldomein, maar bereiken nog steeds waarden van enkele decimeters. Een minder intensieve ontwatering binnen de onttrekkingskegel van een freatische winning lijkt hiermee een effectieve mitigerende maatregel. Ook bij lokale aanpassing naar de historische situatie resulteert dit in een groter effect van de winning op de freatische standen (opp. binnen 5 cm GLG verlagingscontour neemt toe van 73.5 km² naar 109 km²). Voor de GHG is het effect zelfs nog wat sterker bij lokale aanpassing. Dus hoewel de absolute freatische grondwaterstanden stijgen en er minder verdampingsreductie door droogte optreedt neemt het invloedsgebied van de winning op de standen wel toe. Aanleg rond de winning van extra ondiepe drainage ter voorkoming van natschade blijkt vrijwel geen effect te hebben op de freatische standen en het effect van de winning, doordat de grondwaterstand veelal lager is dan de ligging van de drainage.

3.4.4 Effect van beregening

In de huidige situatie is beregening eerder regel dan uitzondering. In gebieden zonder wateraanvoer zal deze beregening plaatsvinden vanuit het grondwater. Om de impact van beregening te kwantificeren op de verlaging door de winning, maar ook op verlagingen bij omliggende niet-beregende percelen is een blokpatroon van beregende percelen aangenomen. De beregening blijkt een fors effect te hebben op het verlagingsbeeld van de winning: van een oppervlak van 73.5 km² binnen de 5 cm GLG-verlagingscontour groeit het oppervlak bij

beregening naar 94 km². Ook hier is de oorzaak van deze toename een afname van de grondwateraanvulling als gevolg van beregening. Een agrariër die niet beregent krijgt bij beregenende buren te maken met een groter verlagingseffect van de winning en daarbij nog met de lokale verlagingseffecten van de onttrekkingen van zijn buren. We kunnen deze effecten niet van elkaar onderscheiden, omdat het systeem niet-lineair is en omdat de totale hoeveelheid water die wordt onttrokken voor beregening afhankelijk is van de vochtcondities en daarmee van de verlaging door de winning. In de simulaties met de winning zal dus meer water onttrokken worden voor beregening dan in de simulaties zonder winning. Omdat we in deze iMod versie de beregeningsonttrekkingen alleen diffuus (putje per beregende gridcel) konden invoeren is het niet goed mogelijk om de lokale verlagingseffecten van beregeningsonttrekkingen te evalueren.

4 Conclusies en aanbevelingen

4.1 Conclusies

In deze paragraaf geven we puntsgewijs antwoorden op de in paragraaf 1.2 geformuleerde onderzoeksvragen

- *Wat is het effect van de wijzigingen in het oppervlaktewatersysteem op freatische grondwaterstanden?*

Uit de literatuurstudie naar effecten van ingrepen in de waterhuishouding kwam een verlaging van de hoogste standen met meerdere decimeters en een verlaging van de laagste standen met enkele centimeters tot enkele decimeters naar voren (Cirkel en Krajenbrink, 2022). Het GHG-effect lijkt dus aanmerkelijk groter dan het GLG-effect. Dit beeld wordt bevestigd door de SWAP-berekening met een dichte onderrand. Als er wel interactie wordt toegestaan met een onderliggende aquifer door het opleggen van een diepe stijghoogte en weerstand als onderrand wordt het effect van intensievere ontwatering in de SWAP berekeningen sterk gedompt, resulterend in een GHG effect van maximaal 25 cm en een GLG effect wat maximaal is bij diepe stijghoogtes aan maaiveld (hoge kwel), maar snel afneemt tot bij diepe stijghoogtes van 85 cm-mv geen effect meer zichtbaar is. Dit uit zich ook in een veel groter effect op de natschade door zuurstofstress (gerelateerd aan hoge grondwaterstanden) dan op de droogtestress (gerelateerd aan lage grondwaterstanden) in het uitgewerkte voorbeeld. Het beperkte GLG effect is verklaarbaar omdat in het SWAP-model de diepere freatische standen afhankelijk van de voedingsweerstand meer of minder sterk worden bepaald (gebufferd) door de (opgelegde) stijghoogte op de onderrand. In werkelijkheid treden er echter terugkoppelingen op naar het regionale systeem waarbij de daar optredende stijghoogtes mede bepaald worden door kwel en wegzijging naar en uit het freatische systeem. Als deze terugkoppelingen worden meegenomen zoals gedaan in het regionale iMod-model, blijken in het gedraineerde gebied ook de laagste standen te zijn gedaald. Echter ook hier zijn de effecten op de hoogste standen het grootst. In het laaggelegen deel staan de freatische grondwaterstanden langdurig aan of boven maaiveld bij een historische waterhuishoudkundige situatie. In het niet gedraineerde deel zijn de effecten op de laagste standen het kleinst. De verschillen tussen de grondwaterstanden in de historische en huidige waterhuishoudkundige situatie zijn kleiner gedurende droge jaren. Dit wordt veroorzaakt door het droogvallen van waterlopen en terugvallen op de regionale drainagebasis. GHG-effecten worden voornamelijk bepaald door de lokale dimensies van het oppervlaktewatersysteem, de GLG wordt veel meer bepaald door grootschaligere veranderingen in de omgeving. Zowel uit de SWAP-berekeningen als uit de resultaten van het regionale iMod-model blijkt dat in de historische waterhuishoudkundige situatie water langer vast wordt gehouden in het grondwatersysteem. In de historische waterhuishoudkundige situatie blijft de basisafvoer in droge periodes daardoor beter op peil.

- *Is het wineffect op de freatische grondwaterstanden anders bij de historische waterhuishoudkundige situatie dan bij de huidige situatie?*

In de SWAP-berekeningen zijn duidelijk, door verschillen in drainageniveaus veroorzaakte, niet-lineaire effecten zichtbaar als de diepe stijghoogte wordt gevarieerd. In deze aanpak ontbreken echter regionale terugkoppelingen en beïnvloedt de gekozen diepe stijghoogte sterk het freatische verloop. Voor een goede analyse van het effect is dan ook een regionaal grondwatermodel noodzakelijk. Uit de vervolgens toegepaste iMod modellering voor een fictief gebied in Oost-Nederland blijkt dat de freatische standen ook binnen het invloedsgebied van de winning in de historische waterhuishoudkundige situatie minder diep wegzakken. Wel wordt dit verschil snel kleiner gedurende droge jaren als sloten ook in de minder intensief ontwaterde situatie

droogvallen. Als wordt gekeken naar de aan de winning toe te schrijven verlaging van de freatische grondwaterstand, dan blijkt een winning die start in de historische waterhuishoudkundige situatie een groter verlagingseffect te veroorzaken dan een winning die start in de huidige waterhuishoudkundige situatie. Het oppervlak binnen de GLG 5 cm verlagingcontour is 107.3 km² voor de historische waterhuishoudkundige situatie vs. 73.5 km² in de huidige. Dit wordt veroorzaakt door verschuivingen in de uitgaande termen van de waterbalans tussen verdamping en afvoer resulterend in verschillen in de grondwateraanvulling. In de historische waterhuishoudkundige situatie is er minder verdampingsreductie en daarmee minder grondwateraanvulling binnen de kegel; dit vergroot het invloedsgebied. Dit effect is uiteraard afhankelijk van de positie van de winning in de landschapsgradiënt en prominent in het intermediaire deel van de onderzochte hoogtegradiënt. In het lage natte deel is de verlagingkegel in beide scenario's kleiner, maar zijn ook de verschillen kleiner doordat de vochtbeschikbaarheid ook in de huidige waterhuishoudkundige situatie op peil blijft. In het hoge droge deel zijn in beide situaties de standen al zo laag dat ook daar het verschil kleiner is. Ondanks de lagere standen is het absolute wineffect op de freatische grondwaterstand door de waterhuishoudkundige aanpassingen van de historische situatie naar de huidige dus juist kleiner geworden.

- *Hoe werkt landbouwberekening door op het wineffect?*

In het regionale iMod-model is in het basisscenario voor de huidige condities geen berekening meegenomen. In werkelijkheid wordt echter op grote schaal berekend, ook uit grondwater. Uit de modellering blijkt berekening uit grondwater een fors effect te hebben op het verlagingbeeld van de winning. Doordat berekening leidt tot een lagere grondwateraanvulling, wordt het invloedsgebied van een winning vergroot. Een niet berekend buurperceel mist de compensatie van de transpiratiereductie, heeft te maken met verlagingseffecten van de beregeningsonttrekking(en) en wordt tevens geconfronteerd met een versterkt effect van de winning op de grondwaterstanden. Hierdoor ontstaat een extra prikkel om ook te gaan beregenen waardoor de druk op het watersysteem verder toeneemt.

- *Kan door terugbrengen van de historische waterhuishoudkundige situatie het wineffect worden gemitigeerd?*

Het grootschalig terugbrengen van historische hydrologische kenmerken (grotere slootafstanden, ondiepere sloten) heeft een fors effect op de freatische standen. Uit de regionale modellering blijkt dat de verdamping in de historische waterhuishoudkundige situatie ook met winning gelijk of hoger is dan in de huidige situatie, er treedt dus minder transpiratiereductie op. De impact van de winning op landbouw en natuur is dus kleiner ook al is het aan de winning toe te wijzen verlagingseffect op de freatische grondwaterstand groter in de historische waterhuishoudkundige situatie. De aanpassingen hebben echter ook een keerzijde: er treedt in het lage deel van het landschap aanzienlijke vernatting op met langdurige inundaties. De af- en ontwatering kan echter ook alleen binnen het invloedsgebied van de freatische winning worden aangepast. Bij toepassing op de winlocatie midden in het modeldomein resulteert een lokale aanpassing naar de dimensies van de historische waterhuishoudkundige situatie in een stijging van de freatische grondwaterstanden in het gebied rond de winning en in de hoger gelegen delen. De stijgingen zijn minder groot dan bij aanpassingen in het hele modeldomein, maar bereiken nog steeds waarden van enkele decimeters. In de lage delen van het gebied zijn de stijgingen beperkt in dit scenario waardoor langdurige inundaties uitblijven. Een minder intensieve ontwatering binnen de onttrekkingskegel van een freatische winning lijkt hiermee een effectieve mitigerende maatregel voor door de winning veroorzaakte verdroging.

