

KWR 2021.026 | Maart 2021

Hergebruik van gezuiverd restwater in de landbouw

Subirrigatie met RWZI effluent
Haaksbergen 2015-2019



Hergebruik van gezuiverd restwater in de landbouw

Subirrigatie met RWZI effluent Haaksbergen 2015-2019

KWR 2021.026 | Maart 2021

Opdrachtnummer

402403 (Lumbricus), 402088 (WiCE)

Projectmanager

dr. Klaasjan J. Raat

Opdrachtgevers

Programma Lumbricus

Het kennisprogramma Lumbricus (www.programmalumbricus.nl) is een consortium bestaande uit STOWA, Deltares, KnowH2O, KWR Water Research Institute, FutureWater, Radboud Universiteit, Louis Bolk Instituut, Universiteit Twente, Wageningen Universiteit en Wageningen Environmental Research, waterschap Limburg, waterschap Aa en Maas, en waterschap Vechtstromen.

BTO in het kader van WiCE – Water in de Circulaire Economie

Auteurs

dr. Sija F. Stofberg, dr. ir. Ruud P. Bartholomeus, dr. ir. Gé A.P.H. van den Eertwegh/KnowH2O, dr. Klaasjan J. Raat

Kwaliteitsborger

dr. ir. Gijsbert Cirkel

Verzonden naar

Betrokkenen bij de kennisprogramma's Lumbricus en WiCE

Dit rapport is openbaar.

Keywords

subirrigatie, landbouw, effluent, droogte, waterhergebruik

Jaar van publicatie
2021

Meer informatie

dr. Sija Stofberg
T +31 30 606 9569
E Sija.Stofberg@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

Maart 2021 ©

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevens bestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder

KWR



Samenvatting

Sinds 2015 wordt er op een landbouwperceel in Haaksbergen een proef uitgevoerd met subirrigatie met gezuiverd effluent. Hierbij wordt effluent uit de nabijgelegen RWZI toegevoerd in het klimaatadaptieve drainagesysteem (KAD-systeem), om te verkennen hoe subirrigatie kan bijdragen aan de watervoorziening van het gewas en wat dit zou betekenen voor verspreiding van stoffen in de ondergrond. In dit rapport worden de resultaten van de metingen van de afgelopen vijf jaar gepresenteerd en geïnterpreteerd met het oog op de vochtvoorziening van het gewas en de mogelijke verspreiding van stoffen uit het effluent in de ondergrond. Daarnaast is een modelstudie verricht, waarin met behulp van een gevoeligheidsanalyse is onderzocht welke factoren effect hebben op de verspreiding van stoffen.

De resultaten van het onderzoek laten zien dat subirrigatie positief werkt ten aanzien van de vochtvoorziening van de geteelde landbouwgewassen in de proefperiode 2015-2019. De studie laat zien dat de achtergrondstroming van het grondwater de belangrijke factor is in de verspreiding van stoffen. Daarnaast zijn de aan- en afvoer van effluent via de het drainagesysteem zelf van belang voor de hoeveelheid effluent die achterblijft in de ondergrond. De bodemopbouw (heterogeniteit) kan daarbij de verspreidingsrichting en retardatie (het achterblijven in bepaalde lagen) sterk beïnvloeden. Daarnaast is de grootte van het neerslagtekort tijdens de periode van subirrigatie bepalend voor de verspreiding van stoffen naar de wortelzone. De resultaten van de veldstudie wijzen op een beperkte verspreiding van stoffen in neerwaartse richting vanuit de drains. Er zijn aanwijzingen voor verspreiding in horizontale richting, maar de onzekerheden zijn op dit gebied relatief groot, vooral als gevolg van de relatief grote heterogeniteit van de ondergrond). Voor de lange termijn lijkt verspreiding naar diepere grondwatersystemen minder waarschijnlijk, maar is het verstandig om dit te blijven controleren met regelmatige monitoring. Daarnaast is de mogelijke verspreiding naar de wortelzone een aandachtspunt met name voor zeer droge perioden, vanwege het risico van mogelijke opname door het landbouwgewas.

Inhoud

Samenvatting	3
--------------	---

Inhoud4

1	Inleiding	6
1.1	Beschikbaarheid zoet water	6
1.2	RWZI als bron van water	8
1.3	Subirrigatie met effluent in Haaksbergen	9
1.4	Eerdere rapportages	10
1.5	Dit rapport	11
2	Methoden	12
2.1	Toelichting	12
2.2	Toepassing en metingen subirrigatie	12
2.3	Veldmetingen	13
2.4	Bemonstering en chemische analyses	15
2.5	Modelstudie	16
3	Resultaten	21
3.1	Waterkwantiteit	21
3.2	Waterkwaliteit	28
3.3	Modelstudie	33
4	Discussie	45
4.1	Veldonderzoek	45
4.2	Modelstudie	46
4.3	Interpretatie van de veldmetingen met behulp van de modelstudie	47
5	Conclusies en aanbevelingen	48
5.1	Conclusies	48
5.2	Aanbevelingen	49
6	Referenties	51
I	Aanvullende resultaten stofconcentraties	53
II	Cl:Br – Chlorideratio	57
III	Aanvullende afbeeldingen gevoeligheidsanalyse	58
IV	Aanvullende afbeeldingen simulaties van 10 jaar subirrigatie	70

Dankwoord

Dit onderzoek had niet kunnen plaatsvinden zonder de medewerking van een aantal mensen. Ten eerste is dat agrariër René Asbreuk, die sinds 2011 als perceelseigenaar betrokken is een experiment met KlimaatAdaptieve Drainage (KAD) in Haaksbergen. Aanvankelijk – vanaf 2011 – was dit een proef binnen het programma Landbouw op Peil, i.s.m. Waterschap Vechtstromen, FutureWater, De Bakelse Stroom, KEE en WUR-WEnR. Later hebben we binnen TKI Watertechnologie vanuit KWR, FutureWater en KnowH2O een vervolg aan de proef kunnen geven en een online management-algoritme voor het KAD-systeem ontwikkeld. KnowH2O pakte de verdere ontwikkeling van het KAD-systeem op. Vervolgens was het René Asbreuk zelf die met de suggestie kwam om gezuiverd effluent van de nabijgelegen waterzuivering te gebruiken om het KAD-systeem te voeden en zo ook subirrigatie toe te gaan passen. Dat dit qua techniek ging werken was duidelijk en de proef werd ook ingericht i.s.m. het waterschap, maar de toepassing gaf aanvullende vragen m.b.t. waterkwaliteitsaspecten. Bas Worm van Waterschap Vechtstromen heeft deze proef naar hergebruik van gezuiverd restwater voor de landbouw ingekaderd in een bredere strategie van het waterschap. Immers, in gebieden waar wateraanvoer niet mogelijk is, zullen de beschikbare bronnen van water moeten worden benut. In samenwerking met het collectieve onderzoek van de drinkwaterbedrijven bij KWR (BTO), het programma Zoetwatervoorziening Oost Nederland (ZON), het Deltaprogramma Zoetwater en Waterschap Vechtstromen is gezamenlijk gewerkt aan geleidelijke kennisontwikkeling op het thema waterhergebruik. De proef in Haaksbergen is hierbij belangrijk, omdat het naast de mogelijkheid tot uitgebreide monitoring naar waterkwantiteit- en waterkwaliteitsaspecten, ook een goede demo is voor nationale én internationale bezoekers (vaak o.l.v. Henk Ritzema/WUR) evenals een kapstok voor een groot aantal relevante vragen. Medio 2015 heeft Bas Worm het initiatief genomen voor het samenbrengen van meerdere projectvoorstellen in het Programma Lumbricus. Eén van die voorstellen kwam van KnowH2O en KWR, gericht op verdere opschaling en kennisontwikkeling over regelbare/klimaatadaptieve drainage met subirrigatie. De casus Haaksbergen is hierin ondergebracht, i.s.m. het programma Water in de Circulaire Economie (WiCE) dat wordt uitgevoerd door KWR in opdracht van de Nederlandse drinkwaterbedrijven en De Watergroep uit Vlaanderen. Ten slotte hebben we samen met Wageningen Universiteit en Universiteit Utrecht financiering van NWO kunnen verwerven, zodat we met twee promovendi ook werken aan een fundamentele kennisontwikkeling ten aanzien van waterhergebruik voor de landbouw (NWO-RUST - Re-Use of Treated effluent for agriculture). De casus Haaksbergen staat hierin centraal. Onze dank gaat ook uit naar Lodewijk Stuyt en Harrie Massop van WEnR voor de drainage-adviezen tijdens de start en de ter beschikking gestelde debietmeters die meerdere jaren gebruikt mochten worden. Ook dank aan verschillende medewerkers van Waterschap Vechtstromen, die ons in de loop van de jaren hebben ondersteund bij de monitoring, toegang verleenden tot de zuivering en meedachten met diverse praktische zaken. Daarnaast bedanken wij Bas Worm, Marloes van der Kamp (Waterschap Vechtstromen) en kwaliteitsborger Gijsbert Cirkel voor hun nuttige reacties op de conceptversie van dit rapport.

Het werk dat we samen met betrokkenen hebben kunnen vormgeven is voor ons heel waardevol. De integraliteit, het begrip voor elkaars problemen en inzichten, helpt om kennisontwikkeling op een specifiek onderdeel altijd in een breder (maatschappelijk) perspectief te plaatsen. Zo werken we samen aan maatschappelijk relevant onderzoek.

1 Inleiding

1.1 Beschikbaarheid zoet water

Klimaatverandering en beschikbaarheid zoetwater

Klimaatverandering zal in Nederland naar verwachting leiden tot vaker voorkomende en langdurigere droge periodes, maar ook tot intensievere buien (Klein Tank et al., 2014). Uit metingen blijkt al dat de jaarlijkse hoeveelheid neerslag toeneemt¹, evenals de intensiteit en duur van zware buien in de zomer met (lokale) wateroverlast als gevolg. Ook de referentieverdamping vertoont op jaarbasis een stijgende lijn. In het groeiseizoen wordt de kans op langere en intensievere droge periode groter² (Philip et al., 2020). De vraag naar grondwater, bijvoorbeeld voor de productie van drinkwater of voor irrigatie van landbouwgewassen, neemt toe tijdens droge zomers. Uitgaande van het Deltascenario STOOM, is de verwachting dat de druk op het (grond)watersysteem verder toe zal nemen. Het gaat hierbij niet alleen om een grotere watervraag vanuit de landbouw, maar ook vanuit de burger en de industrie (Pronk et al., 2020). Al met al neemt de vraag naar zoetwater dus toe, terwijl de beschikbaarheid ervan in de zomerperiode juist afneemt. Het systeem raakt hierdoor verder uit balans³ waardoor de kans op droogteschade aan landbouw, natuur en infrastructuur toeneemt.

Van oudsher is het watersysteem van Nederland ingericht op het snel en intensief afvoeren van water om wateroverlast te voorkomen en de gewenste voorjaarsdrooglegging te realiseren. Agrariërs hebben daarvoor hun land gedraineerd met greppels, sloten en drainagebuizen (Ritzema et al., 2006), terwijl ook de afwatering sterk is vergroot/versneld door de waterschappen. Dit waterbeheer heeft bijgedragen aan een structurele daling van de grondwaterstanden (Knotters & Jansen, 2005). Hoewel wateroverlast en natschade aan gewassen door de ontwatering en afwatering sterk zijn afgenomen, zorgt dit er ook voor dat er in, naar verwachting vaker voorkomende, droge periodes minder water beschikbaar is. Zonder verandering in het waterbeheer kan de droogteschade in de landbouw oplopen tot 140 miljoen euro per jaar (Klijn et al., 2011), komt de natuur onder druk te staan, en neemt de druk op waterbeschikbaarheid voor drinkwatervoorziening en industrie toe. Adaptieve maatregelen om schaderisico's door droogte en natheid voor landbouw én voor andere functies als natuur en drinkwater te beperken zijn dus van groot (economisch) belang.

In Nederland zijn grote delen van de hoge zandgronden (Figuur 1-1) gevoelig voor droogte, omdat hier weinig tot geen water aangevoerd kan worden vanuit het hoofdwatersysteem. In deze regio's wordt daarnaast ook grondwater onttrokken voor de drinkwatervoorziening, de industrie en door agrariërs zelf voor irrigatie van gewassen (van den Eertwegh et al., 2020). Hoewel wateraanvoer in deze gebieden niet goed mogelijk is kan het bodem- en waterbeheer echter wel anders ingericht worden voor het beperken van risico's en schade door droogte, zonder daarbij het risico op wateroverlast uit het oog te verliezen. Daarvoor hebben waterbeheerders en agrariërs oplossingen nodig om de risico's op reductie in gewasopbrengst door zowel droogte als wateroverlast te beperken en dit in te bedden en af te stemmen met de regionale zoetwateropgave. De uitdaging ligt daarbij in de verschillende tijdschalen waarop droogte en wateroverlast zich manifesteren: wateroverlast komt en gaat snel, terwijl droogte langzaam intreedt en lang na-ijlt. Maatregelen om op steeds grilliger weer te anticiperen liggen dan ook op zowel perceelschaal als regionale schaal (Figuur 1-2). De lokale waterbehoefte moet afgestemd worden met de regionale waterbeschikbaarheid. Dit vraagt om passend bodem- en waterbeheer en een watersysteem met meer sturing en flexibiliteit.

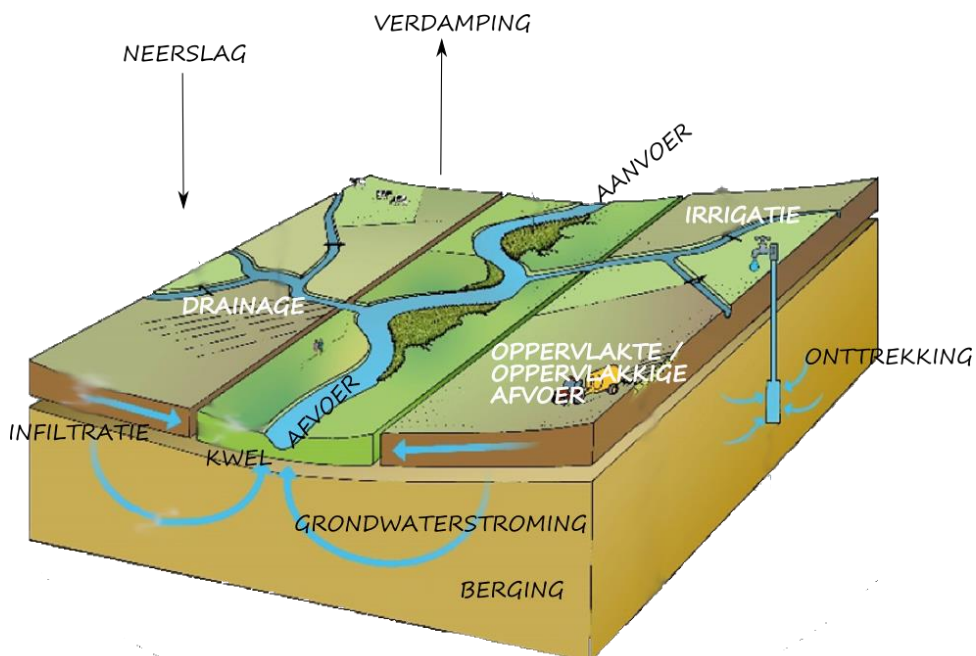
¹ <https://www.clo.nl/indicatoren/nl0508-jaarlijkse-hoeveelheid-neerslag-in-nederland>

² <https://www.knmi.nl/over-het-knmi/nieuws/vaker-droogte-in-het-binnenland>

³ <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/achtergrond/attributie-van-de-droogte-van-2018-in-nederland>



Figuur 1-1: Hoge zandgronden in Nederland, met zowel Oost- als Zuid-Nederland (Wing, 2015)



Figuur 1-2: Dwarsdoorsnede van een beekdal en termen van de waterbalans. Voor een robuust watersysteem moeten maatregelen zoveel mogelijk bijdragen aan i) een grotere beschikbaarheid van water en ii) een kleinere druk op het grondwater. Vanuit verschillende compartimenten werken aan het enerzijds vergroten van de aanvulling van grondwater en anderzijds verminderen van de afvoer uit een systeem is van belang om te komen tot een klimaatrobuust stroomgebied (basisfiguur ontleend aan Programma Lumbricus).

Water vasthouden, sparen en aanvullen

Uit de NBW (2006) en DHZ-ZON (2015) is een zogenaamde trits afgeleid voor waterbeheer, om beter bestand te zijn tegen wateroverlast en tegen droogte (Figuur 1-3). De DHZ-ZON 'watertekort-trits' geeft aan hoe we het watertekort en de effecten ervan kunnen reduceren door (1) te sparen in bodem en grondwater, zowel door water beter vast te houden, als het gebruik van het grondwater te verminderen, (2) wateraanvoer via oppervlaktewater en (3) te accepteren en te adapteren. Deze trits sluit aan bij die in het Nationaal Deltaprogramma 2021, waarin in het kader van de deltabeslissing Zoetwater wordt voorgesteld om a) zuinig te zijn met watergebruik, b) water beter vast te houden, c) water slimmer te verdelen en d) schade te accepteren (wanneer deze moeilijk te vermijden is). Als uitgangspunt hierbij wordt genoemd dat de ruimtelijke inrichting van gebieden afgestemd is op de beschikbaarheid van zoet water (zie ook NOVI, 2020).

Voor de hoge zandgronden wordt dus binnen het Deltaplan Zoetwater (Deltaprogramma, 2019) ingezet op het vasthouden en besparen van water. Ondergrondse waterberging en voorraadvorming bieden kansen voor de ontwikkeling van een veerkrachtig watersysteem en een verantwoorde benutting daarvan. In vergelijking met laag-Nederland zijn praktijktoepassingen op de hoge zandgronden in Oost- en Zuid-Nederland echter tot nu toe beperkt, terwijl juist daar droogtegevoelige gebieden liggen, grondwater gewonnen wordt voor drinkwater en de watervraag vanuit meerdere actoren hoog is.



Figuur 1-3: DHZ-ZON-trits uit 2015 (rechterdeel) in combinatie met de VBA-trits NBW uit 2006 (linkerdeel).

Programma Lumbricus

Het onderzoek dat in dit rapport is beschreven maakt onderdeel uit van het thema Bewuste Bodem van het Programma Lumbricus (looptijd 2016-2020). Programma Lumbricus is een samenwerkingsprogramma met onderzoeksinstituten, regionale partijen en lokale agrariërs en terreinbeherende organisaties, waar doelstellingen met betrekking tot waterkwaliteit, zoetwatervoorziening, bodembeheer, klimaatadaptatie en waterveiligheid samenkomen. Kern van het Programma Lumbricus is het ontwikkelen en implementeren van een klimaatrobuust bodem- en watersysteem door het op stroomgebiedsniveau geïntegreerd toepassen van innovatieve maatregelen op het gebied van bodem, ondergrond en water. Het Lumbricus-thema Bewuste Bodem richt zich op de bodem als sleutel in vocht- en nutriëntenvoorziening voor landbouw en natuur en op een duurzaam bodem- en waterbeheer voor een gezonde bodem in relatie tot gebruiksfuncties. Het thema richt zich met name op de effectiviteit van hydrologische en bodemmaatregelen op perceelniveau en de verbetering van modellen om de effectiviteit te kunnen beoordelen.

1.2 RWZI als bron van water

Hoewel Nederland regelmatige neerslag en aanvoer van grote rivieren kent, zijn verschillende gebieden van Nederland, waaronder 'de hoge zandgronden', gevoelig voor (periodieke) droge perioden. De meest voor de hand liggende oplossingsrichting is het beter benutten van aanwezige waterstromen. Iedere dag stromen er bijvoorbeeld

grote hoeveelheden water (een waterschijf van bijna 50 mm per jaar (Cirkel et al., 2017) via de rioolwaterzuiveringsinstallatie (RWZI) naar het oppervlaktewater, en via de oppervlaktewateren het gebied uit. De laatste jaren is er steeds meer aandacht voor verdere zuivering van het effluent en worden proeven uitgevoerd met innovatieve zuiveringstechnieken. Dit valt samen met aandacht voor het concept 'de RWZI als waterfabriek', waarbij gekeken wordt naar nuttige inzet van het effluent.

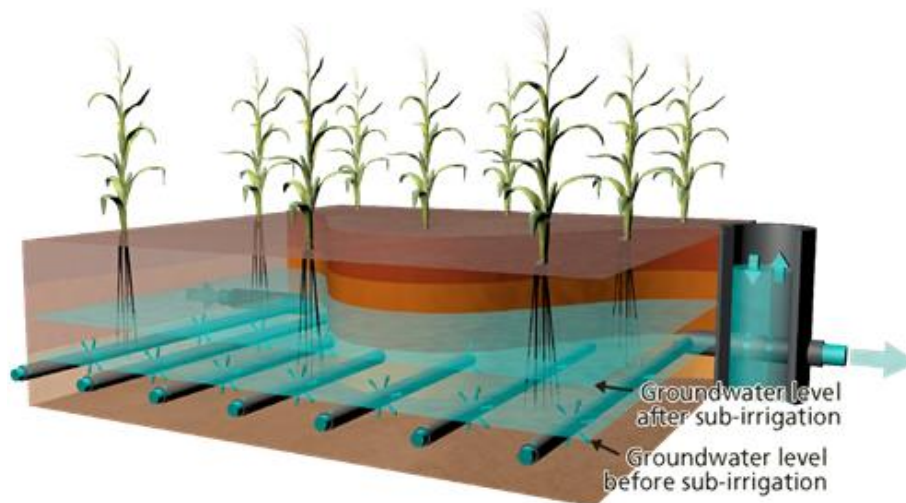
Effluent bevat na gangbare zuivering nog verschillende stoffen en ziekteverwekkers. Initiatieven rondom hergebruik van effluent krijgen te maken met vragen rondom de mogelijke risico's. Het gaat dan om veiligheid en gezondheid, maar bijvoorbeeld ook om milieu en wet- en regelgeving. Over veel van deze onderwerpen is nog veel niet bekend. Om verantwoord hergebruik mogelijk te maken zullen antwoorden gezocht moeten worden op deze vragen. Naast *bewust* hergebruik van effluent, is er in de praktijk ook sprake van *onbewust* hergebruik (Beard et al., 2019). Hier is bijvoorbeeld sprake van wanneer er voor gewasberegening gebruik wordt gemaakt van oppervlaktewater dat (deels) uit effluent bestaat. Ook voor deze bestaande praktijken kan onderzoek naar veilig en verantwoord hergebruik van belang zijn.

1.3 Subirrigatie met effluent in Haaksbergen

In 2013 is een eerste korte proef opgezet om gezuiverd effluent uit de rioolwaterzuiveringsinstallatie (RWZI) Haaksbergen te gebruiken om het naastgelegen maisperceel via het klimaatadaptieve drainage (KAD) systeem ondergronds van water te voorzien (Van den Eertwegh et al., 2013). Dit wordt subirrigatie, of ook wel 'omgekeerde drainage' genoemd (Figuur 1-4). De korte proef in 2013 liet zien dat dit technisch mogelijk was en vanaf 2015 vindt er een langjarige proef plaats om de watervoorziening van het gewas en de verspreiding van stoffen in kaart te brengen. Deze proef is het onderwerp van de in deze rapportage beschreven studie.

Klimaatadaptieve drainage (KAD) houdt in dat het drainageniveau online en traploos regelbaar is en via telemetrie (TMX) aangepast kan worden aan (verwachte) omstandigheden. Wanneer een neerslagtekort wordt verwacht, zoals tijdens de zomer, wordt het drainageniveau relatief hoog ingesteld, zodat water wordt vastgehouden voor een goede vochtvoorziening van het gewas. Tijdens natte perioden, zoals de winter of tijdens hevige neerslag in het groeiseizoen, kan het drainageniveau lager gezet worden, om overtollig water snel te kunnen afvoeren.

De combinatie van KAD met subirrigatie heeft als doel om het gewas met beperkte verdampingsverliezen van water te voorzien tijdens het groeiseizoen en de beregeningsbehoefte vanuit grondwater te verminderen. Het KAD-systeem kan perceelwater draineren, vasthouden en extern water aanvoeren voor subirrigatie. Voor het actief aanvullen van het watersysteem via subirrigatie kan gebruik gemaakt worden van verschillende bronnen van water, zoals oppervlaktewater, grondwater en gezuiverd restwater. De keuze voor de bron hangt af van zowel de beschikbaarheid als de kwaliteit. Als bron van water voor subirrigatie wordt in de proef bij RWZI Haaksbergen secundair gezuiverd effluent gebruikt. Dit secundair gezuiverd effluent bevat echter nog stoffen die niet gewenst zijn in het gewas of het grondwater. Het onderzoek richt zich dan ook (naast de vochtvoorziening van het gewas) specifiek op het in beeld brengen van de verspreiding van deze stoffen in de bodem en ondergrond.



Figuur 1-4. Systeem voor regelbare drainage met subirrigatie (Narain et al., 2020).



Figuur 1-5. Ligging van het maisperceel naast RWZI Haaksbergen.

1.4 Eerdere rapportages

In het perceel te Haaksbergen is in de zomer van 2013 een korte test uitgevoerd en tijdens de groeiseizoenen van 2015 tot en met 2019 subirrigatie ingezet. Vanaf 2015 is een meetopstelling ingericht, waarbij onder andere grondwaterpeilen en bodemvocht worden gemeten, die in de jaren daarna is uitgebreid. Daarnaast zijn regelmatig monsters genomen van het grond- en bodemwater, die geanalyseerd zijn op aanwezige stoffen om een beeld te geven van de verspreiding van het effluent in de ondergrond.

In twee rapporten (Bartholomeus et al., 2017; Bartholomeus et al., 2016) (BTO 2016.050 en BTO 2017.062) zijn de resultaten van bovenstaande metingen tot en met 2016 beschreven. De vraagstelling in deze rapporten richtte zich op de vraag of de subirrigatie bijdroeg aan een goede watervoorziening van het gewas en in hoeverre de in het effluent aanwezige stoffen verspreid worden. De samengevatte bevindingen uit deze rapporten zijn:

- De watervoorziening middels subirrigatie kan gemiddeld enkele millimeters per dag bedragen (verspreid over het perceel; 200 à 250 m³/d wateraanvoer). Hiermee worden grondwaterstanden verhoogd en wordt de wortelzone van vocht voorzien.

- Tracering aan de hand van de chloride-bromide ratio (Cl:Br) wijst erop dat gedurende het inlaten, het effluent zich vooral in het grondwater onder de drains verspreidt, en dat het in lage mengverhoudingen met grond- en infiltrerend regenwater de wortelzone bereikt. Hoewel in eerdere jaren geneesmiddelen de wortelzone niet leken te bereiken, zijn deze in 2016 wel in lage concentraties in de wortelzone teruggevonden.

1.5 Dit rapport

In de afgelopen jaren is het onderzoek naar de effecten van de subirrigatie in het perceel in Haaksbergen voortgezet. In deze periode zijn er nieuwe metingen verricht, waarbij ook enkele nieuwe meetpunten zijn meegenomen. De jaren 2018 en 2019 gelden daarbij als uitzonderlijk droog.

Opnieuw wordt de vraag gesteld of, en in hoeverre, de subirrigatie bijdraagt aan de vochtvoorziening van het gewas. Ook wordt de verspreiding van stoffen uit het effluent opnieuw onderzocht.

Dit rapport gaat in op de nieuwe meetresultaten ten opzichte van de eerdere rapportages, gericht op waterkwantiteit en het volgen van het effluent via Cl:Br als tracer, en de inzichten die hieruit verkregen worden. Daarnaast is getracht om middels een modelstudie meer inzicht te krijgen in het systeem en de verspreiding van stoffen uit het effluent; de resultaten hiervan zijn opgenomen in Hoofdstuk 3.

De proef is tevens ingebed in een onderzoeksproject binnen het NWO-programma 'Gesloten kringlopen'. Daarin werken twee PhD-onderzoekers aan kennisopbouw op het thema 'hergebruik van effluent via subirrigatie' in het project RUST⁴ (Re-Use of Treated effluent for agriculture) via hydrologische modellering van relevante processen en monitoring van zogenaamde 'Contaminants of Emerging Concern (CEC)' te Haaksbergen. Binnen NWO-RUST zijn intussen twee artikelen verschenen (Narain-Ford et al., 2020; Narain et al., 2020). De analyse van CEC's in het grondwater, bodemvocht en gewas loopt nog en is niet opgenomen in deze rapportage. De resultaten hiervan worden medio 2021 verwacht en worden opgenomen in wetenschappelijke publicaties vanuit NWO-RUST.

⁴ <https://www.kwrwater.nl/projecten/re-use-of-treated-effluent-for-agriculture-rust/>

2 Methoden

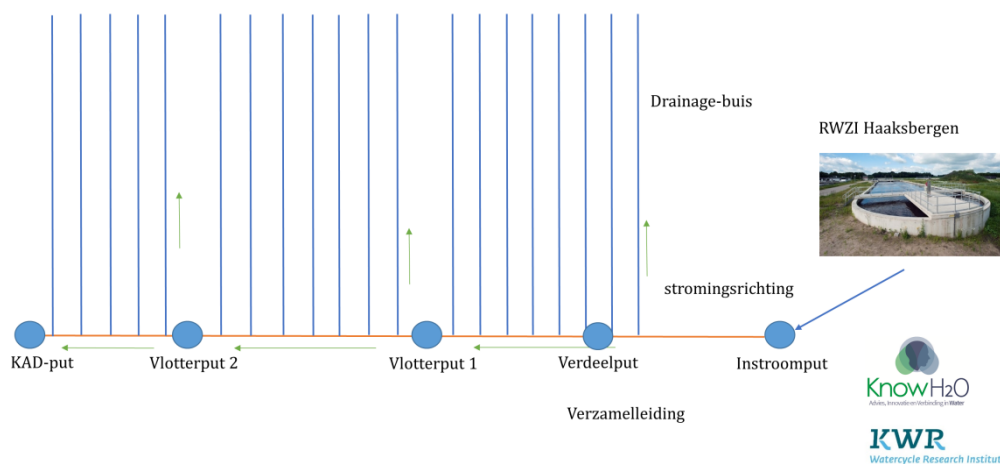
2.1 Toelichting

In dit hoofdstuk geven we een kort overzicht van de veldsituatie en de meetopstelling. Voor een uitgebreide beschrijving van de methoden wordt verwezen naar de eerdere rapporten over dit onderzoek (Bartholomeus et al., 2017; Bartholomeus et al., 2016).

2.2 Toepassing en metingen subirrigatie

De proef is uitgevoerd op een naast de RWZI Haaksbergen gelegen perceel (Figuur 1-5). Op dit perceel wordt mais verbouwd. Het aanwezige drainagesysteem is aangesloten op een KAD-systeem, waarmee het drainageniveau op afstand geregeld kan worden (Figuur 2-1). Omdat het maaiveldniveau in het perceel varieert, worden vlotterputten gebruikt om het drainageniveau op de hoger gelegen delen op een hoger niveau in te stellen (0.3 meter hoger dan het benedenstroomse deel). Via een instroomput wordt effluent uit RWZI Haaksbergen in het systeem gebracht, waarna het via de drainagebuizen kan infiltreren in de ondergrond. De afgelopen 5 jaar (2015-2019) heeft subirrigatie plaatsgevonden tijdens alle groeiseizoenen. De data hiervan zijn opgenomen in Tabel 2-1.

Gedurende de proef is de aanvoer van effluent gemeten met een ELSTERQ4000 debietmeter die wekelijks wordt afgelezen. Ook wordt sinds 2018 de afvoer via de KAD put gemeten middels een automatische debietmeter (Kamstrup IQ-Flow 3100). Tijdens de subirrigatieperiode in 2018 is het cumulatieve debiet ongeveer elke maand geregistreerd en vanaf 2019 dagelijks.



