



BTO 2016.050 | Juni 2016

BTO rapport

Hergebruik restwater voor
zoetwatervoorziening in
het landelijk gebied:
Monitoring sub-irrigatie
met RWZI-effluent
Haaksbergen



KnowH₂O

Advies, Innovatie en Verbinding in Water

KWR

Watercycle
Research
Institute

BTO

Herbruik restwater voor zoetwatervoorziening in het landelijk gebied: Monitoring sub-irrigatie met RWZI-effluent Haaksbergen

BTO 2016.050 | Juni 2016

Opdrachtnummer

401165; 400554/133

Projectmanager

dr. Klaasjan J. Raat, ir. Jan Willem Kooiman

Opdrachtgever

- Waterschap Vechtstromen
- Bedrijfstakonderzoek van de Nederlandse drinkwaterbedrijven (BTO) - Thematisch onderzoek - Duurzame bronnen en watersystemen
- Zoetwatervoorziening Oost-Nederland (ZON)
- Deltafonds

Kwaliteitsborger(s)

Prof.dr. Pieter J. Stuyfzand

Auteur(s)

dr.ir. Ruud P. Bartholomeus, dr.ir. Gé A.P.H. van den Eertwegh/KnowH₂O, dr.ir. D. Gijsbert Cirkel

Verzonden aan

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

Jaar van publicatie
2016

Meer informatie

dr.ir. Ruud P. Bartholomeus
T 030-6069530
E ruud.bartholomeus@kwrwater.nl

Keywords

circulaire economie, hergebruik, klimaatadaptatie, landbouw, rwzi-effluent, sub-irrigatie, zoetwatervoorziening

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

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

KWR

Watercycle
Research
Institute

BTO 2016.050 | Juni 2016 © KWR

Alle rechten voorbehouden.

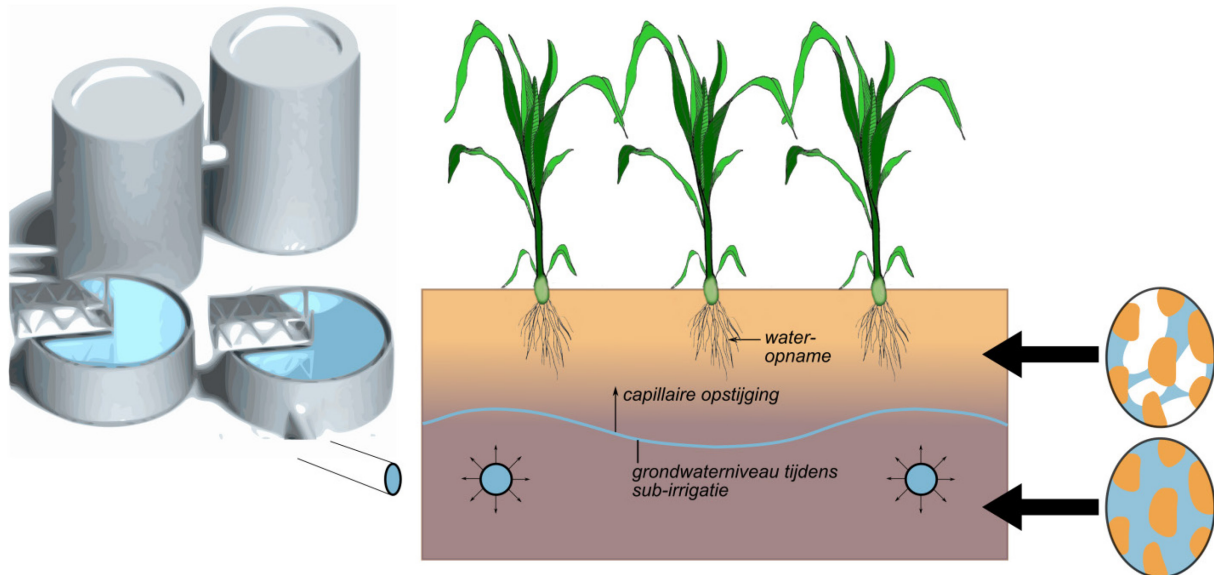
Niets uit deze uitgave mag worden veeelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

BTO Managementsamenvatting

Hergebruik restwater voor de zoetwatervoorziening in het landelijk gebied: sub-irrigatie met RWZI effluent te Haaksbergen

Auteur(s) dr.ir. Ruud Bartholomeus, dr.ir. Gé van den Eertwegh (KnowH₂O), dr.ir. Gijsbert Cirkel

Ondergrondse infiltratie door middel van sub-irrigatie biedt evidente kwantitatieve voordelen in het op peil houden of verhogen van de grondwaterstand en het bodemvochtgehalte. Dat blijkt uit een eerste jaar van monitoring in 2015 bij RWZI-Haaksbergen (Waterschap Vechtstromen), waar de effluentstroom in het Klimaat Adaptieve Drainagesysteem (KAD) in een aangrenzend akkerbouwperceel wordt gebracht. Het onderzoek toonde tevens aan dat gedurende het eerste groeiseizoen resten van geneesmiddelen niet significant tot de wortelzone van het gewas zijn doorgedrongen, maar wel tot het grondwater op 250 cm diepte. Verspreiding van geneesmiddelen naar het diepere grondwater is een belangrijk risico bij gebruik van effluent als aanvullende bron. Sub-irrigatie is een methode om watertekorten in de landbouw te verminderen door restwater voor droogtebestrijding te gebruiken, in plaats van af te voeren via het open water. Ondanks watertekorten in de landbouw lozen RWZI's en industrieën dagelijks gezuiverd afvalwater op het oppervlaktewater. Een groeiende disbalans in watervraag en -aanbod leidt tot toenemende droogteschade aan landbouwgewassen en meer druk op beschikbaar grondwater. Verhoging van de regionale zelfvoorziening in de zoetwatervraag door efficiënt gebruik van beschikbare waterbronnen is daarom van groot belang.



Sub-irrigatie met continue wateraanvoer maakt actieve regeling van grondwaterstand en het bodemvochtregime mogelijk

Belang: adaptieve maatregelen nodig om schaderisico's door droogte te beperken
Klimaatverandering leidt naar verwachting tot toenemende droogteschade aan landbouw en natuur en druk op waterbeschikbaarheid voor hoogwaardige toepassingen, zoals de productie

van drinkwater. Vanwege de afhankelijkheid van een goede watervoorziening lopen gewasopbrengsten 's zomers vaak bij gebrek aan bodemvocht terug. Voor de hogere zandgronden gaat het hierbij om een schadepost van €200 miljoen in een droog jaar. Met het steeds grilliger

worden van het klimaat zullen bij ongewijzigd waterbeheer de watertekorten verder toenemen. In dit project werken waterbeheerder en agrariërs samen aan adaptieve maatregelen voor betere watervoorziening in de landbouw door beschikbare waterbronnen efficiënt te benutten.

Aanpak: praktijkproef en monitoring van sub-irrigatie met RWZI-effluent in Haaksbergen

Bij RWZI-Haaksbergen (Waterschap Vechtstromen) is in 2012 in het kader van Landbouw op Peil de mogelijkheid gecreëerd om de effluentstroom in te brengen in het Klimaat Adaptieve Drainagesysteem (KAD) in een aangrenzend akkerbouwperceel. Via het KAD-systeem wordt het water ondergronds geïnfiltrerd d.m.v. sub-irrigatie, waardoor de grondwaterstand en het bodemvochtgehalte op peil blijven of worden verhoogd. Dankzij het KAD-systeem kan de agrariër zonder aanvullende beregening het vochtregime in zijn akker actief beheren voor optimale gewasproductie. In 2015 is een meetopstelling ingericht om de verspreiding van het sub-irrigatiewater in zowel horizontale als verticale richting te monitoren, inclusief de verspreiding van resten van geneesmiddelen.

Resultaten: effluent bereikt wortelzone en bevat nauwelijks geneesmiddelen

Sub-irrigatie met RWZI-effluent vond plaats op een maïspanceel in Haaksbergen. Van 3 juni tot 9 oktober 2015 werd gemiddeld ongeveer 220 m³/d effluent in het KAD-systeem ingelaten. Voor het proefperceel komt dat neer op ongeveer 4 mm/d. Ongeveer 3% van het totaal beschikbare effluent in deze periode is gebruikt voor sub-irrigatie. De verhoging van de grondwaterstand als gevolg van sub-irrigatie is dusdanig dat het droogtestress bij het gewas voorkomt. Tracering aan de hand van chloride-bromide ratio (Cl:Br) wees erop dat

gedurende het eerste jaar van kwaliteitsmonitoring het effluent zich tot minimaal 250 cm diepte verspreidt, en dat het de wortelzone bereikt. Resten van geneesmiddelen werden in de wortelzone nauwelijks teruggevonden. Uit verdere analyses blijkt een reëel risico te bestaan op verstopping van het systeem door vaste bestanddelen in het aangevoerde effluent en door de vorming van biofilm.

Implementatie: verantwoorde toepassing effluent biedt kans voor benutting andere restwaterstromen

Het inzetten van restwater voor droogtebestrijding is een technologische vorm van (klimaat)adaptatie om te anticiperen op toenemende watertekorten in de landbouw. Ondiepe sub-irrigatie van effluent via KAD is een nieuwe inpassing van water uit de waterketen in het watersysteem, waarbij het water ingebracht wordt daar waar en wanneer het nodig is. Het is evident dat de vochtvoorziening van het gewas door sub-irrigatie wordt verbeterd.

Behalve RWZI's zijn ook restwaterstromen van industrieën beschikbaar om in te zetten voor de regionale watervoorziening. Bij hergebruik van RWZI-effluent voor sub-irrigatie zullen de meeste vragen omtrent waterkwaliteit en gezondheid worden gesteld. Dit onderzoek geeft een eerste aanzet om verspreiding van geneesmiddelen richting grondwater en wortelzone te kwantificeren. Om risico's beter in te kunnen schatten is meerjarige monitoring, ook gericht op andere stoffen en het diepere grondwater, noodzakelijk.