Samenvattend kan geconcludeerd worden dat wijzigingen in de waterhuishouding (het af- en ontwateringsstelsel) een fors verlagend effect hebben op de freatische grondwaterstanden. Zowel de (schaarse) metingen als de modelsimulaties wijzen op verlagingen van meerdere decimeters bij een aanpassing naar een intensievere af- en ontwatering. De effecten zijn hierbij het grootst op de hoogste standen en minder groot, maar nog steeds aanzienlijk, op de laagste standen. Het is echter niet zo dat door aanpassing naar een

extensiever af- en ontwateringssysteem droogte geen probleem meer zal vormen. Uit de iMod-berekeningen komt naar voren dat in droge jaren (referentiejaren 2018-2020) de standen ook in de historische waterhuishoudkundige situatie ver kunnen uitzakken en zelfs de huidige waterhuishoudkundige situatie kunnen benaderen als sloten droogvallen. Een ander interessant resultaat is de beduidend lagere berekende winterafvoer in de historische waterhuishoudkundige situatie en de analogie van de afvoertoe name met de metingen aan de Lunterse beek door Bon in de jaren 1960. Het is dus mogelijk om water uit natte periodes langer vast te houden en vertraagd te laten afvoeren. Uiteraard komt dit bij grootschalige toepassing wel met de prijs van langduriger nattere omstandigheden en zelfs inundaties in de lage delen van het landschap. Een dergelijke transitie zal dan ook gepaard moeten gaan met een extensivering van het landbouwkundig gebruik of omzetting naar natuur in de laagste delen van het landschap. Het is echter ook mogelijk om meer lokaal aanpassingen door te voeren. Lokaal aanpassen van het af- en ontwateringsstelsel naar dimensies van de historische situatie binnen de onttrekkingskegel heeft een positief effect op de freatische standen en is daarmee een mogelijk effectieve mitigerende maatregel voor door de winning veroorzaakte verdroging. Door lokaal rond de winning aanpassingen te doen in de waterhuishouding treedt geen extreme vernatting op in de lage delen.

4.2 Aanbevelingen

- Door problemen met MetaSWAP was het in deze studie niet mogelijk om combinaties door te rekenen met andere vegetaties dan landbouwkundig gras. Een interessante aanvulling is het doorrekenen van andere landgebruiksvormen (bos, heide, bebouwing) al dan niet in combinatie met historische hydrologische kenmerken van het af- en ontwateringssysteem. Ook kan in een vervolg uit worden gegaan van dynamische gewasgroei om het effect van verlagingseffecten in meer detail te beschouwen.
- Berekening blijkt een fors effect te hebben op zowel standen als wineffect. In het beregeningsmodel in de gebruikte iMod-versie is het niet gelukt om berekening van meerdere cellen aan één onttrekkingspunt toe te wijzen. Het beregende water wordt dus diffuus onttrokken over het gehele beregende oppervlak. Voor het nader onderzoeken van het effect van lokale onttrekkingen moet dit aangepast worden.
- Het Lunterse beek stroomgebied lijkt een van de weinige gebieden in Nederland waar structureel onderzoek is verricht aan grondwaterstanden en afvoeren voor en na de aanpassingen aan het oppervlaktewaterstelsel. In deze studie is geput uit de rapportage van Bon (1967). Wellicht is er in de archieven nog ruwe data beschikbaar die in meer detail geanalyseerd kan worden.
- Door het aanpassen van de af- en ontwatering van historische naar huidige dimensies ontstaan verschillen in de flux naar het oppervlaktewaterstelsel, die van jaar tot jaar sterk kunnen verschillen. Deze verschillen hangen waarschijnlijk samen met voorafgaande weersomstandigheden en de toestand van het grondwatersysteem. Het is interessant om deze interacties nader te onderzoeken.

5 Referenties

Bon, J. (1967) De afvoer en berging in verband met beekverbetering, toegelicht aan het stroomgebied van de Lunterse beek, ICW-mededeling 107, Wageningen

Daldegan Balduino, C. (2020) Preventing hydrological drought in the Pleistocene uplands – a modeling experiment with managed aquifer recharge. MSc thesis, Utrecht University, Utrecht.

Cirkel, D.G. & H.J. Krajenbrink (2022) Invloed van historische ingrepen in de waterhuishouding en veranderingen in landgebruik op freatische grondwaterstanden; een literatuurstudie. BTO 2022.061, KWR Water Research Institute, Nieuwegein, The Netherlands

Deltares (2019). iMOD 5.0 (5.0). Deltares. <https://oss.deltares.nl/web/imod/hom>

Harbaugh, A. W. (2005). MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model—the Ground-Water Flow Process. <https://pubs.usgs.gov/tm/2005/tm6A16/PDF.htm>

KNMI (2014). KNMI'14-klimaatscenario's. URL: <http://www.klimaatscenario's.nl>.

Knotters, M. & Jansen, P.C. (2005) Honderd jaar verdroging in kaart. *Stromingen* 11 (4) pp19-32

Kroes J.G., J.C. van Dam, R.P. Bartholomeus, P. Groenendijk, M. Heinen, R.F.A. Hendriks, H.M. Mulder, I. Supit, P.E.V. van Walsum (2017) SWAP version 4 : theory description and user manual Wageningen Environmental Research, Wageningen.

Massop, H.Th.L. & J.W.J. van der Gaast (2009). Historical water management in the river basin of the Baaksche Beek and the adaptations to the water system as a result of change in land use. *Physics and Chemistry of the Earth* 34, 192-199.

Massop, H. Th.L. (2019) Historische data en hydrologie van de Baakse Beek *Stromingen* 33 (2019), Nr 1

Massop, H.Th.L. & De Wit, P.A.J.W (1994) Hydrologisch onderzoek naar de drainageweerstand van het tertiair ontwateringsstelsel in Oost-Gelderland

Philip, S.Y., Kew, S.F., van der Wiel, K., Wanders, N. and van Oldenborgh, G.J. (2020). "Regional differentiation in climate change induced drought trends in the Netherlands." *Environmental Research Letters* 15(9): 094081.

Van den Akker, C. (2014) Een fysische onderbouwing van de overdrachtsfactor; in: *Stromingen* JRG 20 nr 1

Van den Akker, C. (2015) De logaritmische U/h relatie in vrij afwaterende gebieden; interne notitie. Werkgroep Achtergrondverlaging

Van den Eertwegh, G., P. de Louw, J.-P. Witte, M. van Huijgevoort, R. Bartholomeus, D. van Deijl, J. van Dam, J. Hunnink, I. America, J. Pouwels, P. Hoefsloot, J. de Wit (2021). Droogte in zandgebieden van Zuid-, Midden- en Oost-Nederland : het verhaal - analyse van droogte 2018 en 2019 en bevindingen : eindrapport. KnowH2O.

Van der Gaast, J.W.J. & H.Th.L. Massop (2007) Reconstructie van de historische hydrologie. Pilotstudie voor een stroomgebied in hoog Nederland. Wageningen, Alterra-rapport 1466.

Van der Gaast, J.W.J., H.Th.L. Massop, H.R.J. Vroon & I.G. Staritsky (2006) Hydrologie op basis van karteerbare kenmerken. Wageningen, Alterra-rapport 1339.

Van Walsum, P. E. V. & Veldhuizen, A. A. (2011). MetaSWAP_V7_2_0 Rapportage van activiteiten ten behoeve van certificering met Status A. <https://edepot.wur.nl/193958>

Verruijt, A. (1970). Theory of Groundwater Flow. Macmillan, London.

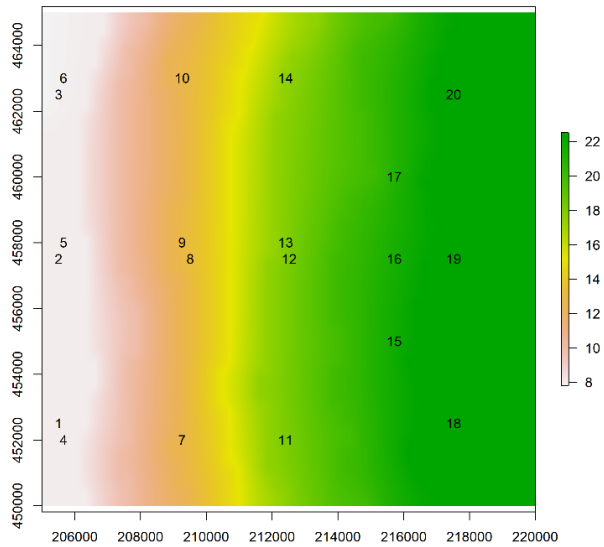
Warmerdam, P.M.M. (1967) Hydrological effects of drainage improvement in the Hupselse beek catchment area in the Netherlands, Nota 64 Department of Hydraulics and Catchment Hydrology, Agricultural University Wageningen, The Netherlands

Witte, J.P.M., W.J. Zaadnoordijk, D.G. Cirkel, I. Leunk & H.F.M. Aarts (2015). Grondwateraanvulling en achtergrondverlaging in de provincie Noord-Brabant. BTO 2015.055, KWR, Nieuwegein.