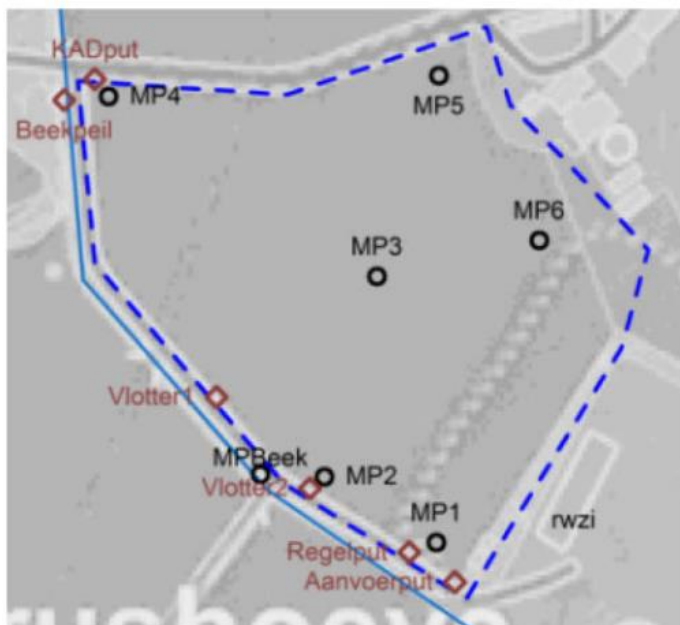
Figuur 2-1. Schematisch bovenaanzicht van het subirrigatiesysteem, dat bestaat uit drainagebuizen (blauwe lijnen), een aan- en afvoerbuiz (oranje) en verschillende putten (blauwe cirkels)..

Tabel 2-1. Start- en einddata van de subirrigatie in de jaren 2015 – 2019 en het aantal dagen van subirrigatie.

Jaar	Startdatum	Einddatum	Aantal dagen
2015	3 – 6	9 – 10	128
2016	31 – 5	21 – 9	113
2017	4 – 5	12 – 10	161
2018	16 – 5	25 – 10	162
2019	2 – 5	4 - 10	155

2.3 Veldmetingen

In 2015 is een meetopstelling ingericht voor het monitoren van de verspreiding van het sub- irrigatiewater in zowel horizontale als verticale richting, inclusief verspreiding van in het gebruikte effluent aanwezige stoffen, zoals resten van geneesmiddelen (Bartholomeus et al., 2016). In 2016 is de meetopstelling uitgebreid met extra meetpunten. In 2018 is nogmaals een extra meetpunt toegevoegd en tevens een referentiemeetpunt op een nabij gelegen perceel waar geen subirrigatie plaatsvindt (in het midden van het perceel ten westen van het proefveld). Dit laatste meetpunt biedt de mogelijkheid om een vergelijking te maken tussen percelen onder vergelijkbare omstandigheden, mét en zonder subirrigatie. Figuur 2-2 en Tabel 2-2 geven de meetlocaties en type metingen weer en Tabel 2-3 geeft weer op welke dieptes van de verschillende meetpunten er bemonstering heeft plaatsgevonden.



Figuur 2-2. Overzicht van de putten ten behoeve van de subirrigatie (in rood) en de meetlocaties (in zwart) in het onderzoeksperceel in Haaksbergen.

Tabel 2-2. Overzicht van de meetpunten en metingen

Meetpunt	Metingen	Sinds	Opmerking
MP1	Ondiepe peilbuis Minifilters	2015	Nabij de inlaat van het effluent, direct naast een drain
MP2	Ondiepe peilbuis Minifilters Rhizons Bodemvocht en EC	2015	Bovenstrooms van vlotterput 2, direct naast een drain
MP3A	Diepe en ondiepe peilbuis Minifilters Rhizons Bodemvocht en EC	2015	Midden van het perceel, midden tussen twee drains, ten noordwesten van MP3B
MP3B	Ondiepe peilbuis Minifilters Rhizons	2015	Midden van het perceel, direct naast een drain
MP3D	Diepe peilbuis Minifilters	2018	Midden van het perceel, direct naast de drain die ten zuidoosten ligt van MP3B
MP4	Diepe en ondiepe peilbuizen Minifilters	2016	Midden tussen twee drains
MP5	Diepe en ondiepe peilbuizen Minifilters	2016	Midden tussen twee drains
MP6	Diepe en ondiepe peilbuizen Minifilters	2016	Midden tussen twee drains
MPBeek	Diepe peilbuis Minifilters	2016	Direct naast de beek
Referentie	Ondiepe peilbuis	2018	In het middel van het perceel ten westen van het proefveld
Aanvoerput	Waterniveau EC		
Vlotterput 1	Waterniveau		
Vlotterput 2	Waterniveau		
Afvoerput/KAD put	Waterniveau EC		

Tabel 2-3. Maaiveldniveau van de meetpunten en diepte van de rhizons (RH) en minifilters (MF) ten opzichte van het maaiveld. De drains bevinden zich op 1.2 m onder maaiveld.

Meetpunt	Maaiveld (m NAP)	RH1 (m- mv)	RH2 (m- mv)	RH3 (m- mv)	MF1 (m- mv)	MF2 (m- mv)	MF3 (m- mv)	MF4 (m- mv)	MF5 (m- mv)	MF6 (m- mv)	MF7 (m- mv)
MP1	22.176										
MP2	20.995	0.2	0.6	1	1.25	1.8	2.3				
MP3A	20.76	0.2	0.6	1	1.3	1.85	2.35	5	7.5	11.8	
MP3B	20.7442	0.2	0.6	1	1.29	1.84	2.34				
MP3D	20.7251				1.3	1.9	2.4	5	7	10	
MP4	20.322				1.04	1.59	2.09	5	7	9	
MP5	20.4763				1.24	1.79	2.29	4	7.5	10	
MP6	21.2441				1.27	1.82	2.32	5	8.5	9.8	14
MPBeek	20.3942				1.5	2.5	5	7.5	10		
Referentie	20.9195										

2.4 Bemonstering en chemische analyses

Ieder jaar is het grond- en bodemwater op de meetlocaties (minifilters en rhizons) bemonsterd vóór, tijdens en na de subirrigatie. Verwacht wordt dat met deze meetmomenten de meeste situaties in beeld worden gebracht. De watermonsters zijn gefiltreerd over 0,45 µm en geanalyseerd op EC, pH, elementen, nutriënten en organische stof. In 2016 is ook op geneesmiddelenresten (niet gefiltreerd) bemonsterd. Tabel 2-4 bevat een overzicht van de chemische analyses op de verschillende meetpunten en over de verschillende jaren. De metingen voor EC en pH zijn in het veld uitgevoerd, direct na monsternamen, met behulp van een WTW EC/pH meter. De analyses voor de concentraties van de elementen zijn uitgevoerd door Bureau Veritas in Canada en voor nutriënten door het CBLB in Wageningen.

In dit rapport wordt bij de interpretatie de nadruk gelegd op de EC en de ratio tussen chloride en bromide (Cl:Br ratio) welke als tracer dient voor effluent. Voor de overige stoffen wordt voor nu verwezen naar eerdere rapportages (Bartholomeus et al., 2017). Analyse van een breed spectrum aan microverontreinigingen wordt uitgevoerd en gerapporteerd binnen het project NWO-RUST; hiervoor zijn vanaf 2017 monsters verzameld die middels zogenaamde 'brede screening' worden geanalyseerd. De resultaten hiervan worden medio 2021 verwacht en worden vervolgens in internationale wetenschappelijke publicaties vastgelegd.

Tabel 2-4. Overzicht van meetmomenten chemie en geanalyseerde parameters

Jaar	Voor subirrigatie	Tijdens subirrigatie	Na / aan eind van subirrigatie	EC / pH	Elementen	Nutriënten	Geneesmiddelen	Monsternamen voor brede screening (in NWO-RUST)
2015	8 – 4	8 – 7 10 – 9	13 / 29 – 10	x	*		x	
2016	24 – 5 / 31 – 5	18 – 7 13 – 9	1 – 11	x	x	x	x	
2017	18 – 4	3 – 7	26 – 9	x	x	x		x
2018	14 – 5	9 – 8	23 – 10	x	x	x		x
2019	30 – 4	11 – 7	7 - 10	x	x	x		x

* Alleen chloride en bromide

2.5 Modelstudie

2.5.1 Algemene aanpak

De modelstudie heeft als doel om de mogelijke patronen van waterstroming en stoftransport door subirrigatie onder verschillende omstandigheden te bestuderen. We hebben een conceptuele schematisatie gemaakt op basis van de situatie bij MP3, waarin de waterstroming (verzadigd en onverzadigd) en stoftransport is gesimuleerd.. Dit model is gebruikt voor een gevoeligheidsanalyse. Het model kan gebruikt worden om inzicht te krijgen in de processen die in het veld van toepassing kunnen zijn, alsmede ter illustratie van de variatie aan patronen die in werkelijkheid zouden kunnen ontstaan. De opzet van het basismodel wordt beschreven in 2.5.2

In de simulaties wordt een periode van een jaar gesimuleerd, waarbij gestart wordt met subirrigatie, gevolgd door een periode waarin slechts drainage plaatsvindt. In de gevoeligheidsanalyse zijn verschillende parameters los van elkaar gevarieerd, om te zien welke invloed zij hebben op het stromingsbeeld en de verspreiding van stoffen. De gevoeligheidsanalyse wordt verder toegelicht in 2.5.3.

Na de gevoeligheidsanalyse zijn er enkele simulaties uitgevoerd die de effecten van meer realistische (niet constante) meteorologische randvoorwaarden, meerjarige subirrigatie en heterogeniteit in de ondergrond illustreren, welke verder worden beschreven in 2.5.4.

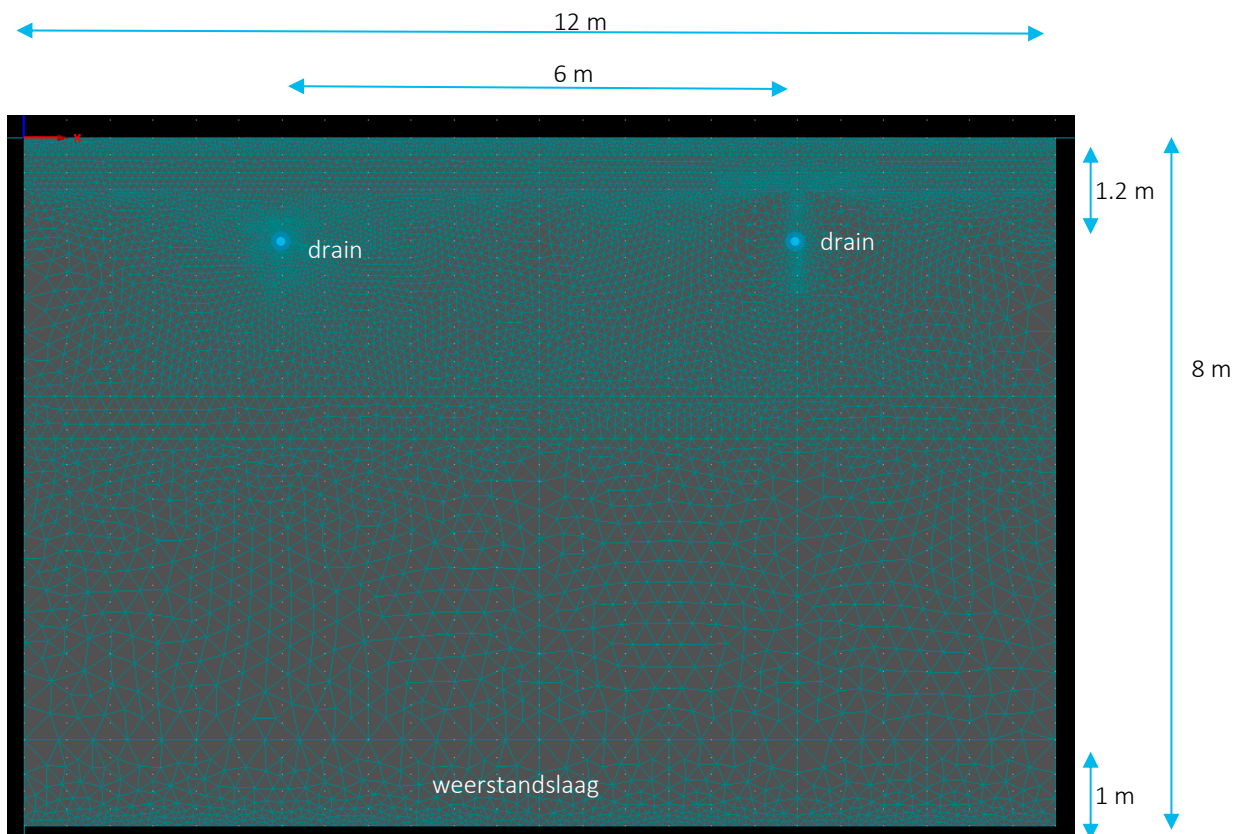
2.5.2 Basismodel

Met behulp van de software Hydrus2D/3D (Simunek et al., 2018) is een 2D model ontwikkeld van een verticale doorsnede van het perceel. In dit model wordt grondwaterstroming, stroming in de onverzadigde zone, neerslag en evapotranspiratie (inclusief wortelopname) en stoftransport gesimuleerd. De geometrie van het model (Figuur 2-3) is gebaseerd op een vereenvoudigde doorsnede van de bodem, haaks op de ligging van de drains. Er zijn twee drains in de schematisatie opgenomen. De drains hebben een diameter van 4 cm, op basis van een berekening van de effectieve draindiameter in Bartholomeus et al. (2016). Voor de gehele doorsnede is een isotroop, zandig bodemtype aangenomen op basis van de verwachte eigenschappen van het grootste deel van deze bodem

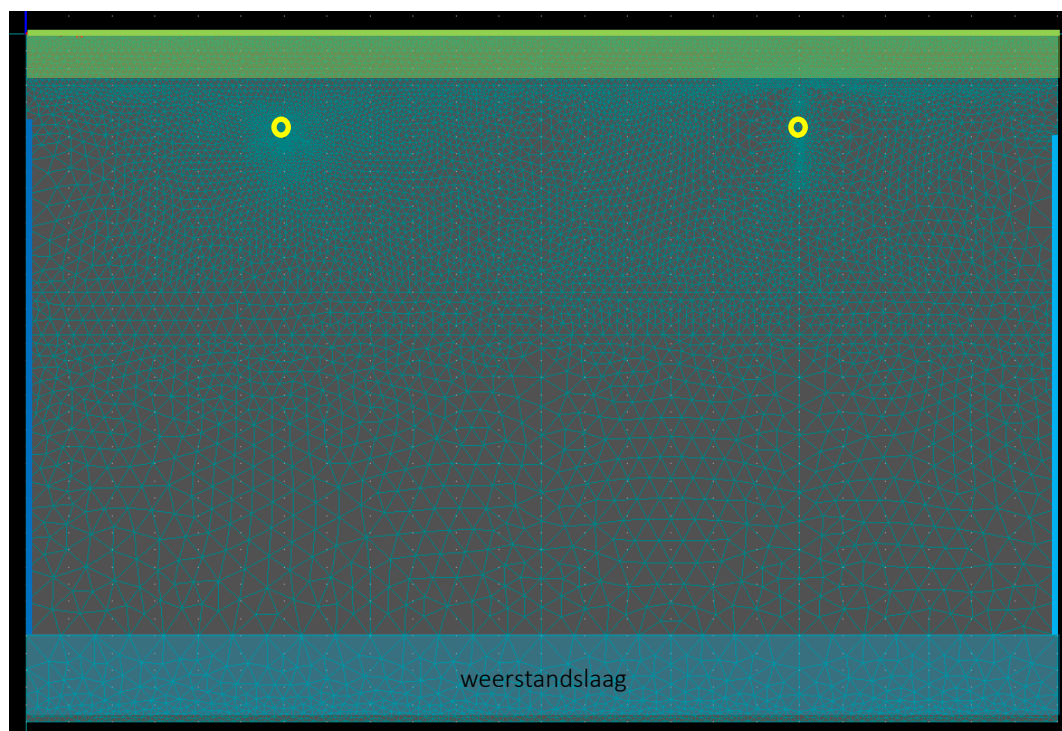
(Bartholomeus et al., 2016), waarvan de bodemfysische parameters in Tabel 2-5 zijn opgenomen. De onderste meter van de doorsnede betreft een weerstandslaag met een lagere doorlatendheid (Tabel 2-5).

Tabel 2-5. Bodemfysische parameters

Parameter	Zandbodem	Weerstandslaag
θ_r [-]	0.02	
θ_s [-]	0.43	
α [1/m]	2.34	
n [-]	1.801	
K_s [m/d]	15	0.01
l [-]	0	



Figuur 2-3. Schematisatie en discretisatie van het model.



Figuur 2-4. Randvoorwaarden van het model. Groene lijn: atmosferische randvoorwaarde(neerslag en evaporatie), groen vlak: wortelzone (transpiratie), rood: vaste stijghoogte, blauw: opgelegde fluxdichtheid, geel: variabele stijghoogte tijdens subirrigatie, 'seepage face' tijdens drainagefase.

De randvoorwaarden van het model zijn weergegeven in Figuur 2-4. Bij de atmosferische randvoorwaarde aan het bodemoppervlak zijn neerslag en verdamping opgelegd. De transpiratievraag is afhankelijk van de worteldichtheid verdeeld over de 60 cm diepe wortelzone (worteldichtheid neemt elke 20 cm afneemt via de volgende wegingsfactoren: 1 : 0.3 : 0.1). In het basismodel wordt gebruik gemaakt van constante, gemiddelde meteorologische omstandigheden (i.e. neerslag: 2 mm/d, transpiratie: 1 mm/d en evaporatie: 0.1 mm/d). Samen met de weerstandslaag vormt de vaste drukhoogte aan de onderrand een Cauchy randvoorwaarde, waarbij de wegzijging afhangt van de stijghoogte in de rest van het model. In het basismodel is de drukhoogte 6.78 m, dat resulteert in een beperkte wegzijging van bijna 3 mm/d tijdens subirrigatie en minder dan 0.01 mm/d tijdens drainage.

De randvoorwaarde bij de drains verschilt per situatie: tijdens de subirrigatie wordt hier een drukhoogte opgelegd (50 cm in het basismodel), maar tijdens de drainagefase is de randvoorwaarde 'seepage face' opgelegd, wat betekent dat bij positieve drukhoogten de drukhoogte 0 wordt opgelegd (waardoor afvoer plaatsvindt) en anders het een 'no flow boundary' is. Om deze functies te combineren zijn de simulaties in twee deelmodellen uitgevoerd, waarbij de resulterende drukhoogten en concentraties aan het einde van de eerste fase middels een Matlab script worden gekopieerd als invoer voor de volgende fase.

Aan de zijranden is een fluxdichtheid opgelegd over het verzadigde traject, om al dan niet optredende laterale stroming mee te kunnen nemen. In het basismodel wordt geen laterale stroming verondersteld (fluxdichtheid is 0 m/d).

Tijdens de subirrigatieperiode wordt voor twee stoffen een constante concentratie van 1000 mmol/l opgelegd bij de drain aan de rechterkant, zodat vanaf die drain de pluim gevolgd kan worden. Deze stoffen zijn illustratief bedoeld voor de verspreiding van het scala aan stoffen (met bijbehorend scala aan eigenschappen) dat kan voorkomen in effluent. De eerste stof is volledig conservatief (vergelijkbaar met bijvoorbeeld chloride of bromide) en de tweede stof vertoont sterke sorptie aan het bodemmateriaal waardoor de stof minder mobiel is. Deze stof is vergelijkbaar met het medicijn carbamazepine dat in effluent relatief veel voorkomt, omdat het persistent en

mobiel is in water, maar in bodems hecht het zich snel aan bodemdeeltjes, waardoor het relatief immobiel is in bodems (Williams et al., 2006). Het verspreidingsgedrag van de tweede stof is gesimuleerd met behulp van non-equilibrium sorptie, met een lineaire isotherm met een coëfficiënt van 10 en een massatransfercoëfficiënt van 0.4 d⁻¹. De ordegrootte deze sorptie-eigenschappen zijn vergelijkbaar met de eigenschappen van carbamazepine (Durán-Álvarez et al., 2012).

Als beginconditie is gekozen voor een hydrostatisch evenwicht, met de grondwaterstand op het niveau van de drains. Voor de weerstandslaag is een lineaire gradiënt gekozen, die varieert tussen de stijghoogte aan de bovenrand (gelijk aan drainniveau) en aan de onderrand (vastgestelde randvoorwaarde). De initiële concentratie voor opgeloste stoffen is 0 mmol/l in het gehele domein.

2.5.3 Gevoeligheidsanalyse

Tabel 2-6 geeft de parameters weer die zijn gevarieerd in de gevoeligheidsanalyse, die bedoeld is om zichtbaar te maken wat het effect is van de betreffende parameters.

Tabel 2-6. Parameters die zijn gevarieerd in de gevoeligheidsanalyse

Parameter	Basis-model	Gevoeligheidsanalyse (min – max waarde)		Opmerking
Neerslag (mm/d)	2	1	3	
Transpiratie tijdens subirrigatie (mm/d)	2.2	1	3	
Transpiratie na subirrigatie (mm/d)	0.8	0.5	1.5	
Laterale stroming (m/d)	0	0.01	0.02	In perceel naar schatting zo'n 0 – 0.02 m/d, en in een enkel geval 0.04 m/d (Bartholomeus et al., 2017)
Drukhoogte aan onderrand van model (t.b.v. wegzijging/kwel) (m)	6.78	6.73	6.83	
Verzadigde doorlatendheid (m/d)	15	5	50	
Dispersiviteit (m)	0.05	0.01	0.1	Waarde is longitudinale dispersiviteit; transversale is in alle gevallen vijf keer zo klein
Tijdsduur van de subirrigatie (d)	150	100	200	Zie ook Tabel 2-1
KAD-niveau tijdens subirrigatie (m)	0.5	0.25	0.75	

De gevoeligheidsanalyse is geautomatiseerd met een Matlab script, dat steeds een nieuw model maakte uit het basismodel door de betreffende parameters te wijzigen, waarna de simulaties als batch gerund konden worden.

2.5.4 Overige simulaties

Na de gevoeligheidsanalyse zijn er twee simulaties uitgevoerd waarbij er 10 jaren met subirrigatie zijn gesimuleerd. Voor deze simulaties zijn de meteorologische randvoorwaarden gebaseerd op meetdata van het KNMI, voor meetstation Twente tijdens de periode 1 mei 2010 tot 30 april 2020. Hierbij is er vanuit gegaan dat subirrigatie steeds plaatsvond van 1 mei tot en met 30 september. De randvoorwaarde voor neerslag is rechtstreeks overgenomen van de meetdata (zonder aanname voor interceptie) en voor evaporatie en transpiratie zijn (gewas) factoren van respectievelijk 0.1 en 1.2 aangenomen tijdens de subirrigatieperiode en 0.1 en 0.5 tijdens de drainageperiode waarmee de Makkink potentiële evapotranspiratie van het KNMI is vermenigvuldigd. Eén simulatie

is uitgevoerd zonder laterale stroming en de andere simulatie is uitgevoerd met een laterale stroming van 0.01 m/d.

Daarnaast zijn er twee simulaties uitgevoerd waarbij het effect van heterogeniteit wordt geïllustreerd door het toevoegen van een leemlaag op een diepte van 3 tot 3.5 m, met een doorlatendheid van 0.5 m/d. Hierbij is gebruik gemaakt van dezelfde randvoorwaarden als bovenstaande simulaties, waarbij twee jaren zijn doorgerekend (van 1 mei 2010 tot 30 april 2012).

3 Resultaten

In dit hoofdstuk worden allereerst de resultaten van de veldproef besproken. Hierbij gaat de aandacht uit naar waterkwantiteit (aanvoer, afvoer, grondwaterstanden en bodemvocht) en vervolgens naar kwaliteit (metingen van stoffen in het bodemvocht en grondwater). Vervolgens worden de resultaten van de modelstudie beschreven, waarin verschillende processen worden verkend die mogelijk invloed hebben op de verspreiding van het effluent in de ondergrond.

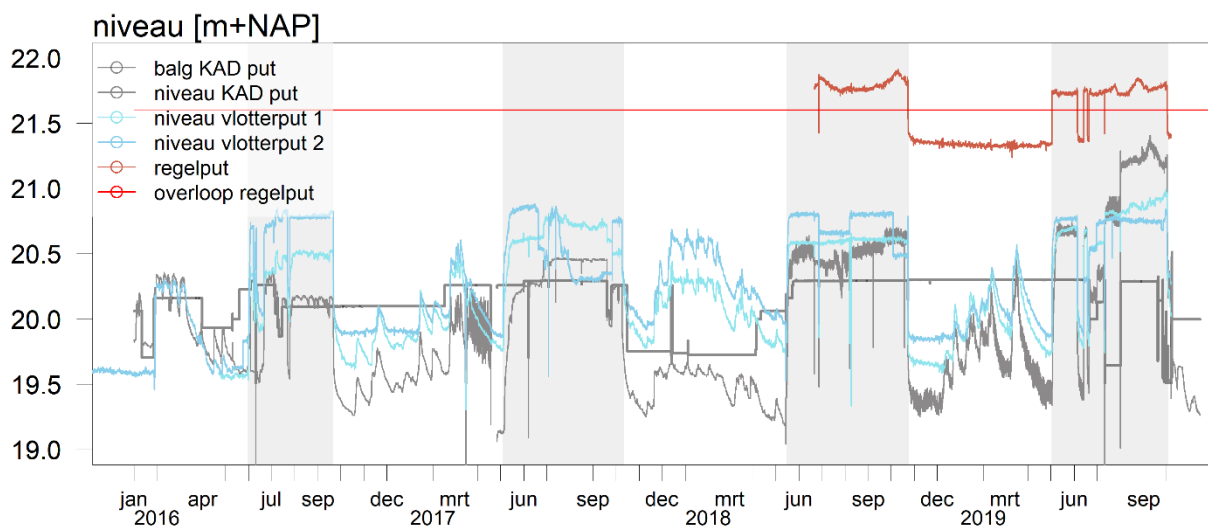
3.1 Waterkwantiteit

3.1.1 Neerslag en aan- en afvoer

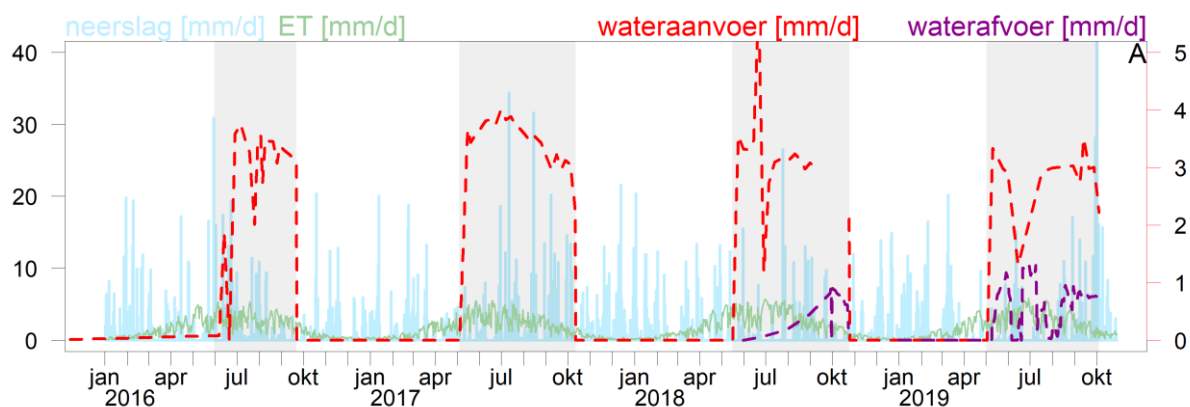
De water- en overloophniveaus in de putten van het subirrigatiesysteem zijn weergegeven in Figuur 3-1. De grijze vlakken geven de periodes met wateraanvoer aan, wat te zien is aan de hoge waterniveaus in de verschillende putten.

In Figuur 3-2 en Tabel 3-1 zijn de neerslag, potentiële evapotranspiratie en (gemiddelde) aan- en afvoer via het subirrigatiesysteem weergegeven. De aanvoer van effluent bedraagt zo'n 3-4 mm per dag, en heeft daarmee de orde grootte van de dagelijkse potentiële evapotranspiratie tijdens het groeiseizoen. Het aanvoerdebiet lijkt beperkt te worden door de capaciteit van de pomp die voor de wateraanvoer zorgt. De infiltratiecapaciteit van het subirrigatiesysteem en het neerslagtekort bepalen vervolgens of het aangevoerde water ook geheel ten goede komt aan de grondwateraanvulling, of dat het weer afgevoerd wordt bij de KAD put.

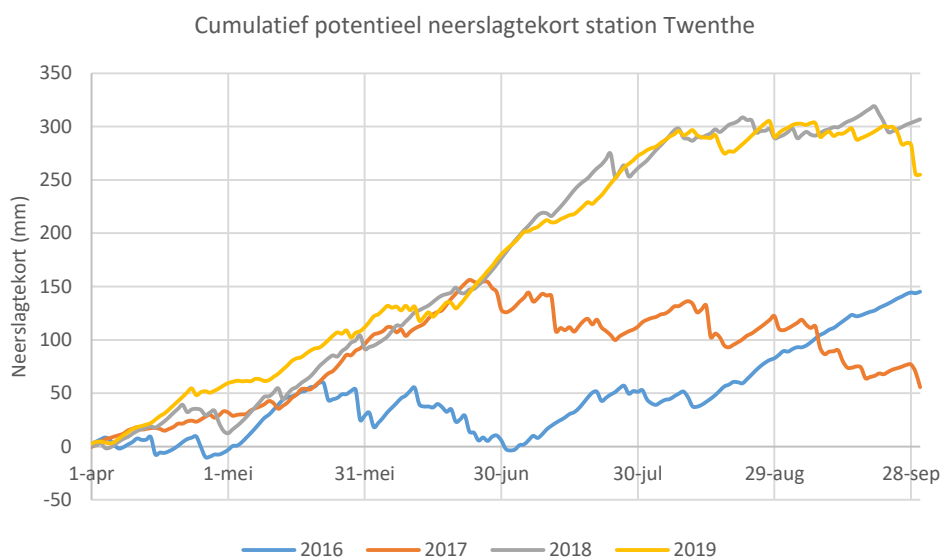
In de loop van de subirrigatieperiode van 2018 en in de gehele periode van 2019 is er sprake van afvoer van water, ook in periodes met weinig neerslag, ondanks het grote neerslagtekort in deze jaren (Figuur 3-3). Hieruit kan worden geconcludeerd dat de infiltratiecapaciteit van het systeem lager is dan de wateraanvoer en dat die beperkte infiltratiecapaciteit dan ook de beperkende factor is voor het op peil houden van de grondwaterstanden in het perceel.



Figuur 3-1. Niveaus van de putten van de subirrigatieinstallatie. De grijze vlakken geven de periodes met subirrigatie aan. Het waterniveau in de KAD-put van half juli 2019 zijn waarschijnlijk niet correct geregistreerd.



Figuur 3-2. Neerslag, potentiële evapotranspiratie (ET) (bij KNMI station Twenthe, KNMI, 2020) (linker y as) en aan- en afvoer via het subirrigatiesysteem zoals gemeten op de veldlocatie (rechter y as) in de jaren 2016-2019. Afvoer is vanaf de start van het subirrigatieseizoen in 2018 gemeten. Let op de verschillende schaal van beide y-assen.



Figuur 3-3. Neerslagtekort in de jaren 2016-2019 voor KNMI station Twenthe. Bron: KNMI (2020).