Rapport

Dit onderzoek is beschreven in rapport *Hergebruik restwater voor zoetwatervoorziening in het landelijk gebied: Monitoring sub-irrigatie met RWZI-effluent Haaksbergen* (BTO-2016.050).

Inhoud

1	Inleiding	3
2	Methode	7
2.1	Algemeen	7
2.2	Klimaat Adaptieve Drainage systeem Haaksbergen	8
2.3	Meetopstelling	10
2.4	Monsternamen bodemwater en analyses chemische samenstelling	14
2.5	Indicatoren verstopping systeem	15
2.6	Modelsimulaties	16
3	Resultaten	21
3.1	Metingen waterkwantiteit	21
3.2	Metingen waterkwaliteit	24
3.3	Verstopping van het systeem	32
3.4	Modellering van water- en stoftransport in de bodem	33
4	Discussie en conclusie	39
5	Referenties	43

1 Inleiding

Klimaatverandering en beschikbaarheid zoetwater

Klimaatverandering leidt naar verwachting tot toenemende droogteschade aan landbouw en natuur, en druk op waterbeschikbaarheid voor hoogwaardige toepassingen, zoals de productie van drinkwater. Om deze risico's beheersbaar te maken, worden, onder meer binnen het Deltaprogramma Zoetwater, strategieën ontwikkeld om de zoetwatervoorziening op de lange termijn veilig te stellen. Eén van de pijlers van deze strategieën is het verhogen van de regionale zelfvoorziening in de zoetwatervraag, zodat de afhankelijkheid van oppervlaktewateraanvoer afneemt en beschikbare waterbronnen efficiënter worden benut.

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 tot nu toe beperkt, terwijl juist daar droogtegevoelige gebieden liggen, grondwater gewonnen wordt voor drinkwater en de watervraag hoog is.

Klimaatverandering en landbouw

Gewasopbrengsten in de landbouw zijn in belangrijke mate afhankelijk van de hoeveelheid vocht in de wortelzone. 's Zomers is er vaak een gebrek aan bodemvocht, waardoor er beregend moet worden om te voorkomen dat landbouwopbrengsten teruglopen. De jaarlijkse grondwateronttrekking voor beregning in Nederland wordt geschat op ca. 100 miljoen m³ in een gemiddeld tot ca. 200 miljoen m³ in een droog jaar. Beregning vindt doorgaans vooral plaats in droge perioden, waarbinnen de onttrekking voor beregning 2 tot 3 maal groter kan zijn dan alle overige Nederlandse onttrekkingen samen (Stuurman et al., 2008). Met een onvoldoende aan het toekomstige grilligere klimaat aangepast waterbeheer, zullen watertekorten in het groeiseizoen verder toenemen. Voor de hogere zandgronden gaat het om een schadepost voor de landbouw van €200 miljoen in een droog jaar (Ter Maat & Van der Vat, 2015) en de gemiddelde droogteschade voor de landbouw kan in 2050 ongeveer 2,5x groter worden dan nu (Zoetwatervoorziening Oost Nederland, 2012). Adaptieve maatregelen om schaderisico's door droogte én druk op andere functies als natuur en drinkwater te beperken zijn daarom nodig. Dit is ook opgenomen in het Deltaplan Zoetwater, waarin voor de Hoge Zandgronden wordt ingezet op het vasthouden en besparen van water, zoals bijvoorbeeld het hergebruik van restwater om de grondwateraanvulling op perceelniveau te vergroten.

Rioolwaterzuiveringsinstallaties (RWZI's) en industrieën lozen dagelijks, dus ook tijdens perioden met watertekort, gezuiverd afvalwater op het oppervlaktewater. Door dit water niet af te voeren via het open watersysteem, maar direct te benutten voor droogtebestrijding in de landbouw, kunnen watertekorten lokaal worden verminderd.

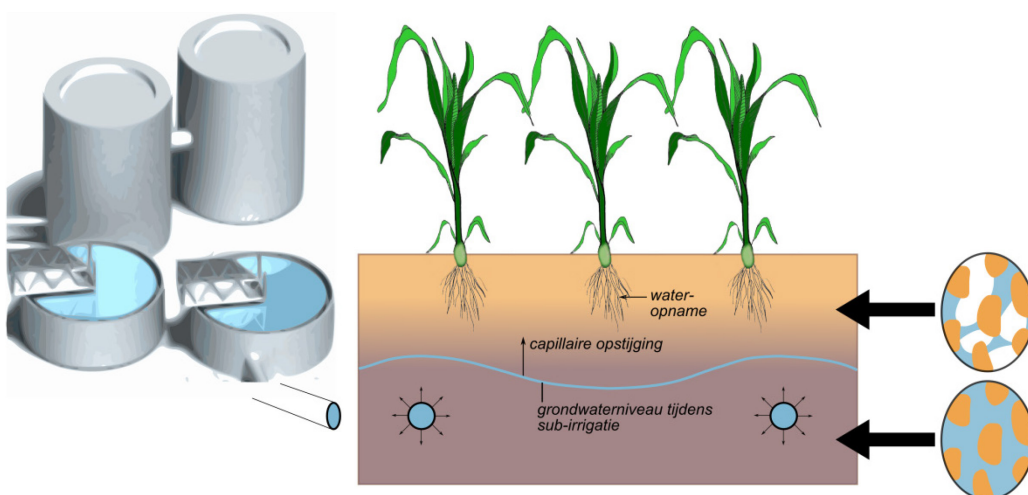
Hergebruik restwater Haaksbergen

In 2013 werd in het project 'Landbouw op Peil' door Waterschap Vechtstromen een proef met RWZI-effluent opgestart, waarbij een klein deel van de effluentstroom van de RWZI te Haaksbergen is aangesloten op het Klimaat Adaptieve Drainagesysteem (KAD) in een aangrenzend snijmaisperceel (Figuur 1.1). Via KAD kan het effluentwater ondergronds worden geïnfiltrerd: we noemen dit *sub-irrigatie* (Figuur 1.2). Zo kan de agrariër het vochtregime in zijn akker actief beheren en de plantgroei en -productie optimaliseren,

zonder aanvullend te hoeven beregenen. Deze praktijkproef past in een trend van de laatste jaren om effluentstromen uit industrieën en RWZI's beter te benutten en te hergebruiken als zoetwaterbron. In 2013 is kortstondig het KAD-systeem voor sub-irrigatie getest, waarbij vooral is gekeken naar effecten op de gewasopbrengst (Schaap et al., 2014).



Figuur 1.1: RWZI Haaksbergen met ten noordwesten het perceel met KAD-systeem waarop een deel (5 à 6% van de Droog-Weer-Afvoer DWA van de RWZI) van de effluentstroom is aangesloten.



Figuur 1.2: Sub-irrigatie met continue wateraanvoer via drains, waarmee de grondwaterstand en het bodemvochtregime actief en online geregeld kunnen worden.

Directe benutting van gezuiverd RWZI-effluent via een KAD-systeem heeft een aantal voordelen. De belangrijkste zijn (1) een betere controle over het bodemvocht-regime en daardoor betere groeicondities, (2) een verminderde beregeningsbehoefte (waterbesparing) en geen directe verdampingsverliezen, en (3) een mogelijk verminderde belasting van het oppervlaktewater met meststoffen en antropogene verontreinigen, met name restanten van geneesmiddelen en gewasbeschermingsmiddelen. Deze verminderde belasting kan direct zijn, doordat minder effluent geloosd wordt op het oppervlaktewater, en/of indirect doordat het effluent het oppervlaktewater pas bereikt na bodempassage. Tegenover deze voordelen staan ook risico's en vragen. Verontreiniging van het grondwater met diverse microverontreinigingen waaronder geneesmiddelen is een belangrijk potentieel risico. Een belangrijke vraag is of en hoe resten van o.a. geneesmiddelen en bacteriën/virussen zich verspreiden bij sub-irrigatie. Een andere vraag is hoe de verspreiding van microverontreinigingen bij sub-irrigatie zich verhoudt tot die bij de directe beregening met, in de zomermaanden voor een groot deel uit effluent bestaand, oppervlaktewater.

In 2015 is een eerste monitoring van de effecten van sub-irrigatie met RWZI-effluent uitgevoerd, gericht op inzicht verschaffen in een deel van genoemde kansen en risico's. Centraal doel voor onderliggende rapportage was de ruimtelijke verspreiding van het sub-irrigatiewater in zowel horizontale als verticale richting in beeld te brengen, inclusief verspreiding van (resten van) geneesmiddelen.