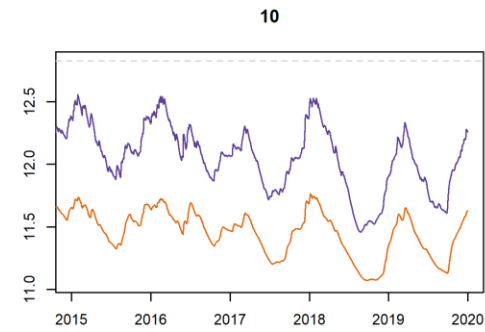
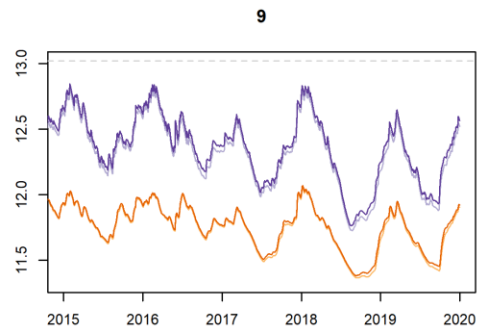
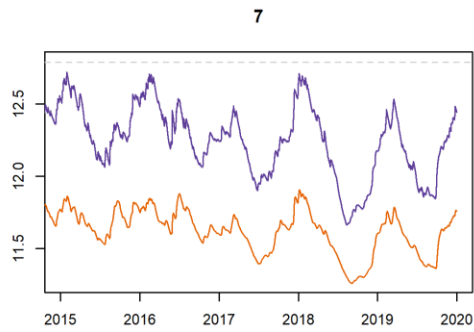
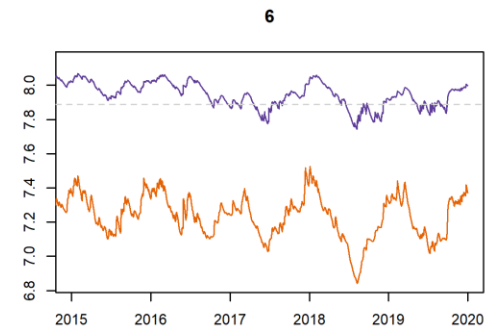
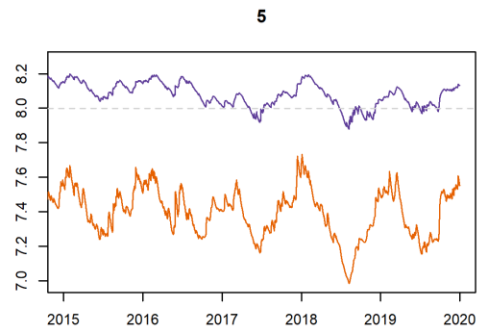
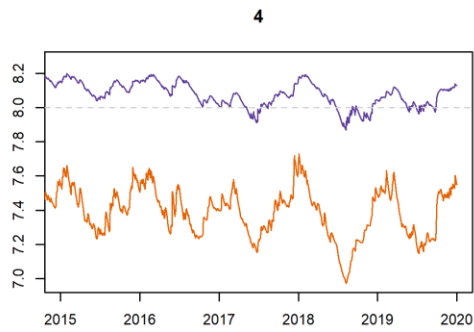
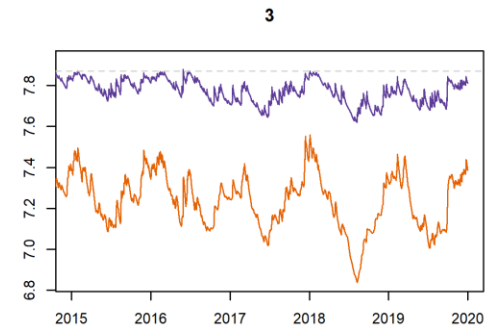
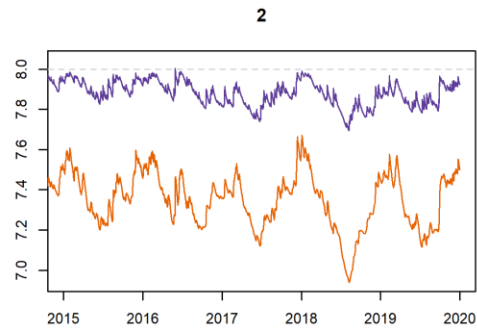
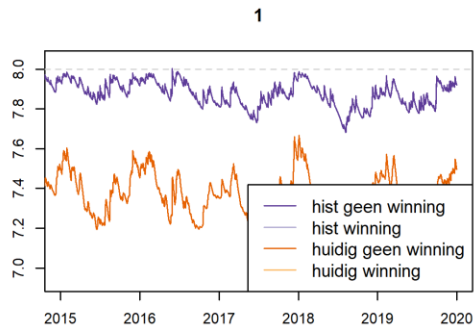
Witte, J.P.M., W.J. Zaadnoordijk & J.J. Buyse (2019). Forensic Hydrology Reveals Why Groundwater Tables in The Province of Noord Brabant (The Netherlands) Dropped More Than Expected. *Water* 11(3), 14p.
DOI:10.3390/w11030478

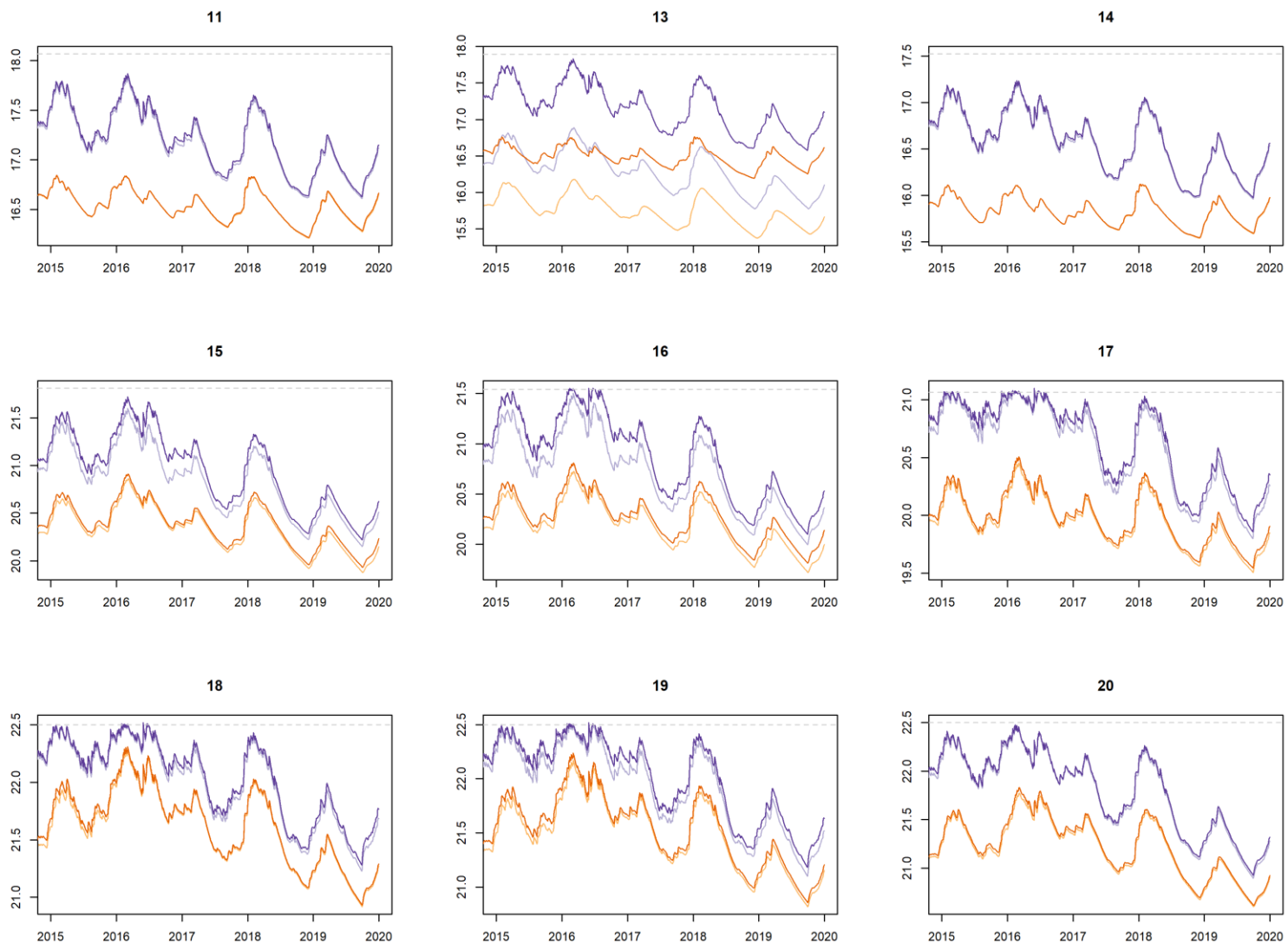
I Resultaten conceptueel regionaal model

I.1 Gesimuleerde freatische grondwaterstanden in de historische en huidige situatie met en zonder winning

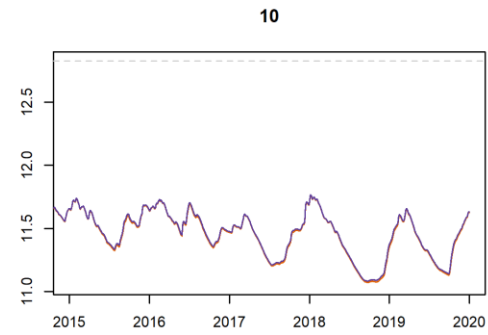
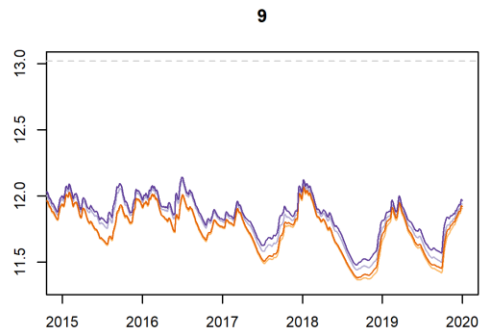
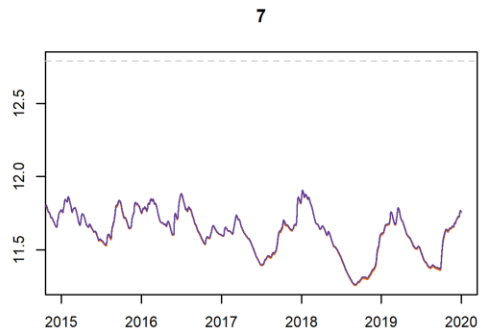
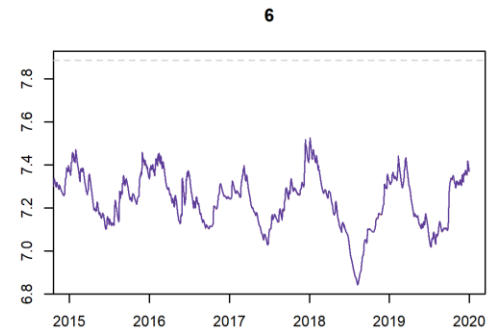
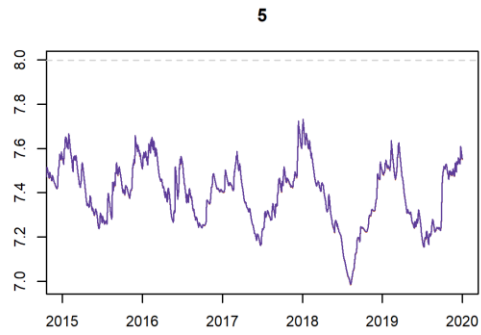
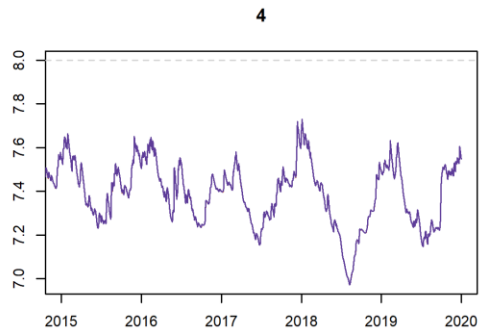
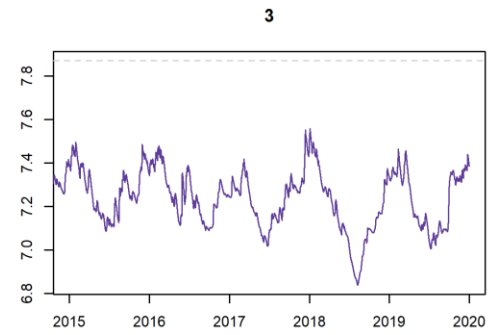
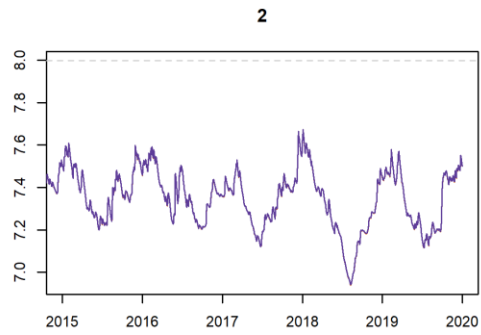
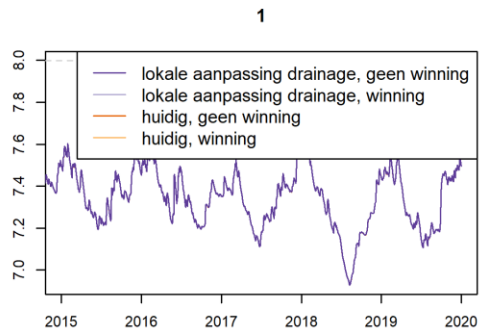