Tabel 3-1. Totale en gemiddelde aan- en afvoer tijdens de perioden van subirrigatie in de jaren 2016-2019

Jaar	Totale aanvoer (m ³)	Totale aanvoer (mm)	Gemiddelde aanvoer (mm d ⁻¹)	Totale afvoer (m ³)	Totale afvoer (mm)	Gemiddelde afvoer (mm d ⁻¹)
2016	18977	324	3.0			
2017	32890	562	3.5			
2018	29416	503	3.1	3721	64	0.4
2019	25655	439	2.8	4294	73	0.7

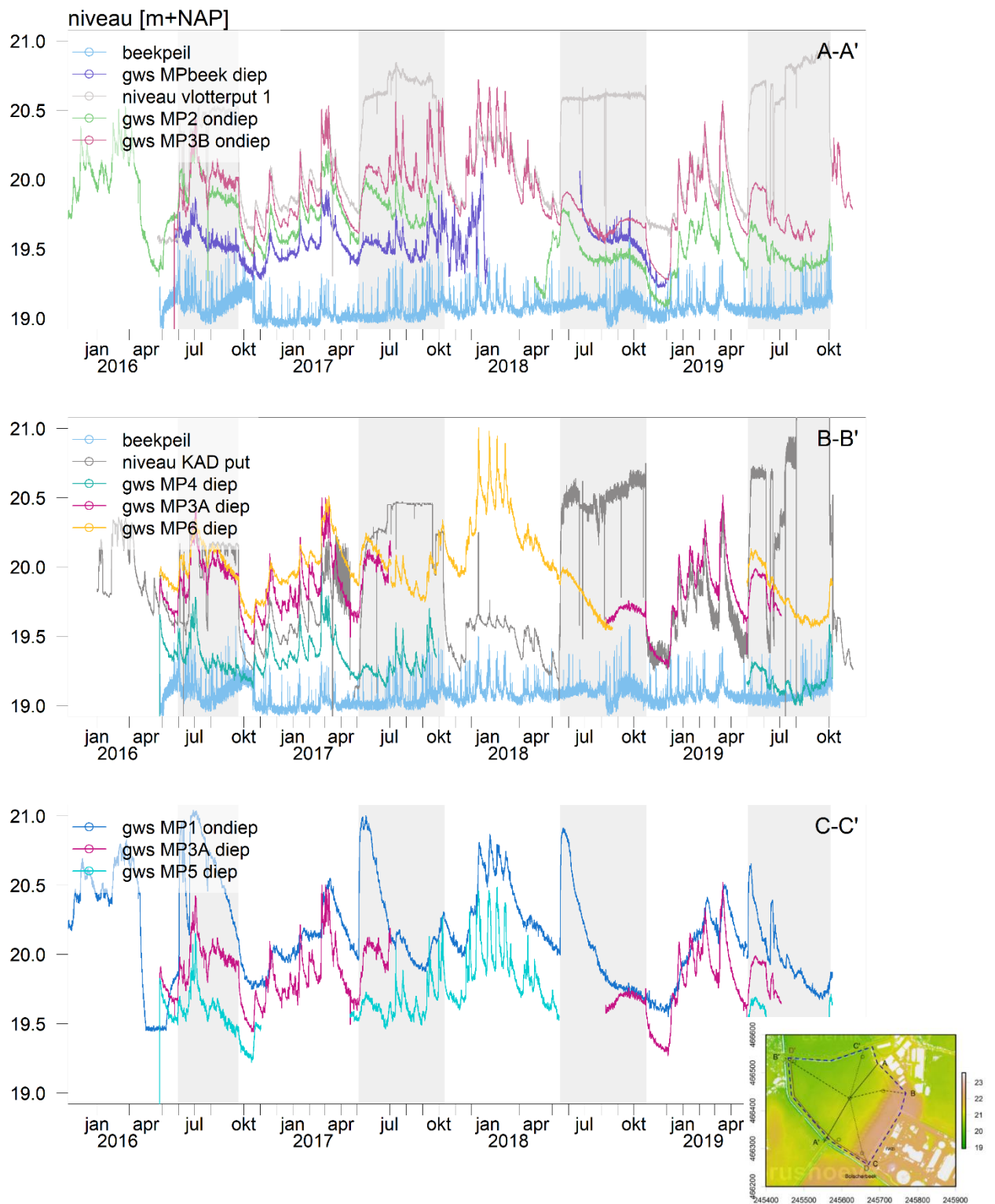
3.1.2 Grondwater en bodemvocht

Figuur 3-4 geeft de grondwaterstanden in het perceel weer. In de meeste situaties is er sprake van een duidelijke gradiënt vanaf het hoger gelegen deel van het perceel (MP6, MP1) dat het meest nabij de aanvoerput ligt, naar het midden (MP3) tot aan de randen (MP2, MP4, MP5). Het grondwater bij de beek heeft een lagere stijghoogte en het beekpeil ligt nog lager. De beek werkt hierdoor drainerend op het perceel. Aan het begin van de perioden van subirrigatie stijgen de grondwaterstanden, dat het sterkst zichtbaar is op de hoger gelegen locaties. De grondwaterstanden lijken tijdens de subirrigatie beperkt uit te zakken, behalve in de extreem droge zomer van 2018 wanneer er vrijwel geen sprake meer lijkt te zijn van laterale gradiënten in het perceel zelf.

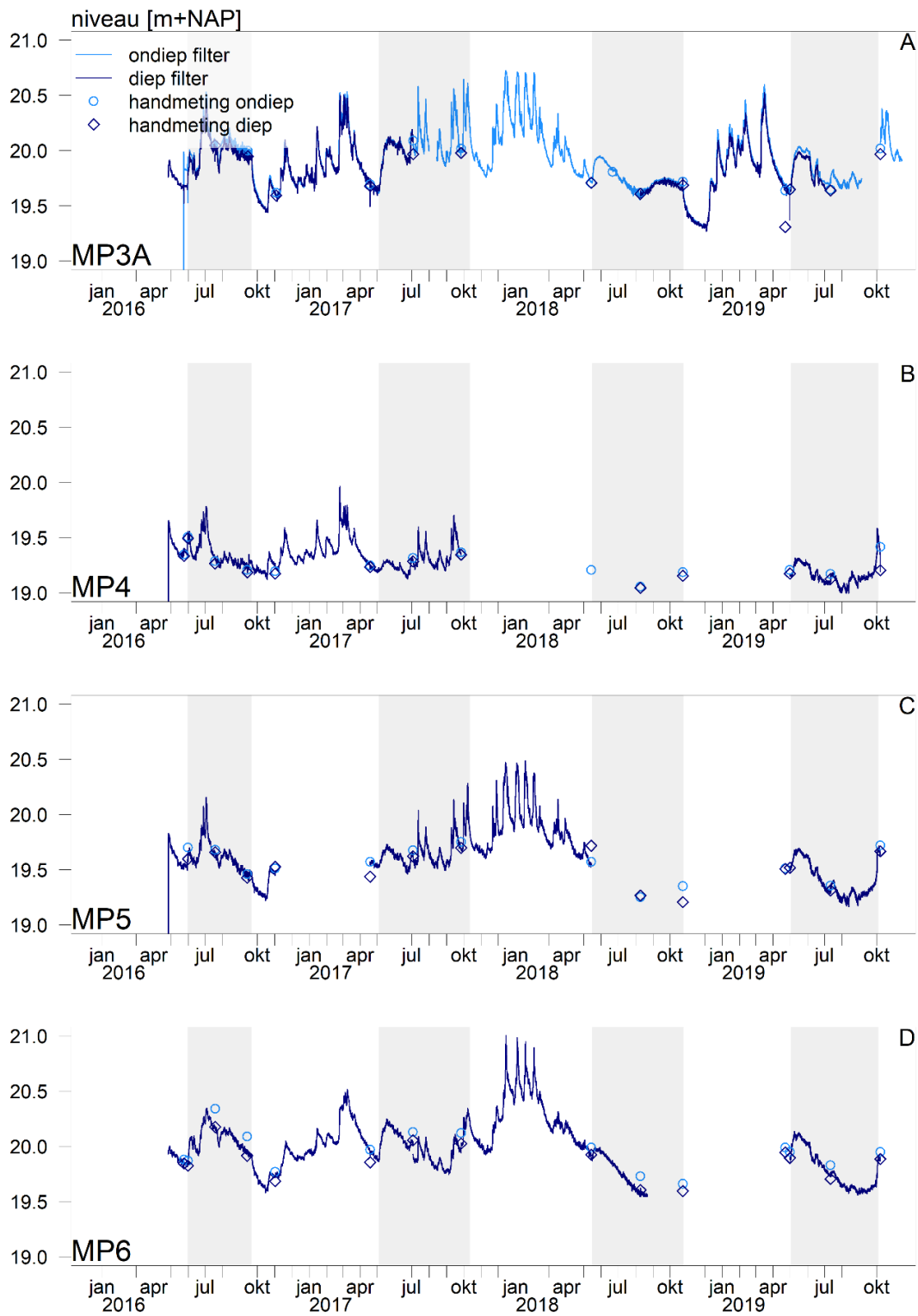
Wanneer de stijghoogten van diepe en ondiepe filters worden vergeleken (Figuur 3-5) wordt duidelijk dat diepe en ondiepe stijghoogten dezelfde patronen volgen, zij het dat op grotere diepte de stijghoogte vaak net iets lager is, wat wijst op (beperkte) wegzijging. Midden op het perceel, bij meetpunt 3, blijkt dat de grondwaterstanden nabij de drains vrijwel dezelfde patronen volgen als tussen de drains.

Het bodemvochtgehalte op drie diepten tussen de drains laat zien dat tijdens perioden van subirrigatie het bodemvocht op 80 en 50 cm diepte meestal op peil wordt gehouden, ook al droogt het nabij het oppervlak (op 10 cm diepte) meer uit. In de zomer van 2018 zijn op 50 cm iets verlaagde waarden van het bodemvocht ten opzichte van andere jaren gevonden (in de zomer van 2019 zijn van deze diepte geen metingen beschikbaar als gevolg van uitval van de sensor).

Voor elk jaar geldt dat de van nature dalende trend van de grondwaterstand in het voorjaar wordt omgezet in een stijging door subirrigatie. In de extreem droge jaren van 2018 en 2019 blijkt dat een minder hoge grondwaterstand gerealiseerd kan worden dan in de jaren ervoor. Het stijghoogteverschil tussen de regelputten en de grondwaterstand wordt ook groter, wat tot een hogere infiltratieflux zou moeten leiden. Echter, ondanks het grotere stijghoogteverschil, wordt er nog water afgevoerd uit het systeem (Figuur 3-2). De infiltratiecapaciteit van het systeem was in deze jaren dus onvoldoende om het grondwater voldoende aan te vullen. Dit kan te maken hebben met de weerstand van het drainagesysteem zelf, maar kan ook duiden op geleidelijke verstopping van het systeem. Toch is de grondwaterstand nog aanzienlijk hoger dan dat deze zonder subirrigatie geweest zou zijn. Dit blijkt onder meer uit de sterke daling van de grondwaterstand direct na het stoppen van de wateraanvoer. Geconcludeerd kan worden dat door subirrigatie wordt voorkomen dat de grondwaterstand in het perceel in het groeiseizoen diep wegzakt.



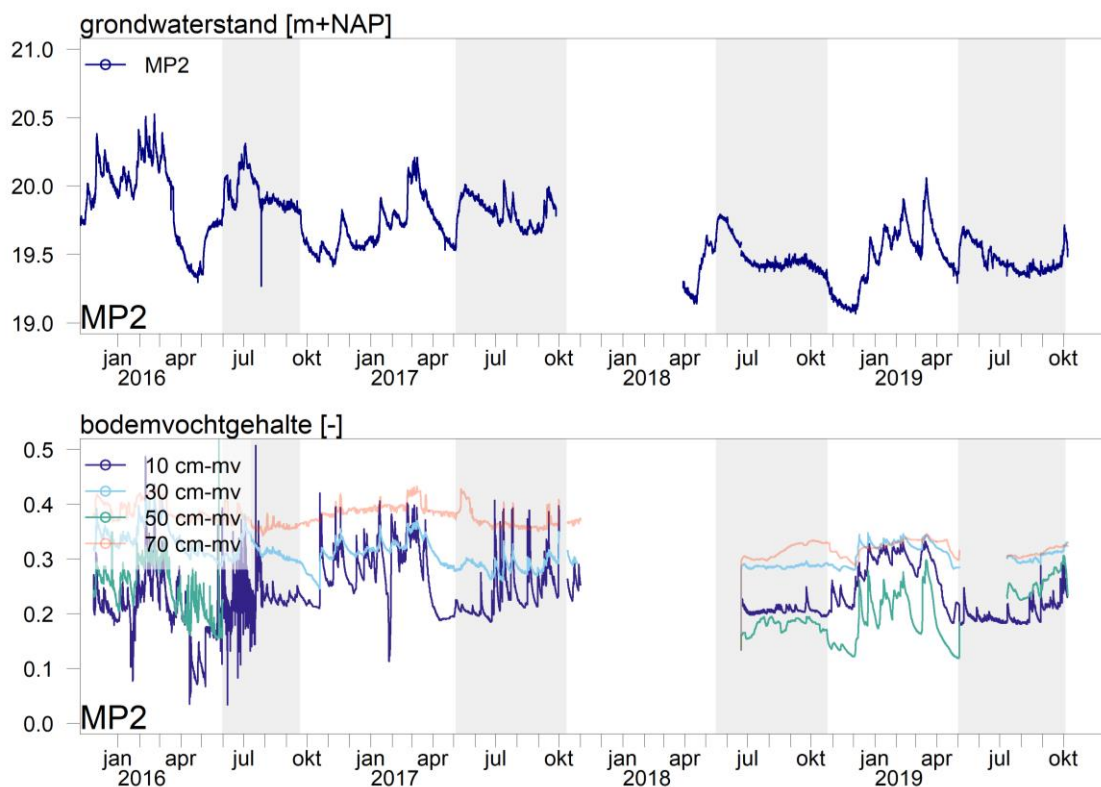
Figuur 3-4. Grondwaterstanden stijghoogten op de meetpunten in het perceel, geordend volgens drie transecten (zie inzet).



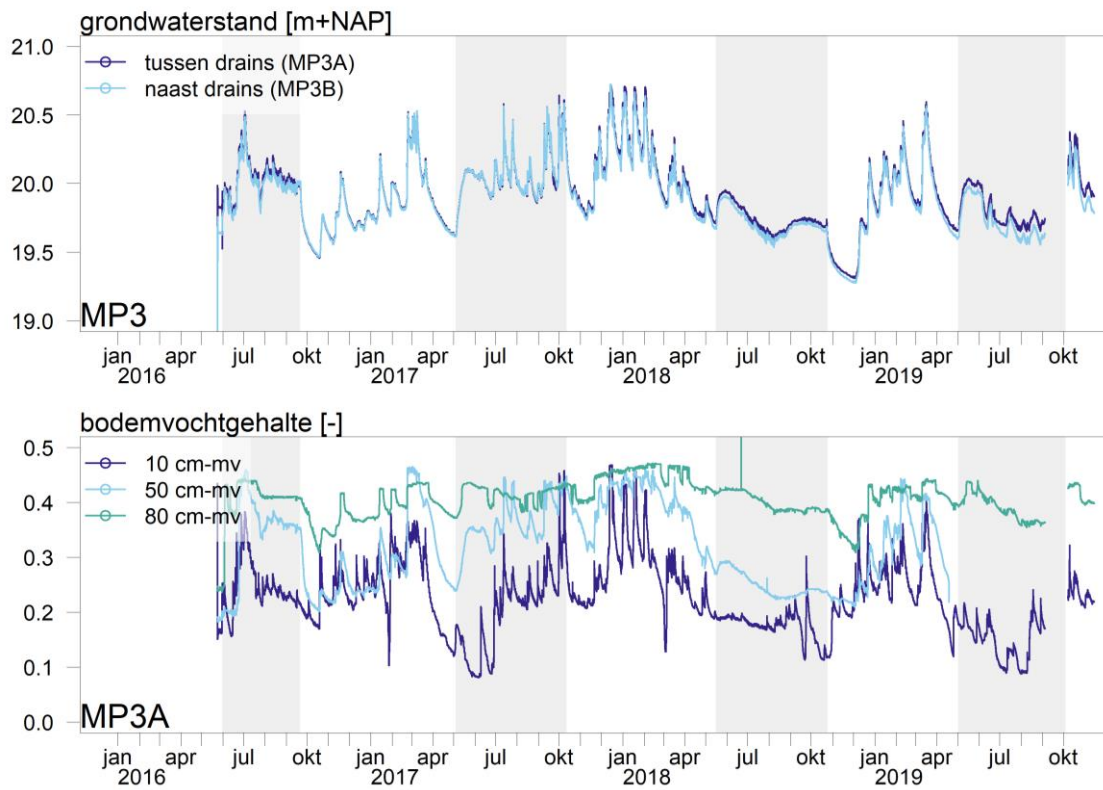
Figuur 3-5. Grondwaterstanden/stijghoogten in diepe en ondiepe filters op vier van de meetlocaties.

De bodemvochtgehalten bij MP2 en MP3 (Figuur 3-6 en Figuur 3-7) vertonen patronen zoals deze verwacht zouden worden: ze variëren sterk over de diepte, nabij het oppervlak zijn er sterke fluctuaties en op grotere diepte wordt het vochtgehalte gemiddeld hoger en meer constant.

Bij MP3 blijkt dat de grondwaterstanden nabij de drains vrijwel dezelfde patronen volgen als tussen de drains. Het bodemvochtgehalte op drie diepten tussen de drains laat zien dat tijdens perioden van subirrigatie het bodemvocht op 80 en 50 cm diepte meestal op peil wordt gehouden, ook al droogt het nabij het oppervlak (op 10 cm diepte) meer uit. In de zomer van 2018 zijn op 50 cm iets verlaagde waarden gevonden (van de zomer van 2019 waren van deze diepte geen metingen beschikbaar), wat kan samenhangen met de aanwezigheid van een zandige laag op deze diepte (zie Bartholomeus et al. (2017), Figuur 2-12).



Figuur 3-6. Grondwaterstand bij MP2 en bodemvochtgehalten op verschillende dieptes. Wegens storingen zijn de bodemvochtsensoren in de zomer van 2018 vervangen, waardoor de patronen voor en na dit moment slechts beperkt vergeleken kunnen worden.

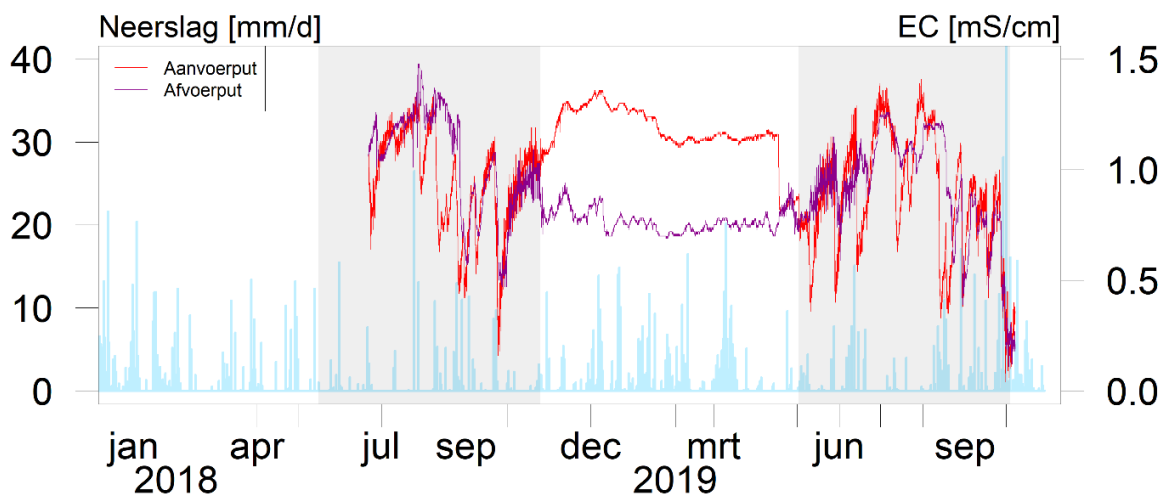


Figuur 3-7. Grondwaterstanden tussen en naast de drains (boven) en bodemvochtgehalten bij meetpunt 3.

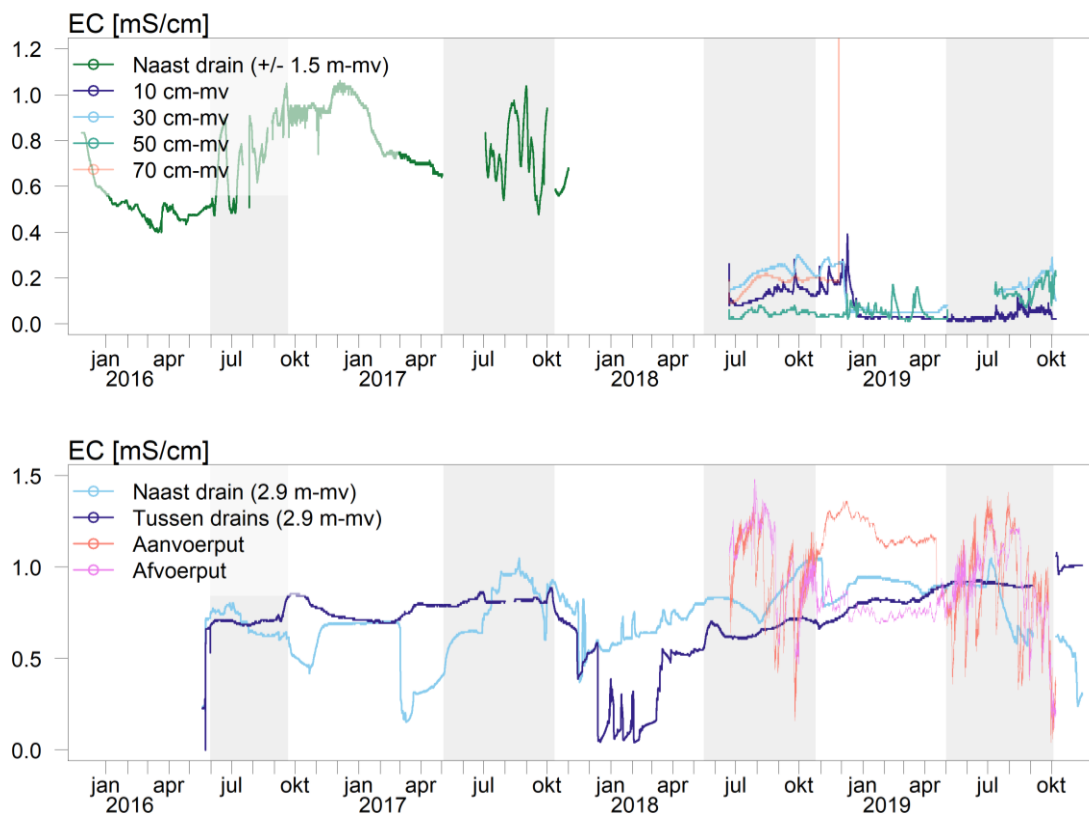
3.2 Waterkwaliteit

Vanaf de zomer van 2018 is het elektrisch geleidingsvermogen (electrical conductivity, EC) gemeten in de aan- en afvoerputten van het subirrigatiesysteem. De aanvoerput geeft de EC waarde aan van het aangevoerde effluent, wat een variabel patroon over de tijd vertoont. Dit patroon lijkt in ieder geval deels verklaard te worden door patronen van neerslag, waardoor verdunning (en dus een verlaging van de EC) optreedt. In juli 2019 is er een verlaging zichtbaar in de EC, die niet duidelijk samenvalt met pieken in de neerslag. Mogelijk is hier sprake geweest van een lokale neerslagbui die niet is gemeten op het meteorostation. Buiten de subirrigatieperiode is er geen sprake van aanvoer van effluent, het EC signaal in de aanvoerput betreft hier de EC van het nog aanwezige mengsel van aangevoerd effluent en lokaal grondwater. In de afvoerput is de EC tijdens sommige perioden vergelijkbaar met die in de aanvoerput, maar wijkt deze af tijdens andere perioden. In de afvoerput komen verschillende watertypen samen: overtollig effluent dat niet in de bodem is gestroomd en grondwater dat afgevoerd wordt via de drainagebuizen. Het ontwarren van deze patronen is complex, omdat de EC van het aanwezige grondwater zowel over de ruimte als de tijd varieert (Bartholomeus et al., 2017). Daarnaast kunnen er nog andere factoren van invloed zijn, zoals bemesting.

In de meetresultaten valt op dat het signaal buiten het subirrigatieseizoen sterk afwijkt van het signaal ten tijde van subirrigatie. Dit kan te maken hebben met het verschil in EC van het effluent (dat kan fluctueren over de tijd) en het (met effluent gemengde) grondwater, dat door menging een constanter signaal geeft.



Figuur 3-8. Neerslag en elektrisch geleidingsvermogen (electrical conductivity, EC) zoals gemeten in de aan- en afvoerputten in 2018 en 2019.



Figuur 3-9. Elektrisch geleidingsvermogen (EC) bij meetpunten MP2 (boven) en MP3 (onder) en de aan- en afvoerputten.

De EC metingen bij meetpunt 2 en 3 (Figuur 3-9) laten geen patronen zien die duidelijk samenhangen met seizoen of subirrigatieperioden, behalve dat EC waarden bij MP2 tijdens het drainagestelsel lager lijken te zijn en dat de gemeten EC-waarden in het bodemvocht bij MP2 aanzienlijk lager zijn dan die in het effluent en het grondwater. De verhoogde EC in het bodemvocht daalt naar zeer lage waarden als gevolg van neerslag vanaf januari 2019.

De belangrijkste tracer voor effluent is de ratio tussen chloride en bromide (Cl:Br ratio), waarvan hoge waarden wijzen op de aanwezigheid van effluent en lage waarden op van nature voorkomend grond- en bodemwater. De Cl:Br ratio's op de verschillende meetpunten zijn weergegeven in Figuur 3-10 en Figuur 3-11. De chloride- en bromideconcentraties zijn opgenomen in Bijlage I. Een kanttekening bij deze waarden is dat de monsters uit 2019 (vooral bij de eerste meetronde) opvallend lage bromideconcentraties vertoonden, waardoor de Cl:Br ratio's hoog zijn. In Bijlage II zijn de verhoudingen tussen Cl:Br en chloride weergegeven voor verschillende meetpunten, waaruit blijkt dat de verhouding in de eerste meetronde van 2019 (maar soms ook in de tweede) stelselmatig afwijkt.

Hoewel er verder geen aanwijzingen zijn gevonden dat er hier sprake zou zijn van een meetfout, is voorzichtigheid bij de interpretatie van trends over de tijd geboden (vergelijkingen tussen verschillende locaties tijdens dezelfde meetronde zijn hier minder gevoelig voor).

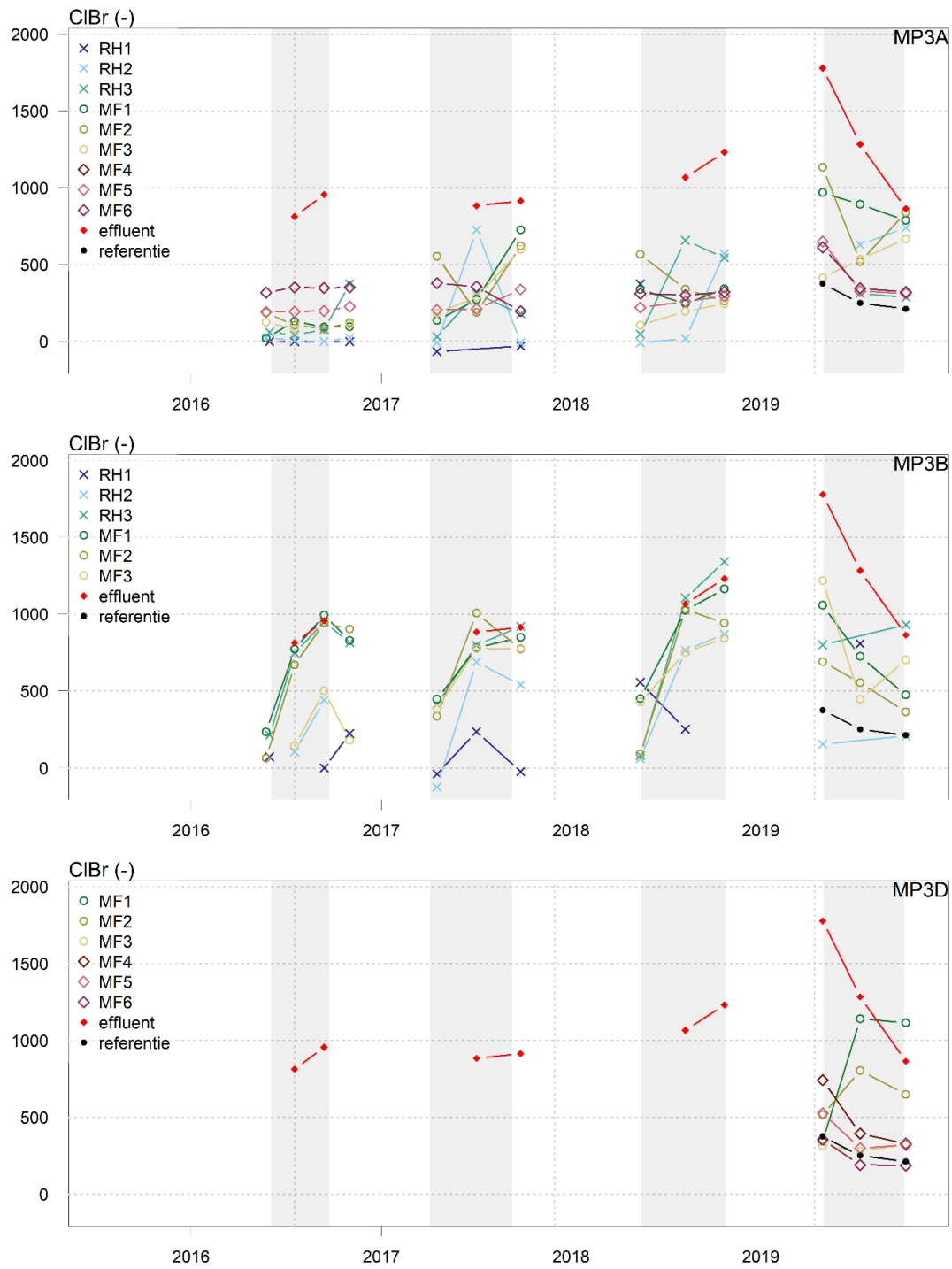
De meetresultaten laten zien dat op twee meetpunten die zich nabij een drain bevinden (namelijk 3B en 2), de Cl:Br ratio op verschillende dieptes vlak onder het drainniveau (op 1.2 m diepte, MF1) duidelijk stijgt na aanvang van de subirrigatie. Bij MP2 lijkt het effluent in ieder geval tot een diepte van 1.1 m onder de drain te komen (MF3) en tot 0.2 (in 2016, RH3) en 0.6 m boven de drain (in de jaren daarna, RH2). Aan het eind van het drainagestelsel zijn de Cl:Br ratio's weer gezakt tot een lagere waarde, behalve in 2019 en (in mindere mate) in 2017. Voor meetpunt 3B zijn de patronen vergelijkbaar, behalve dat bij MF3 in 2016 de ratio's niet helemaal zo hoog werden als in effluent. Ook wijkt het patroon in 2019 af: er lijkt sprake van menging tussen effluent en natuurlijk grondwater. Voor

meetpunt 3D, die ook vlakbij een drain ligt, geldt dat er tot een diepte van 0.7 m onder de drain (MF2) verhoogde ratio's zijn gevonden in 2019. Op grotere dieptes (MF 4, 5 en 6) geldt zowel direct bij als tussen twee drains, dat de Cl:Br nauwelijks afwijkt van de Cl:Br van het grondwater in het referentieperceel. Hieruit kan geconcludeerd worden dat het effluent deze dieptes niet heeft bereikt. De verspreiding van het effluent beperkt zich tot nu toe tot zo'n 3 m-mv.