Dit rapport bevat:

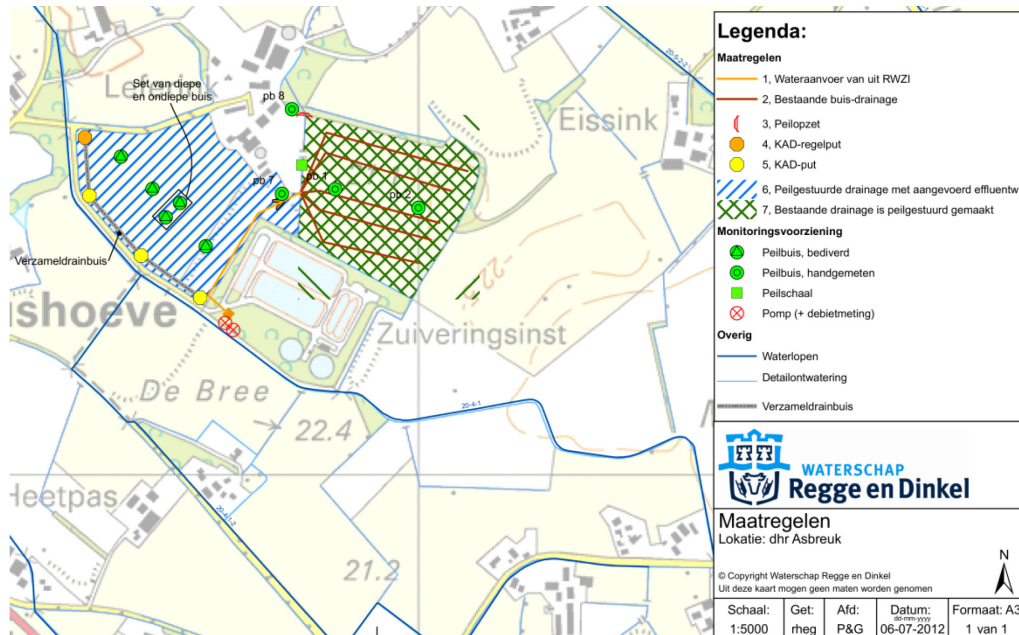
1. Beschrijving van het ingerichte monitoringsnetwerk om de effecten van sub-irrigatie van RWZI-effluent op de ruimtelijke verspreiding van het sub-irrigatiewater in zowel horizontale als verticale richting te kunnen kwantificeren in het KAD-perceel te Haaksbergen.
2. Overzicht van de grondwaterkwaliteit (geselecteerde tracers en resten van geneesmiddelen) van de referentiesituatie (d.w.z. situatie na periode zonder enige irrigatie) in het KAD-perceel te Haaksbergen.
3. Overzicht van de grondwaterkwaliteit (geselecteerde tracers en resten van geneesmiddelen) tijdens de periode van sub-irrigatie in het KAD-perceel te Haaksbergen.
4. Opzet en eerste resultaten simulatiemodellen voor de modellering van de verspreiding van RWZI-effluent in het KAD-perceel te Haaksbergen in 2015.

2 Methode

2.1 Algemeen

De sub-irrigatie proef met RWZI-effluent heeft plaatsgevonden op een drainage-proefperceel, direct naast de RWZI in Haaksbergen. Op dit perceel is in het kader van Landbouw op Peil in 2011 een Klimaat Adaptief Drainage (KAD) systeem geïnstalleerd (Figuur 2.1) dat erop gericht is om waterschappen en agrariërs te laten samenwerken om water vast te houden in de bodem (Van den Eertwegh et al., 2013). Vervolgens is binnen TKI-Watertechnologie gewerkt aan een online aansturing van het KAD-systeem. Doel hiervan was om door tijdig te anticiperen op het weer en de vochttoestand van de bodem een dynamisch beheer van het drainageniveau mogelijk te maken: water vasthouden wanneer mogelijk en water afvoeren indien nodig (Bartholomeus et al., 2015a; Bartholomeus et al., 2015b). Naast deze ontwikkelingen die bijdragen aan een meer adaptief waterbeheer, is in 2013 op dezelfde locatie een experiment gestart met sub-irrigatie van RWZI-effluent via het KAD-systeem. Op het perceel wordt al jaren mais verbouwd. Bovengrondse irrigatie heeft, in ieder geval de laatste jaren, niet plaatsgevonden.

In dit hoofdstuk geven we wat meer achtergrondinformatie over het KAD-systeem, de meetopstelling en de bemeaten parameters om de verspreiding van het sub-irrigatiewater in beeld te brengen en een eerste modelopzet om de meetresultaten in ruimte en tijd te kunnen extrapoleren.



Figuur 2.1: RWZI en KAD-systeem (blauw gearceerde perceel) te Haaksbergen, zoals ingericht eind 2011.
Bron: Waterschap Vechtstromen.

2.2 Klimaat Adaptieve Drainage systeem Haaksbergen

Klimaat Adaptieve Drainage (KAD) is een bijzondere vorm van regelbare drainage, die het mogelijk maakt om de drainagebasis via internet op afstand te besturen (Figuur 2.2). De technische kenmerken van KAD maken het mogelijk om continu en online de bodemvochtcondities in een landbouwperceel te beheren en tijdig te anticiperen op te droge of te natte groeiomstandigheden. KAD is in twee fasen ontwikkeld als innovatie in waterbeheer (SBIR-Klimaatadaptatie en Water). Allereerst is er een haalbaarheidsstudie uitgevoerd (Droogers et al., 2010). Daarna is KAD verder onderzocht en ontwikkeld (Van den Eertwegh et al., 2013).

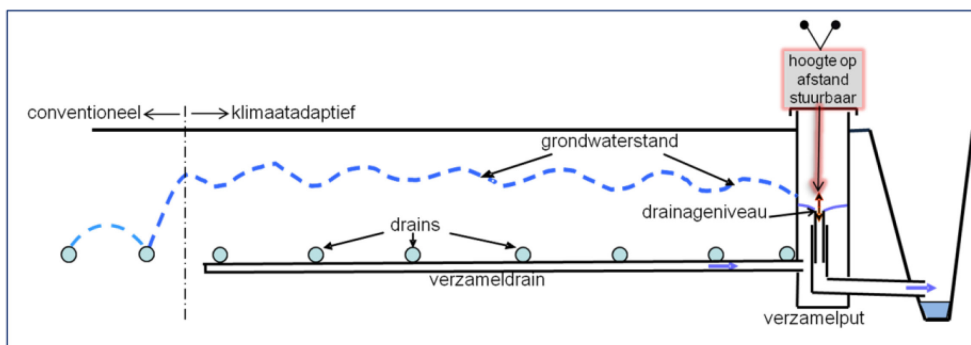
Reductie van piekafvoeren en een grotere mate van zelfvoorziening zijn de voornaamste doelen van KAD voor het waterbeheer. KAD is in 2010-2012 getest in het veld op drie locaties in Nederland. Op deze locaties is nauw samengewerkt met eindgebruikers van het systeem, te weten waterbeheerders en agrariërs. Het KAD-systeem is erop gericht water vast te kunnen houden in de bodem van landbouwpercelen. De bodem krijgt zo een actieve rol in het operationele waterbeheer.

Er zijn bij drie agrariërs binnen de waterschappen Brabantse Delta, Hunze en Aa's en Vechtstromen (Figuur 2.1, Figuur 2.3) prototypen van KAD aangelegd. Deze prototypen zijn in wezen één volledige unit van een geheel KAD systeem. Elk KAD-systeem bestaat uit een samengesteld regelbaar drainagesysteem, een op afstand online en traploos regelbare drainageput, en de volledige infrastructuur voor telemetrie en dataopslag. Daarnaast worden grondwaterstanden continu geregistreerd. Via telemetrie zijn alle data en alle handelingen steeds in te zien. De prototypen zijn uitgerust met een monitoringsysteem om in detail het functioneren van KAD te onderzoeken, maar ook om potentiële eindgebruikers inzicht te geven in de processen die aan KAD en de effecten van de toepassing ten grondslag liggen. Het resultaat van deze demonstratie-prototypen was in 2012:

- KAD werkt in de praktijk goed;
- enkele technische verbeteringen zijn doorgevoerd en het systeem is robuust;
- een extra "tussenschakel" is ontwikkeld, de zogenaamde vlotterput, waardoor KAD ook in licht glooiende gebieden kan worden toegepast; er wordt een peilverschil binnen het KAD-systeem van stroomopwaarts +0,3 m gemaakt per vlotterput; ook kunnen drainafvoeren worden gemeten binnen het systeem;
- deelnemende agrariërs zijn als potentiële eindgebruiker tevreden over het systeem.

Op het KAD-perceel in Haaksbergen hebben de polypropeen zuigdrains een buitendiameter van 6 cm en een binnendiameter van 5,5 cm. Ze zijn omhuld met een kunststof filter ($O_{90}=450 \mu\text{m}$). De geribbelde wand kent een afstand tussen twee ribben van 0,7 cm. Elke cirkelvormige rib heeft een drietal rechthoekige perforaties van 0,2 cm bij 0,5 cm, uniform verdeeld over de cirkelomtrek. De zuigdrains bevinden zich op een diepte van 1,2 m-m.v. en onderlinge afstand van 6 m. Ze liggen te Haaksbergen in een drietal 'waaiers' of segmenten, waarbij de buizen dus niet helemaal parallel lopen aan elkaar. De drie segmenten zijn het gestuurde deel met de KAD-put, het deel bovenstrooms van vlotterput 2 en het deel vanaf de vlotterput 1 richting de infiltratie-verdeelput in de zuidoosthoek, nabij de RWZI. Elke vlotterput creëert een hoogteverschil in drainageniveau van +0,3 m ten opzichte van het benedenstroomse segment.

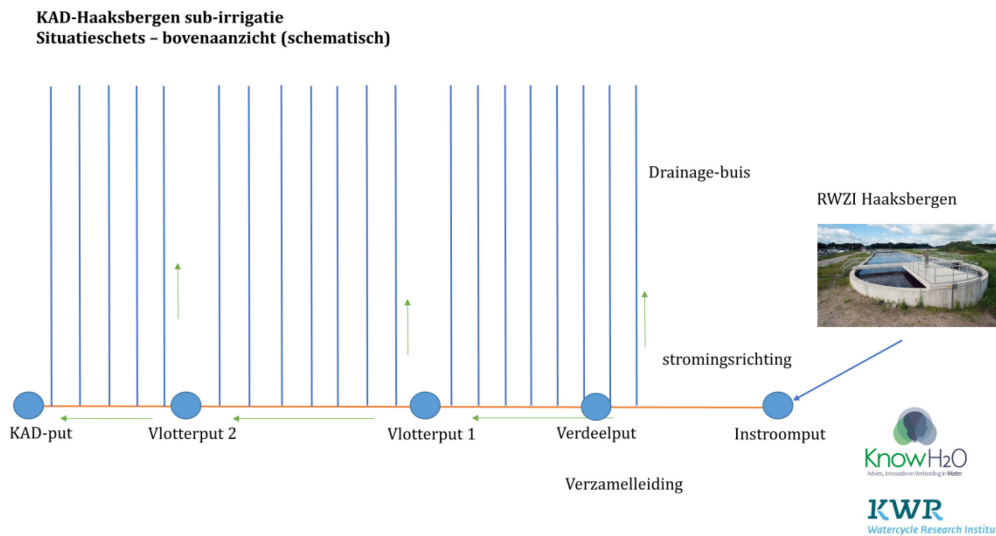
In 2013 heeft Waterschap Vechtstromen een eerste vingeroefening uitgevoerd naar benutting van gezuiverd RWZI-effluent voor droogtebestrijding in de landbouw. Nabij RWZI Haaksbergen is de effluentstroom aangesloten op het KAD-systeem in het aangrenzende akkerbouwperceel van 8 april tot en met 18 juni 2013 (Figuur 2.4). Via het KAD-systeem wordt water ondergronds in de bodem gebracht (sub-irrigatie). In 2015 heeft sub-irrigatie plaatsgevonden van 3 juni tot en met 9 oktober 2015.