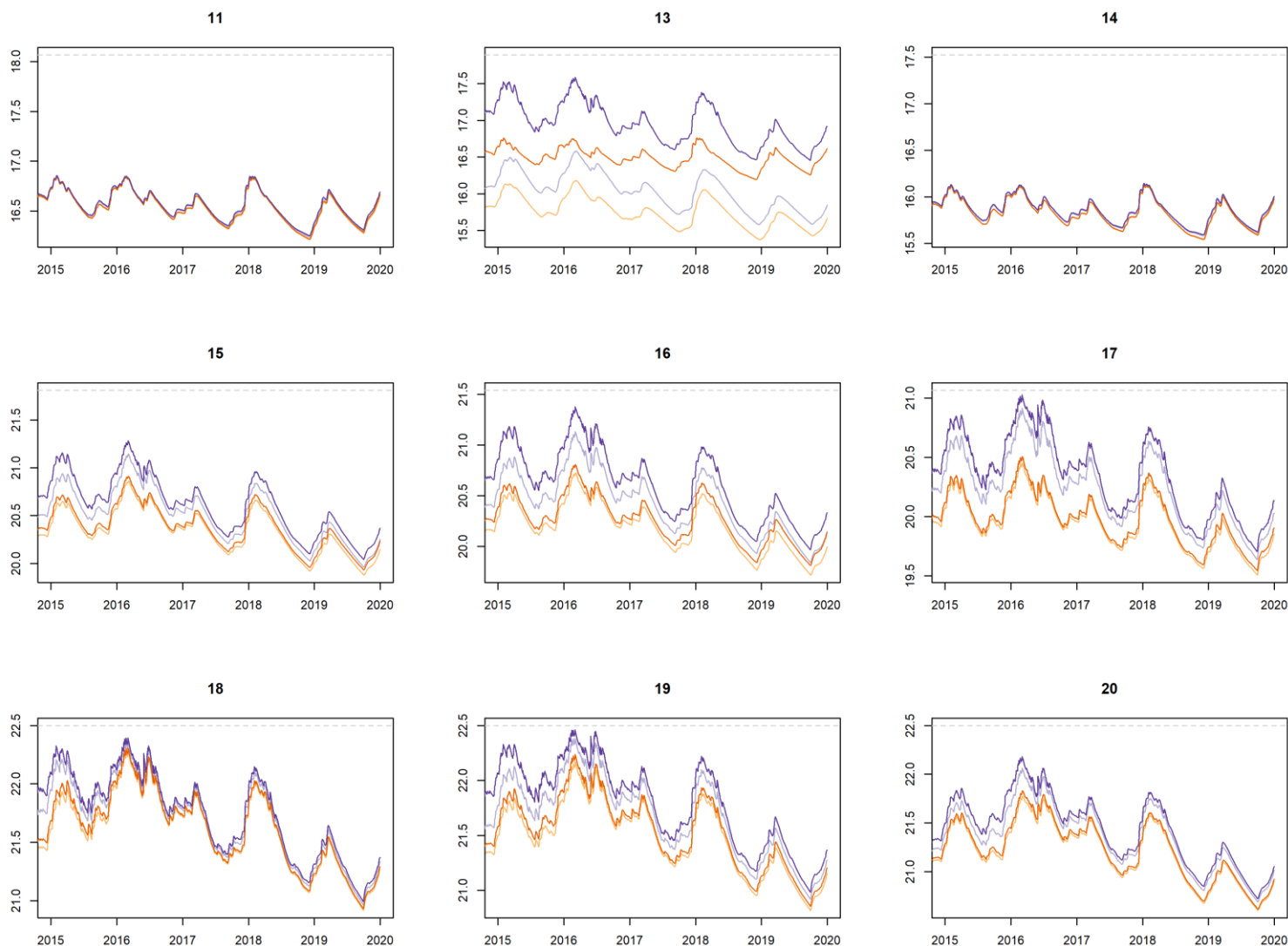
Figuur 36 Maaielveldhoogte in het model en locaties van de tijdseries voor grondwaterstanden.





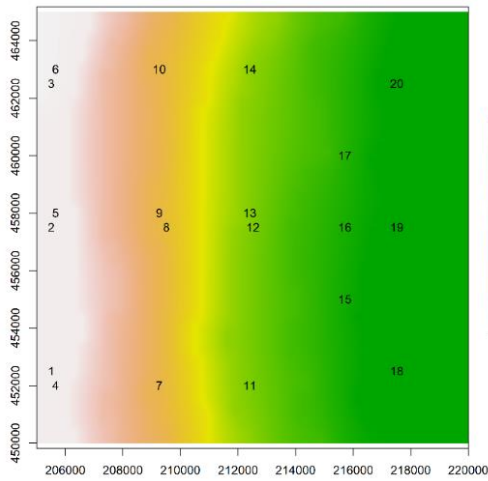
Figuur 37 Gesimuleerde grondwaterstanden (m +NAP) voor de scenario's in historische (paarse lijnen) en huidige (oranje lijnen) situatie zonder winning en met winning bij locatie 12 (scenario's 1, 2b, 3 en 4b). Gestippelde grijze lijn geeft het maiveld weer.



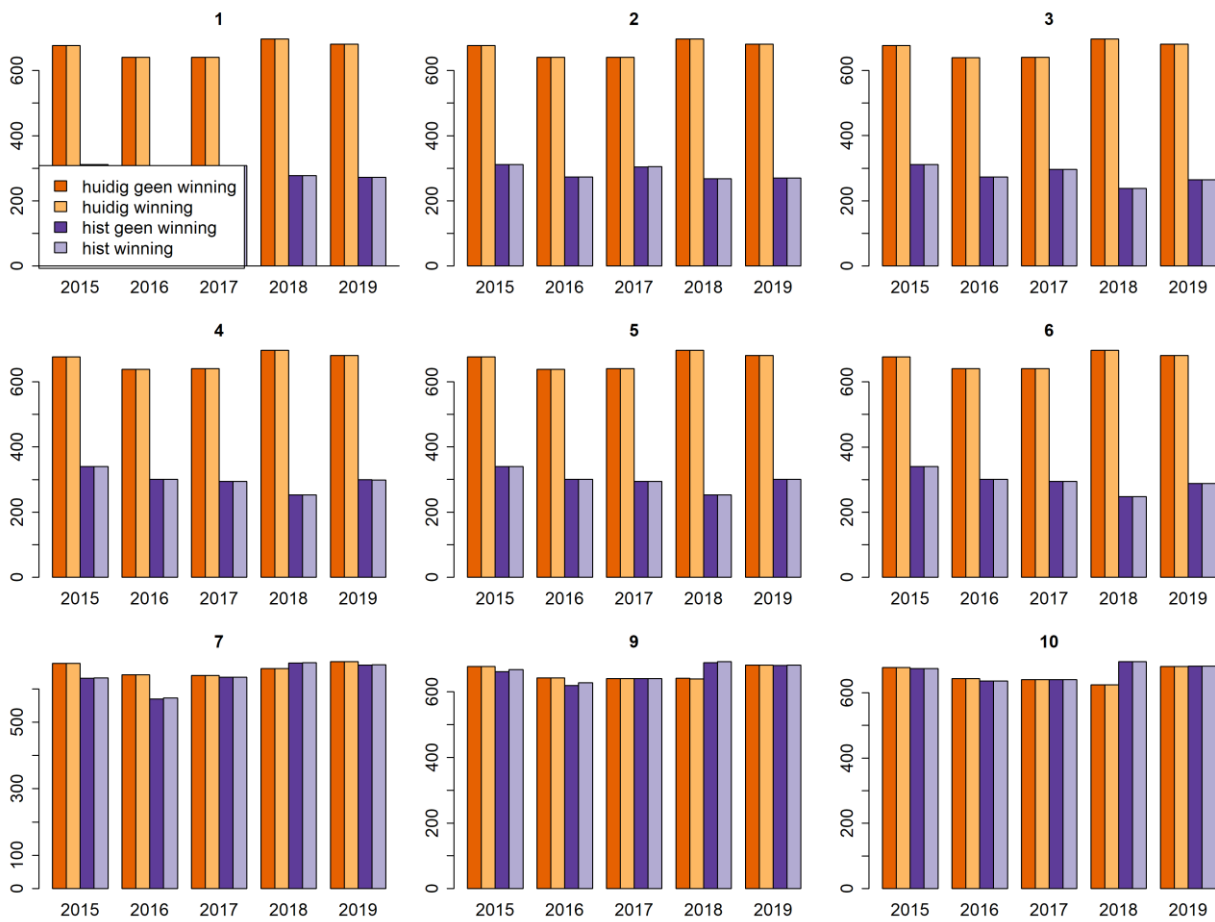


Figuur 38 Gesimuleerde grondwaterstanden (m +NAP) voor de scenario's met lokale aanpassingen naar de historische waterhuishoudkundige situatie (paarse lijnen) en zonder aanpassing (oranje lijnen) zonder winning en met winning bij locatie 12 (scenario's 9, 10, 3 en 4b). Gestippelde grijze lijn geeft het maaiveld weer.