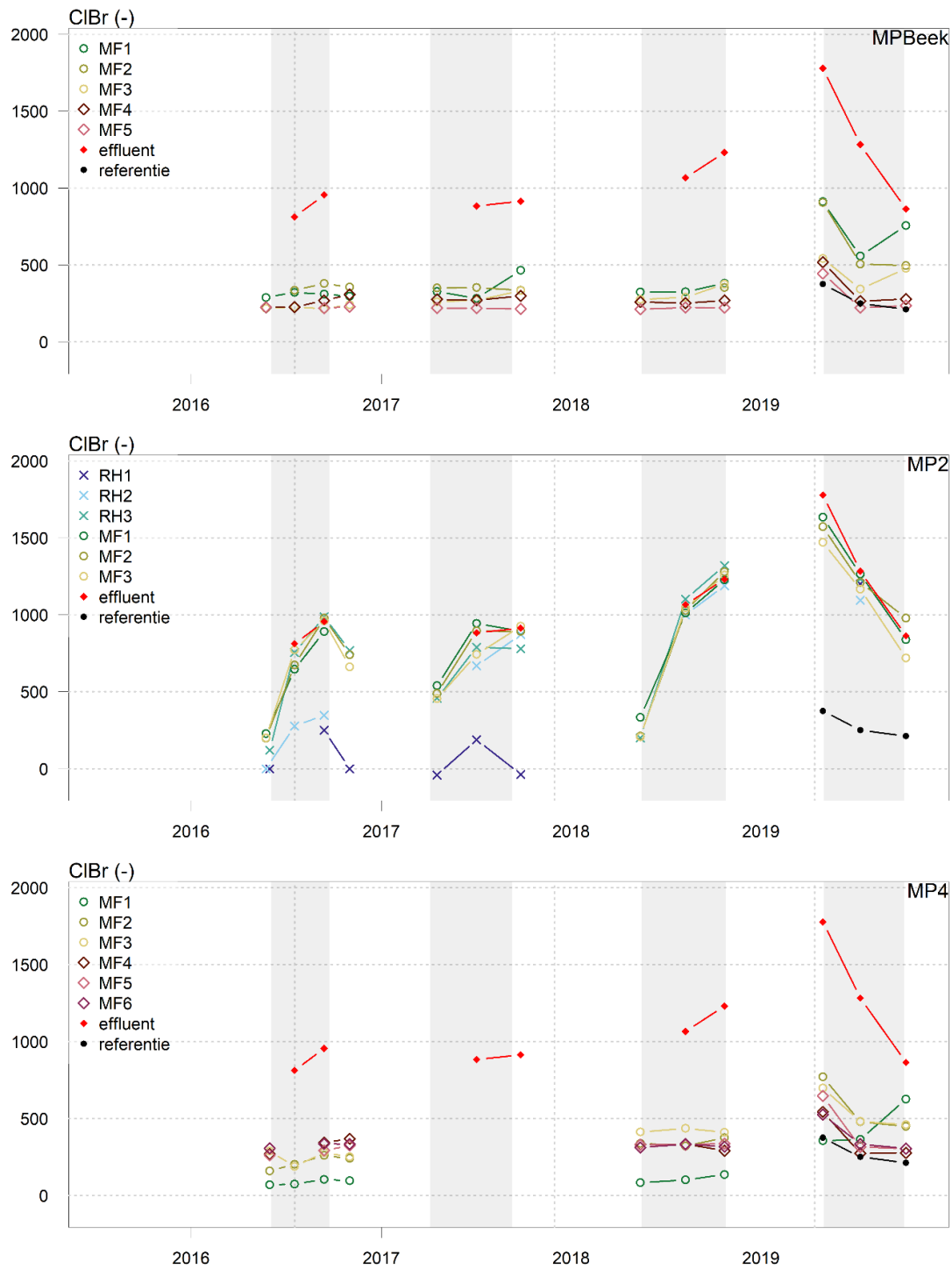
Ondanks dat de grondwaterstand in 2018 en 2019 minder hoog was dan in de jaren ervoor, is de Cl:Br ratio bij MP2 in de middelste (RH2, 60 cm-mv) en diepste (RH3, 100 cm-mv) rhizon (meting voor samenstelling bodemvocht) gelijk aan die van het effluent. De droge weerscondities en zeer lage vochtgehalten op 20 cm-mv maakten monsternamen en analyse op deze diepte onmogelijk. Voor MP3B geldt dat in 2018 Cl:Br op 60 en 100 cm-mv (RH2 en 3) nagenoeg gelijk was aan die van het effluent, maar dat op 20 cm-mv (RH1) geen invloed van effluent zichtbaar is. Voor 2019 is invloed van het effluent zichtbaar op 100 cm-mv en op 20 cm-mv, maar niet op 60 cm-mv. Mogelijk is hier sprake van een meetfout. Ook is midden tussen twee drains (MP3A) op 60 cm-mv (RH2) wel sprake van een verhoogde Cl:Br. Uit deze analyses blijkt subirrigatie met effluent tot in ieder geval 60 cm-mv de samenstelling van het bodemvocht beïnvloedt.

Meetpunt 3A bevindt zich in het midden tussen twee drains. In 2016 zijn hier geen verhoogde Cl:Br ratio's gevonden. Tijdens latere meetjaren zijn op verschillende diepten (net boven en net onder de drain, RH3 en MF1) verhoogde ratio's aangetroffen, hoewel deze, met uitzondering van de laatste meetronde in 2019, niet de in de buurt kwamen van de ratio van effluent. De laterale verspreiding van het effluent tussen drains wordt dus voor het eerst aan het eind van 2019 zichtbaar; dit laat het belang van meerjarige meetcampagnes zien.

Meetpunten Beek en 4 liggen aan de randen van het perceel. Meetpunt 4 ligt tussen twee drains. Hier zijn, net als in het midden van het perceel bij MP3 ook geen duidelijk verhoogde ratio's aangetroffen, afgezien van een lichte verhoging in 2019. Bij meetpunt Beek is hetzelfde patroon waargenomen, behalve dat de verhoging in 2019 in de zone onder drainniveau duidelijker is. Het effect van (regionale) grondwaterstroming richting de beek op de verspreiding van het effluent lijkt pas medio 2019 zichtbaar te worden.



Figuur 3-10. Cl:Br ratio's op meetpunten 3A, 3B en 3D, in combinatie met de waarden voor effluent en op de referentielocatie. Let op: de resultaten van met name de eerste meetronde van 2019 vertonen opvallend lage bromideconcentraties en hierdoor hoge Cl:Br. Ondanks dat er geen oorzaak is gevonden voor deze afwijkende resultaten, is voorzichtigheid m.b.t. de interpretatie van het Cl:Br verloop in de tijd geboden.



Figuur 3-11. Cl:Br ratio's op meetpunten Beek, 2 en 4, in combinatie met de waarden voor effluent en op de referentielocatie. Let op: de resultaten van met name de eerste meetronde van 2019 vertonen opvallend lage bromideconcentraties en hierdoor hoge Cl:Br. Ondanks dat er geen oorzaak is gevonden voor deze afwijkende resultaten, is voorzichtigheid m.b.t. de interpretatie van het Cl:Br verloop in de tijd geboden.

3.3 Modelstudie

Door middel van de modelstudie proberen we de in het veld waargenomen patronen voor de verspreiding van het effluent beter te begrijpen, inclusief de processen die daar aan ten grondslag liggen. In dit hoofdstuk beschrijven we de modelresultaten, steeds gericht op de verspreiding van stoffen naar het diepere grondwater, naar de onverzadigde zone en lateraal tussen de drains.

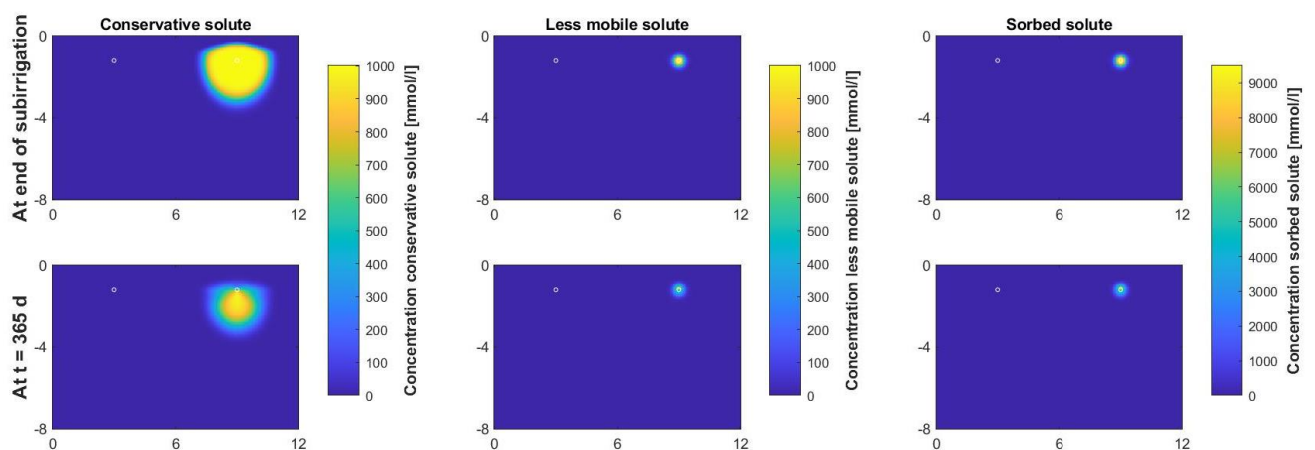
3.3.1 Basismodel

In het basismodel is er tijdens de subirrigatieperiode van 150 dagen gemiddeld zo'n 3.9 mm/d aan effluent aangevoerd, waarvan een groot deel tijdens de eerste dag is aangevoerd, ter verhoging van de grondwaterspiegel tot een vrijwel egaal niveau van 70 cm onder het maaiveld. Na de subirrigatie vond drainage plaats via het drainagesysteem, van gemiddeld 0.5 mm/d.

Aan de subirrigatie zijn twee tracers toegevoegd, een mobiele stof (met conservatief transport) en een immobiele stof (met veel sorptie). De verspreiding van deze tracers is weergegeven in Figuur 3-12. Voor de analyse is de tracer steeds alleen op de drain rechts in het model toegepast, maar subirrigatie vindt plaats via beide drains.

Tijdens de subirrigatie ontstond een bel van de conservatieve tracer (van maximaal 2 meter lateraal van de drain en tot een diepte van ongeveer 3.5 meter. Er is sprake van een relatief grote verspreiding van stoffen richting het maaiveld direct in de zone boven een drain. In de zone tussen twee drains is sprake van een hogere grondwaterstand als gevolg van subirrigatie, maar deze bestaat niet uit effluent. Tijdens de drainageperiode spoelt een deel van de stof uit via de drain, vooral vanuit de zone boven de drain. In de zone onder de drain blijft er een groot deel van de bel achter. Deze patronen komen op hoofdlijnen overeen met de patronen die volgen uit de meetgegevens (Cl:Br, hoofdstuk 2). In de zone boven en aan de zijkant van de drains verdwijnt het aangevoerde effluent in een periode met drainage ook weer grotendeels uit het systeem, maar onder de drain blijft effluent achter.

De minder mobiele stof verspreidde zich tot ongeveer een halve meter rondom de drain, waarbij een groot deel van de stof zich hechtte aan de bodemdeeltjes. In de drainagefase spoelde een deel van het niet gesorbeerde deel weer weg, terwijl er een groot deel van de stof, geabsorbeerd aan de bodemdeeltjes, nabij de drain aanwezig bleef.

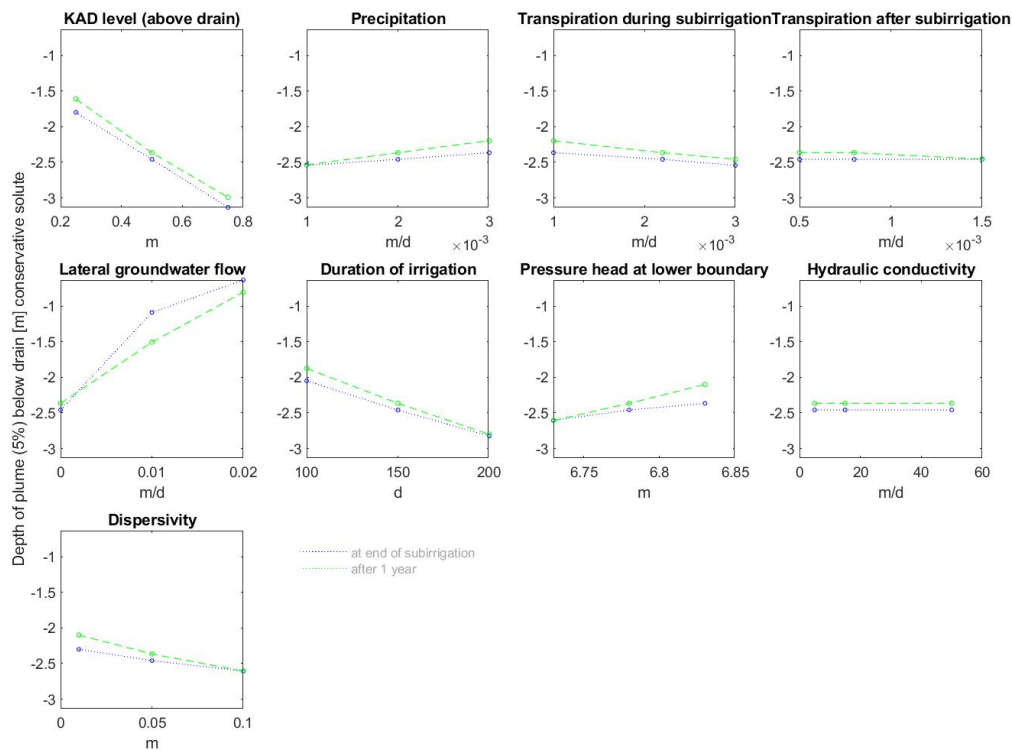


Figuur 3-12. Verspreiding van de conservatieve tracer (links) en de minder mobiele tracer (midden) in de waterfase. De verspreiding van geabsorbeerde stof is weergegeven in de rechter figuur. Figuren weergegeven voor het moment aan het einde van de subirrigatieperiode (boven) en aan het eind van het drainageperiode (een jaar na de start van de subirrigatie). De drains zijn als kleine witte cirkels ingetekend.

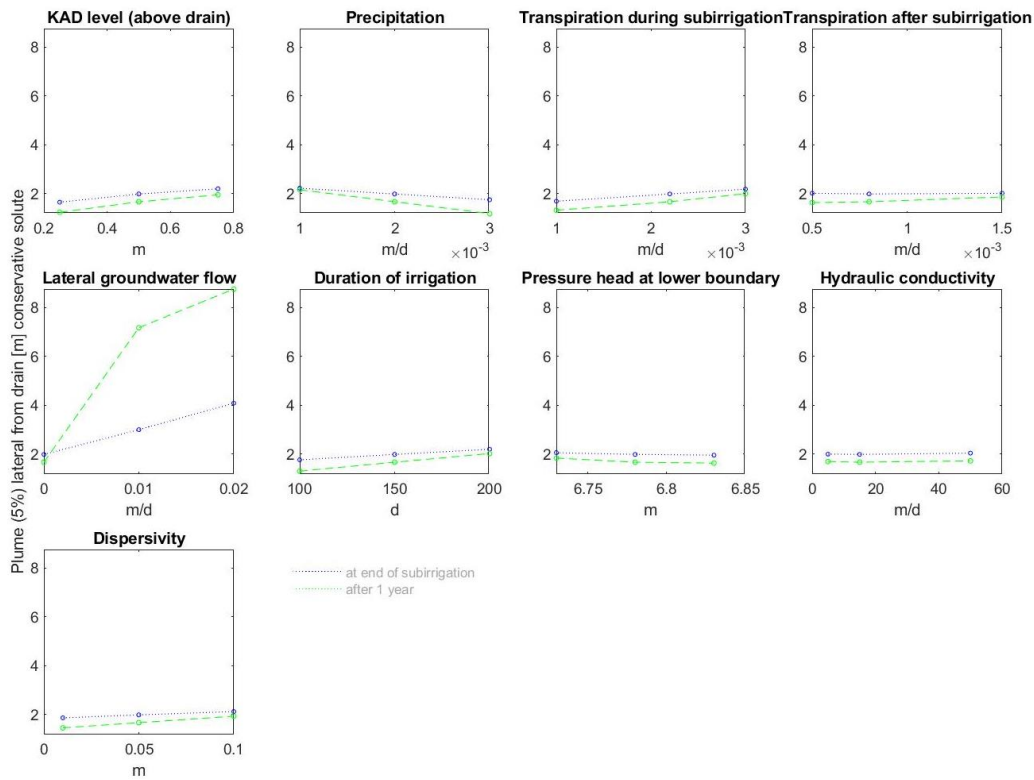
3.3.2 Gevoeligheidsanalyse

De effecten van de gevarieerde parameters op de verspreiding van stoffen is samengevat in Figuur 3-13 tot en met Figuur 3-15, met aanvullende afbeeldingen in Bijlage I. Uit de resultaten blijkt dat verspreiding naar de diepte vooral beïnvloed wordt door het KAD-niveau en laterale stroming. Op de laterale verspreiding lijkt slechts de laterale stroming van significante invloed. De verspreiding naar boven, richting het maaiveld, lijkt het sterkst beïnvloed te worden door de meteorologische randvoorwaarden (neerslag, transpiratie). Voor de relatief immobiele stof hebben de gevarieerde parameters een relatief beperkt effect op de verspreiding rondom de drain. Om deze reden zijn de resultaten alleen opgenomen in Bijlage I en worden ze hier slechts samengevat.

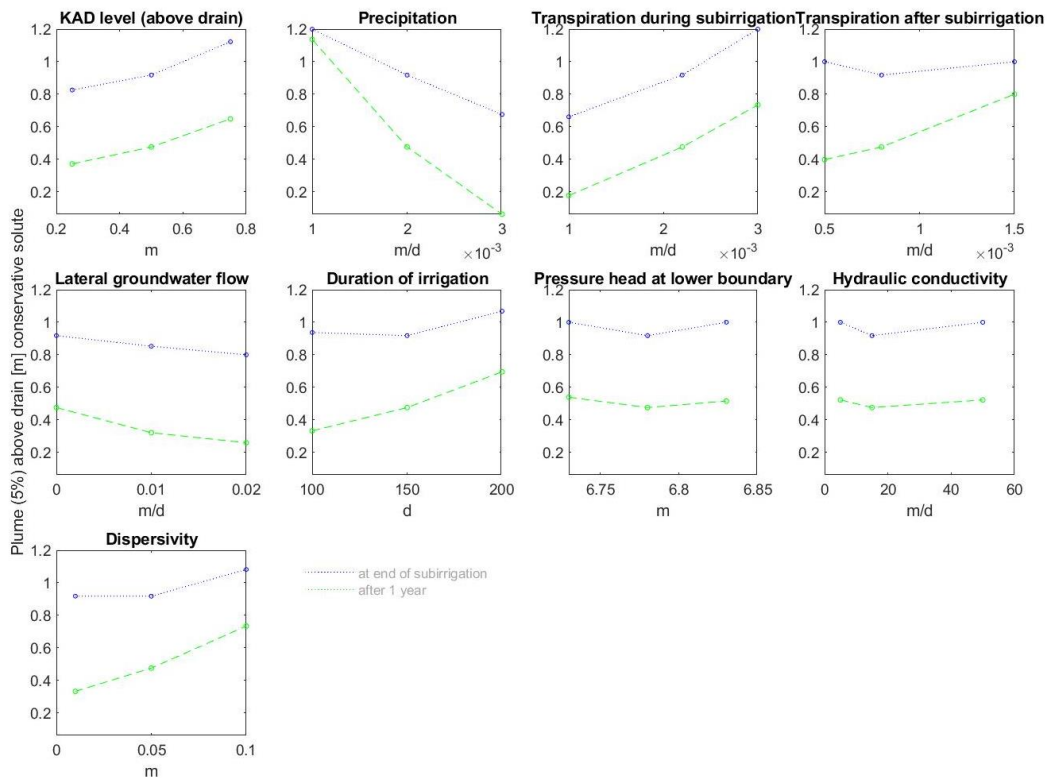
In de volgende paragrafen worden de effecten per type parameter nader toegelicht.



Figuur 3-13. Resultaten van de gevoeligheidsanalyse op de diepte tot waar de conservatieve stof zich verspreid heeft (tot waar de 5% contour van de beginconcentratie zich bevindt) aan het einde van de subirrigatie en het einde van de drainageperiode.



Figuur 3-14. Resultaten van de gevoeligheidsanalyse op de laterale afstand tot waar de conservatieve stof zich verspreid heeft (tot waar de 5% contour van de beginconcentratie zich bevindt) aan het einde van de subirrigatie en het einde van de drainageperiode.

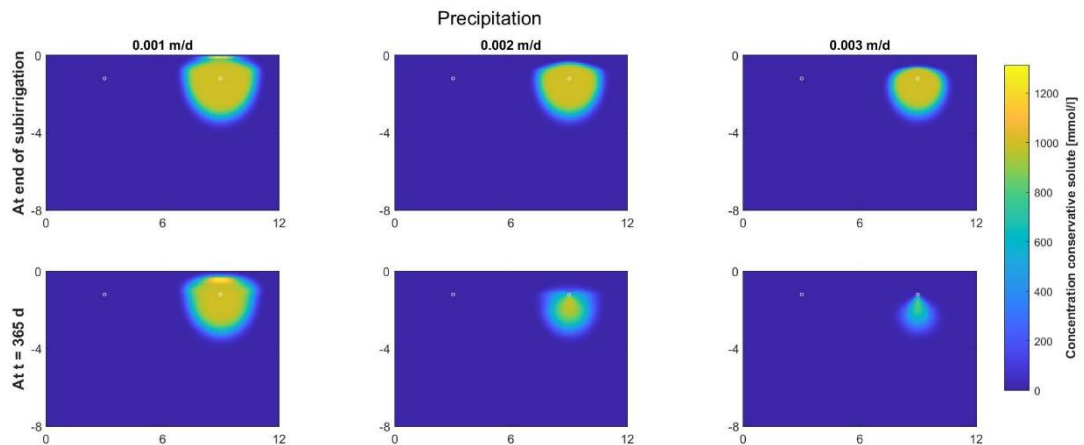


Figuur 3-15. Resultaten van de gevoeligheidsanalyse op de hoogte boven de drain tot waar de conservatieve stof zich verspreid heeft (tot waar de 5% contour van de beginconcentratie zich bevindt) aan het einde van de subirrigatie en het einde van de drainageperiode.

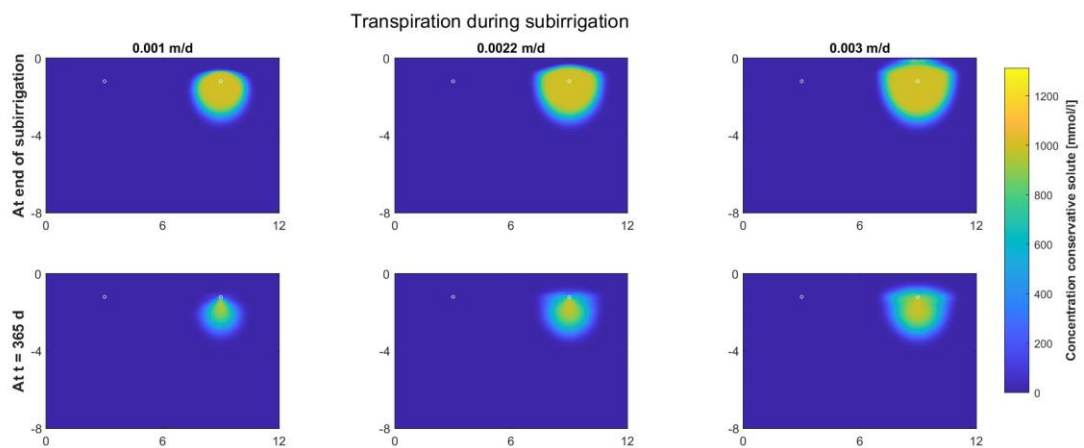
Meteorologische randvoorwaarden

De hoeveelheid neerslag heeft invloed op de omvang van de pluimen ten tijde van de subirrigatie (Figuur 3-16), doordat bij weinig neerslag er meer aanvoer van effluent plaatsvindt om het peil te handhaven. Daarnaast vindt er voor conservatieve stoffen bij lage neerslaghoeveelheden meer verspreiding plaats naar de onverzadigde zone, waar concentraties hoger worden door indikking. Stoffen die door planten opgenomen kunnen worden, zouden in zo'n situatie dus ook sneller via de wortels in het gewas terecht kunnen komen. Tijdens de drainageperiode heeft de hoeveelheid neerslag invloed op hoeveel van de pluim wordt afgevoerd via het drainagesysteem, bij veel neerslag verdwijnt er relatief veel van het effluent, vooral uit de zone boven het drainagesysteem.

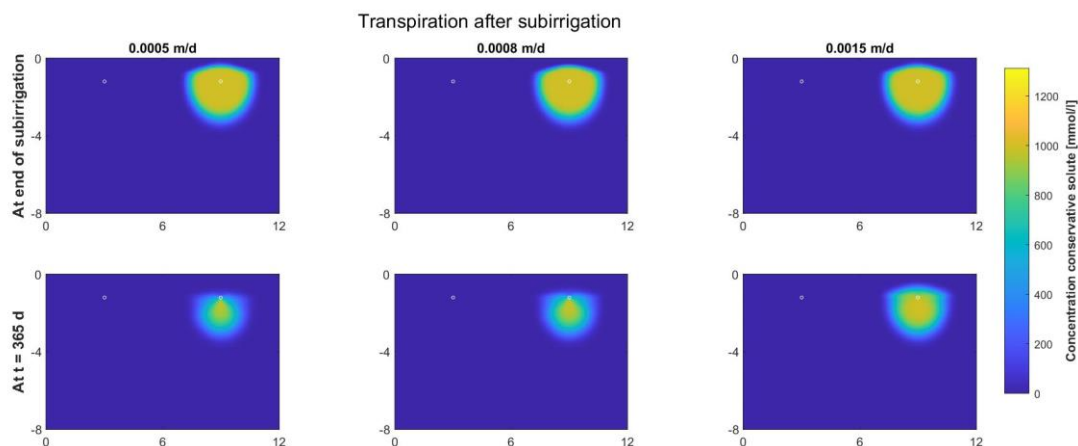
De hoeveelheid transpiratie tijdens (Figuur 3-17) en na (Figuur 3-18) de subirrigatieperiode heeft eveneens effect op de aan- en afvoer van effluent. Bij veel transpiratie tijdens de subirrigatieperiode wordt er meer effluent aangevoerd, wat resulteert in een grotere effluentpluim rondom de drain, deze verschillen zijn ook na de drainageperiode nog zichtbaar. Hierbij valt op dat de verspreiding naar boven door transpiratie versterkt wordt, waarbij de pluim het maaiveld kan bereiken (1.2 m boven drainniveau), direct boven de buis. Wanneer de transpiratie tijdens de drainageperiode verschilt van de referentiesituatie, heeft dit invloed op de hoeveelheid effluent die afgevoerd wordt en daarmee op de omvang van de pluim die achter blijft in de bodem.



Figuur 3-16. Invloed van neerslag op de verspreiding van de conservatieve stof aan het einde van de subirrigatieperiode en de drainageperiode .



Figuur 3-17. Invloed van transpiratie tijdens subirrigatie op de verspreiding van de conservatieve stof aan het einde van de subirrigatieperiode en de drainageperiode.



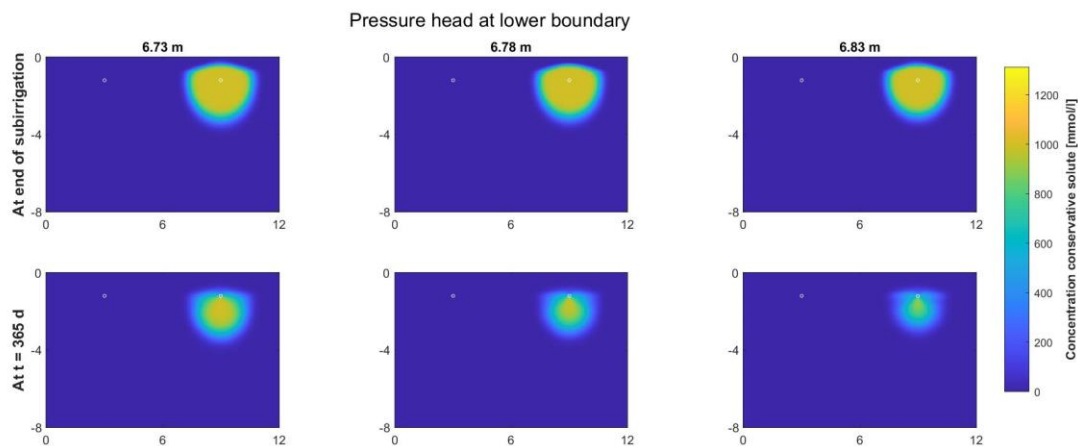
Figuur 3-18. Invloed van transpiratie tijdens de drainageperiode op de verspreiding van de conservatieve stof aan het einde van de subirrigatieperiode en de drainageperiode.

Stroming

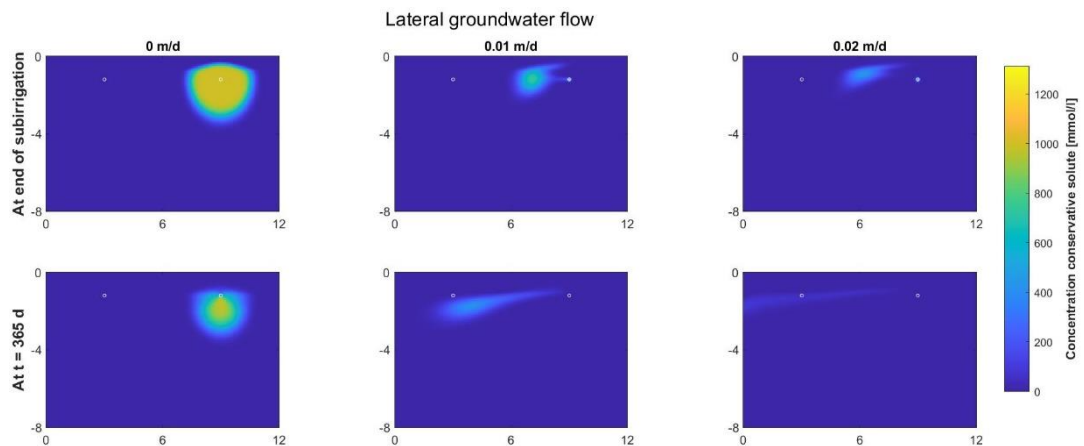
In de gevoeligheidsanalyse is de stijghoogte aan de onderrand van het model gevarieerd om de effecten van wegzijging in beeld te brengen. Bij een lagere stijghoogte vindt er meer wegzijging plaats, waardoor er meer effluent wordt aangevoerd tijdens de subirrigatieperiode en de pluim van de conservatieve stof zich iets verder van de drain verspreidt, wat door de stroming het sterkst is in neerwaartse richting. Tijdens de drainageperiode wordt er bij sterkere wegzijging tevens minder afgevoerd, waardoor er meer effluent achterblijft. Effluent verspreidt zich binnen het gemodelleerde jaar tot zo'n 3.5 m diepte.

Laterale stroming heeft relatief sterke invloed op de verspreiding van de conservatieve stof vanuit de drain. Bij de start van de subirrigatie vormt zich binnen korte tijd een bel rondom de drain (zoals in de overige scenario's), maar deze drijft vervolgens in zijwaartse richting af, waarbij de grenzen van de pluim vervagen door dispersie. Afhankelijk van de stroomsnelheid kan de pluim zich in laterale richting verspreiden tot de volgende drainagebuis of zelfs verder. Wanneer de pluim zich bij een volgende drainagebuis bevindt tijdens de drainageperiode, kan via de betreffende drainagebuis een deel worden afgevoerd.

Indien hetzelfde proces van laterale verspreiding zou plaatsvinden bij alle drainagebuizen, zou dit kunnen resulteren in diffuse verspreiding van de conservatieve stof over een bepaalde zone in de diepte (afhankelijk van de wegzijging). Voor een verdere illustratie van hoe de verspreiding over de tijd plaatsvindt, wordt verwezen naar paragraaf 3.3.3.



Figuur 3-19. Invloed van de stijghoogte onder de weerstandslaag op de verspreiding van de conservatieve stof aan het einde van de subirrigatieperiode en de drainageperiode.

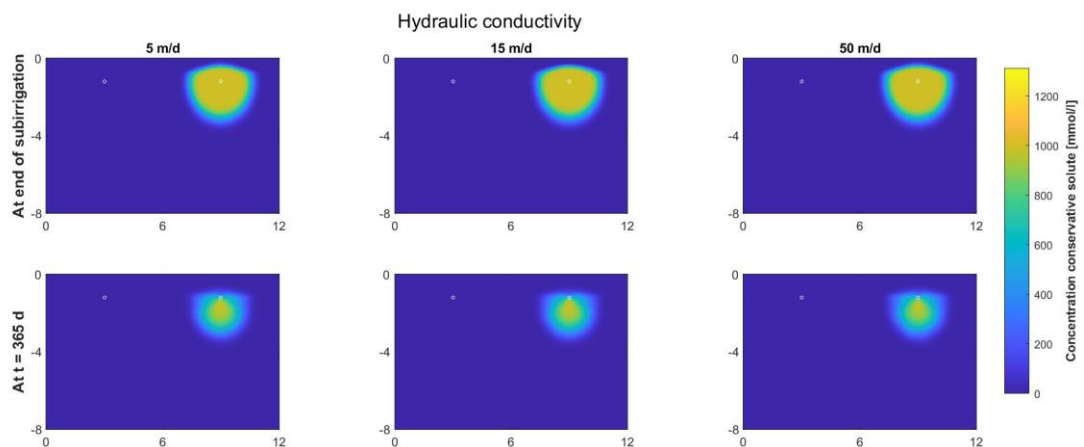


Figuur 3-20. Invloed van laterale stroming op de verspreiding van de conservatieve stof aan het einde van de subirrigatieperiode en de drainageperiode. In de doorsneden van de situaties met laterale stroming aan het einde van de drainageperiode is een (groot) deel van de pluim reeds uit beeld verdwenen.