Figuur 2.2: Klimaat Adaptieve Drainage (KAD) systeem: drains, verbonden met een gesloten verzameldrain, die uitmondt in een verzamelput met op afstand regelbaar gestuurd drainageniveau via telemetrie, en een afvoerleiding naar het oppervlaktewater.



Figuur 2.3: KAD-perceel in Haaksbergen (5,8 ha). Linksboven: opzet van het KAD en in 2011 geïnstalleerde monitoringssysteem; ligging peilbuizen in groen, verzamelput in oranje, vlotterputten in geel. Rechtsboven: foto van het snijmaïs-perceel in juni 2013. Linksonder: mechanische installatie voor controle drainagebasis die geïnstalleerd wordt in de verzamelput. Rechtsonder: op afstand bestuurbare controle-eenheid met daarachter de verzamelput.

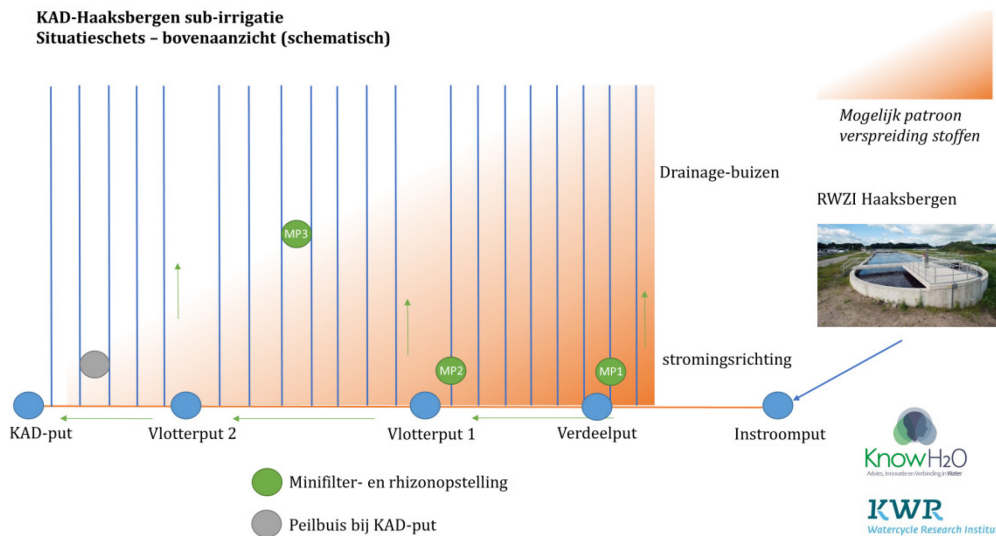


Figuur 2.4: Schematisch bovenaanzicht KAD-proefveld Haaksbergen en de aansluiting op de RWZI.

2.3 Meetopstelling

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 stoffen in het effluent, zoals resten van geneesmiddelen.

Monitoringspunten zijn ingericht op plekken waar we het meeste effect van sub-irrigatie op de kwaliteit van het bodemwater verwachten (Figuur 2.5, Figuur 2.6). Voor effecten op de samenstelling van het grondwater is dit op het hoger gelegen deel van het perceel, nabij de inlaat van het RWZI-effluent, omdat hier de wegzijgingsflux waarschijnlijk het grootst is (MP1). Invloed van effluent op de waterkwaliteit in de onverzadigde zone is waarschijnlijk het grootst in het lager gelegen deel van het perceel, nabij de eerste vlotterput (t.o.v. de inlaat) (MP2). Uitgangspunt is dus een ‘worst-case’ benadering: waar is de verspreiding van effluentwater het grootst? Een derde meetlocatie is ingericht bij de bestaande peilbuis midden in het perceel (MP3), om te onderzoeken of ook midden tussen de drains en op het midden van het perceel de waterkwaliteit wordt beïnvloed door sub-irrigatie met effluent.

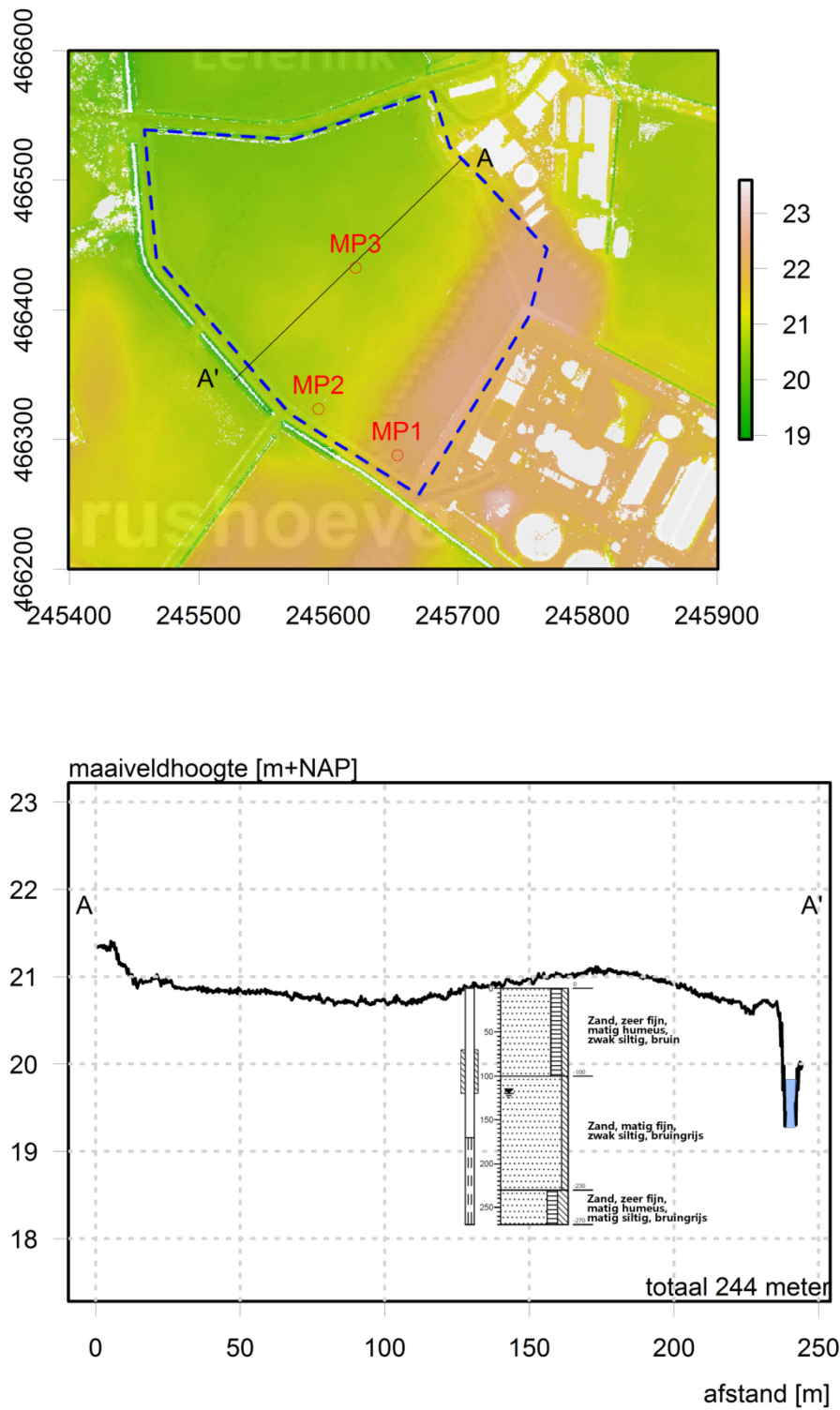


Figuur 2.5: Schematisch bovenaanzicht KAD-proefveld Haaksbergen met mogelijke verspreiding van stoffen die in RWZI-effluent aanwezig zijn over het gedraineerde perceel. MP1, MP2 en MP3 zijn de drie meetlocaties waar peilbuizen, minifilters en rhizon bodemvochtnemers zijn geplaatst.