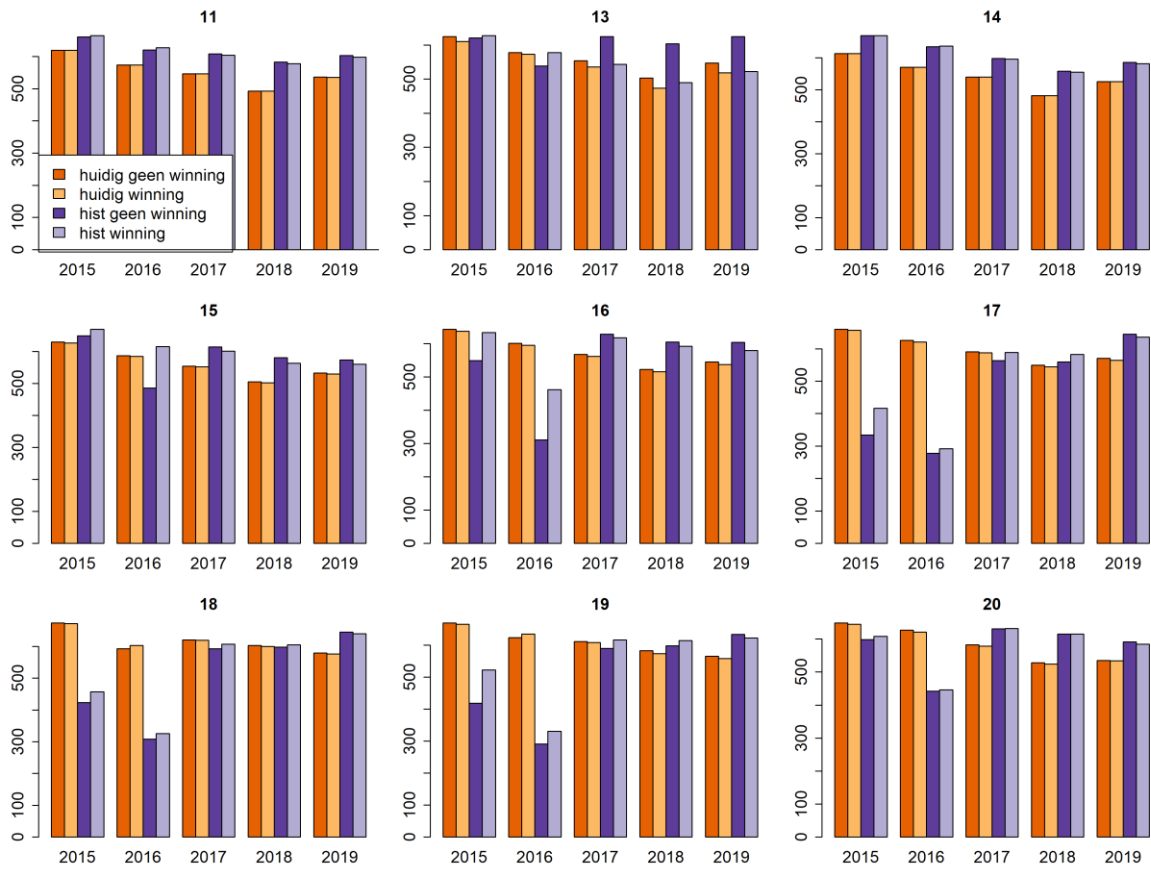
I.II Verschil in berekende verdamping in de huidige en historische situatie zonder winning en de historische situatie met winning ten opzichte van de huidige situatie met winning



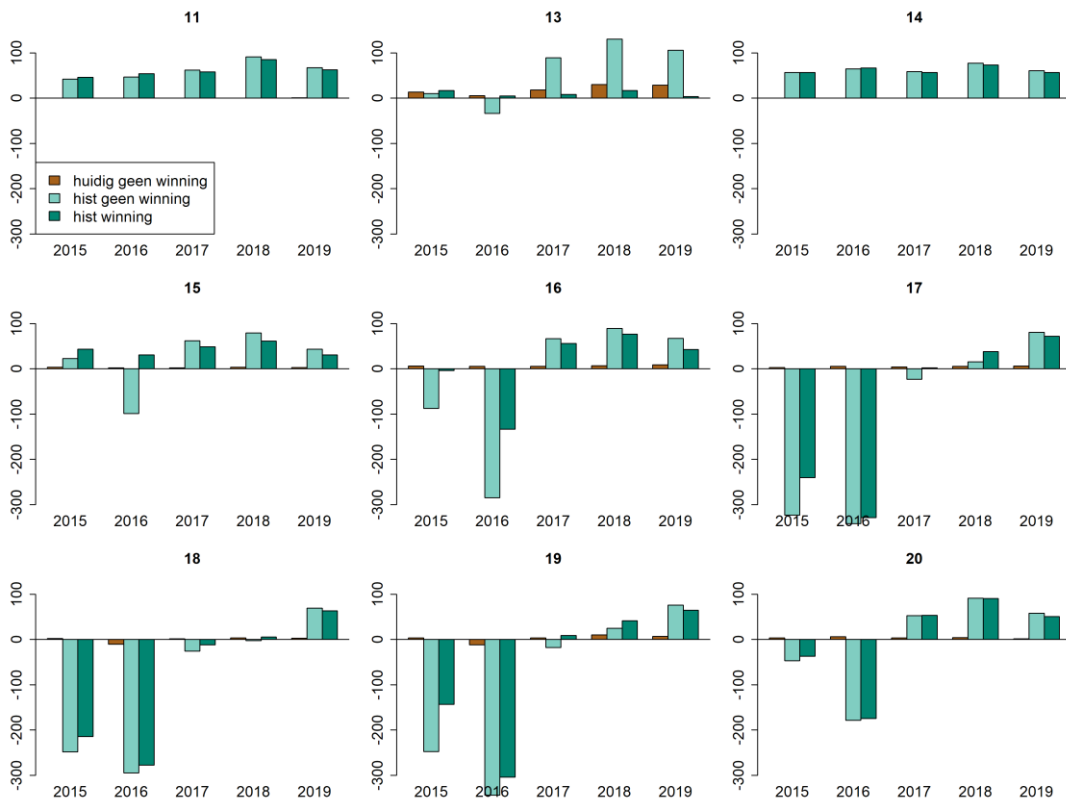
Figuur 39 Maaielveldhoogte in het model en locaties van de tijdsreeksen.



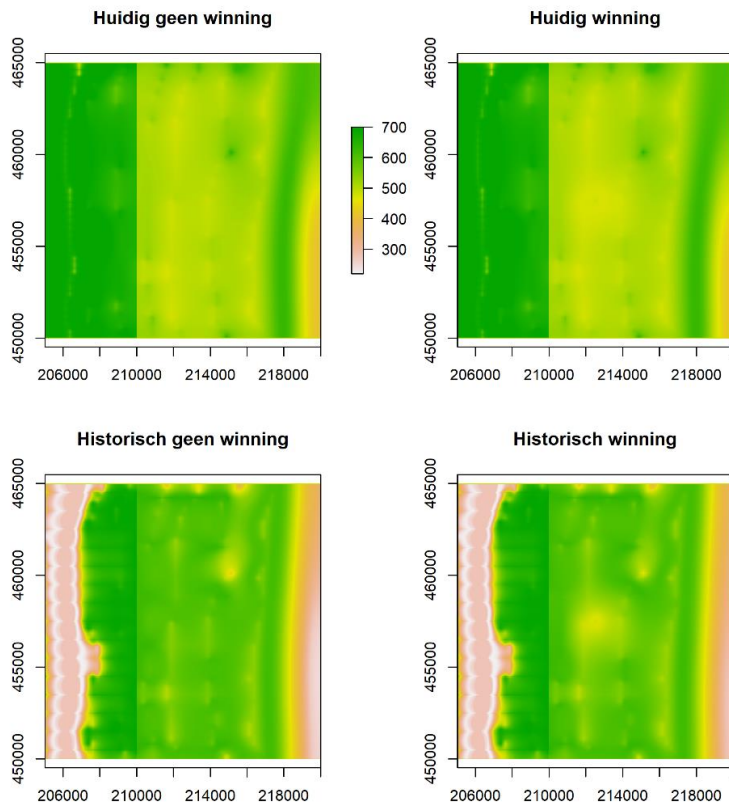
Figuur 40 Jaarlijkse verdamping (mm) op de lageregelegen locaties voor scenario's 1, 2b, 3 en 4b.



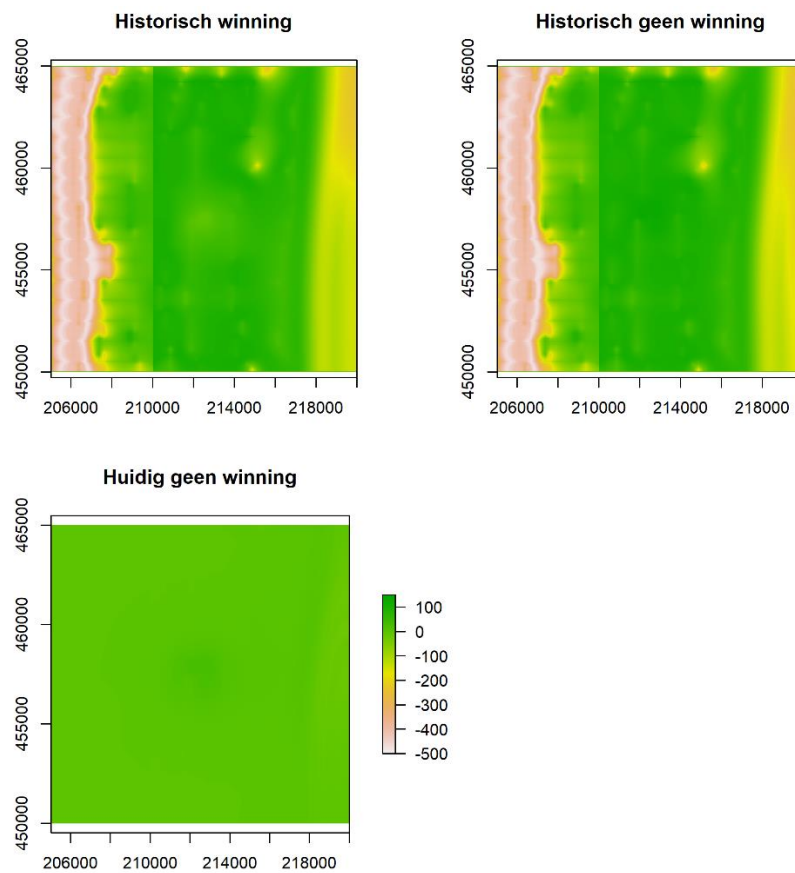
Figuur 41 Jaarlijkse verdamping (mm) op de hogergelegen locaties voor scenario's 1, 2b, 3 en 4b.



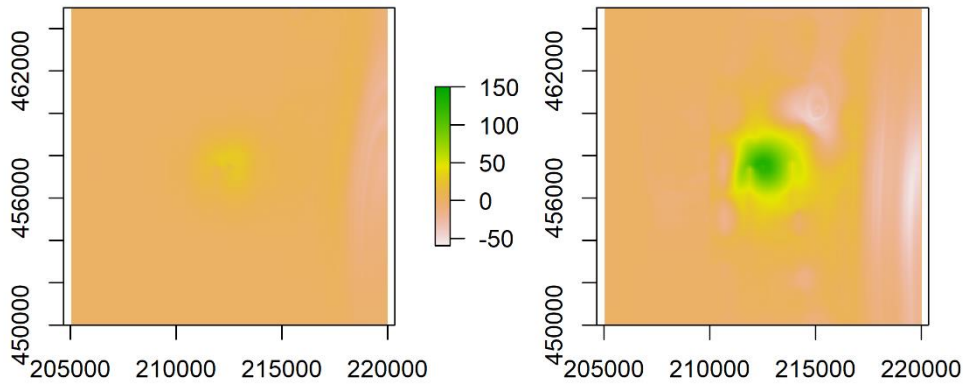
Figuur 42 Verschil in jaarlijkse verdamping (mm) op een negental locaties tussen scenario 1 (historische situatie zonder winning), 2b (historische situatie met winning op locatie 12), 3 (huidige situatie zonder winning) en de huidige situatie met winning op locatie 12 (scenario 4b). Een positief getal geeft een toename in verdamping ten opzichte van de huidige situatie met winning aan.