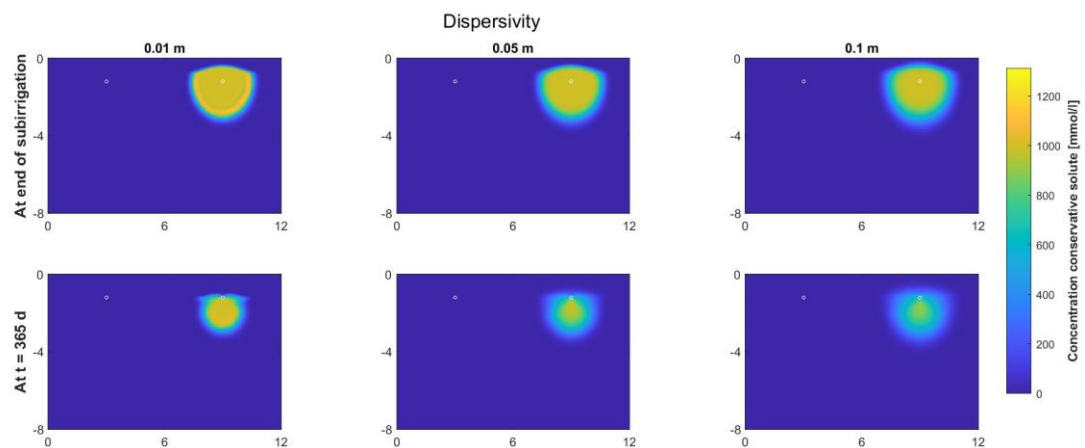
Eigenschappen van het bodemmateriaal

Verzadigde doorlatendheid van het bodemmateriaal heeft in deze gevoeligheidsanalyse vrijwel geen invloed op de verspreiding van de conservatieve stof (Figuur 3-21), omdat er slechts in zeer beperkte mate sprake is van stroming. Wanneer er sprake is van stroming, kan een andere doorlatendheid resulteren in andere stroomsnelheden, waarbij de effecten van de vorige alinea's van toepassing zijn.

Variatie in dispersiviteit (waarbij longitudinale en transversale dispersiviteit gezamenlijk zijn gevarieerd) heeft een beperkte invloed op de verspreiding van de conservatieve stof rondom de drain (Figuur 3-22), waarbij een hogere dispersiviteit resulteert in iets verdere verspreiding.



Figuur 3-21. Invloed van de verzadigde doorlatendheid op de verspreiding van de conservatieve stof aan het einde van de subirrigatieperiode en de drainageperiode.

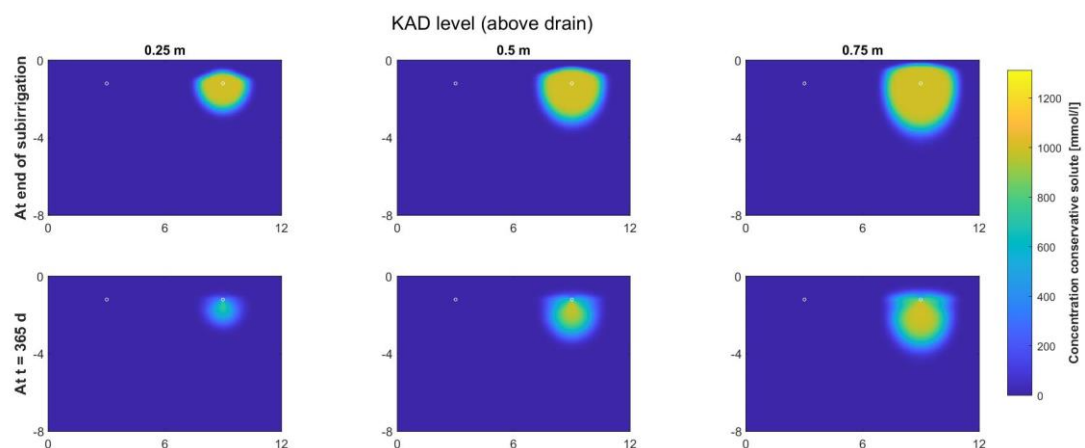


Figuur 3-22. Invloed van de dispersiviteit op de verspreiding van de conservatieve stof aan het einde van de subirrigatieperiode en de drainageperiode.

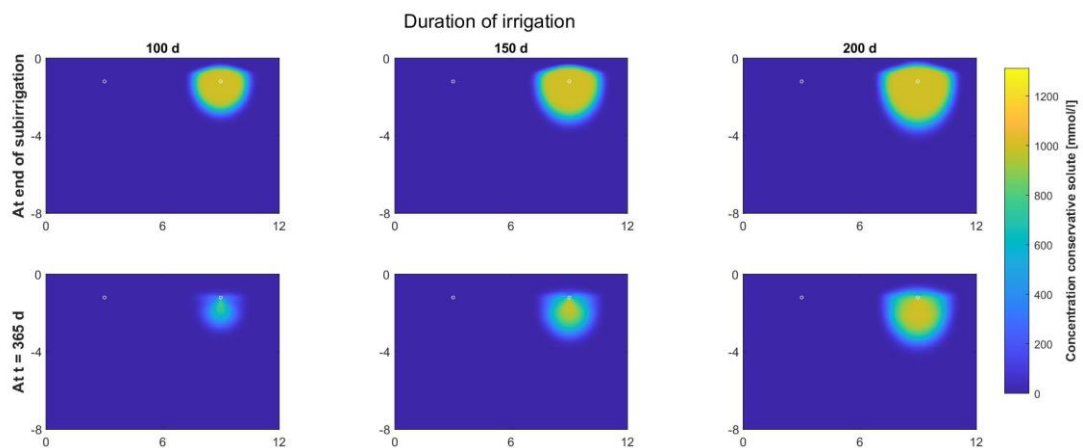
Subirrigatie

Het niveau van de KAD ten opzichte van het drainniveau lijkt voor de conservatieve stof vooral effect te hebben op de omvang van de pluim (Figuur 3-23), wat samenhangt met de hoeveelheid aangevoerd water die groter is bij hogere KAD-niveaus. In deze modellen, waarin geen sprake is van laterale stroming maar wel wegzijging (die tevens toeneemt tijdens de subirrigatie bij hogere KAD-niveaus), is er met name sprake van uitbreiding van de pluim in de diepte. Aan het einde van de drainageperiode blijft wederom het diepere deel van de pluim achter in de ondergrond. Voor de minder mobiele stof geldt dezelfde afhankelijkheid van KAD-niveau, ten opzichte van het basisscenario.

De tijdsduur van de subirrigatie heeft effect op de omvang van de pluimen tijdens en na de subirrigatieperiode (Figuur 3-24). Bij langere tijdsduur wordt deze groter door de langer durende aanvoer (waardoor er meer wordt aangevoerd) en korter durende afvoer via de drain (waardoor er minder wordt afgevoerd).



Figuur 3-23. Invloed van het KAD niveau tijdens de subirrigatie op de verspreiding van de conservatieve stof aan het einde van de subirrigatieperiode en de drainageperiode.



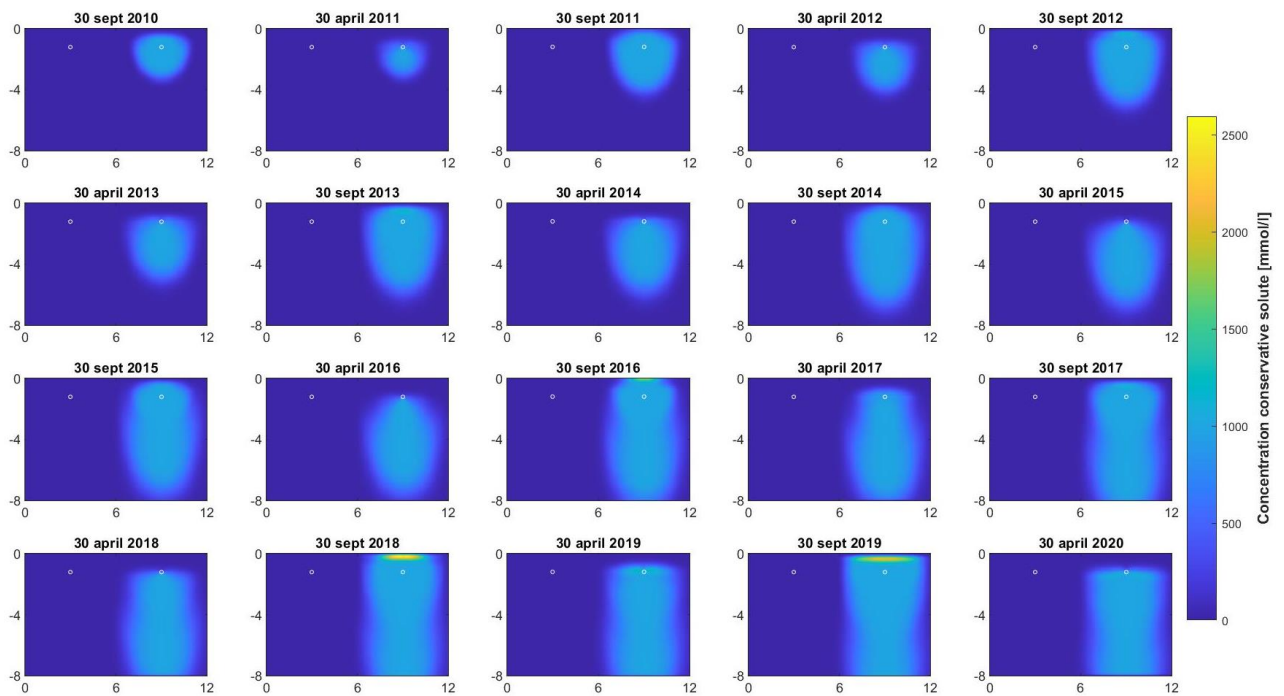
Figuur 3-24. Invloed van de tijdsduur van de subirrigatie op de verspreiding van de conservatieve stof aan het einde van de subirrigatieperiode en de drainageperiode.

3.3.3 Tien jaar subirrigatie

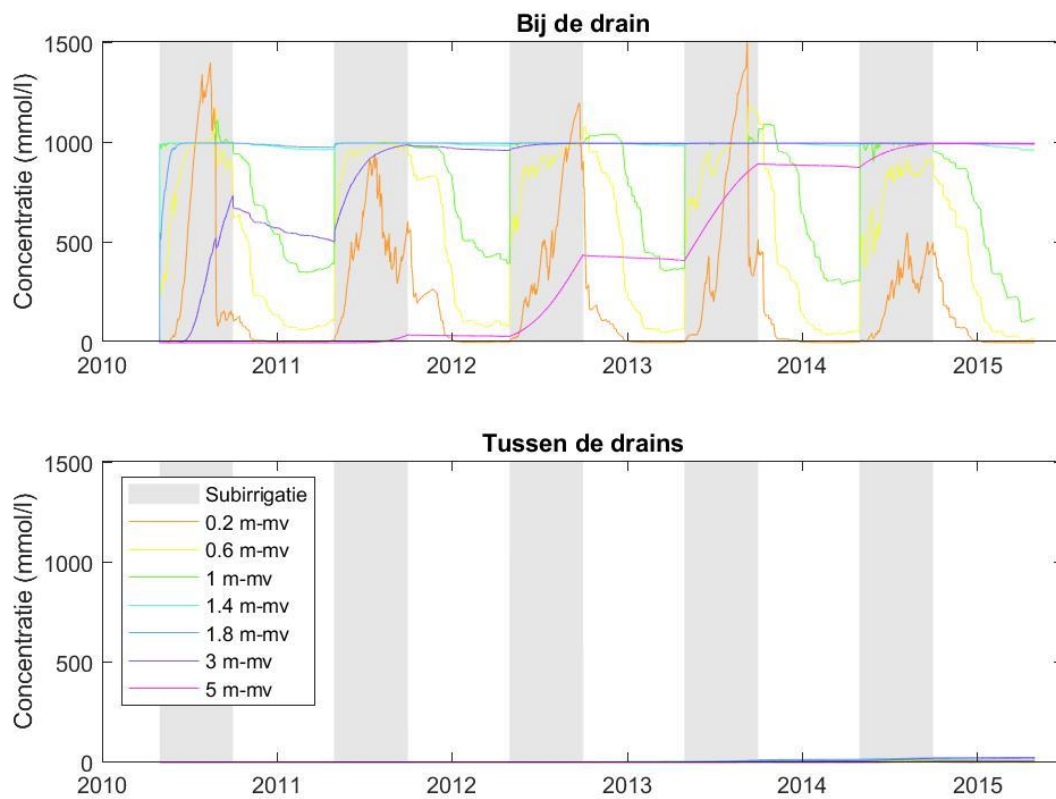
Aangezien wel of geen laterale stroming een zeer sterke invloed heeft op de verspreiding van de stoffen, is er voor gekozen om deze simulatie uit te voeren voor de situatie zónder laterale grondwaterstroming en mét laterale grondwaterstroming.

De resultaten van deze simulaties voor de conservatieve stof zijn weergegeven in Figuur 3-25 en Figuur 3-27, in de vorm van twee afbeeldingen per jaar, aan het eind van de subirrigatieperiode en aan het eind van de drainageperiode. De resultaten voor de relatief immobiele stof zijn opgenomen in Bijlage IV. Doordat voor deze simulaties echter gebruik is gemaakt van dagwaarden van gemeten neerslag en potentiële evapotranspiratie, is er sprake van zeer veel kleine en grote fluctuaties over de tijd. Om het effect hiervan te verduidelijken is een animatie met de verspreiding van de stoffen bijgevoegd (<https://vimeo.com/523739754/fff71e3c27>).

In de simulatie zonder laterale stroming (Figuur 3-25, Figuur 3-26) wordt zichtbaar dat ook bij dagelijks variërende meteorologische randvoorwaarden de conservatieve stoffen uit het effluent zich tijdens de subirrigatie verspreiden rondom de drain en tijdens de drainage vooral uit de zone boven de drain worden afgevoerd, waarbij het deel van onder de drain achterblijft. In de periode wordt zichtbaar dat de stoffen zich langzaam naar beneden verspreiden (onder invloed van de beperkte wegzijging), terwijl bij iedere subirrigatiecyclus een nieuwe pluim zich verzamelt rondom de drain. Het resultaat op langere termijn is een 'kolom' van hoge concentratie op de locatie van de drain. Deze kolom verspreidt zich tot halverwege de afstand tussen de drains. Wanneer de conservatieve stof zich uit iedere drain zou verspreiden, zou er initieel tussen de drains een zone zijn zonder verhoogde concentratie, maar over langere tijd zou deze mogelijk kunnen verdwijnen. Verder valt op dat tijdens droge zomers (2018, 2019) er extra verspreiding naar het oppervlak plaatsvindt, waarbij (door indikking) de concentraties in de wortelzone hoog oplopen. Tijdens de drainageperiode daarna verdwijnen deze concentraties echter weer door uitspoeling. Voor immobiele stoffen (Bijlage IV) geldt dat deze in de periode van 10 jaar rondom de drain verzameld blijven.

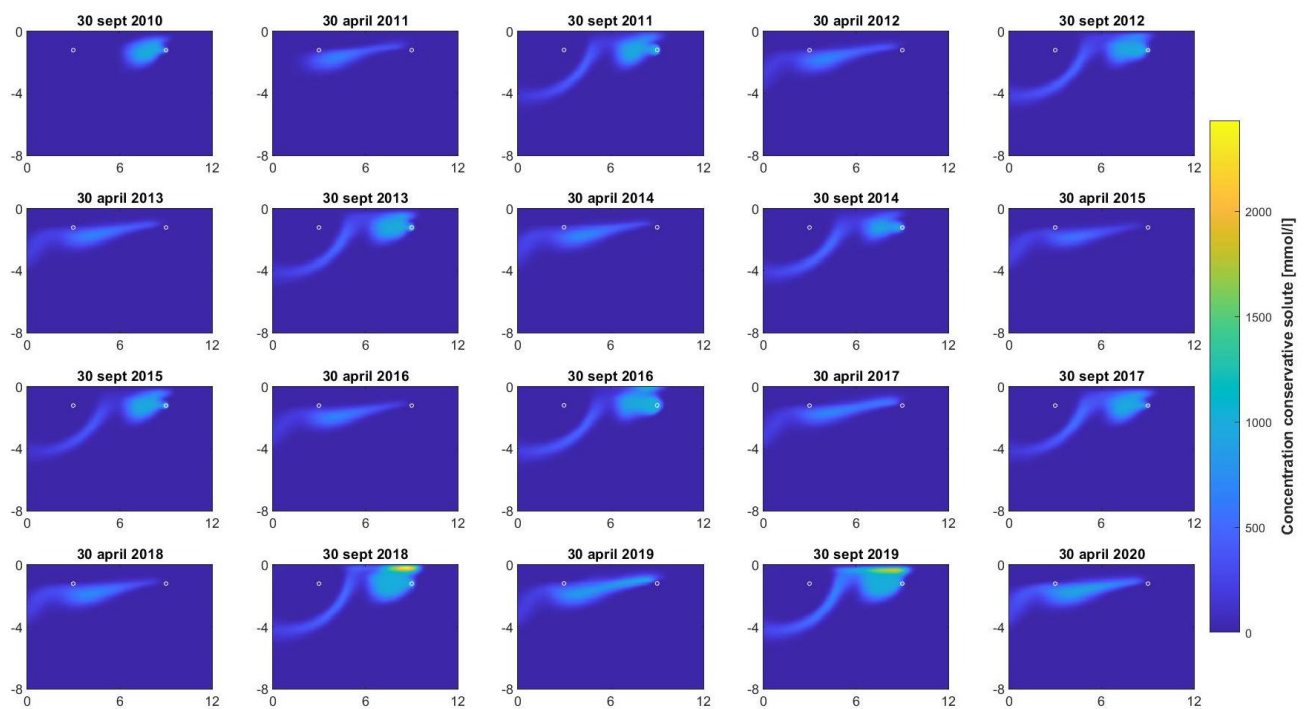


Figuur 3-25. Concentratie van een conservatieve stof over een periode van 10 jaar subirrigatie in een situatie zonder laterale stroming. Afbeeldingen zijn achtereenvolgens van het einde van de subirrigatieperiode (30 september) tot het einde van de drainageperiode (30 april).

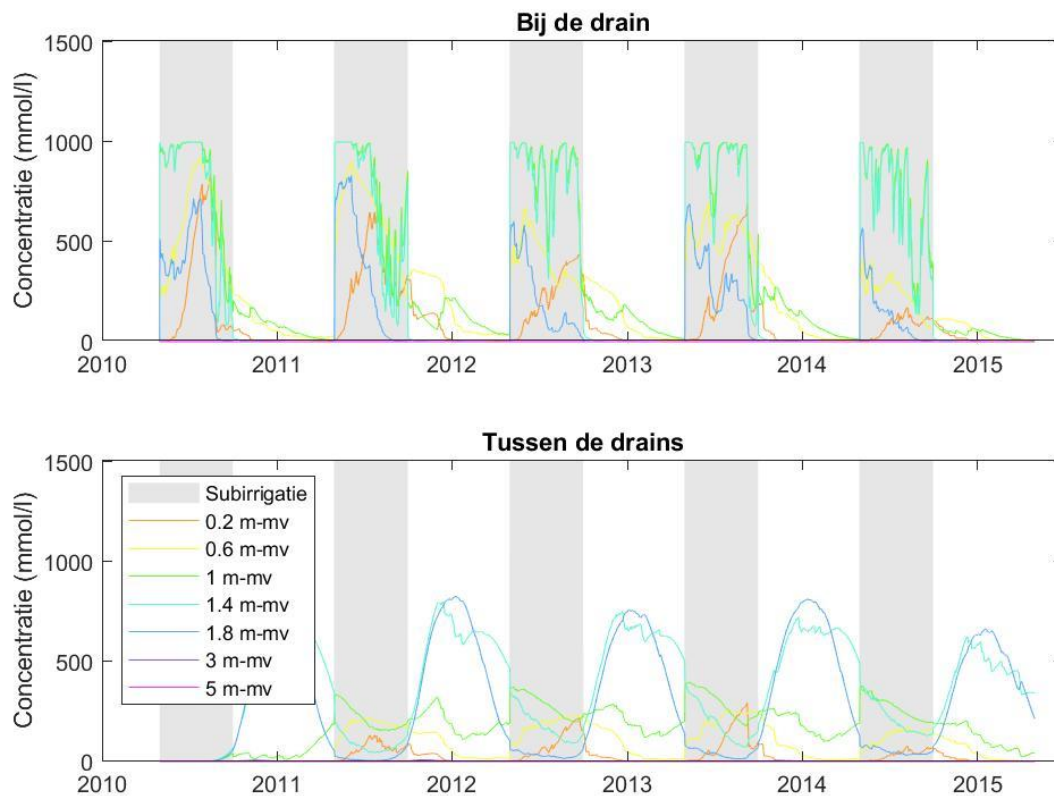


Figuur 3-26. Concentraties bij observatiepunten ter hoogte van de drain en tussen de drains op verschillende diepten tijdens de eerste vijf jaar van de simulatie van subirrigatie in een situatie zonder laterale stroming. Tussen de drains is de verspreiding bijna nihil.

In de simulatie waarbij laterale stroming is meegenomen (Figuur 3-27, Figuur 3-28) vindt verspreiding van de conservatieve stof zich initieel zijwaarts plaats, waardoor na het subirrigatie seizoen zowel boven als onder de drain de concentratie daalt en er tussen de drains juist een piek kan optreden. Wanneer er echter sprake is van een nieuwe subirrigatieperiode, wordt de pluim (wanneer deze nabij een drain is) als het ware 'weggedrukt' door de aanvoer van nieuw effluent. De pluim verplaatst zich hierdoor iets naar onderen en zijwaarts, weg van de drain. Tijdens de drainageperiode daarna, wanneer het water rondom de drain weer afgevoerd wordt, verplaatst de pluim zich echter weer richting de drain. Gezien de beperkte omvang van het model domein is niet te zien wat de uiteindelijke verspreiding op langere termijn is. Op basis van extrapolatie van de resultaten kan echter gezegd worden dat de verspreiding met de stroming mee is (lateraal en licht neerwaarts), waarbij er tevens sprake is van dispersie. Wanneer de stof zich vanuit iedere drain zich zou verspreiden, zou er op termijn menging van de pluimen plaatsvinden, waarbij vooral de zone onder de drains verhoogde concentratie conservatieve stoffen bevat, terwijl de zone boven de drains na neerslagoverschot relatief vrij is van de stof. Voor relatief immobiele stoffen (Bijlage IV) geldt ook hier dat, hoewel er beperkt sprake is van afdriving in de stroomrichting, deze vooral rondom de drain achterblijven.



Figuur 3-27. Concentratie van een conservatieve stof over een periode van 10 jaar subirrigatie in een situatie met laterale stroming van 1 cm/d. Afbeeldingen zijn achtereenvolgens van het einde van de subirrigatieperiode (30 september) tot het einde van de drainageperiode (30 april).

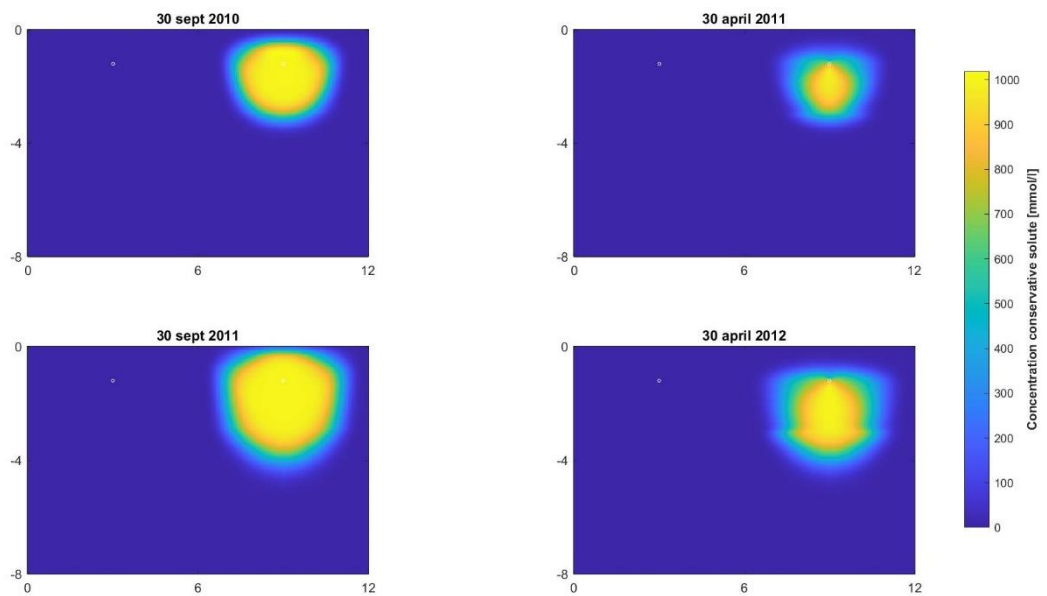


Figuur 3-28. Concentraties bij observatiepunten ter hoogte van de drain en tussen de drains op verschillende diepten tijdens de eerste vijf jaar van de simulatie van subirrigatie in een situatie met laterale stroming van 1 cm/d.

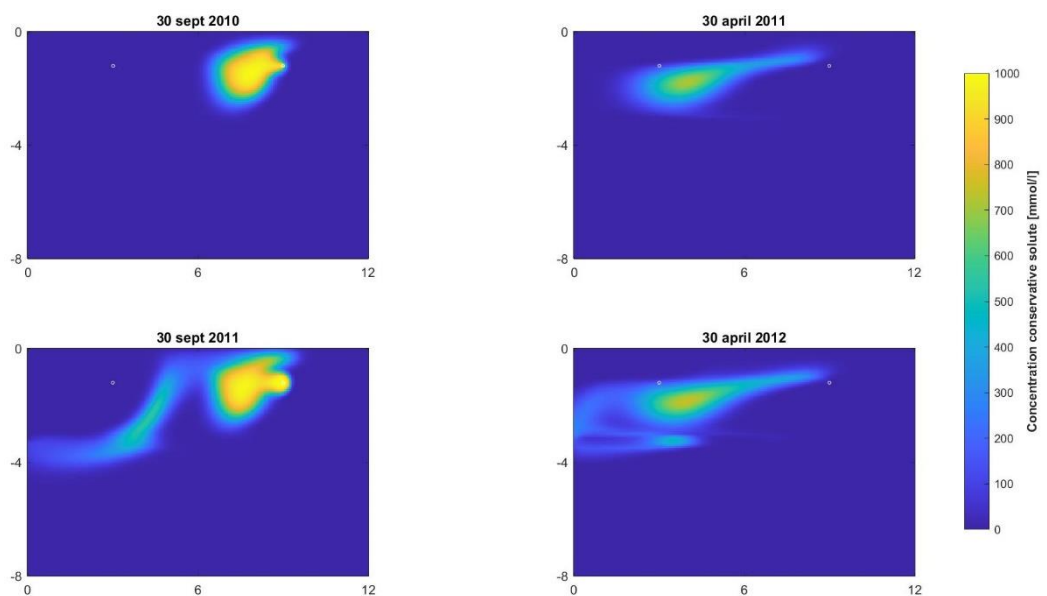
3.3.4 Het effect van een leemlaag

In Figuur 3-29 en Figuur 3-30 is weergegeven hoe de conservatieve stof zich kan verspreiden wanneer er sprake is van een laag met een lagere doorlatendheid in de ondergrond, in een situatie met en zonder laterale stroming. De veranderingen over de tijd zijn weergegeven in een animatie (<https://vimeo.com/523739726/d5a9a73f2f>). De resultaten voor de relatief immobiele stof zijn niet weergegeven, omdat deze vrijwel niet afwijken van eerdere resultaten.

Ten opzichte van de resultaten uit 3.3.3 valt in de simulatie zonder laterale stroming op dat de stof zich bij deze laag minder in de diepte verspreidt tijdens de subirrigatie. Tijdens de drainageperiode, wanneer de pluim rondom de drain doorgaans kleiner wordt, blijft het deel van de pluim dat zich in deze laag bevindt meer achter dan in de rest van de bodem. In de simulatie met laterale stroming valt op dat ook hier de verspreiding van de stof minder neerwaarts plaatsvindt wanneer deze nabij de leemlaag komt. Het deel dat echter in de leemlaag terecht komt, blijft vervolgens achter ten opzichte van de rest van de pluim.



Figuur 3-29. Concentratie van een conservatieve stof over een periode van 2jaar subirrigatie in een situatie zonder laterale stroming en een leemlaag. Afbeeldingen zijn achtereenvolgens van het einde van de subirrigatieperiode (30 september) tot het einde van de drainageperiode (30 april).



Figuur 3-30. Concentratie van een conservatieve stof over een periode van 2jaar subirrigatie in een situatie met laterale stroming van 1 cm/d en een leemlaag. Afbeeldingen zijn achtereenvolgens van het einde van de subirrigatieperiode (30 september) tot het einde van de drainageperiode (30 april).

4 Discussie

4.1 Veldonderzoek

De resultaten van het onderzoek laten zien dat door subirrigatie grondwaterstanden omhoog kunnen worden gebracht, om zo gewassen in de zomer beter van water te voorzien. Het bleek echter dat er via het subirrigatiesysteem niet altijd zoveel geïnfilteerd kon worden als de bedoeling was, doordat de infiltratiecapaciteit van de drains leek af te nemen. Mogelijk is hier sprake geweest van gedeeltelijke verstopping van drains, bijvoorbeeld door nagroei van micro-organismen. Nader onderzoek zou moeten uitwijzen welke oorzaak hier aan ten grondslag ligt en hoe dit kan worden voorkómen in de toekomst.

De veldmetingen geven inzicht in verschillende processen (grondwaterstroming en stoftransport) in de ondergrond van het perceel. In het veldonderzoek kon echter niet altijd een compleet beeld gekregen worden door technische problemen en fysieke beperkingen: niet alleen door incidenteel uitvallende sensoren (door technisch defect, maar ook vandalisme), die vaak binnen enkele maanden zijn vernieuwd, maar vooral doordat bemonstering in het bovenste deel van de bodem soms niet mogelijk bleek als gevolg van te droge omstandigheden en daarbij optredende sterk negatieve drukken. Met rhizons kan er namelijk maar tot een bepaalde negatieve drukhoogte water worden onttrokken uit de bodem. Hierdoor is het beeld van de verspreiding van stoffen naar de wortelzone niet volledig. Hoewel gedacht kan worden dat dergelijke droge omstandigheden kunnen betekenen dat er geen verspreiding plaatsvindt, bestaat de mogelijkheid dat deze eerder heeft plaatsgevonden of dat (beperkte) stroming in het nog aanwezige vocht plaatsvindt. Dit probleem zou ondervangen kunnen worden door aanvullend monsters van bodem- en/of plantmateriaal te nemen, in plaats van het bodemwater.

De resultaten van de veldmetingen laten grotendeels een vergelijkbaar beeld zien als in eerdere rapportages (Bartholomeus et al., 2017), namelijk: subirrigatie leidt tot verhoging, dan wel voorkoming van het uitzakken van de grondwaterstanden op het perceel. Hierdoor wordt het gewas beter van vocht voorzien dan zonder subirrigatie. Tijdens de droge zomers van 2018 en 2019 lijken de verhoogde grondwaterstanden echter minder goed gehandhaafd te kunnen worden dan tijdens eerdere jaren. Het is niet zeker of dit veroorzaakt wordt door de sterkere droogte, of de verminderde aanvoer door bijvoorbeeld verstopping, of door een combinatie van beide.