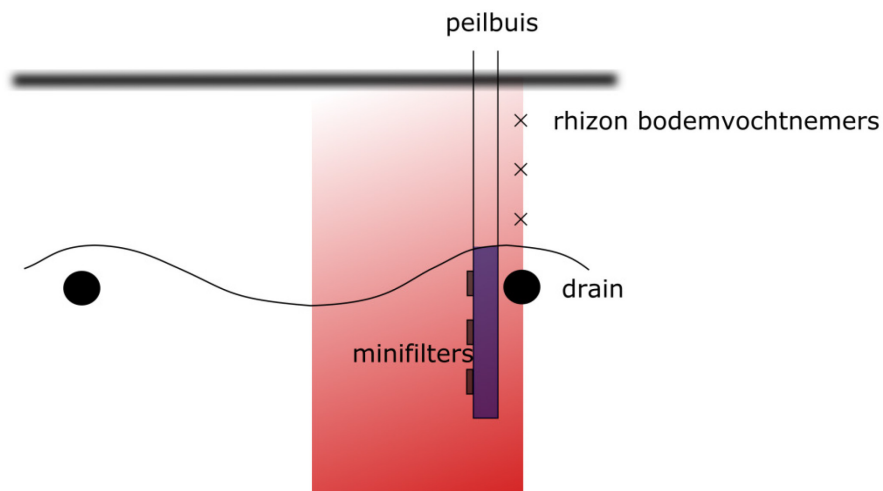
Voor de monitoring van de waterkwaliteit en de verspreiding van het RWZI-effluent is de bestaande meetopstelling dus uitgebreid met drie meetpunten (Figuur 2.6, Figuur 2.7, Figuur 2.8, Tabel 2.1):

1. MP1: nabij de inlaat van het RWZI-effluent, direct naast een drain
2. MP2: 'bovenstrooms' van de eerste vlotterput, direct naast een drain
3. MP3: in het midden van het perceel, midden tussen twee drains

Bij MP2 worden ook bodemvochtgehalten boven drainniveau gemeten (Figuur 2.9).



Figuur 2.6: Boven: Hoogtekaart (m+NAP) van het proefperceel te Haaksbergen (blauw omrand) en de directe omgeving. MP1, MP2 en MP3 zijn de drie meetlocaties waar peilbuizen, minifilters en rhizon bodemvochtnemers zijn geplaatst. Onder: transect A-A' met bodemprofiel bij MP3 (Van den Eertwegh et al., 2013).



Figuur 2.7: Schematisch overzicht van de meetopstelling en de mogelijke verspreiding van stoffen (in rood). Bij MP1, MP2 en MP3 zijn peilbuizen (filterlengte 100cm) geplaatst met daaraan bevestigd minifilters op drie dieptes voor de bemonstering van grondwater onder het freatisch grondwaterniveau. Boven drainniveau zijn op twee (MP1) of drie (MP2 en MP3) dieptes MacroRhizon bodemvochtnemers geplaatst voor de bemonstering van bodemvocht in de onverzadigde zone. Bij MP1 en MP2 bevindt de meetopstelling zich direct naast de drains; bij MP3 midden tussen de drains.



Figuur 2.8: Meetopstelling en bemonstering van bodemvocht met MacroRhizons (links) en grondwater met minifilters (rechts) ter plekke van MP3. Foto: Ruud Bartholomeus.



Figuur 2.9: Bodemvochtsensoren bij MP2 op vier meetdieptes.

Tabel 2.1: Metadata van de meetopstelling

	MP1	MP2	MP3
xyz	x 466287.867	x 466323.711	x 466430.465
	y 245653.292	y 245592.425	y 245619.537
	z 22,176 m+NAP	z 20,995 m+NAP	z 20,816 m+NAP
diepte drain	55 cm-mv	100 cm-mv	120 cm-mv (aanname)
diepte minifilters	25, 80 en 130 cm-drain	25, 80 en 130 cm-drain	25, 80 en 130 cm-drain
diepte MacroRhizons	20 en 40 cm-mv	20, 60 en 100 cm-mv	20, 60 en 100 cm-mv
diepte leemlaag	435 cm-mv	295 cm-mv	295 cm-mv

2.4 Monsternamen bodemwater en analyses chemische samenstelling

Op de meetlocaties zijn op 8 april 2015, voorafgaand aan het groeiseizoen, monsters genomen voor het in beeld brengen van de referentiesituatie van de grondwatersamenstelling. Vervolgens zijn monsters genomen gedurende sub-irrigatie (8 juli en 10 september 2015) en nadat sub-irrigatie is gestopt (13 en 29 oktober 2015). Oogst van de snijmaïs vond plaats op 24 en 25 oktober 2015.

Laboratoriumanalyses van de waterkwaliteit richtten zich op tracers voor detectie van het infiltratiewater en zijn hieronder besproken.

2.4.1 Chloride en bromide

In rioolwater is een significante bijdrage van steenzout (ingrediënt van keukenzout en strooizout bijvoorbeeld) aan de zoutvracht te verwachten. Bij vorming van steenzout (haliet-kristallen) door het indampen van zeewater wordt verhoudingsgewijs meer chloride in de kristalstructuur ingebouwd dan bromide. De bijdrage van opgelost steenzout aan rioolwater zal hierdoor resulteren in een duidelijk verhoogde chlorideconcentratie en een ten opzichte van chloride verhoudingsgewijs lage bromideconcentratie. Het effluent is aldus qua chloride en bromide afwijkend ten opzichte van de natuurlijke achtergrond en neerslagwater. Zowel de chlorideconcentratie als de ratio tussen chloride en bromide kan hierdoor worden gebruikt als tracer voor de verspreiding van rioolwater tijdens sub-irrigatie in het proefperceel. Chloride- en bromideconcentraties zijn bepaald door het Vitens laboratorium.

2.4.2 pH en EGV

Gedurende de periode met sub-irrigatie zijn van de grondwatermonsters ook de pH, het EGV en de temperatuur bepaald, omdat dit kwaliteitsindicatoren zijn die eenvoudig in het veld te meten zijn. Ze geven een eerste indicatie van de herkomst van het water tijdens de veldwerkzaamheden, en dan met name het EGV en de temperatuur. De pH zal onderhevig zijn aan eventuele chemische reacties en geeft hierdoor een minder eenvoudig interpreteerbaar signaal.

2.4.3 Restanten van geneesmiddelen

De verwijdering van (restanten van) geneesmiddelen in RWZI's kan sterk verschillen per geneesmiddel. De emissie van geneesmiddelen naar het oppervlaktewater is daarom onder meer voor waterschappen een belangrijk aandachtspunt (Oosterhuis et al., 2011). Voor de drinkwaterwinning op de hoge zandgronden is verontreiniging van het onttrokken grondwater met geneesmiddelen van groot belang (Van der Aa et al., 2008). Daarnaast is het doordringen van resten geneesmiddelen in de wortelzone van het gewas ongewenst. Concentraties van 61 geneesmiddelen en metabolieten zijn bepaald voor 31 watermonsters, door het Laboratorium voor Materialenonderzoek en Chemische analyse (LMC) van KWR.

2.5 Indicatoren verstopping systeem

Sub-irrigatie met RWZI-effluent kan tot verstopping van het KAD-systeem leiden, ten gevolge van verstopping door vaste bestanddelen, of door groei van de in het water voorkomende micro-organismen. Om de potentie voor verstopping te bepalen is een tweetal analyses uitgevoerd:

- MFI-meting: de MembraanFilterIndex is een maat voor de verstoppende eigenschappen van het water. $MFI < 3 \text{ s/L}^2$ wordt beschouwd als 'goed infiltratiewater' (Van Beek et al., 1998), met dus beperkte kans op verstopping door vaste bestanddelen.
- BPP-test (BiomassaProductiePotentie): Door het maximale Adenosinetrifosfaat(ATP)-gehalte te bepalen dat wordt bereikt door de groei van de in het water van nature voorkomende micro-organismen, wordt een indruk gekregen over de "nagroeipotentie" van dat (drink)water (Van der Kooij & Veenendaal, 2014). Uit Van der Kooij & Veenendaal (2014): "In de BPP-test wordt een watermonster zonder pasteurisatie gedurende 14 dagen in AOC-vrije kolven geïncubeerd bij 25°C, nadat een rivierwaterent en een oplossing van fosfaat en nitraat zijn toegevoegd. Tijdens deze 14 dagen wordt de concentratie actieve biomassa gevolgd door op gezette tijden de ATP-concentratie te meten." Kenmerkende parameters voor de groei zijn BP7 en BPC14. BP7 is het maximum ATP-gehalte dat binnen 7 dagen wordt waargenomen als gevolg van groei. BPC14 is de cumulatieve hoeveelheid actieve biomassa in een incubatieperiode van 14 dagen.

2.6 Modelsimulaties

De verwachting is dat water en stoffen die via de drainbuizen het perceel binnenstromen zich vanaf de drain verticaal en lateraal zullen verspreiden. In welke mate dit gebeurt, is zonder metingen en modelberekeningen lastig te voorspellen en slechts kwalitatief te beoordelen (Figuur 2.5). Het is a priori niet zeker in welke mate water en stoffen zich verspreiden in het 2D-vlak en natuurlijke 3D-bodem-water-lichaam, terwijl het water na het verlaten van de gekoppelde drainbuizen infiltreert in de bodem. In de 2D-transect kan de situatie eruit zien conform Figuur 2.7, waarbij stoffen zich vanuit de drainbuis lateraal en verticaal verspreiden in de bodem.

Om de verspreiding van stoffen in het bodem-water-systeem tijdens en na sub-irrigatie te simuleren, hebben we de 1D-berekeningen opgezet met SWAP (1D Z-richting) (Kroes et al., 2009) en de 2D-berekeningen met Hydrus (2D XZ-richting, versie 2.04; Šejna et al. (2011)). SWAP geeft de verspreiding van water en stoffen in een verticale bodemkolom midden tussen de drains. Hydrus beschrijft het verdampingsproces in minder detail dan SWAP, maar maakt het wel mogelijk de verspreiding van water en stoffen in een 2D-transect tussen drains te simuleren.

2.6.1 Berekeningen met SWAP voor proefveld Haaksbergen

SWAP is een model waarmee transport van water en opgeloste stoffen in verzadigde en onverzadigde bodems gesimuleerd kan worden. SWAP rekent één-dimensionaal, waarbij laterale stroming naar open water of drainagebuizen via drainagefuncties is verdisconteerd. Conceptueel gaat SWAP ervan uit dat de gesimuleerde 1D-bodemkolom zich midden op een perceel bevindt, midden tussen twee drains, waar de opbolling van de grondwaterstand maximaal is. Voordeel van SWAP is de zeer geringe rekentijd, waardoor snel grote aantallen varianten doorgerekend kunnen worden. Het model is hiermee bijvoorbeeld geschikt voor het online aansturen van het KAD-systeem met sub-irrigatie. In deze paragraaf wordt beknopt ingegaan op de modelstructuur en resultaten van eerste modelsimulaties.