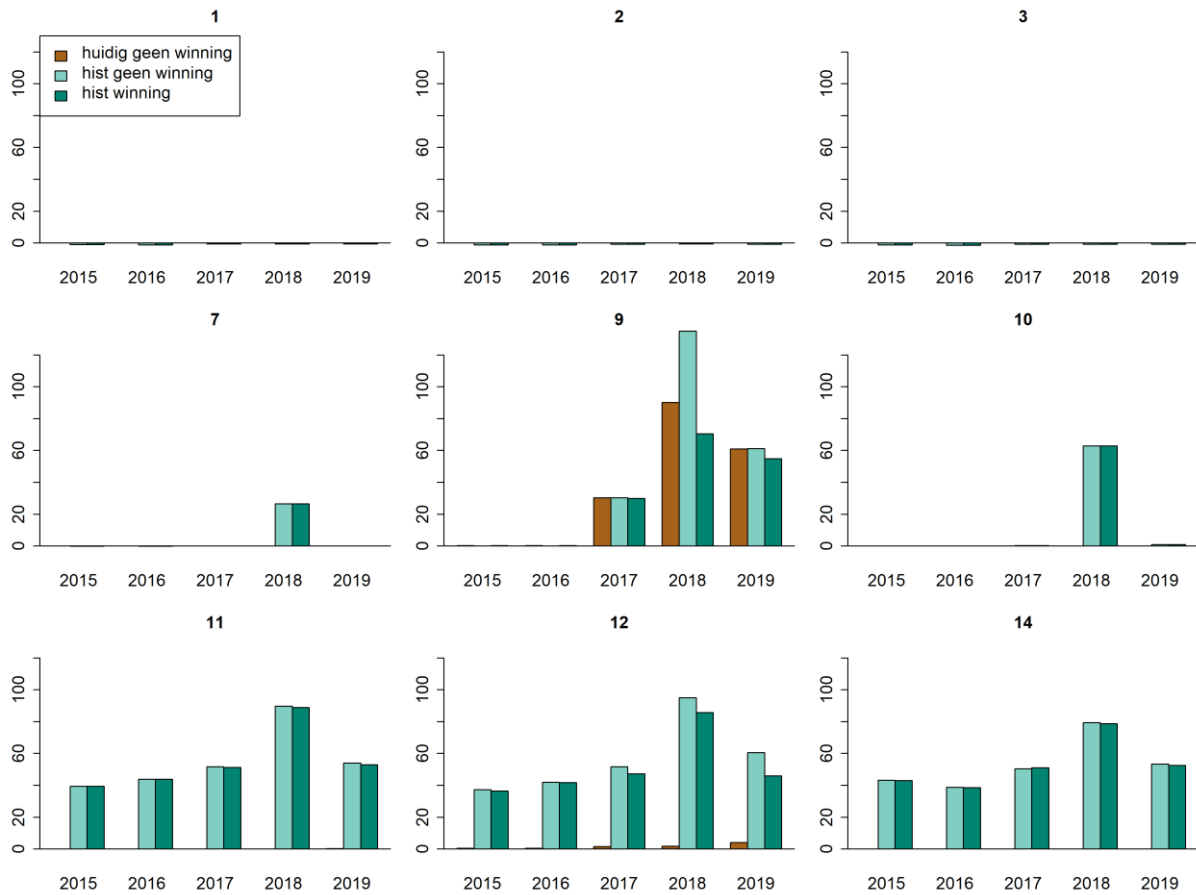
Figuur 43 Ruimtelijke verdeling van jaarlijkse verdamping (mm) in 2018 voor de scenario's in de huidige waterhuishoudkundige situatie zonder en met winning (scenario 3 en 4b) en in de historische waterhuishoudkundige situatie zonder en met winning (scenario 1 en 2b).



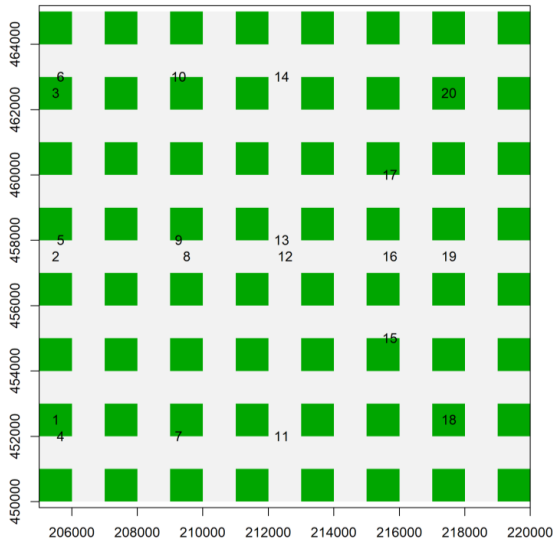
Figuur 44 Verschil in jaarlijkse totale verdamping (mm) in 2018 tussen scenario 2b (historische situatie met winning op locatie 12), 1 (historische situatie zonder winning), 3 (huidige situatie zonder winning) en de huidige situatie met winning op locatie 12. Een positief getal geeft een hogere verdamping dan in de huidige situatie met winning aan.



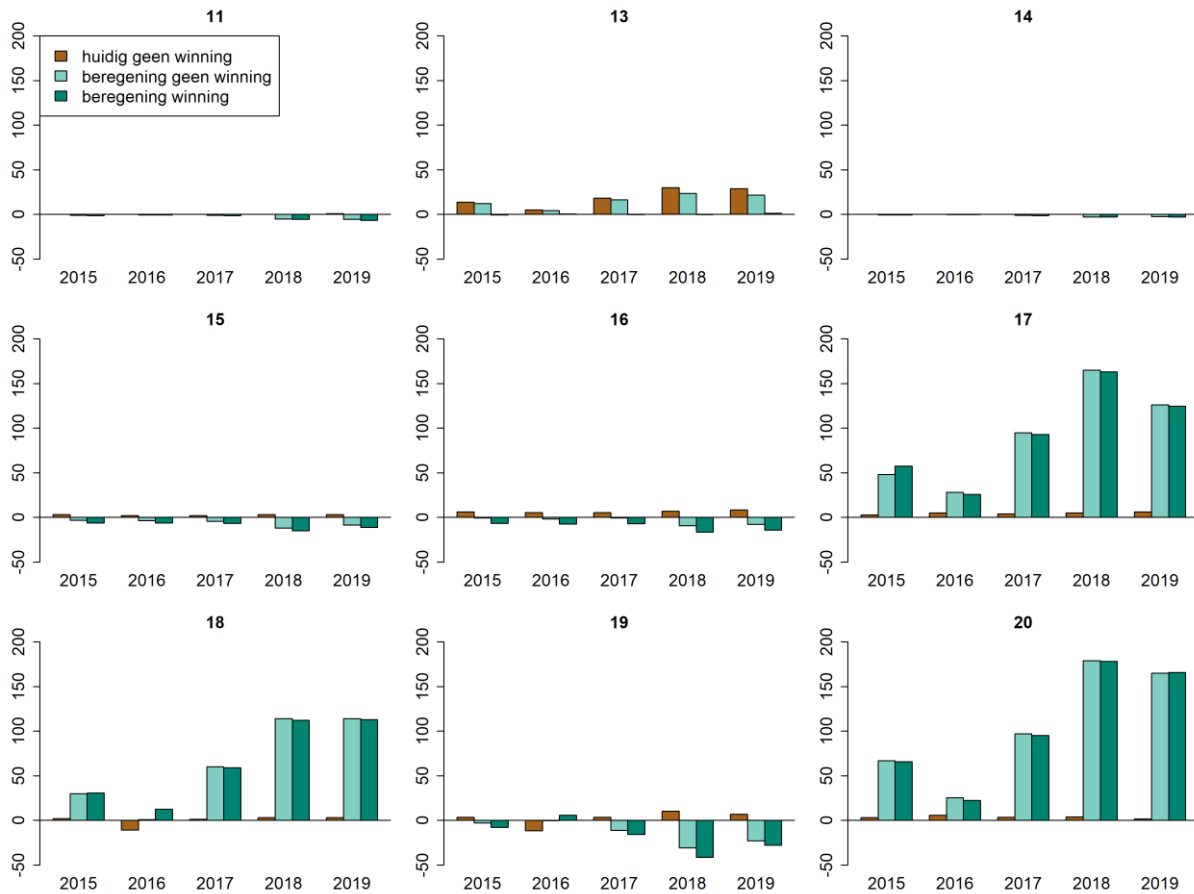
Figuur 45 Verschil in jaarlijkse totale verdamping (mm) in 2018 voor de huidige waterhuishoudkundige situatie zonder en met winning (links) en voor de historische waterhuishoudkundige situatie zonder en met winning (rechts). Positief betekent een afname in verdamping in de situatie met winning.



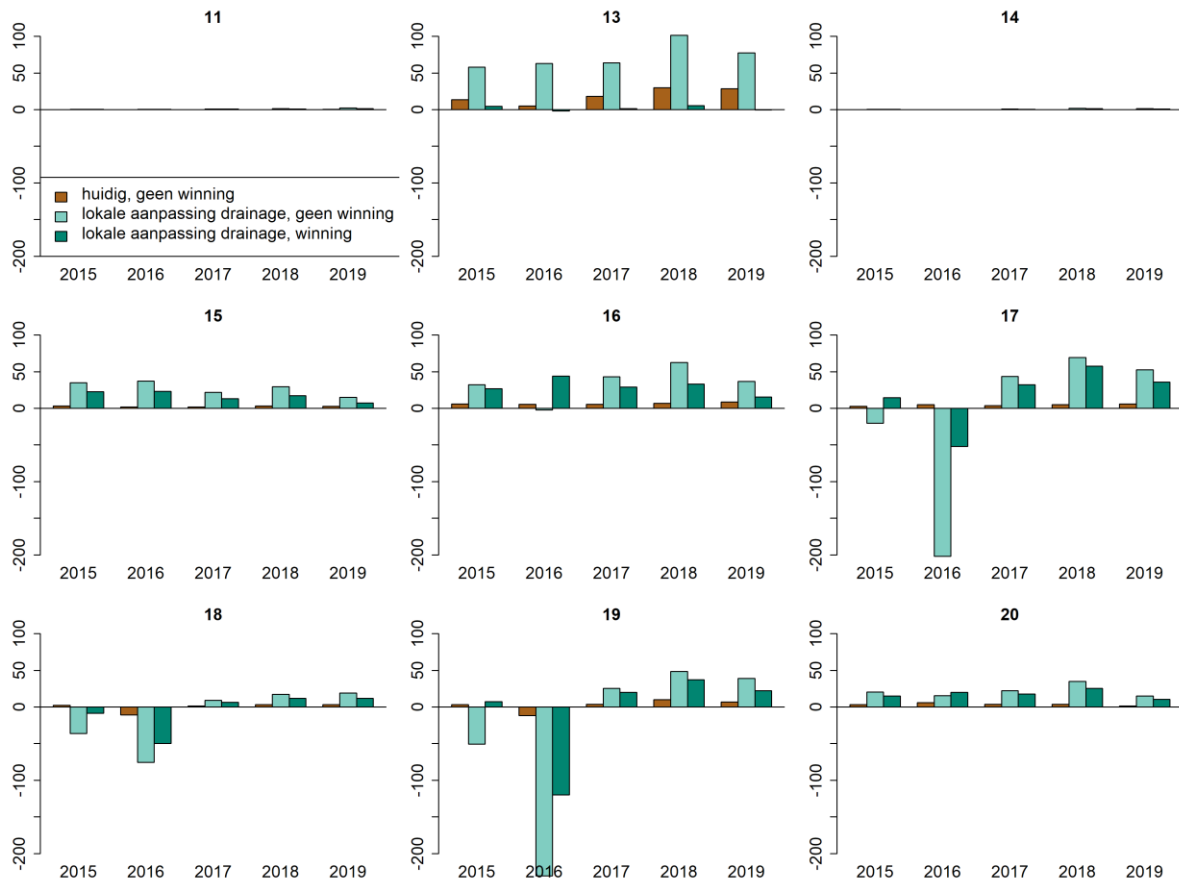
Figuur 46 Verschil in jaarlijkse verdamping (mm) op een negental locaties tussen scenario 1 (historische situatie zonder winning), 2a (historische situatie met winning op locatie 8), 3 (huidige situatie zonder winning) en de huidige situatie met winning op locatie 8. Een positief getal geeft een toename in verdamping ten opzichte van de huidige situatie met winning aan.