De grondwaterstanden en stijghoogten vertonen gradiënten die wijzen op laterale grondwaterstroming vanuit de zuidoostelijke naar de noordwestelijke richting en een beperkte wegzijging naar het regionale grondwatersysteem. De ordegrootte van deze stroming kan geschat worden op basis van de gemeten gradiënten en een aanname over de doorlatendheid van de ondergrond. Sinds de eerdere rapportages zijn geen opvallende veranderingen in de gradiënten waargenomen en blijft stroming naar verwachting in de ordegrootte van enkele millimeters tot maximaal enkele centimeters per dag. De sterkte van de stroming hangt af van de locatie op het perceel, met een sterkere stroming midden op het perceel, mogelijk samenhangend met de veranderende hoogte van drainage/aangebrachte stijghoogte door middel van de vlotterputten. Ook is er sprake van een variatie in de tijd, met een sterkere stroming tijdens perioden met subirrigatie.

Voor verschillende meetpunten geldt dat de Cl:Br ratio's verhoogd waren in 2019, met name bij de eerste meetronde, wat verklaard werd door opvallend lage bromideconcentraties voor alle meetpunten. Hoewel dit niet aangetoond kon worden, wordt vermoed dat hier sprake was van een meetfout, waardoor ervoor gekozen is deze meetronde niet mee te nemen in de interpretatie van patronen over de tijd.

Uit de gemeten Cl:Br ratio's blijkt dat het effluent zich tijdens de subirrigatieperiode vooral rondom de drains verspreidt, zowel horizontaal als verticaal. Na de subirrigatieperiode worden de ratio's rondom de drain weer lager, hoewel deze niet elk jaar weer zo laag worden als de achtergrondconcentratie, dus een deel lijkt achter te blijven. Verspreiding tot midden tussen de drains is alleen waargenomen aan het eind van 2019. Dit duidt op een beperkte

laterale verspreiding van het effluentwater. Verspreiding van stoffen tot dieper dan vier meter beneden maaiveld is (nog) niet waargenomen.

De aanvoer van effluent zou per drain kunnen verschillen, doordat de stijghoogteverschillen tussen drain (tijdens subirrigatie) en omliggend grondwater per locatie kunnen afwijken, maar ook door bijvoorbeeld verstopping van een drain. Voor afvoer geldt overigens ook dat hier lokaal verschillen kunnen optreden.

4.2 Modelstudie

Voor de modelstudie zijn enkele aannames gedaan die mogelijk afwijken van de praktijk:

- **Isotropie.** Er is aangenomen dat de ondergrond isotroop is, dat wil zeggen in alle richtingen gelijk doorlatend is. Indien er sprake zou zijn van anisotropie en een hogere horizontale doorlatendheid, dan zou dit betekenen dat stroming, daarmee dus ook de verspreiding van stoffen, meer in de horizontale richting zou plaatsvinden dan in de verticale richting. Er zijn geen metingen van de (an)isotropie van de ondergrond in Haaksbergen. Stel dat de anisotropie een factor 5 bedraagt, wat voor zandige ondergronden een realistische schatting is (Bot, 2016), dan zou de verspreiding in de diepte sterk beperkt kunnen worden, en de verspreiding in laterale richting (in geval van stroming) veel groter zijn. Door de leemlagen expliciet te modelleren (zoals in 3.3.4) wordt overigens een deel van de anisotropie (de non-uniformiteit van het pakket) wel meegenomen, en werd ook zichtbaar dat de verspreiding in de diepte beperkt werd.
- **Draindiameter.** In het model is een effectieve draindiameter gekozen op basis van enkele aannames uit een eerder rapport. Gezien de aanwijzingen van drainverstopping is het mogelijk dat de effectieve draindiameter in de praktijk kleiner blijkt te zijn. Dit zou vooral gevolgen hebben voor de snelheid waarop grondwaterstandsveranderingen als gevolg van omschakeling naar subirrigatie of drainage plaatsvinden. Hoewel dit gevolgen zou kunnen hebben voor de stromingspatronen ten tijde van de grondwaterstandsverlaging (de Vos, 1997) wordt verwacht dat dit een zeer beperkt effect heeft op de berekende verspreidingspatronen, omdat deze stroming in vrijwel alle gevallen nog steeds veel sneller zou plaatsvinden dan de andere stroming-gerelateerde processen.

Initieel verspreiden de stoffen zich rondom de drain, vooral tijdens de aanvangsperiode van de subirrigatie, wanneer tijdens een korte periode (minder dan een dag in het model, in het veld enkele dagen) veel effluent wordt aangevoerd om de grondwaterstand te verhogen. De resultaten van de gevoeligheidsanalyse en overige simulaties laten zien dat de vooral volgende zaken van belang zijn wat betreft de verspreiding van **mobiele stoffen** uit het effluent:

- **Grondwaterstroming.** Zowel laterale als verticale grondwaterstroming kunnen zorgen voor verspreiding van de pluim met stoffen, weg van de drainbuis (die juist in de afvoerperiode kan zorgen voor partiële verwijdering). Stroming kan worden herkend wanneer verhoogde concentraties na de subirrigatieperiode in de zone onder de drain lager worden. Laterale stroming kan er voor zorgen dat effluent ook op locaties tussen de drains kan komen, terwijl dit zonder stroming niet of mogelijk pas na vele jaren zou optreden.
- **Aanvoer van effluent tijdens de subirrigatieperiode.** Verschillende processen, zoals neerslag, evapotranspiratie, ingestelde drainagebasis in het KAD-systeem en tijdsduur van de subirrigatie hebben invloed op de totale aangevoerde hoeveelheid effluent. Bij meer aanvoer hoort een verdere verspreiding rondom de drain, en zal doorgaans een kleiner percentage worden verwijderd tijdens de drainageperiode (zie hierna).
- **Afvoer van effluent tijdens de drainageperiode.** Tijdens de drainageperiode wordt grondwater afgevoerd, evenals de stoffen daarin vooral vanuit de zone boven het drainniveau. De mate van afvoer wordt beïnvloed door het neerslagoverschot en stroombanen naar de drainagebuizen: naarmate het neerslagoverschot en afgevoerde hoeveelheid water toeneemt, vindt meer verwijdering plaats.
- **Neerslagtekort.** Bij perioden van neerslagtekorten zal er verspreiding van water en stoffen naar de onverzadigde zone plaatsvinden, waarbij concentraties door indikking sterk verhoogd kunnen raken. Dit werd vooral zichtbaar in de meerjarige simulaties waarin hoge concentraties in de wortelzone ontstonden tijdens de zomers van 2018 en 2019. Tijdens perioden van neerslagoverschot zal echter weer uitspoeling plaatsvinden. Een mogelijk

belangrijk effect dat niet is meegenomen in de modelstudie is mogelijke ophoping in relatief immobiele zones in de wortelzone. Wanneer een stof zich tijdens neerslagtekort verplaatst door de onverzadigde zone, vindt deze stroming via kleinere poriën plaats, aangezien de grotere poriën zijn drooggevallen. Tijdens perioden met neerslagoverschot (regenbuien) is de bodem vochtiger, en vindt stroming (vooral) plaats via grotere poriën. Hierdoor kan het voorkomen dat stoffen in de onverzadigde zone achterblijven, terwijl er netto sprake is van neerwaartse stroming. Hierdoor zou in deze zone sprake kunnen zijn van ophoping van stoffen. Of dit proces ook daadwerkelijk plaatsvindt hangt af van de textuur en structuur van de bodem (vooral bij grote verschillen tussen macro- en microporiën, bijvoorbeeld een bimodale pF curve), alsmede de intensiteiten van het neerslagoverschot en -tekort (vooral bij de afwisseling van sterk droge perioden en grote buien).

- **Heterogeniteit.** Gelaagdheid in de bodem heeft lokaal invloed op de stroomrichting (zie anisotropie boven) en stroomsnelheid, waardoor de stoffen zich in een iets andere richting kunnen verspreiden (bijvoorbeeld minder de diepte in) en er delen van de pluim die in minder doorlatende lagen zijn gedrongen er langer kunnen achterblijven, waardoor er op den duur ophoping zou kunnen plaatsvinden.

Voor **relatief immobiele stoffen** geldt dat de meeste onderzochte processen van veel kleinere invloed zijn en dat **de stoffen in de onderzochte gevallen dichtbij de drainbuis blijven en de verspreiding gering is.**

4.3 Interpretatie van de veldmetingen met behulp van de modelstudie

Zoals het geval is bij elke modelstudie moet in de interpretatie er rekening mee worden gehouden dat een model een versimpeling van de werkelijkheid is. Als toetsing van het verspreidingsgedrag van conservatieve stoffen uit effluent zijn de concentraties van de conservatieve stof uit de modelstudie vergeleken met de Cl:Br ratio's uit de veldmetingen. Hierbij valt op dat op de meetlocaties bij drains (3B en 2; vanaf 2019 ook 3D) de gemeten Cl:Br ratio's dalen tijdens de drainageperioden, wat wijst op laterale stroming. Deze observatie strookt met de gradiënten die met de peilbuizen zijn gemeten. De (onregelmatige) verhoogde ratio's tussen de drains (meetpunt 3A) bevestigen dit beeld. De stroomsnelheid in het veld is echter niet met zekerheid bekend, waardoor de mate van laterale verspreiding in het veld ook niet zeker is. Naast de laterale verspreiding lijkt er sprake te zijn van (beperkte) neerwaartse verspreiding. Gezien de verwachte stroomsnelheden, kan laterale verspreiding plaats hebben gevonden tot enkele meters per jaar in noordwestelijke richting.

In de praktijk kan aanvoer bij iedere drain in het perceel plaatsvinden (dus iedere zes meter), maar kan de hoeveelheid aanvoer lokaal sterk verschillen. In combinatie met de sterke heterogeniteit van de ondergrond, zal dit waarschijnlijk leiden tot een variatie aan verspreidingspatronen: er zullen zones zijn met verhoogde concentraties en zones met geen/nauwelijks effluent.

Het is op basis van de additionele effecten van de afzonderlijke drains te verwachten dat op langere termijn, na vele jaren van subirrigatie, er steeds meer verspreiding en menging plaatsvindt. Hierdoor kan het aandeel effluent in een groot deel van de ondiepe ondergrond (in de zone onder drainniveau) constant verhoogd zijn, met mogelijk extra hoge concentraties in de leemlagen, als gevolg van retardatie.

Voor relatief immobiele stoffen wezen de modelresultaten uit dat deze vooral dichtbij de drain blijven, onafhankelijk van verschillende omstandigheden. Hoewel (relatief immobiele) resten van geneesmiddelen slechts kort zijn gemeten, bevestigen de metingen de modelresultaten (Bartholomeus et al., 2017). Ook op lange termijn lijken deze stoffen zich in het model slechts beperkt te verspreiden, waarbij wel rekening gehouden moet worden met ophoping van deze stoffen nabij de drain. In het onderzoek binnen NWO-RUST (2018-2021) wordt de verspreiding van een breed spectrum aan stoffen onderzocht.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

Dit rapport richt zich op de vraag hoe subirrigatie bijdraagt aan de vochtvoorziening van het gewas, en op de verspreiding van gezuiverd effluentwater en de stoffen die daarin voorkomen voor het KAD-perceel in Haaksbergen, dat via subirrigatie van dat water is voorzien.

- **Watervoorziening gewas.** Subirrigatie heeft positief uitgewerkt voor de watervoorziening van de geteelde landbouwgewassen op het perceel. Het is gelukt om via subirrigatie de grondwaterstand en het vochtgehalte in de wortelzone te verhogen.
- **Verspreiding effluent.** Uit de veldmetingen blijkt dat verspreiding van de onderzochte stoffen in de diepte beperkt is. Verspreiding in zijwaartse richting wordt wel verwacht op basis van grondwaterstroming en temporele patronen in de concentraties, maar vooral de grootte van de laterale stroomsnelheid van het grondwater is nog onzeker.

Uit de modelstudie blijkt dat verschillende factoren invloed kunnen hebben op de verspreiding van het effluent, waarbij de achtergrondstroming van het grondwater de belangrijkste is. Daarnaast zijn ook het neerslagtekort (verspreiding richting de wortelzone) en de bodemopbouw van invloed. Heterogeniteit en anisotropie kunnen afwijkende stromingspatronen veroorzaken.

In het systeem met subirrigatie is er een sterk verschil in stromingspatronen tussen de subirrigatieperiode (groeiseizoen) en de drainageperiode (winterperiode). In een situatie met beperkte laterale en/of verticale achtergrondstroming zal tijdens de drainageperiode een (relatief groot) deel van het effluent weer wegstromen via de drains.

Voor in het effluent aanwezige stoffen die in de bodem relatief immobiel zijn, zoals carbamazepine, geldt dat deze nabij de drain blijven en (indien persistent) zich hier ook kunnen ophopen. Relatief immobiele stoffen die niet persistent zijn, zullen in de zone rondom de drain afbreken. Afhankelijk van de eigenschappen van de afbraakproducten (mobiliteit en persistentie) zullen deze stoffen zich al dan niet verspreiden in de ondergrond, via de drains wegstromen of lokaal aanwezig blijven.

Hoewel de situatie binnen het perceel sterk kan verschillen door de heterogeniteit van de ondergrond, kunnen er in het algemeen conclusies worden getrokken over de verspreiding van mobiele stoffen uit het effluent:

- **Verspreiding naar de wortelzone.** Deze is beperkt aangetoond, maar komt voor tijdens perioden met een (zeer) groot neerslagtekort. Het is mogelijk dat stoffen uit het effluent hier vervolgens opgenomen worden door het gewas en/of deels achterblijven.
- **Verspreiding in de diepte.** Verspreiding in de diepte is tot nu toe (eind 2019) relatief beperkt gebleven door de beperkte wegzijging en de aanwezigheid van leemlagen. Dit effect zou nog versterkt te kunnen worden indien er sprake is van anisotropie in de doorlatendheid, die verwacht wordt een minder grote verticale verspreiding tot gevolg te hebben.
- **Verspreiding in laterale richting.** Hoewel dit verwacht wordt op basis van stijghoogtegradiënten, is dit in met behulp van de stofconcentraties slechts beperkt aangetoond. Het is mogelijk dat dit wel plaatsvindt, maar dat dit net niet op de juiste momenten of plekken is gemeten, maar het is ook mogelijk dat de laterale verspreiding langzamer gaat dan oorspronkelijk verwacht.

Op basis van de modelresultaten in combinatie met de gemeten stijghoogtegradiënten wordt verwacht dat verspreiding eerder in laterale richting dan in neerwaartse richting plaatsvindt, waarbij het toegevoerde effluent deels via de drains en deels via het oppervlaktewater tot afvoer komt. Een grootschaligere modelstudie, meer gericht op het regionale grondwater in relatie tot het KAD-perceel, zou aanvullend inzicht in kunnen bieden in de

verspreiding van mobiele, persistente stoffen naar het oppervlaktewater en/of het diepere grondwater op grotere schaal en langere termijn.

5.2 Aanbevelingen

De conclusies uit deze veldstudie laten zien dat er ondanks intensieve monitoring nog veel onzekerheden bestaan rondom de mogelijke verspreiding van stoffen uit het aangevoerde effluent. Wat wel duidelijk is, is dat immobiele, persistente stoffen zich zullen ophopen nabij de drains, terwijl mobiele stoffen zich tegelijkertijd naar de wortelzone en in de ondergrond kunnen verspreiden, waarbij de richting afhangt van lokale omstandigheden. Gezien de samenstelling van het effluent kunnen beide uitersten ongewenste gevolgen hebben, zowel op het vlak van milieu en de gezondheid van mens en dier, maar bijvoorbeeld ook in juridische zin. In de discussie rondom hergebruik van restwater is het daarom sowieso zinnig om de overweging te maken om het effluentwater van tevoren dusdanig goed te zuiveren dat eventuele verspreiding in het milieu niet of nauwelijks tot problemen kan leiden. Het hier gerapporteerde onderzoek is gedaan met bewust hergebruik van gezuiverd effluentwater: met name in het geval van indirect en onbewust hergebruik kan het voorzorgsprincipe een goede reden zijn om verdere zuivering van RWZI-effluent te overwegen. Dit vergroot het toepassingsbereik van een verantwoorde inzet van effluent voor de zoetwatervoorziening en de kans op KRW-doelbereik in het ontvangende oppervlaktewater.

Op basis van de onderzoeksresultaten worden enkele aanbevelingen gedaan:

- **Op peil houden van aanvoer via subirrigatie.** De verhoging van grondwaterstanden door de subirrigatie bleek tijdens verschillende perioden niet goed op peil te houden. De oorzaak hiervan hangt waarschijnlijk samen met gedeeltelijke verstopping van drainbuizen. Vervolgonderzoek naar de oorzaak zou bij kunnen dragen aan een meer succesvolle toepassing van subirrigatie in de toekomst.
- **Monitoring op onderzoeklocatie.** Aangezien er onzekerheden bestaan rondom de verspreiding van stoffen uit het effluent op de lange termijn, lijkt het verstandig om op regelmatige basis langjarig te blijven monitoren.
- **Grondwatermodellering.** De mogelijke verspreiding van stoffen kan verder onderzocht worden door de grondwaterstroming op iets grotere schaal te duiden. Niet alleen de stroming nabij de drains (zoals in deze studie) maar ook op grotere diepten en over horizontaal grotere afstanden, in combinatie met mogelijke afvoer via met name de beek of wellicht de greppel, kan dan worden meegenomen. In rapporten van twee MSc-studenten van WUR zijn hiervoor reeds verkennende berekeningen gedaan, die een goede basis bieden om nadere analyses te doen.
- **Overige stoffen en micro-organismen.** In dit rapport is gekeken naar de chloride:bromide-ratio als conservatieve tracer voor gezuiverd effluent. Via effluent worden echter zeer veel verschillende stoffen in de bodem gebracht worden, met een grote variatie aan eigenschappen (mobiel, sorptie, chemische reacties, etc.). In de promotieonderzoeken binnen NWO-RUST wordt er gekeken (2018-2021) naar overige stoffen, waaronder bijvoorbeeld medicijnresten. Naast chemische stoffen kan er ook verspreiding plaatsvinden van micro-organismen via het effluent. Hierbij kan mogelijke verspreiding naar de wortelzone en/of het gewas een aandachtspunt zijn, in verband met mogelijke gevolgen voor de gezondheid. In het onderzoek naar deze stoffen kunnen ook afbraakprocessen van belang zijn, waardoor de verspreiding kan worden tegengegaan of juist verspreiding van ongewenste metabolieten kan plaatsvinden.
- **Wortelzone.** Tijdens (zeer) droge zomers kan er verspreiding plaatsvinden naar de wortelzone. Bemonstering van het bodemwater via rhizons blijkt dan niet altijd goed te werken. Middels bodemmonsters kan er wel een goed beeld worden verkregen van de aanwezigheid van effluent gerelateerde stoffen in de wortelzone. Als dit gedaan wordt vlak na zowel een droge periode (tijdens subirrigatie) als na een natte periode (tijdens de drainageperiode) kan tevens nagegaan worden of de stoffen vervolgens achter kunnen blijven in de wortelzone (bijvoorbeeld als gevolg van stroming door verschillende delen van het porienetwerk bij capillaire opstijging en percolatie, en/of sorptie).
- **Gewas.** Bij verspreiding naar de wortelzone kunnen sommige stoffen mogelijk ook opgenomen worden door het gewas. Bemonstering van het gewas kan hier meer inzicht in bieden. Binnen NWO-RUST worden hier eerste analyses aan gedaan. Voor verdere praktijktoepassing kan het tevens interessant zijn om te kijken naar

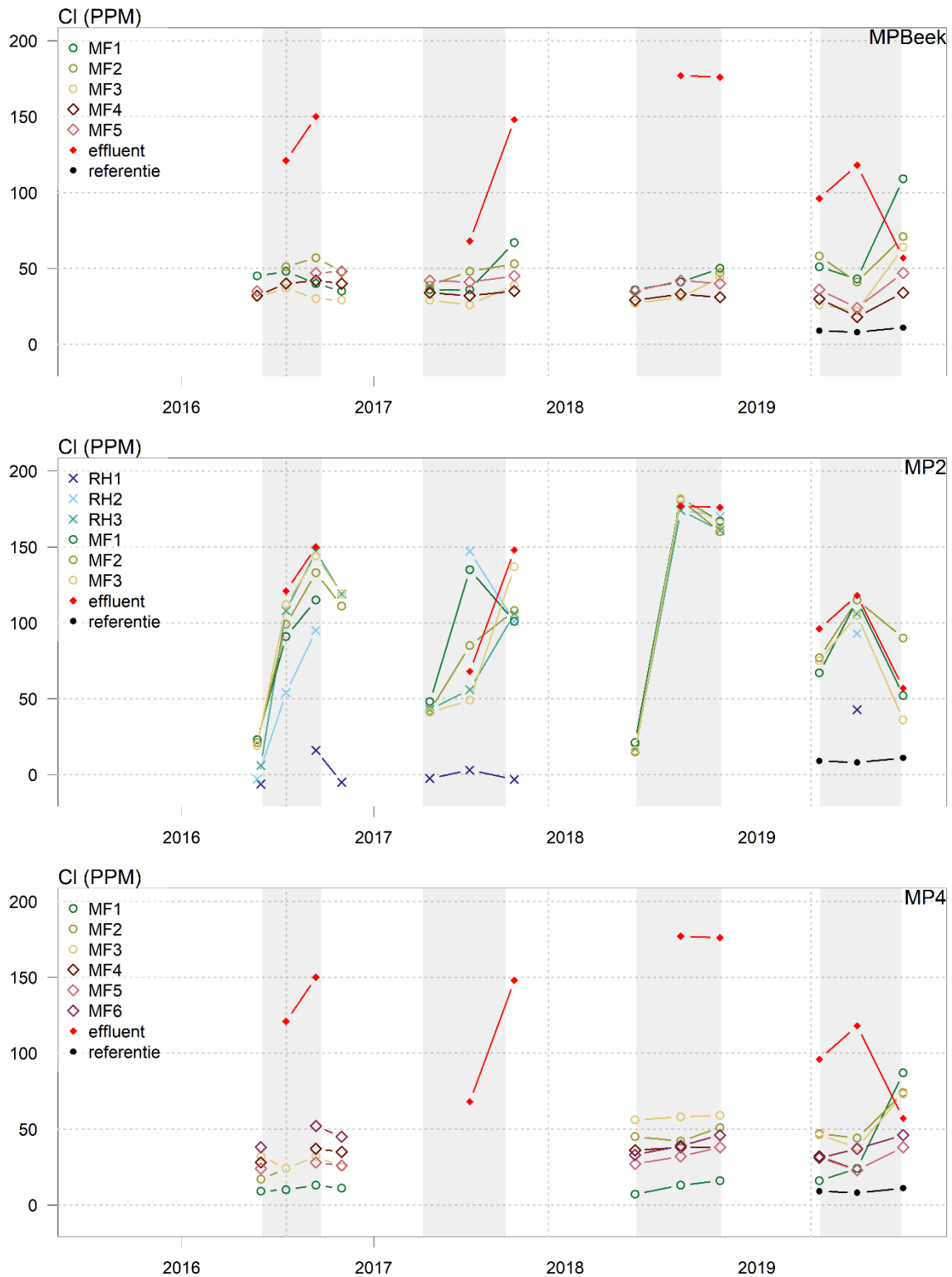
opname van stoffen door verschillende typen gewassen: mogelijk kunnen risico's van verspreiding naar en opname door het gewas beperkt worden door gewaskeuze.

6 Referenties

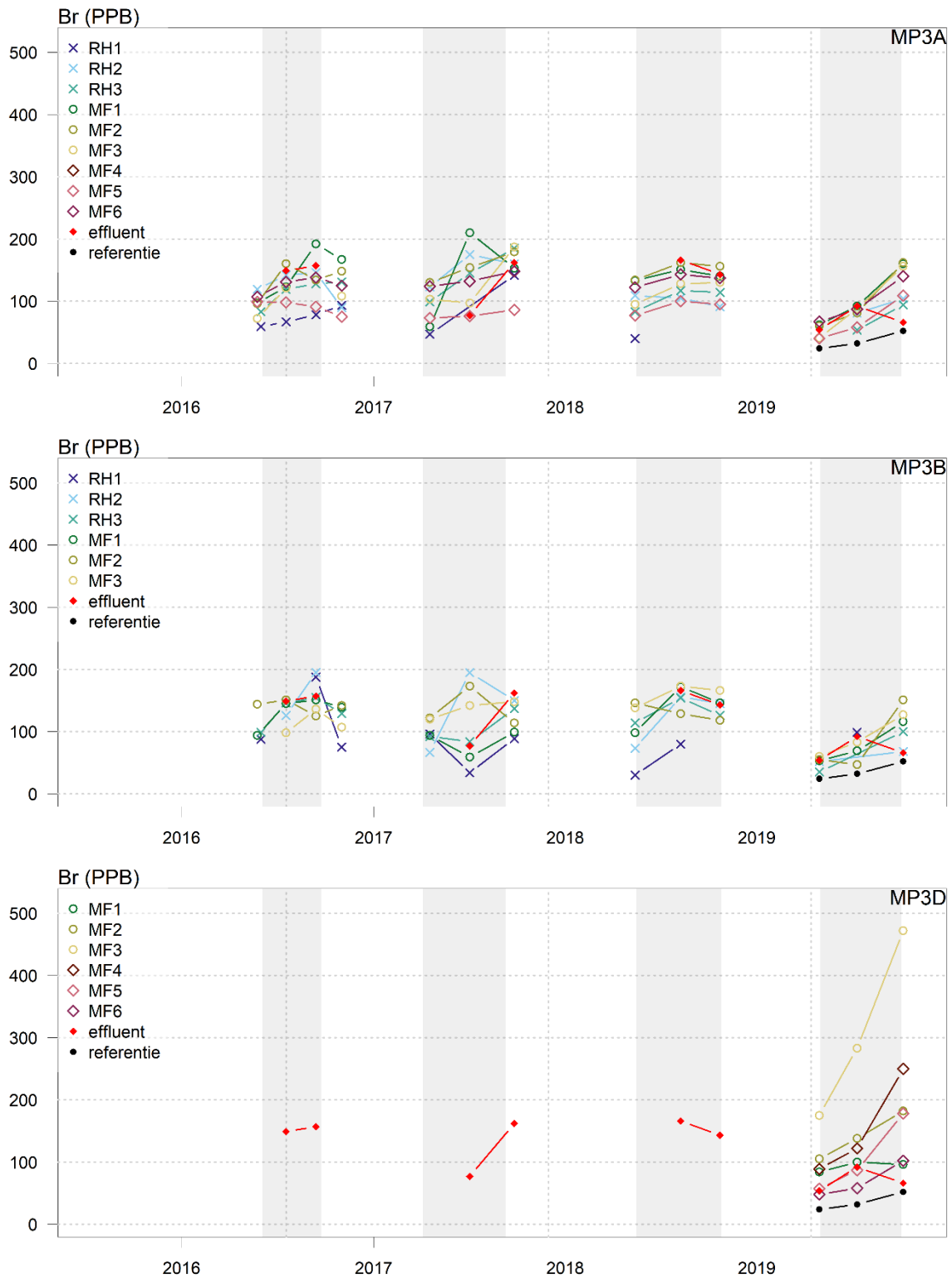
- Bartholomeus, R.P., Stofberg, S.F., van den Eertwegh, G.A.P.H., Cirkel, D.G., 2017. Hergebruik restwater voor zoetwatervoorziening in het landelijk gebied: Monitoring sub-irrigatie met RWZI-effluent Haaksbergen - 2016. BTO 2017.062, KWR, Nieuwegein.
- Bartholomeus, R.P., van den Eertwegh, G.A.P.H., Cirkel, D.G., 2016. Hergebruik restwater voor zoetwatervoorziening in het landelijk gebied: Monitoring sub-irrigatie met RWZI-effluent Haaksbergen. BTO 2016.050, KWR, Nieuwegein.
- Beard, J.E., Bierkens, M.F., Bartholomeus, R.P., 2019. Following the water: Characterising de facto wastewater reuse in agriculture in the Netherlands. *Sustainability*, 11(21): 5936.
- Bot, B., 2016. Gwz2016. Bot, Rotterdam.
- Cirkel, D.G., van den Eertwegh, G., Stofberg, S.F., Bartholomeus, R.P., 2017. Kennisdocument Hergebruik van Restwater voor de Landbouwwatervoorziening. BTO 2017.009, KWR, Nieuwegein.
- de Vos, J.A., 1997. Water flow and nutrient transport in a layered silt loam soil. De Vos.
- Deltaprogramma, 2019. Doorwerken aan de delta: nuchter, alert en voorbereid : inclusief: Deltaplan Waterveiligheid, Deltaplan Zoetwater, Deltaplan Ruimtelijke adaptatie, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, Den Haag. <https://deltaprogramma2020.deltacommissaris.nl/>
- Durán-Álvarez, J.C., Prado-Pano, B., Jiménez-Cisneros, B., 2012. Sorption and desorption of carbamazepine, naproxen and triclosan in a soil irrigated with raw wastewater: Estimation of the sorption parameters by considering the initial mass of the compounds in the soil. *Chemosphere*, 88(1): 84-90. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.02.067>
- Klein Tank, A., Beersma, J., Bessembinder, J., Hurk, B.v.d., Lenderink, G., 2014. KNMI'14 : klimaatscenario's voor Nederland, KNMI, De Bilt. http://www.klimaatscenarios.nl/images/Brochure_KNMI14_NL.pdf
- Klijn, F., ter Maat, J., van Velzen, E., Hunink, J., Goorden, N., Kielen, N., Werkman, W., Baarse, G., Beumer, V., Delsman, J., 2011. Zoetwatervoorziening in Nederland : landelijke analyse knelpunten in de 21e eeuw, Deltares. <http://edepot.wur.nl/220114>
- Knotters, M., Jansen, P.C., 2005. Honderd jaar verdroging in kaart. *Stromingen : vakblad voor hydrologen*, 11(4): 19-32. <https://edepot.wur.nl/9957>
- Narain-Ford, D., Bartholomeus, R., Raterman, B., van Zaanen, I., ter Laak, T., van Wezel, A.P., Dekker, S.C., 2020. Shifting the imbalance: Intentional reuse of Dutch sewage effluent in sub-surface irrigation. *Science of The Total Environment*, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142214>: 142214. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142214>
- Narain, D., Bartholomeus, R., Dekker, S., Van Wezel, A., 2020. Natural purification through soils: Risks and opportunities of sewage effluent reuse in sub-surface irrigation. *Rev. Environ. Contam. Toxicol.*
- Philip, S.Y., Kew, S.F., van der Wiel, K., Wanders, N., van Oldenborgh, G.J., 2020. Regional differentiation in climate change induced drought trends in the Netherlands. *Environmental Research Letters*, 15(9): 094081. DOI:<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab97ca>
- Pronk, G., Dooren, T.v., Stofberg, S., Bartholomeus, R., 2020. Waterhergebruik en de zoetwatervoorziening. BTO 2020.011, KWR, Nieuwegein. <https://library.kwrwater.nl/publication/60884959/>
- Ritzema, H.P., Nijland, H.J., Croon, F.W., 2006. Subsurface drainage practices: From manual installation to large-scale implementation. *Agric Water Manag*, 86(1-2): 60-71. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2006.06.026>
- Simunek, J., Van Genuchten, M.T., Sejna, M., 2018. *Hydrus Technical Manual, Version 3*, PC-Progress, Prague, Czech Republic.
- van den Eertwegh, G. et al., 2020. Droogte in zandgebieden van Zuid-, Midden- en Oost-Nederland : het verhaal: analyse van droogte 2018 en 2019 en tussentijdse bevindingen, KnowH2O, Berg en Dal. <https://edepot.wur.nl/534198>
- Williams, C.F., Williams, C.F., Adamsen, F.J., 2006. Sorption-desorption of carbamazepine from irrigated soils. *J Environ Qual*, 35(5): 1779-83. DOI:10.2134/jeq2005.0345
- Wing, 2015. Wel goed water geven! Werkprogramma zoetwatervoorziening hoge zandgronden 2016-2021.