We gebruiken SWAP simulaties om de gemeten grondwaterstand, bodemvochtgehalten en stofconcentraties in het midden van het perceel midden tussen twee drains te simuleren. De bodemkolom in het model heeft een diepte van ruim 5 m en bestaat uit zes lagen, met bodemfysische eigenschappen zoals opgenomen in Tabel 2.2. De zuigdrains bevinden zich op een diepte van 1,2 m-mv en op een onderlinge afstand van 6 m.

Het via sub-irrigatie instromende RWZI-effluent wordt in het model gevolgd door er een concentratie van 1 g/l aan toe te kennen. Er wordt uitgegaan van conservatief gedrag van de toegediende stof, er treedt dus geen adsorptie of afbraak op. Wel wordt rekening gehouden met dispersie. Door kleinschalige heterogeniteit van de bodem zal de 'pluim' van RWZI-effluent-water na sub-irrigatie zich lokaal sneller of juist langzamer verplaatsen. Hierdoor zal het concentratiefront afvlakken. In transportmodellen wordt dit verschijnsel meegenomen door de introductie van een dispersieterm in de transportvergelijking. Voor de schaal van ons probleem is een dispersiviteit tussen 1 en 10 cm een redelijke schatting. Voor dit onderzoek is gerekend met een (longitudinale) dispersiviteit van 5 cm.

Water kan het model lateraal in- of uitstromen naar de drainage en naar de beek. Van onder kan water in- of uitstromen via kwel of wegzijging. Aan de bovenzijde van de bodemkolom kan water het model binnenkomen via neerslag minus interceptie en de bodem weer verlaten via transpiratie, evaporatie en surface runoff (oppervlakte-afvoer). Laterale in- en uitstroom wordt gereguleerd met een dynamisch peil in het KAD-systeem. Het referentieniveau in het KAD-systeem van belang voor het midden van het perceel, is het regelbare drainagepeil in vlotterput 2, dat 0,3 m hoger is dan het drainagepeil in de KAD-put. De drainage- en

infiltratieweerstanden zijn zo gekozen, dat het SWAP-model de gemeten grondwaterstand bij MP3 en infiltratieflux à 4 mm/dag benadert. Daarnaast zal het water weerstand ondervinden tijdens doorstroming van de drainbuis en omhulling, hiervoor is een waarde van 0,8 dag aangehouden. De onderrandvoorwaarde van het model wordt gereguleerd door een gegeven stijghoogte en een weerstand. De weerstand bedraagt 100 dagen. Voor de stijghoogte is een waarde van 1,0 m-mv gekozen, met een amplitude van 0,5 m. Het verschil tussen de opgelegde stijghoogte aan de onderrand en de stijghoogte die het model uitrekent bepaalt of er via de onderrand water wegstroomt uit het model of juist toestroomt, en de mate waarin dit optreedt. Opgemerkt moet worden dat alle weerstanden geschat zijn. Er is in deze fase nog onvoldoende bekend over de waterfluxen naar de beek en het diepe watervoerende pakket (regionaal grondwatersysteem). De aanwezigheid van een beekleemlaag op ongeveer 3 m-mv (Tabel 2.2, bodemlaag no. 5) kan echter betekenen dat dieper water veelal via de beek het perceel verlaat.

SWAP berekent de potentiële verdamping uit de referentieverdamping volgens Makkink (1957), die door het KNMI wordt gepubliceerd. Met behulp van een standaard gewasmodel voor maïs wordt de potentiële verdamping vervolgens verdeeld over bodemverdamping en transpiratie, en wordt de werkelijke verdamping berekend. De snijmaïs wordt in de praktijk gezaaid in de loop van april en geoogst in de loop van oktober. In het model is de opkomst van het gewas op 1 mei en wordt het geoogst op 25 oktober 2015. In deze periode vinden transpiratie en evaporatie plaats, daarbuiten alleen evaporatie. Surface runoff treedt op als de infiltratiecapaciteit van de bodem wordt overschreden of als de grondwaterspiegel aan maaiveld komt. Zo ontstaat een waterplas op het maaiveld, waarbij het water kan gaan afstromen richting een greppel, sloot of beek. In het model is uitgegaan van een zogenaamde 'ponding layer' van 0,2 cm. Dit is de drempelwaarde van de dikte van een waterplas op het maaiveld waarboven oppervlakte afstroming plaatsvindt.

Met SWAP is het mogelijk om zowel verzadigde als onverzadigde stroming één-dimensionaal te berekenen door het numeriek oplossen van de Richards' vergelijking. In de onverzadigde zone is het vochtgehalte θ en de doorlatendheid K afhankelijk van de drukhoogte (resp. $\alpha(h)$ en $K(h)$). Het gaat hierbij om niet-lineaire relaties. Voor het beschrijven van deze relaties wordt in SWAP gebruik gemaakt van het Mualem-Van Genuchten model (Mualem, 1976; Van Genuchten, 1980). In Tabel 2.2 is per bodemlaag de gebruikte parametrisatie van het Mualem-Van Genuchten model opgenomen.

Tabel 2.2: Bodemfysische parameters per modellaag

Bodemlaag	Omschrijving	θ_{res}	θ_{sat}	a	n	K_0	l	K_{sat}
1 (0-20cm-mv)	leemarm fijn zand	0.02	0.43	0.0234	1.801	23.41	0.000	44.44
2 (20-40cm-mv)	zwak lemig fijn zand	0.02	0.42	0.0276	1.491	12.52	0.0276	33.13
3 (40-60cm-mv)	leemarm fijn zand	0.01	0.36	0.0224	2.286	15.22	0.0	66.53
4 (60-300cm-mv)	zwak lemig fijn zand	0.02	0.38	0.0213	1.951	12.68	0.168	28.12
5 (300-350cm-mv)	beekleem	0.01	0.38	0.003	1.728	0.260	-0.292	0.40
6 (>350cm-mv)	zwak lemig fijn zand	0.02	0.38	0.0213	1.951	12.68	0.168	28.12

Waarin:

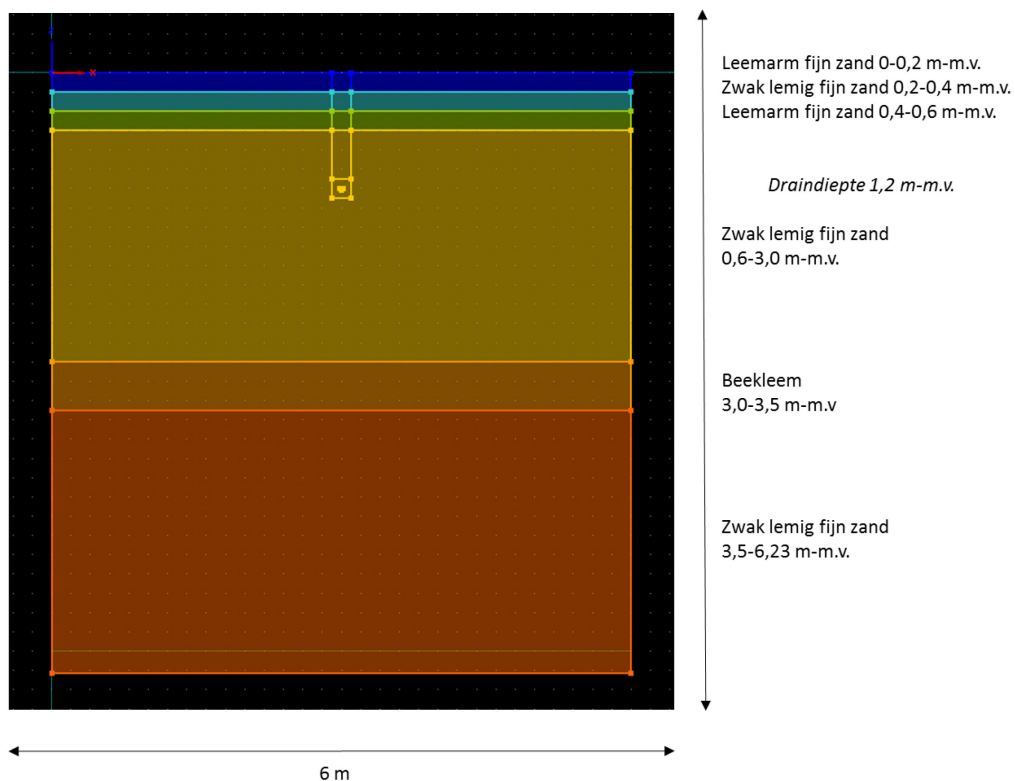
- K_{sat} = Verzadigde doorlatendheid van de bodem (inclusief macroporiën) (cm/d)
- K_0 = Gefitte verzadigde doorlatendheid (exclusief macroporiën) (cm/d)
- θ_{sat} = Verzadigd vochtgehalte (-), ook wel porositeit
- θ_{res} = Residueel vochtgehalte (-)
- α = Vormparameter Van Genuchten (1980) model voor de retentiecurve ($\alpha > 0$) (cm⁻¹)
- n = Vormparameter Van Genuchten (1980) model voor de retentiecurve (maat voor de poriegrootte verdeling) ($n > 1$) (-)
- l = Empirische parameter voor het Mualem (1976) doorlatendheidsmodel voor onverzadigde stroming (-)

2.6.2 Berekningen met Hydrus voor proefveld Haaksbergen

Met Hydrus_2D software kan dynamisch water- en stoftransport berekend worden in de variabele onverzadigde/verzadigde zone van de bodem in een XZ-transect.