Figuur 47 Locaties van berekening en de tijdseries.

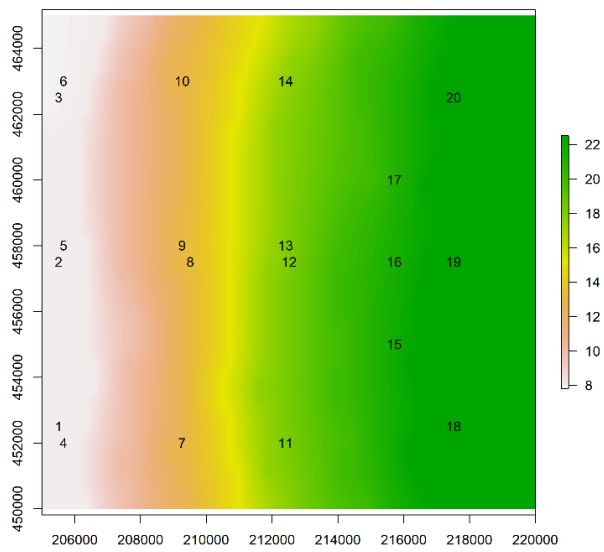


Figuur 48 Verschil in jaarlijkse verdamping (mm) op een negental locaties tussen scenario 3 (huidige situatie zonder winning), 7 (huidige situatie zonder winning met berekening), 8 (huidige situatie met winning met berekening) en de huidige situatie met winning op locatie 12. Een positief getal geeft een toename in verdamping ten opzichte van de huidige situatie met winning aan.



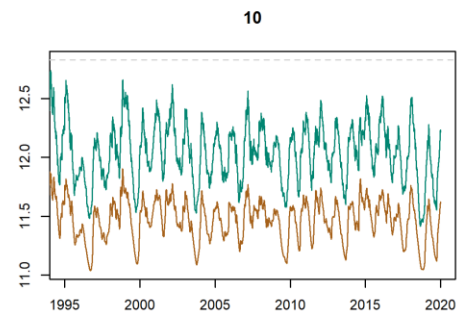
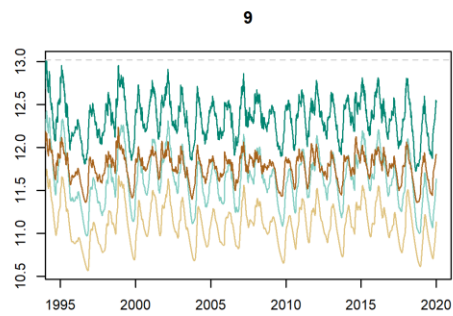
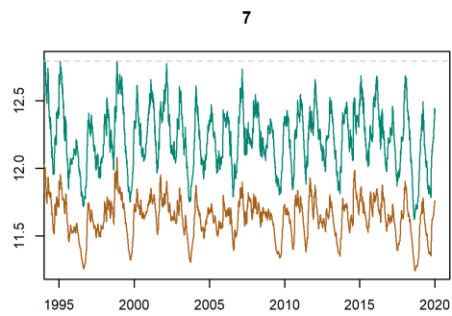
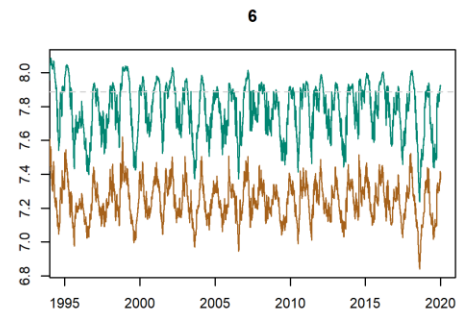
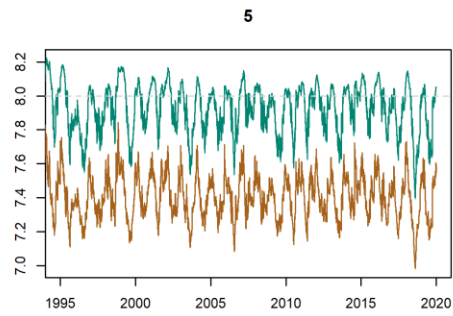
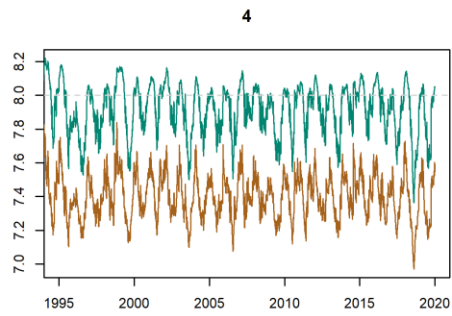
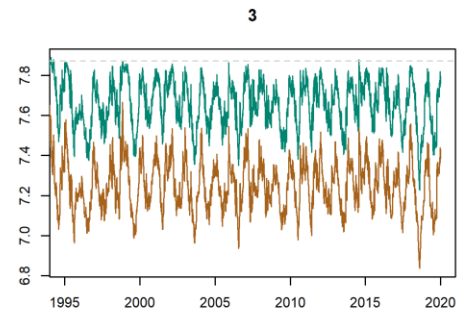
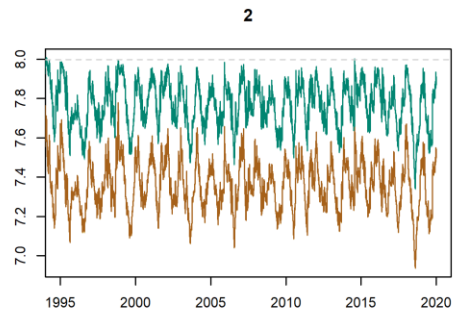
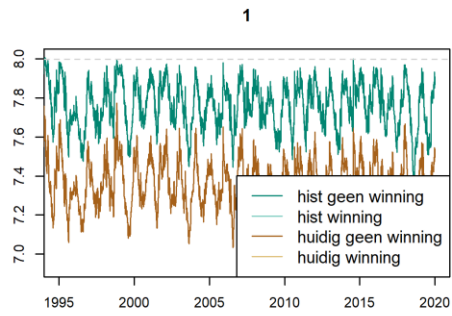
Figuur 49 Verschil in jaarlijkse verdamping (mm) op een negental locaties tussen scenario 3 (huidige situatie zonder winning), 9 (lokale aanpassing waterhuishouding met winning op locatie 12), 10 (lokale aanpassing waterhuishouding zonder winning) en de huidige situatie met winning op locatie 12. Een positief getal geeft een toename in verdamping ten opzichte van de huidige situatie met winning aan.

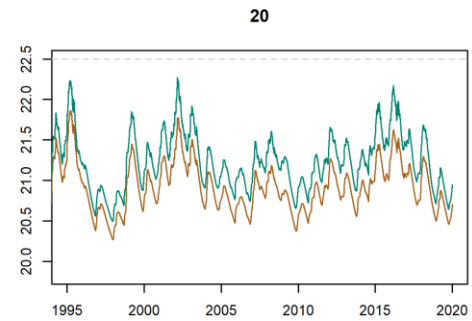
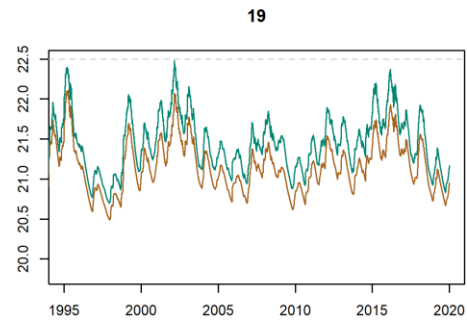
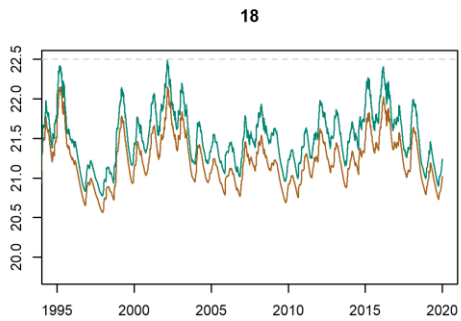
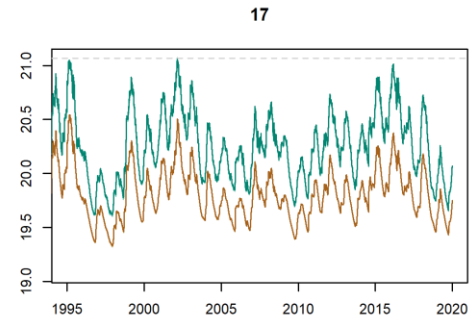
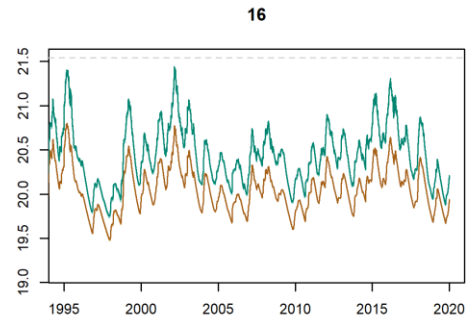
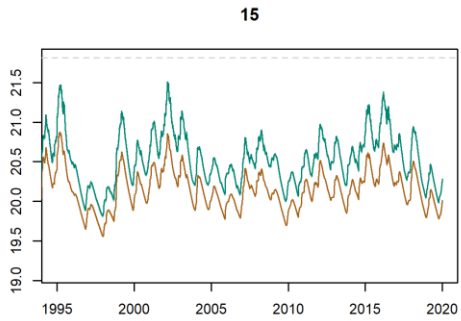
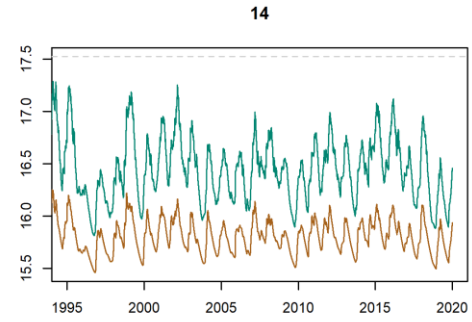
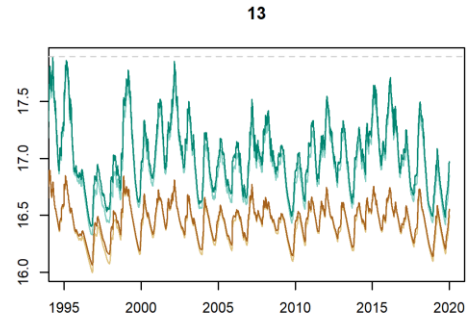
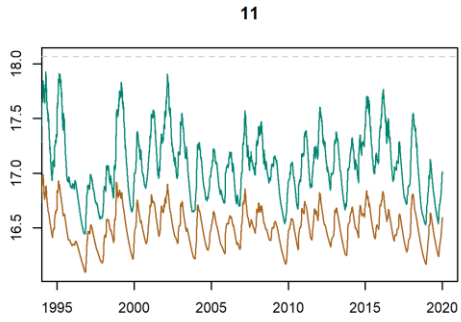
I.III Tijdreeksen modelsimulaties met drie verschillende locaties van de winning