Bijlagen

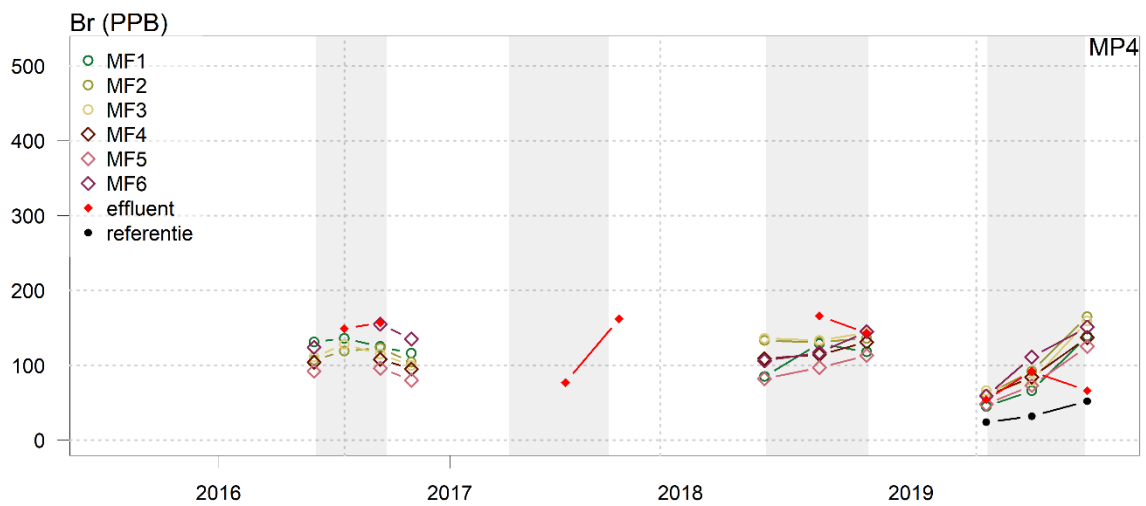
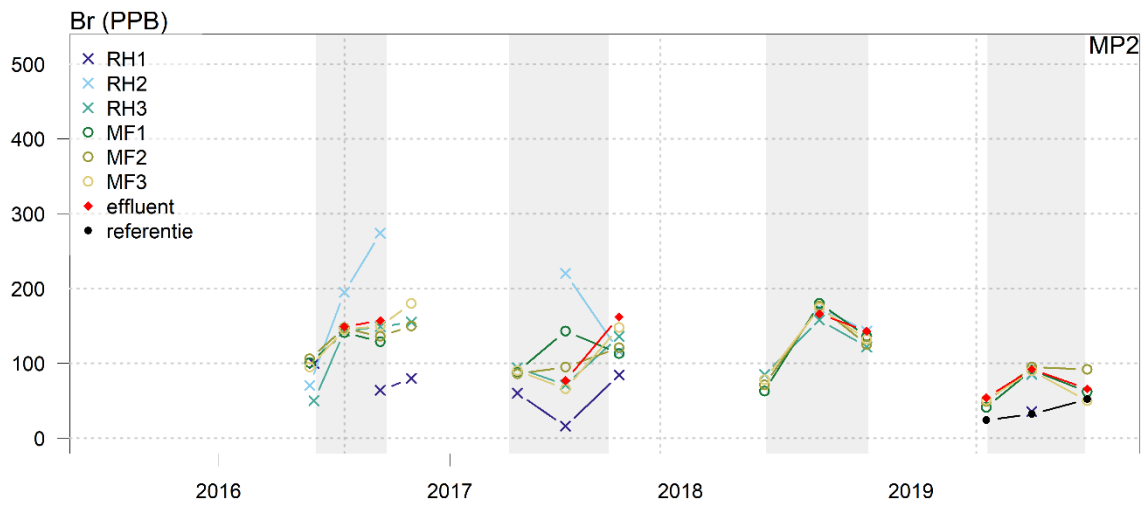
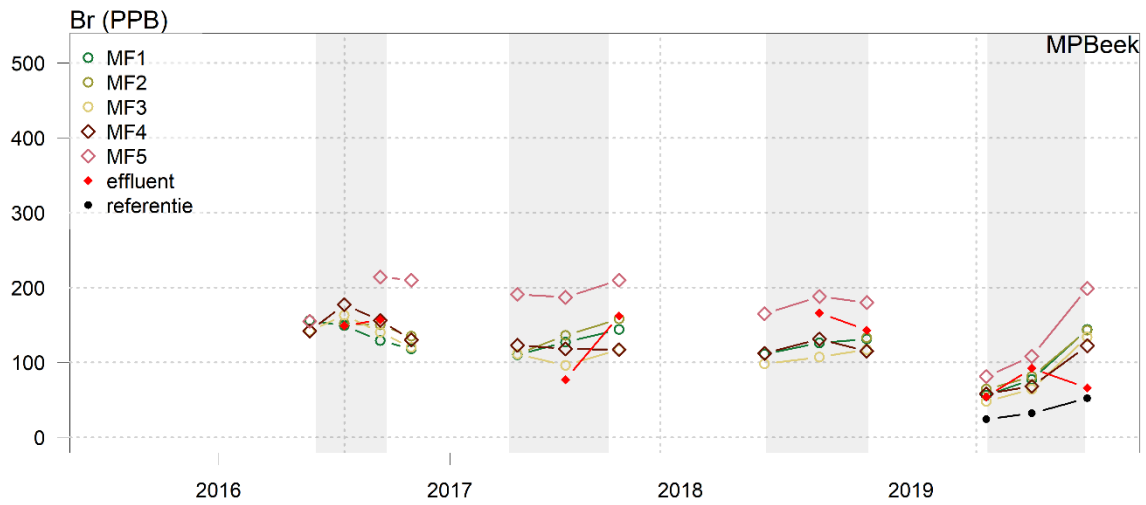
Chloride op meetpunten Beek, 2 en 4



Bromide op meetpunten 3A, 3B en 3D

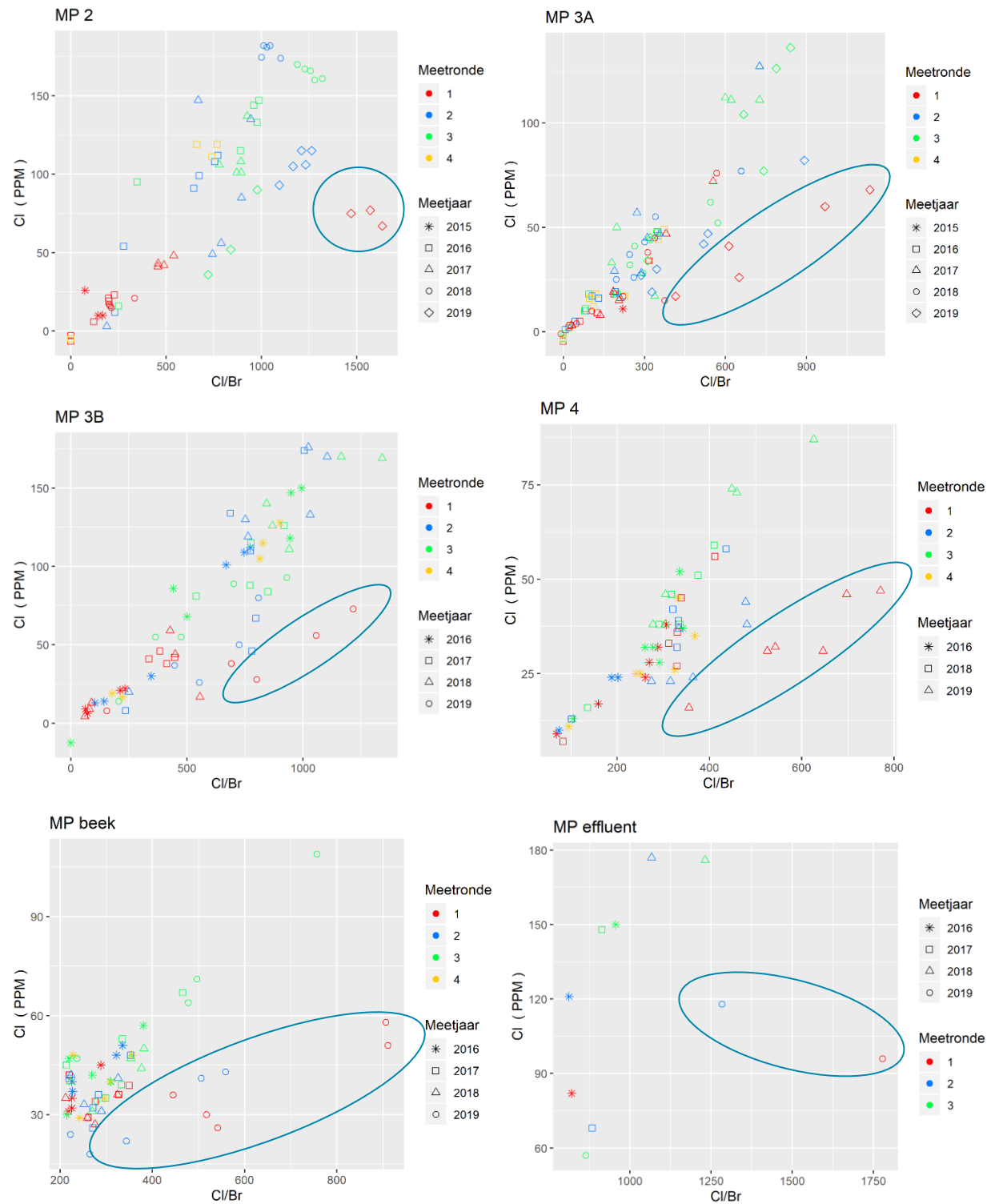


Bromide op meetpunten Beek, 2 en 4.



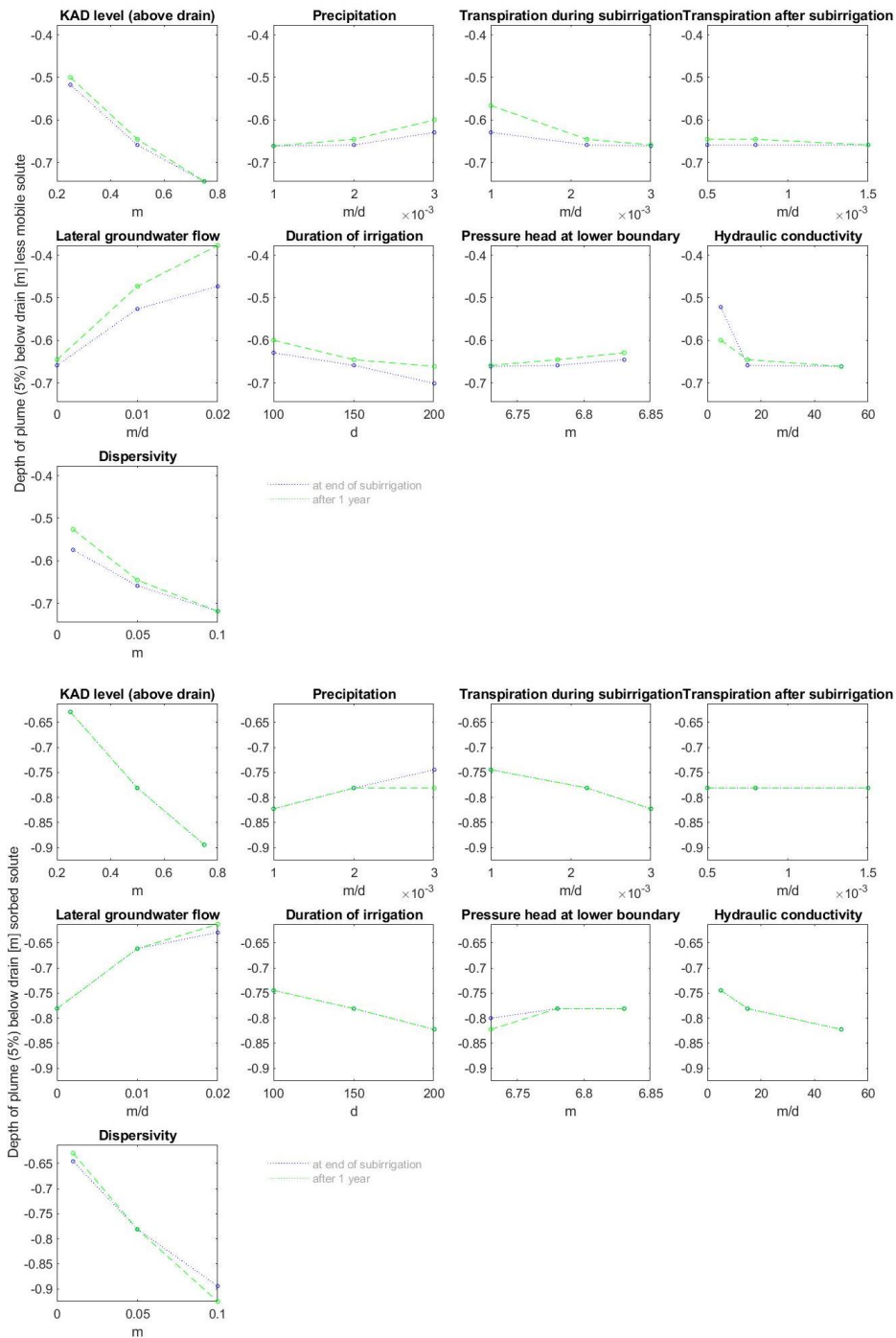
II Cl:Br – Chlorideratio

Verhouding tussen Cl:Br en chloride, geplot per meetpunt (bestaande uit metingen op verschillende dieptes) en voor verschillende meetmomenten. Tijdens de eerste meetronde van 2019 zijn afwijkende waarden van deze verhoudingen geconstateerd (omcirkeld). Let op: de assen zijn niet gelijk voor de verschillende meetpunten.

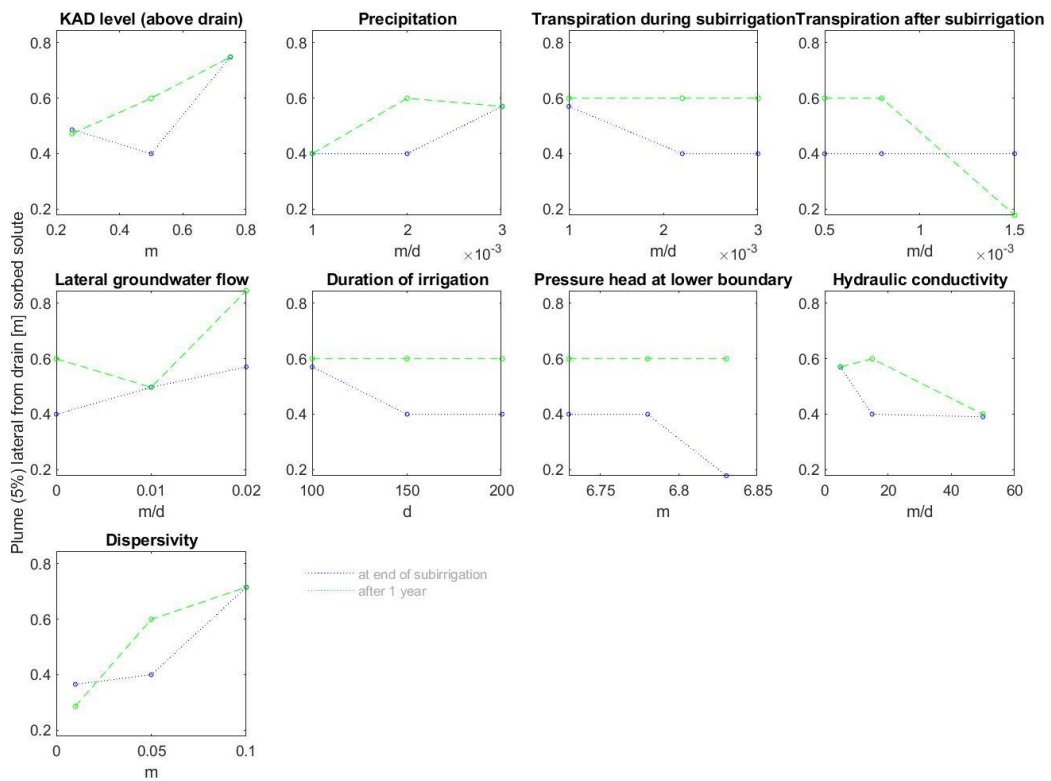
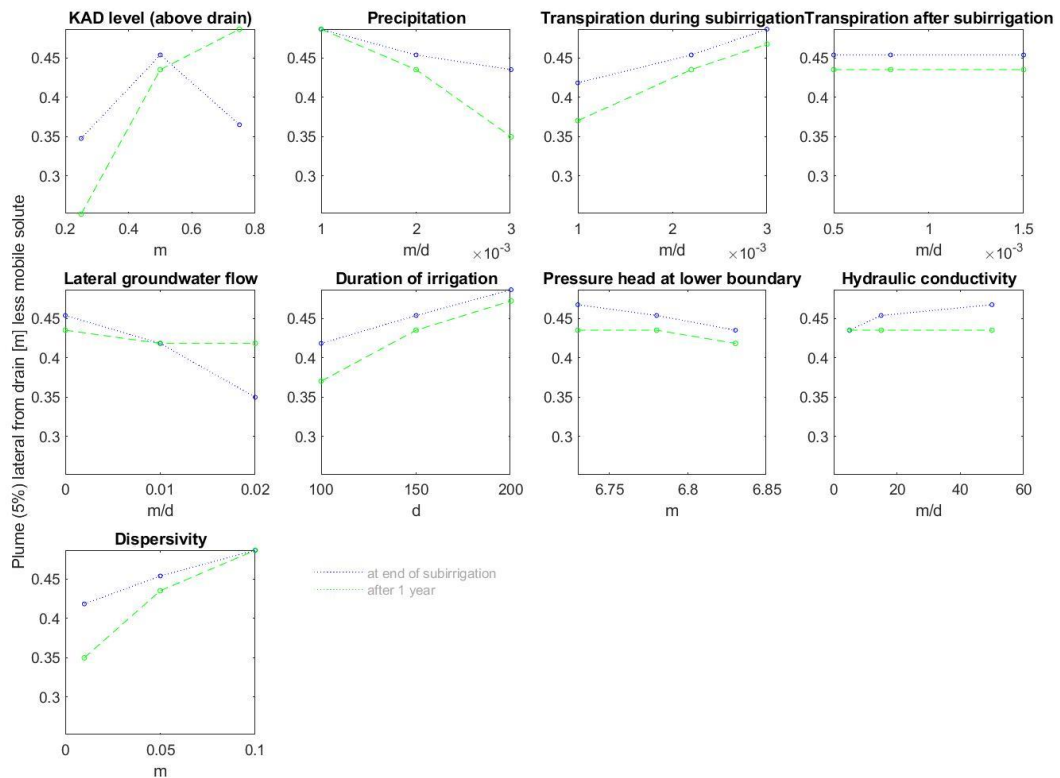


III Aanvullende afbeeldingen gevoelighedsanalyse

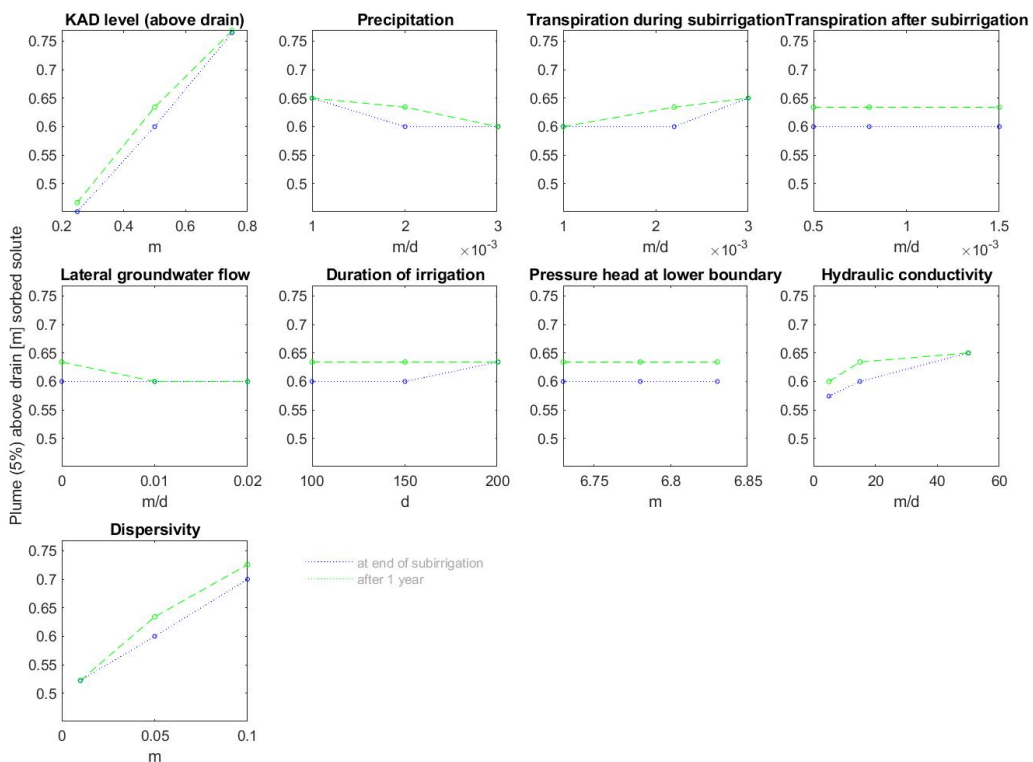
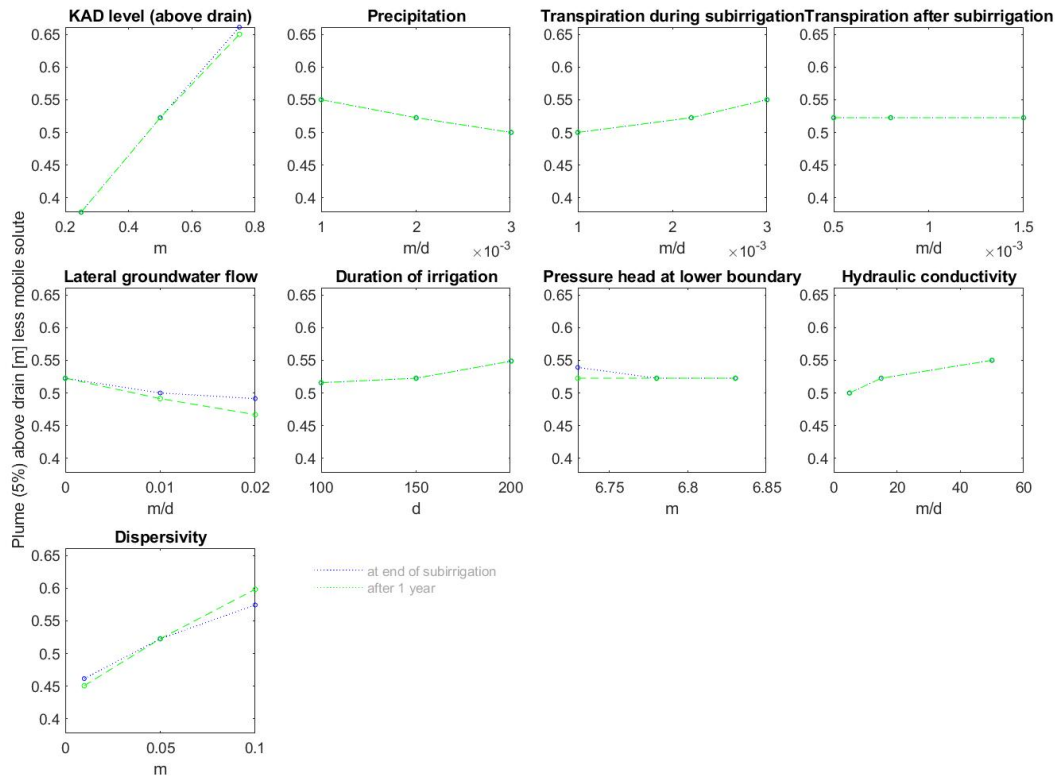
Gevoelighedsanalyse op verspreiding van mobiele en geadsorbeerde stof onder de drain



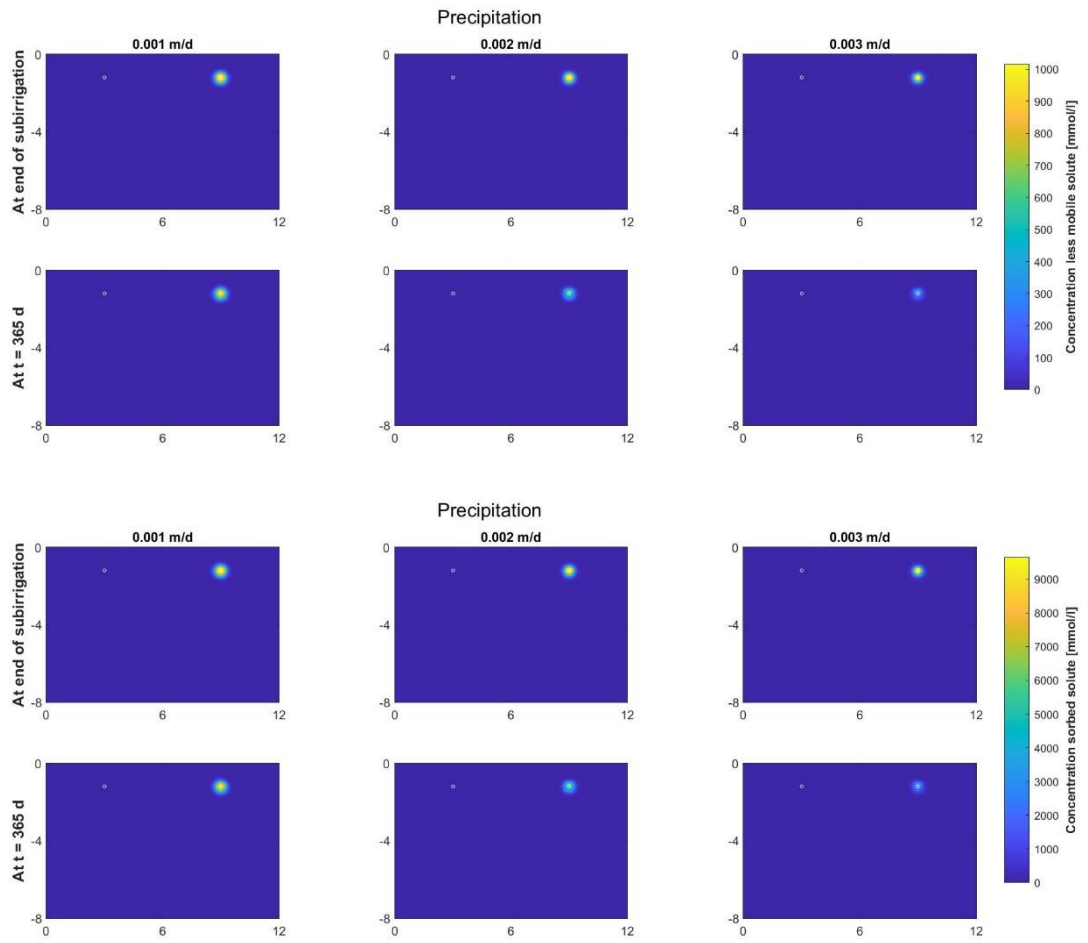
Gevoeligheidsanalyse op verspreiding van mobiele en geadsorbeerde stof naast de drain



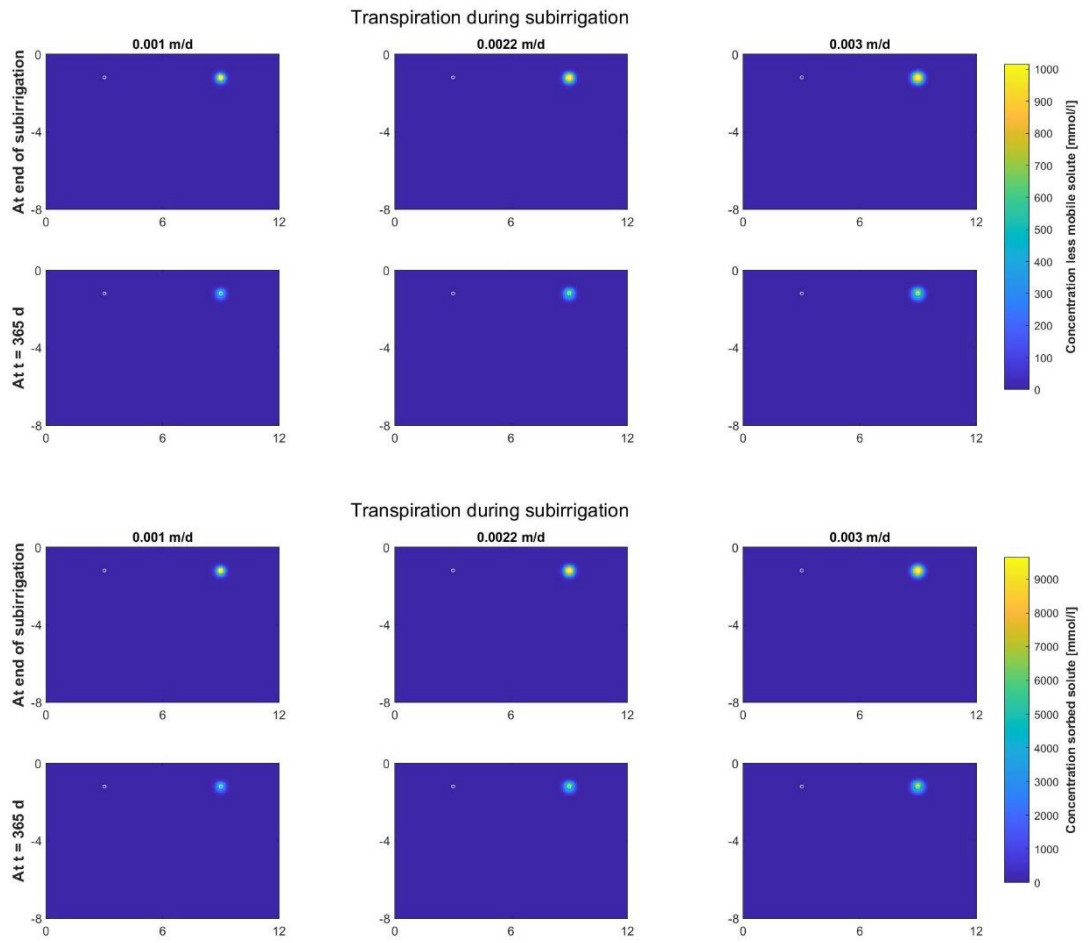
Gevoeligheidsanalyse op verspreiding van immobiele en geadsorbeerde stof boven de drain



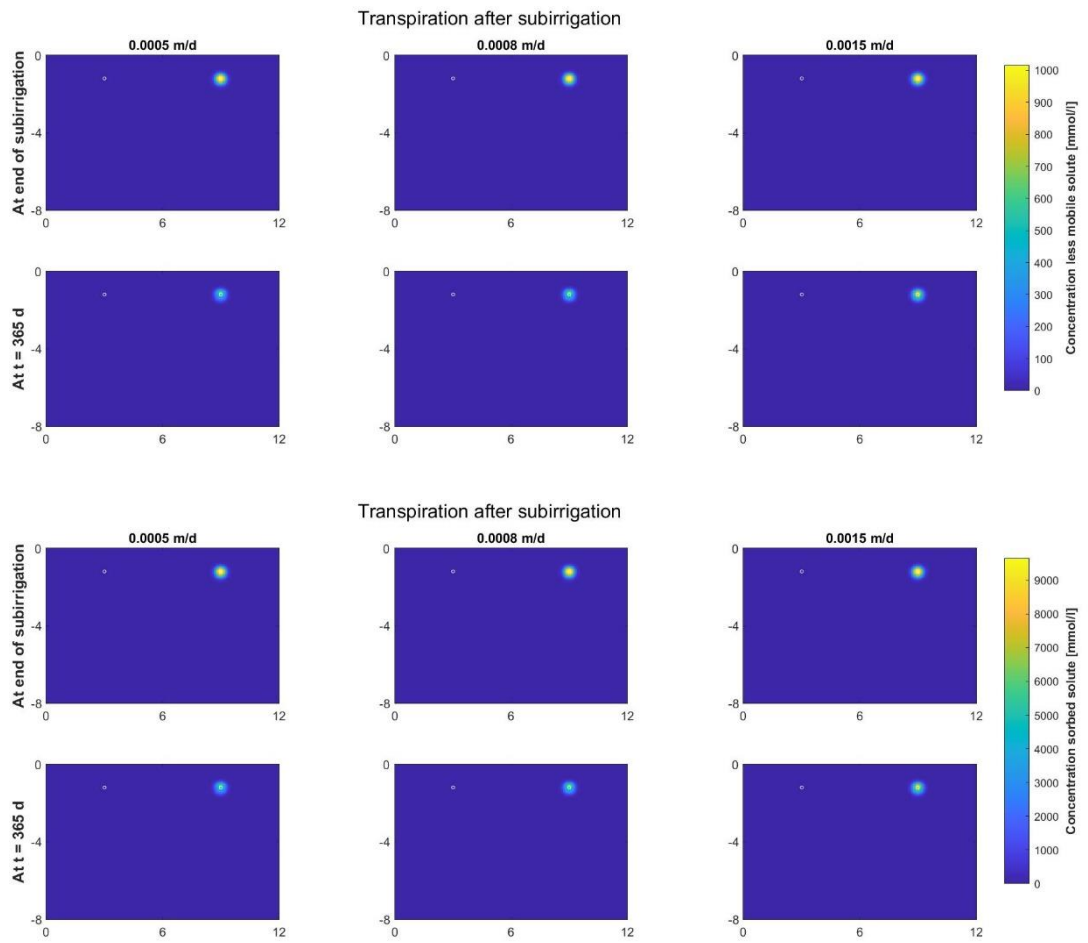
Effect van neerslag op de verspreiding van de relatief immobiele en geadsorbeerde stof