Het geteelde gewas is snijmaïs. De bewortelingsdiepte is tot 0,5 m-m.v. met een maximale dichtheid op 0,1 m-m.v. De zogenaamde wortel-verdelingsparameter p_z is gelijk aan 1,0. De Feddes-functie bepaalt hoe het gewas reageert op zuurstof- en/of vochtstress. We passen daar bovenop geen stress toe naar aanleiding van bepaalde stofconcentraties in de wortelzone. Het gewas in het model neemt niet actief stoffen op die zich in de wortelzone bevinden. Deze blijven dus achter in de wortelzone in het bodemvocht.

Als modelschematisatie is ervoor gekozen één profiel i.c. 2D-transect te maken, dat typisch is voor het KAD-proefveld als geheel (Figuur 2.10).



Figuur 2.10: Schematisatie bodemprofiel en drainage KAD-proefveld Haaksbergen, in 2D-transect. Drainafstand is gekozen als breedtemaat. Draindiepte is 1,2 m-m.v. Drainsleuf is apart geschematiseerd, momenteel met identieke bodemparameters zoals de betreffende bodemlaag.

De drainagebuis in het veld heeft in werkelijkheid een buitendiameter \varnothing van 6 cm (straal $r=3$ cm) en is omhuld met een doorlatende kunststof omwikkeling. Vanwege de perforaties in de buis, die een bepaalde horizontale en verticale afstand tot elkaar hebben, is deze omvang voor 1:1 modeltoepassingen in 2D (XZ-vlak) te groot. Er zou bij gebruikmaking van de werkelijke straal teveel water draineren, dan wel via sub-irrigatie in de bodem infiltreren. Daartoe moet aldus een reductie toegepast worden op de werkelijke straal tot een zogenaamde 'effective drain radius' r_e (o.a. Skaggs & Tang (1979)). We hebben ervoor gekozen op basis van berekeningen eerder in 2015 een model door te rekenen met $r_e = 2$ cm.

De bodemopbouw is horizontaal gelaagd vanwege de ontstaansgeschiedenis. De bodemfysische parameters in Tabel 2 zijn geldig voor de verticale stromingsrichting (in Z-richting). Met name de verzadigde doorlatendheid K_s is belangrijk voor de snelheid waarmee water en stoffen zich door de bodem kunnen verplaatsen. Er is een kans dat de horizontale doorlatendheid $K_{s,x}$ groter is dan de verticale $K_{s,z}$, omdat de bodemlagen in laagjes zijn afgezet en opgebouwd. Dit verschijnsel noemen we anisotropie. Om in dit stadium van het project de verspreiding van water en stoffen 2D te modelleren, hebben we qua bodemfysica voor een deel van de bodem een anisotropiefactor van 2,0 toegepast, waarbij we gerekend hebben met de variabele K_0 uit Tabel 2, om de doorlatendheid niet te extreem te maken zonder macroporiën. Voor de bouwvoor (0-40 cm-m.v.) en de drainsleuf nemen we aan dat de bodem gemengd is door teelthandelingen en de installatie van de drainbuizen. Voor deze bodemdelen is de anisotropiefactor 1,0. Voor de overige delen van de bodem is een anisotropiefactor van 2,0 genomen, i.c. $K_{s,z} = K_0$ en $K_{s,x} = 2 \cdot K_{s,z}$. Hierdoor kan de horizontale verspreiding van water en stoffen sneller verlopen dan de verticale.

Met betrekking tot het stoftransport houden we in deze versie geen rekening met reacties die het stoftransport in de bodem beïnvloeden. We rekenen dus met conservatieve stoffen, die zich als tracer gedragen. Om onderscheid te maken tussen de herkomst van stoffen rekenen we met verschillende concentraties ($\neq 0$) via de bovenrand ($c=0,001$ mmol/L), de sub-irrigatie ($c=10$ mmol/L), en eventueel de onderrand ($c=0,001$ mmol/L). Omdat we in het 2D-vlak (XZ) rekenen heeft de dispersiviteit een longitudinale (met stroomrichting mee) en een transversale component (dwars op stroomrichting). De gebruikte parameterwaarden zijn $\alpha_L = 5$ cm en $\alpha_T = 1$ cm.

Het water kan het geschematiseerde profiel in en uit via de bovenrand i.c. het maaiveld, de drainbuis en de onderrand. Via de bovenrand infiltreert neerslag (P) in het bodemprofiel. Water kan via verdamping vanuit de bodem (evaporatie, E_s) en via de gewaswortels (transpiratie, E_t) het profiel verlaten. Interceptie (E) wordt door Hydrus niet berekend. De bovenrand kent aldus een atmosferische randvoorwaarde, waarbij we als invoer $E_{s,p}$ (potentiële evaporatie) en $E_{t,p}$ (potentiële transpiratie) nemen die gelijk zijn aan die van de SWAP-berekeningen.

Water kan via de drainagebuis het profiel verlaten (Q_{drain}) als de drukhoogte (h) in/om de drainbuis in de bodem groter is dan de atmosferische (tegen-) drukhoogte ($h=0$). Water zal via de drainbuis infiltreren in de bodem tijdens sub-irrigatie als de drukhoogte in het KAD-systeem groter is dan de drukhoogte in/om de drainbuis. In Hydrus passen we voor de drainbuis een variabele drukhoogte-randvoorwaarde in de tijd toe, die sub-irrigatie mogelijk maakt. We passen sub-irrigatie toe in de periode 3 juni tot en met 9 oktober 2015, conform de periode van sub-irrigatie in de veldproef. De genoemde drukhoogte kunnen we omrekenen naar een stijghoogte, als we aan een verticale positie refereren.

De onderrand kent als randvoorwaarde een variabele drukhoogte (h) ten opzichte van de diepte van de onderrand. Hieruit berekent Hydrus zelf een waterflux over de onderrand,

gegeven de drukhoogte-verschillen in de verticaal in het bodemprofiel. De drukhoogte kon niet afgeleid worden uit metingen in nabijgelegen diepe peilbuizen, omdat deze in de directe omgeving niet aanwezig zijn. We hebben aangenomen dat het verloop van de drukhoogte een sinusoïde verloop vertoont over het jaar, met als gemiddelde 5 m, en amplitude van 0,5 m. De maximale waarde wordt bereikt op 15 februari van het jaar, de minimale 6 maanden later op 15 augustus.

De zijranden zijn dicht, omdat verondersteld wordt dat water in het geschematiseerde profiel niet via een buur-drainbuis afgevoerd wordt. De verticale waterscheiding van het vanggebied van de drainagebuizen ligt in onze aanname midden tussen twee drains.

Qua stoftransport zien de randvoorwaarden er als volgt uit:

- Zijranden: geen flux - dicht (ook hydrologisch);
- Bovenrand: flux-randvoorwaarde met neerslagflux en stofconcentratie in neerslag van 0,001 [mmol/L];
- Drainagebuis, drainage: flux-randvoorwaarde met drainageflux (UIT) en berekende stofconcentratie in drainagewater [mmol/L];
- Drainagebuis, sub-irrigatie: flux-randvoorwaarde met berekende sub-irrigatie-flux (IN) en stofconcentratie van 10 [mmol/L];
- Onderrand: flux-randvoorwaarde met berekende flux over onderrand en berekende stofconcentratie in uittredend water [mmol/L].

De initiële condities voor water en stoffen in het model zijn als volgt:

- Water: equilibrium qua drukhoogte h met $h=5$ m boven onderrand model, i.c. grondwaterstand staat net onder de drainagebuis op 1,23 m-m.v. Hydrostatisch evenwicht in bodemprofiel.
- Stoffen, gehele bodemprofiel: $c=0,001$ [mmol/L].

Als variabele drukhoogte voor de drainagebuis nemen we de atmosferische drukhoogte ($h=0$ m) voor perioden zonder sub-irrigatie, zodat drainage kan optreden. We nemen de waterstand in vlotterput 2, die 0.3 m hoger is dan de gemeten waterstand in de KAD-put, als maat voor de drukhoogte tijdens sub-irrigatie. In Hydrus zal altijd drainage optreden als de drukhoogte in/om de drainbuis in de bodem groter is dan de drukhoogte, die opgegeven is als randvoorwaarde.