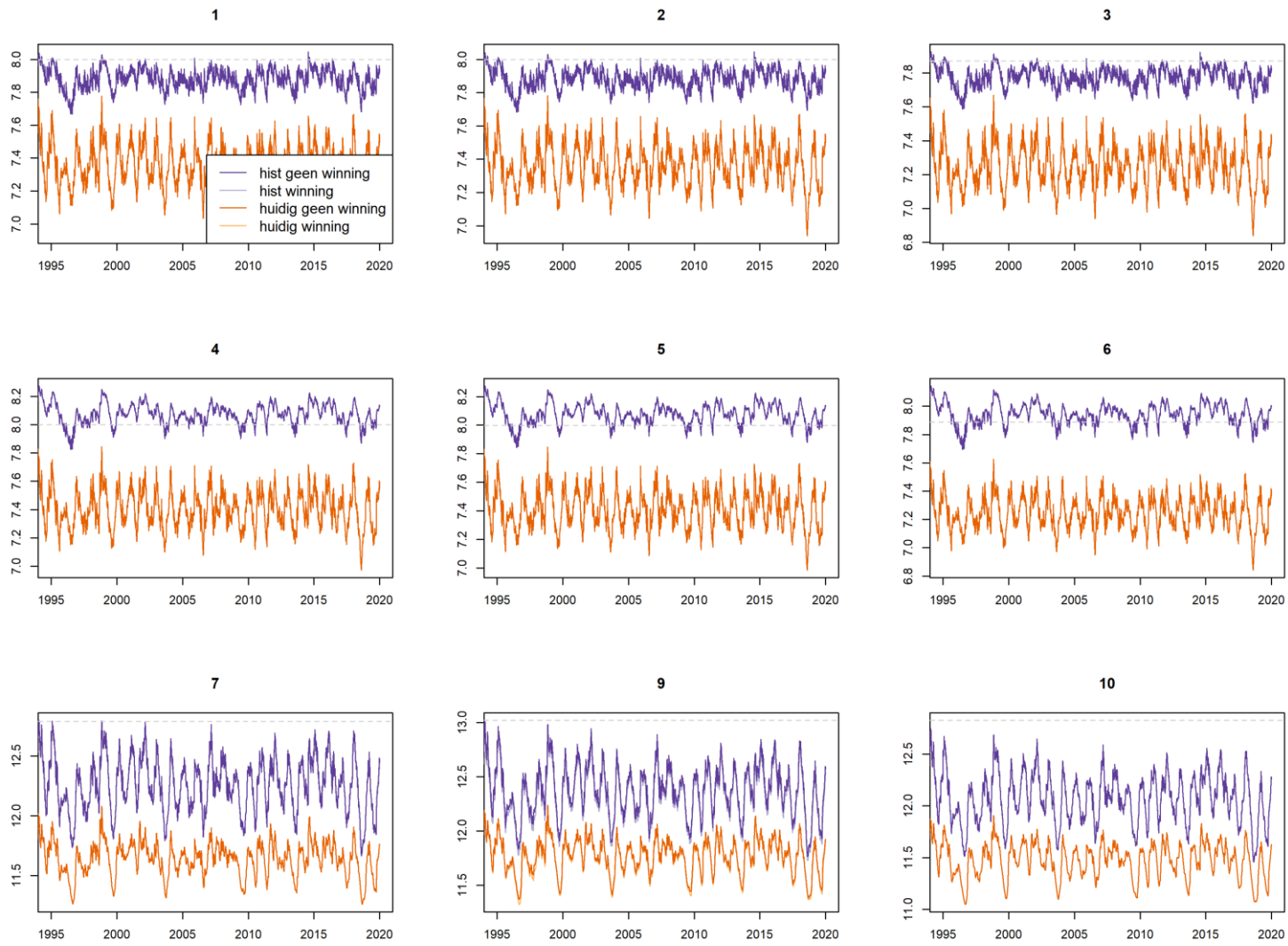
Figuur 50 Maaveldhoogte in het model en locaties van de tijdseries voor grondwaterstanden.

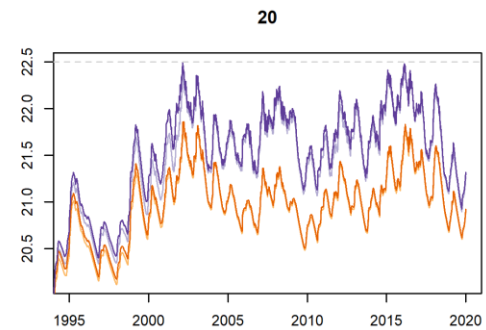
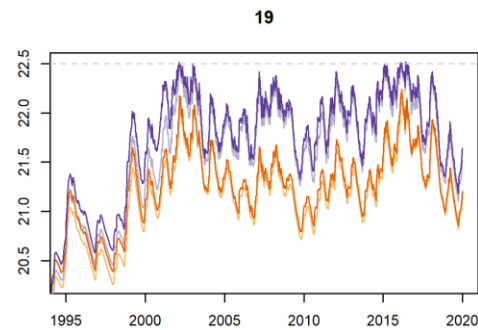
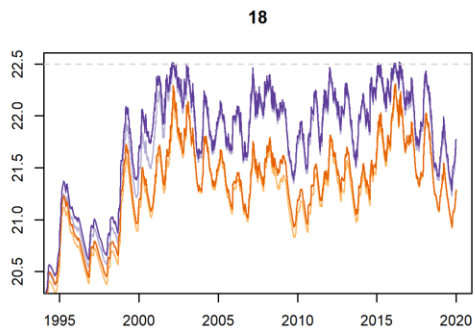
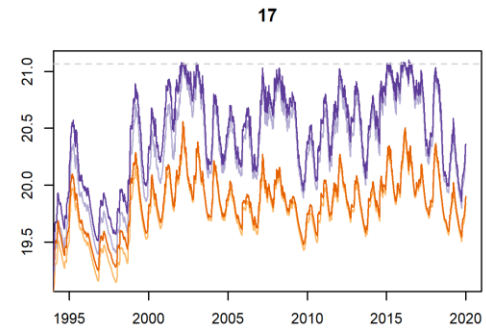
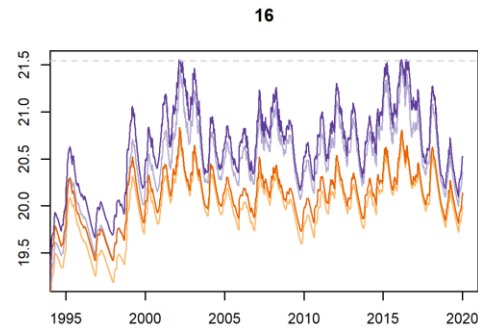
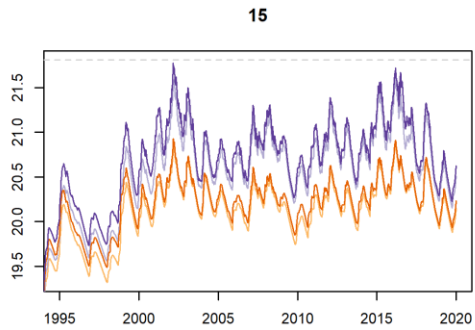
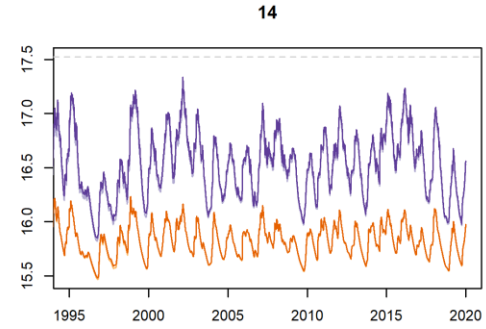
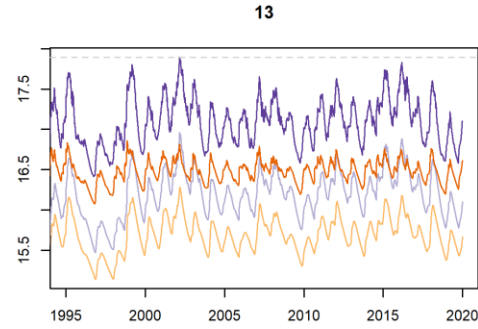
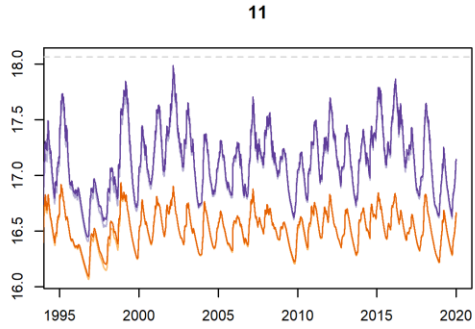
Tijdreeksen modelsimulaties met winning op locatie 8





Tijdreeksen modelsimulaties met winning op locatie 12





Tijdreeksen modelsimulaties met winning op locatie 16