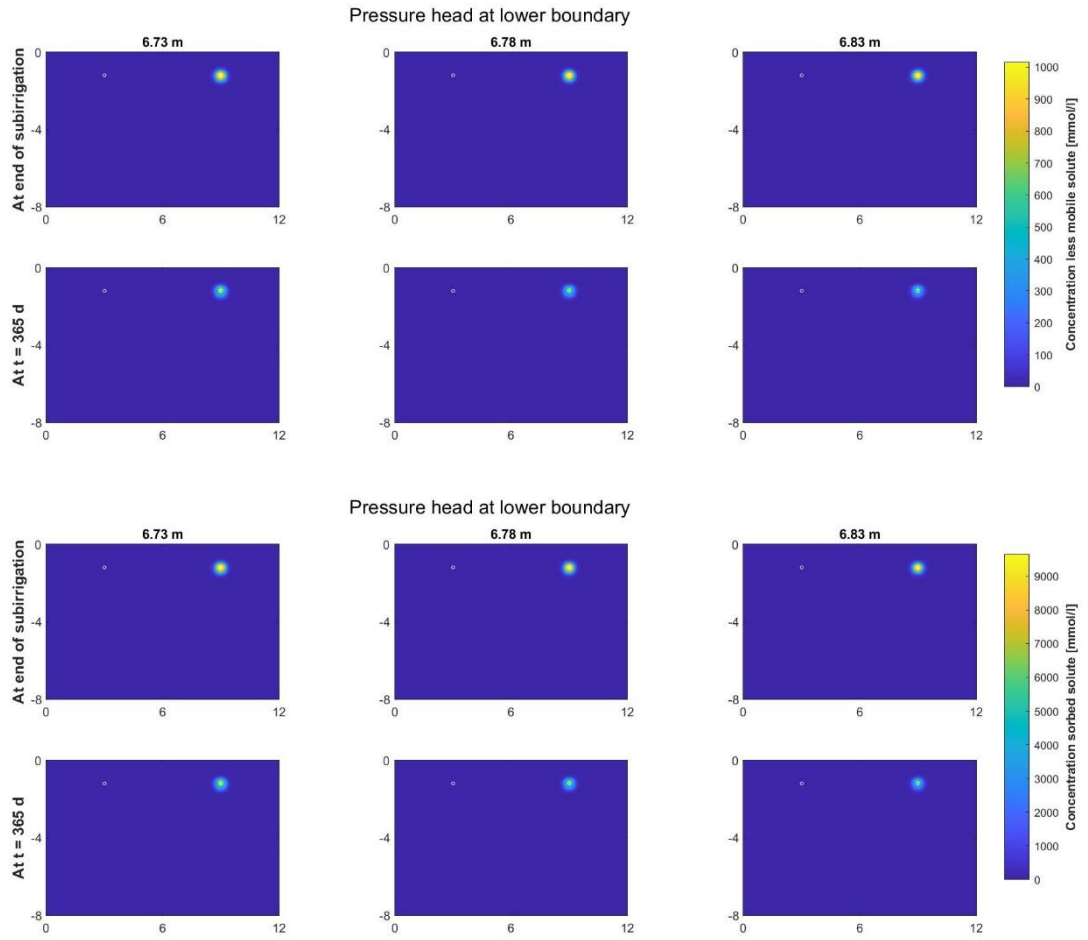
Effect van transpiratie tijdens de subirrigatie op de verspreiding van de relatief immobiele en geadsorbeerde stof



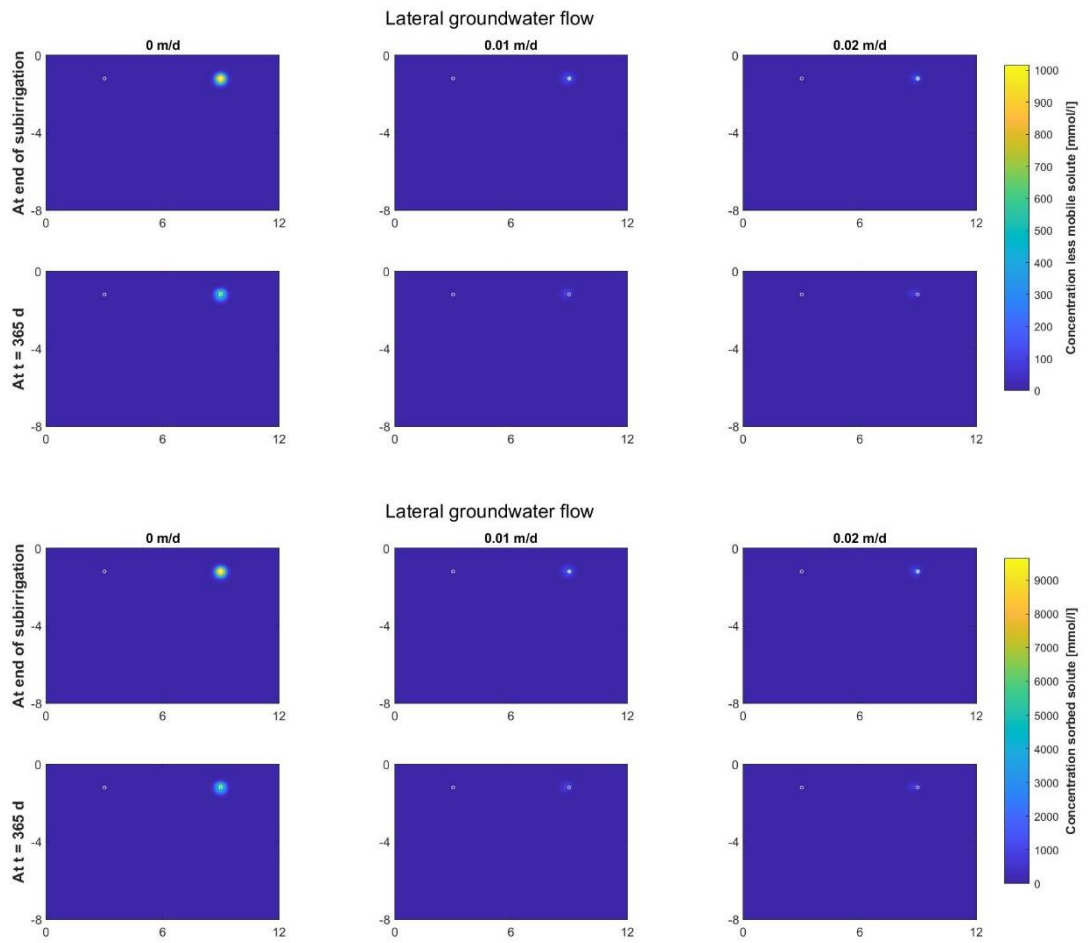
Effect van transpiratie tijdens de drainageperiode op de verspreiding van de relatief immobiele en geadsorbeerde stof



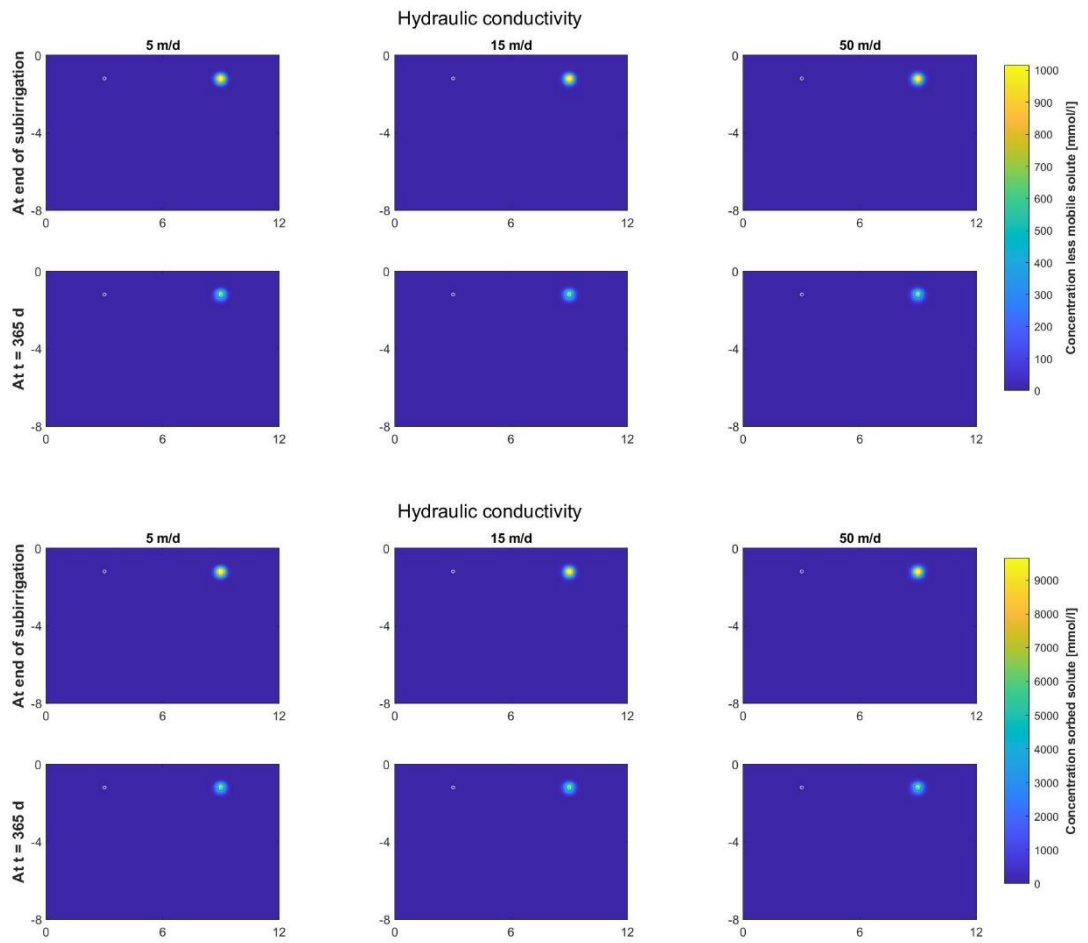
Effect van de stijghoogte aan de onderrand van het model op de verspreiding van de relatief immobiele en geadsorbeerde stof



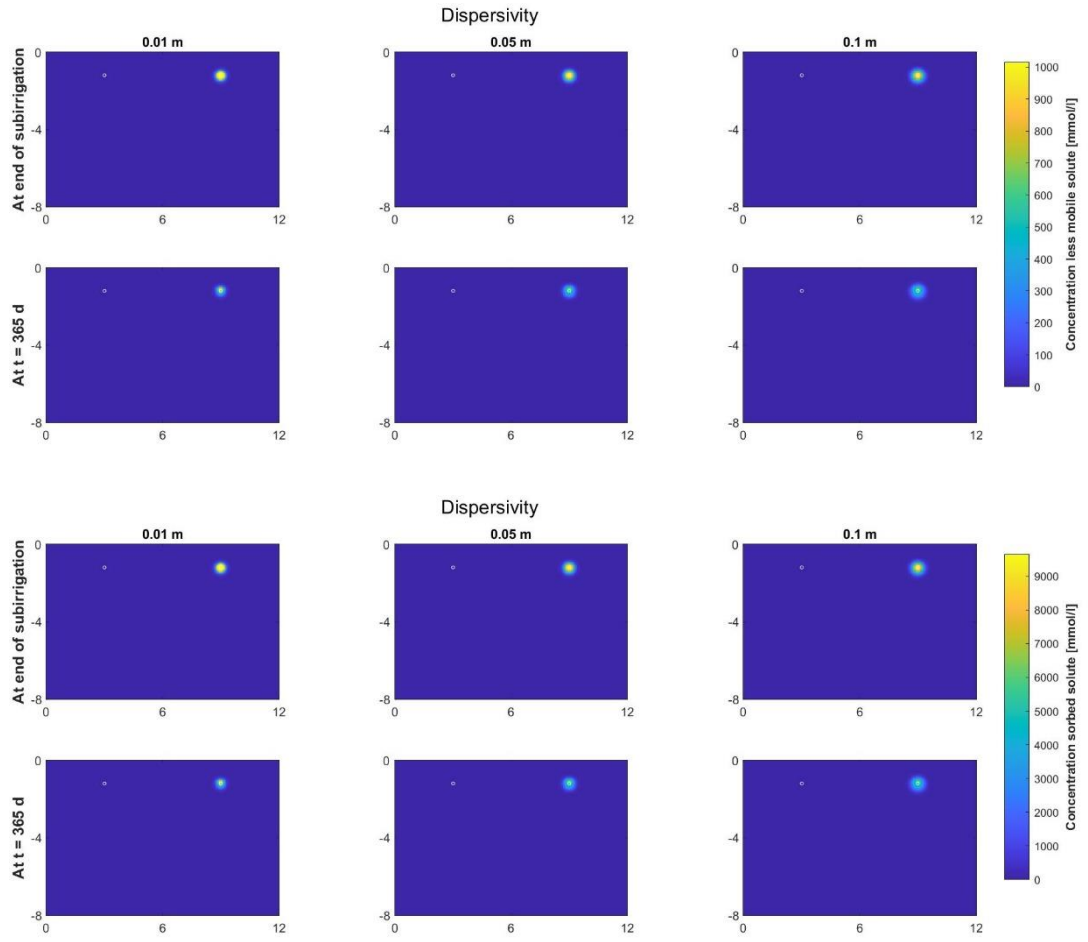
Effect van laterale stroming op de verspreiding van de relatief immobiele en geadsorbeerde stof



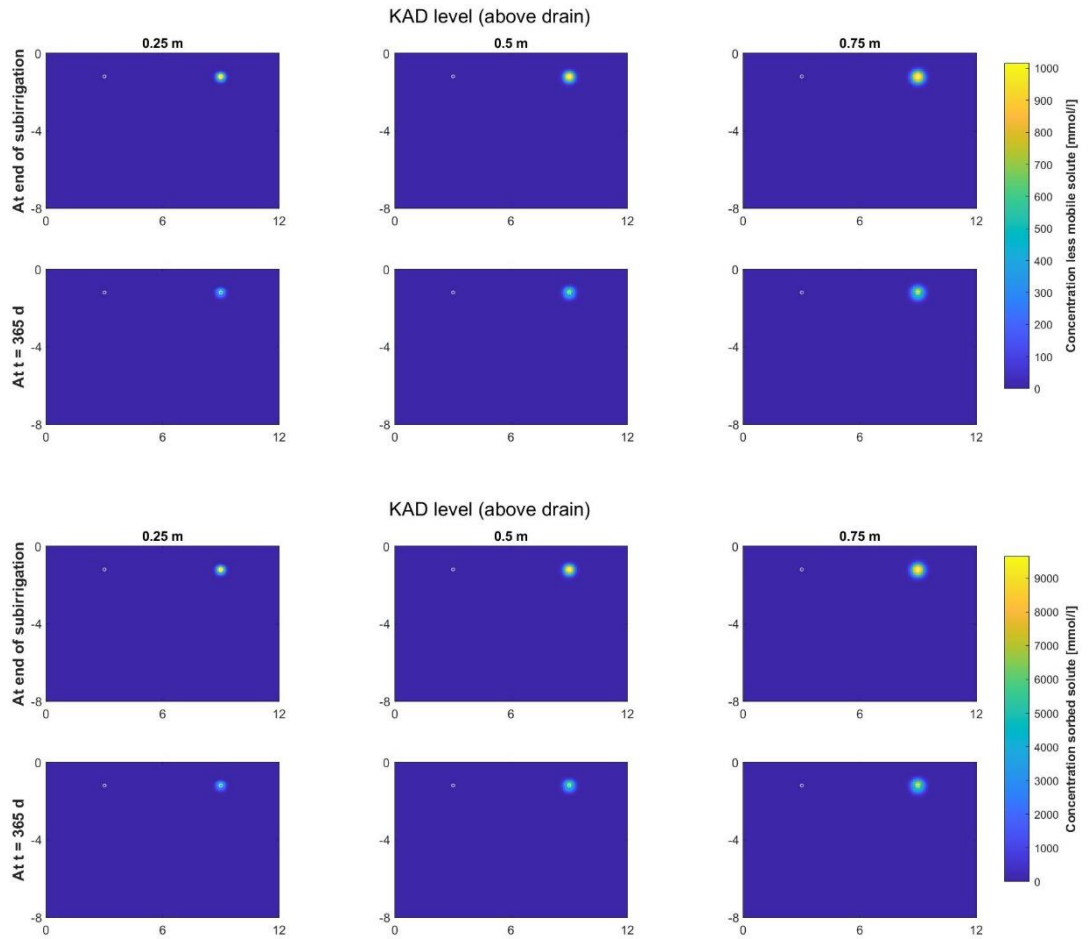
Effect van de verzadigde doorlatendheid op de verspreiding van de relatief immobiele en geadsorbeerde stof



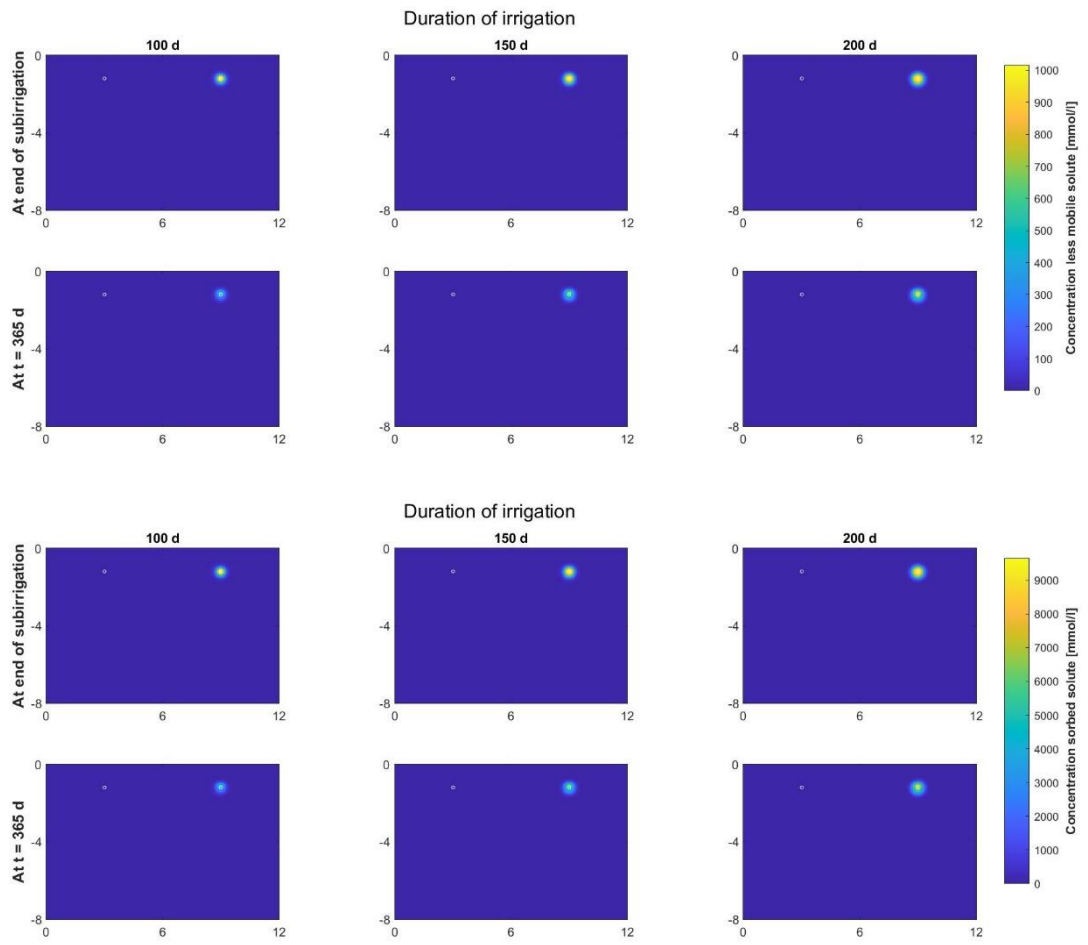
Effect van dispersiviteit op de verspreiding van de relatief immobiele en geadsorbeerde stof



Effect van het KAD niveau tijdens de subirrigatie op de verspreiding van de relatief immobiele en geadsorbeerde stof

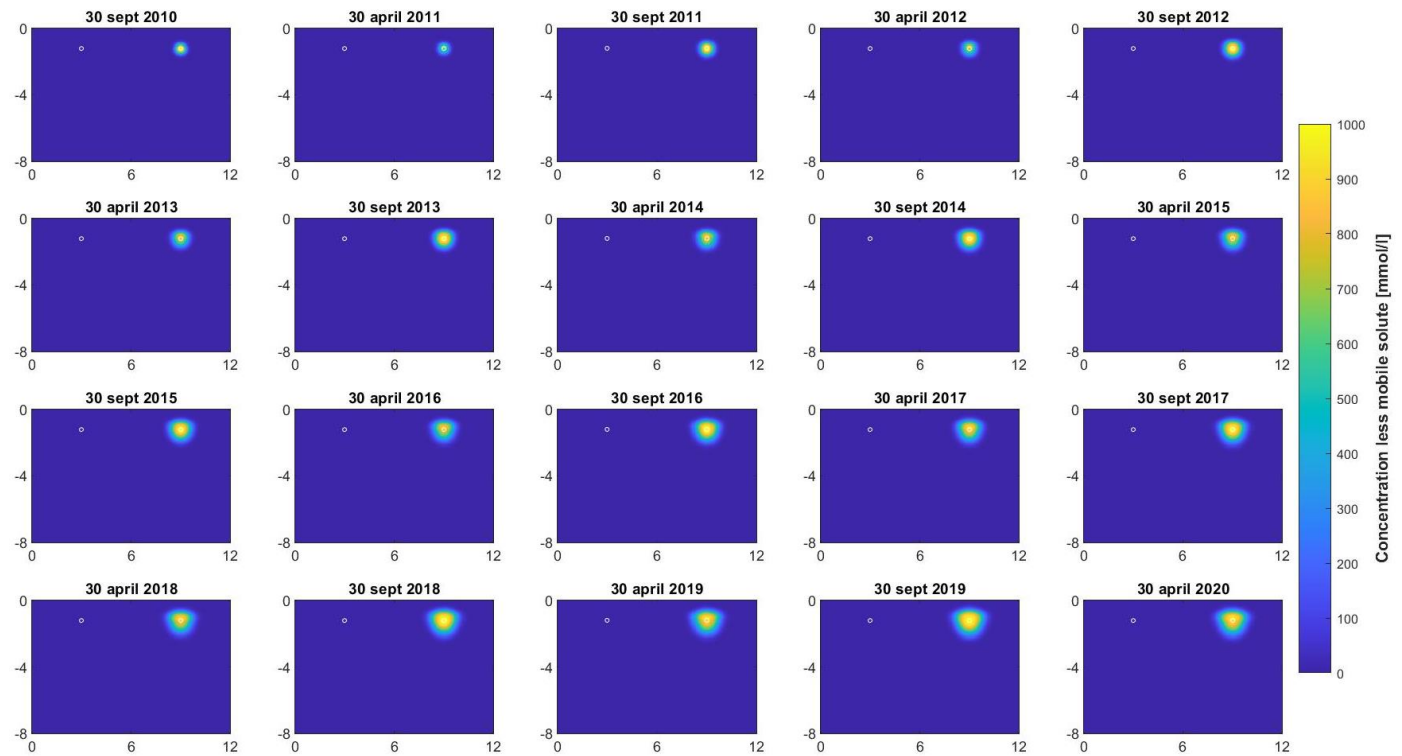


Effect van de tijdsduur van de subirrigatie op de verspreiding van de relatief immobiele en geadsorbeerde stof

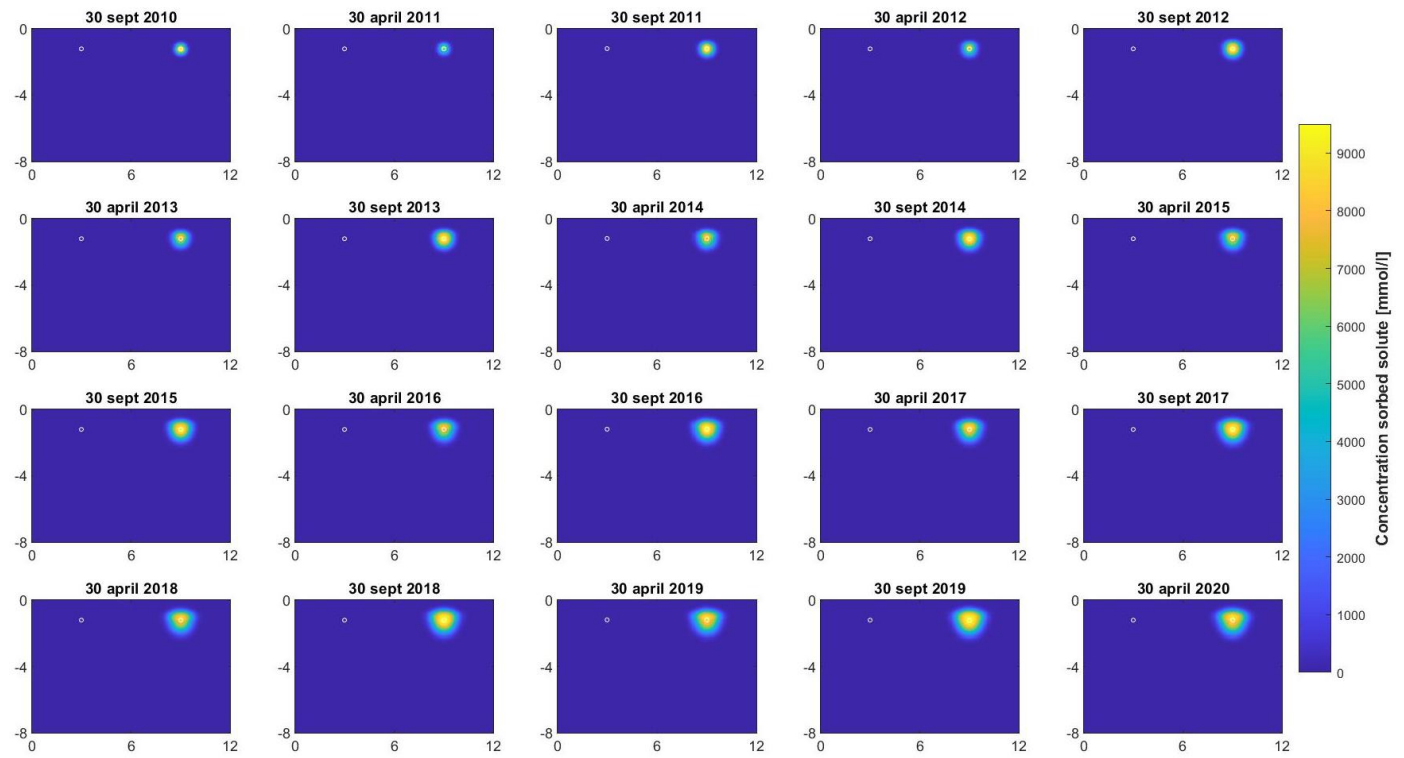


IV Aanvullende afbeeldingen simulaties van 10 jaar subirrigatie

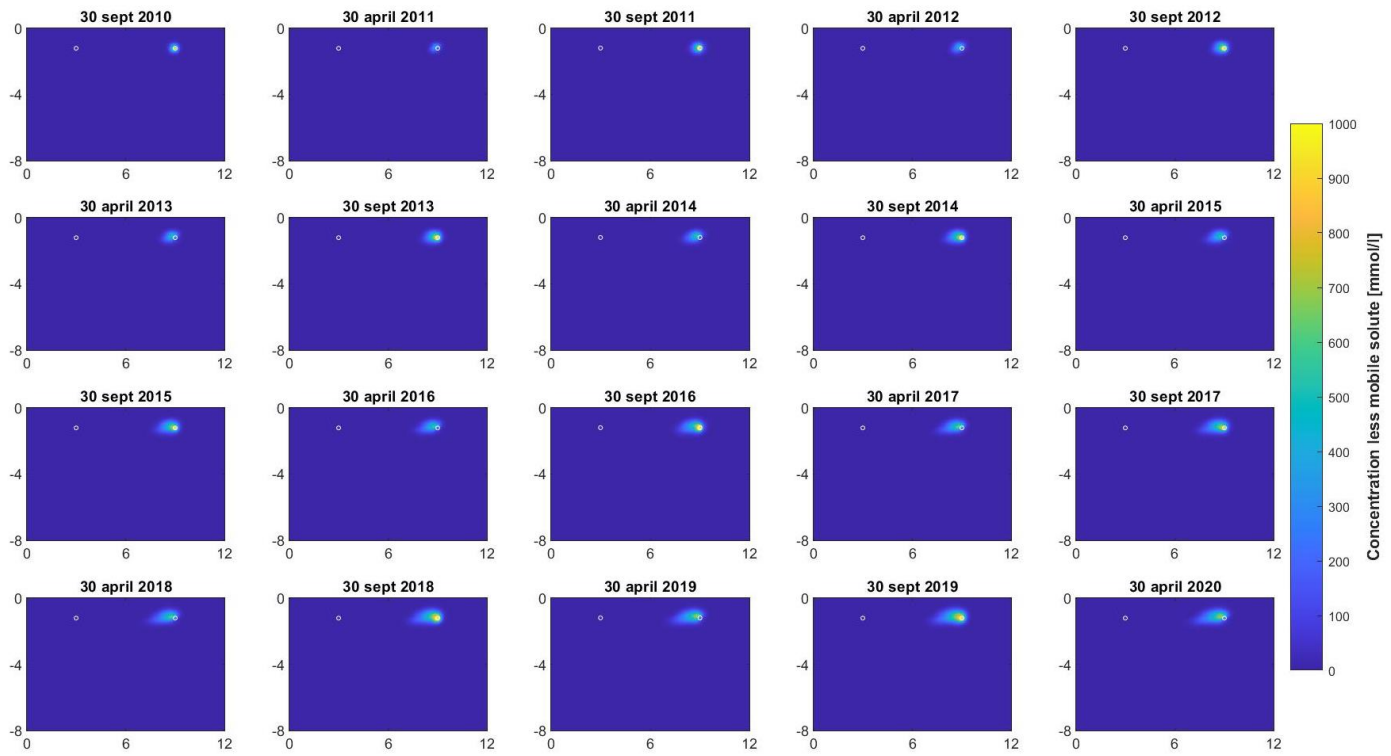
Verspreiding van de mobiele stof in de simulatie met 10 jaar subirrigatie, zonder laterale stroming



Verspreiding van de geadsorbeerde stof in de simulatie met 10 jaar subirrigatie, zonder laterale stroming



Verspreiding van de immobiele stof in de simulatie met 10 jaar subirrigatie, met laterale stroming van 1 cm/d



Verspreiding van de geadsorbeerde stof in de simulatie met 10 jaar subirrigatie, met laterale stroming van 1 cm/d