3 Resultaten

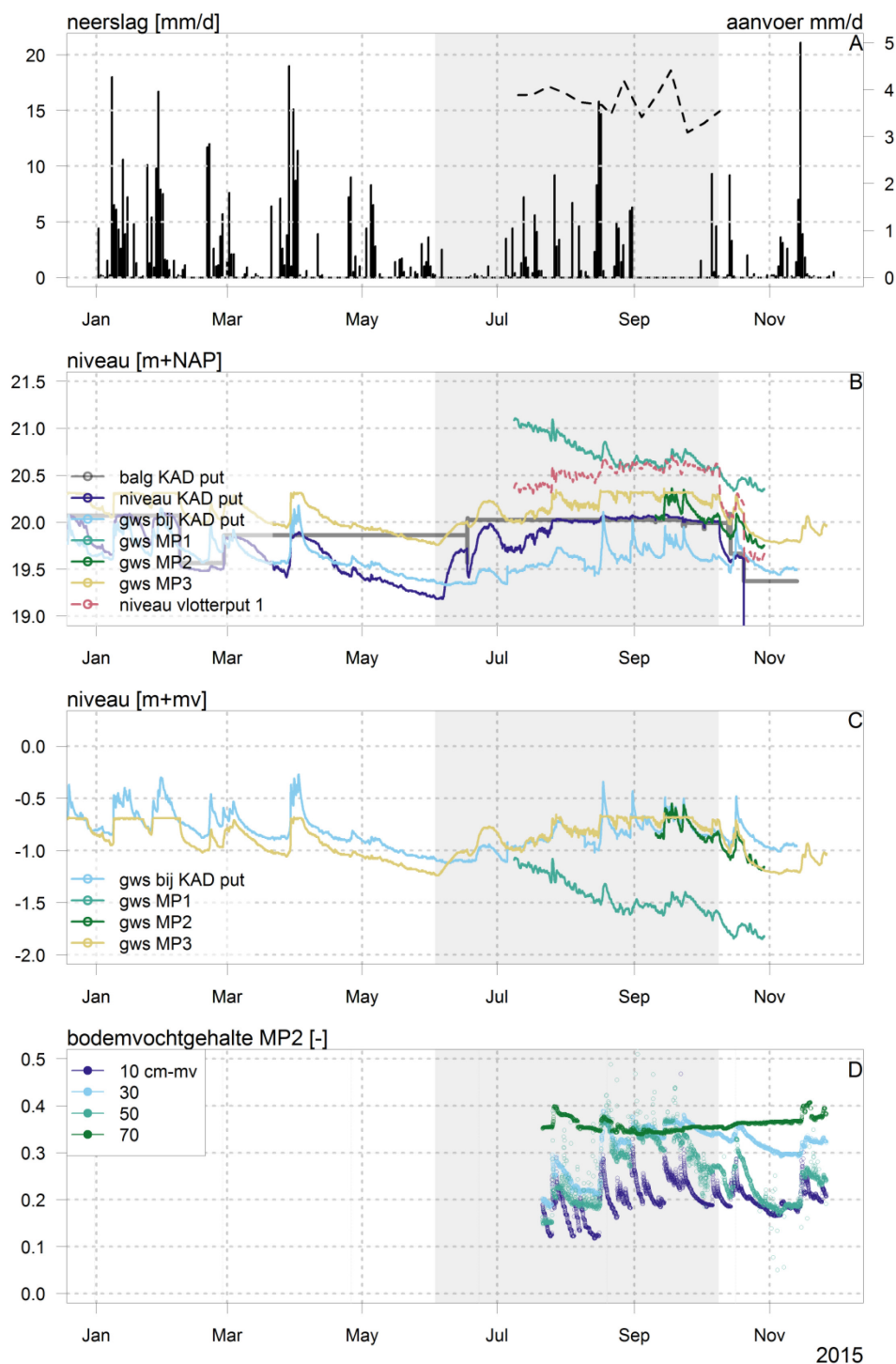
3.1 Metingen waterkwantiteit

Figuur 3.1 geeft gemeten neerslag, aangevoerde hoeveelheid effluent afgeleid uit debietmetingen, waterstanden en bodemvochtgehalte bij MP2. In de periode voorafgaande aan sub-irrigatie daalt de waterstand in de KAD-put en de grondwaterstand in het perceel (Figuur 3.1B). Na de start van de sub-irrigatie stijgt de waterstand in de KAD-put en ook in MP3 in het midden van het perceel. De metingen in de vlotterput en in MP1 en MP2 starten later. Wat opvalt is dat de grondwaterstand bij MP3 in het midden van het perceel direct na het starten van sub-irrigatie stijgt. Met uitzondering van MP1 stijgt de grondwaterstand in het perceel vervolgens geleidelijk en volgt daarbij de geleidelijke stijging van het referentieniveau in de KAD-put. Bij MP2 en MP3 ligt de grondwaterstand tussen 0,5 en 1,0 m-m.v.; bij MP1 is de grondwaterstand dieper dan 1,0 m-m.v. (Figuur 3.1C).

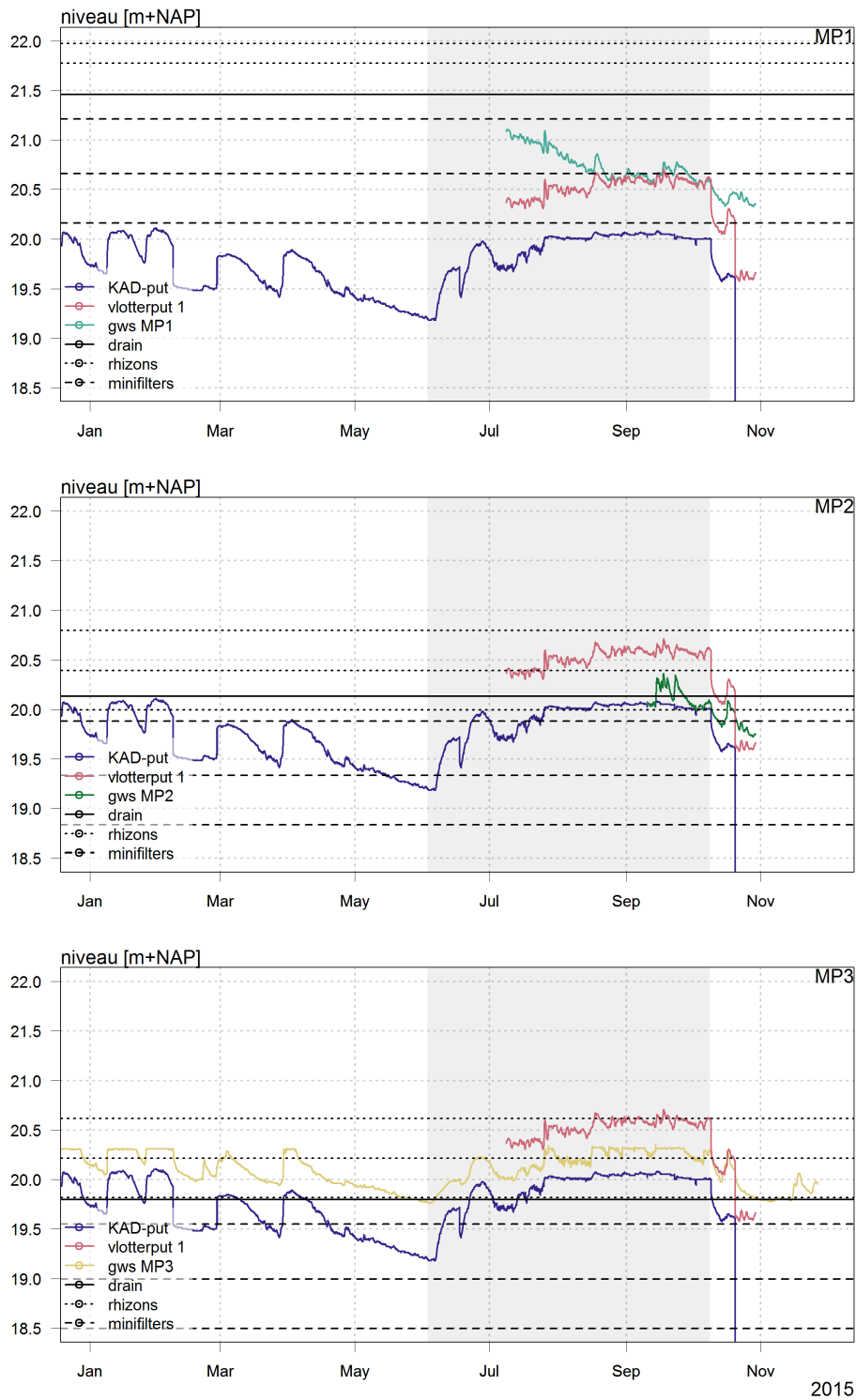
Figuur 3.2 laat zien dat voor MP1 de drain boven het waterniveau van vlotterput 1 ligt, waardoor de hoeveelheid sub-irrigatie beperkt zou zijn. Uit waterkwaliteitsanalyses van het water in de drain bij MP1 blijkt echter dat sub-irrigatie hier wel heeft plaatsgevonden. Dit komt doordat het waterniveau bovenstrooms van de verdeelput hoger is dan in vlotterput 1. Het niveauverschil is echter niet gemeten. Tot eind juli 2015 is de grondwaterstand bij MP1 hoger dan de waterstand in de vlotterput. De grondwaterstand daalt totdat het niveau t.o.v. NAP gelijk is aan het niveau in de vlotterput en volgt daarna nagenoeg de stand in vlotterput 1 tot het einde van de sub-irrigatie. Vlotterput 1 bepaalt tot hoever de grondwaterstand bij MP1 kan wegzakken.

De grondwaterstand bij MP2 is lager dan in de vlotterput, wat vermoedelijk wordt veroorzaakt door een drainerend effect van het niveau in het KAD-systeem benedenstrooms van vlotterput 1. Het niveau in vlotterput 2 is ongeveer 0,3 m hoger dan in de KAD-put.

De wateraanvoer via RWZI-effluent varieert van 3 juni tot eind september 2015 tussen 3,0 en 4,4 mm/d. Daarna daalt die van 4,4 via 3,1 naar 3,5 mm/d tot het einde van de proef op 9 oktober 2015. De gemiddelde aanvoer voor de gehele proef bedraagt 3,7 mm/d (Figuur 3.1A), waardoor de waterstand in de vlotterput daalt met ongeveer 15 cm. De grondwaterstand bij MP1 en MP2 daalt vervolgens met ongeveer 30 cm. De daling bij MP3 is geringer.



Figuur 3.1: A) Neerslag en debiet van aangevoerd RWZI-effluent (stippellijn). B) Niveau t.o.v. NAP van balg KAD-put, waterstand in de KAD-put, waterstand in de vlotterput bij MP2 en grondwaterstanden bij MP1-3 en nabij de KAD-put. C) Als B maar t.o.v. maaiveld. D) Bodemvochtgehaltes bij MP2. Het grijze vlak geeft de periode van sub-irrigatie met RWZI-effluent in 2015.



Figuur 3.2: Waterniveau in vlotterput 1 en grondwaterstanden in MP1, MP2 en MP3. De stippellijnen geven de diepte van de drainbuis, rhizons (bemonstering bodemvocht) en minifilters (bemonstering grondwater) voor elk meetpunt.

3.2 Metingen waterkwaliteit

3.2.1 Chloride-bromide ratio

Door een te diepe grondwaterstand en droogval van de minifilters kon bij de referentiemeting op 8 april 2015, voorafgaand aan de start van de sub-irrigatie, uit de minifilters van MP1 geen water worden onttrokken. In plaats daarvan is grondwater direct uit de peilbuis bemonsterd. Ook de ondiepe rhizon van MP1 leverde geen water.

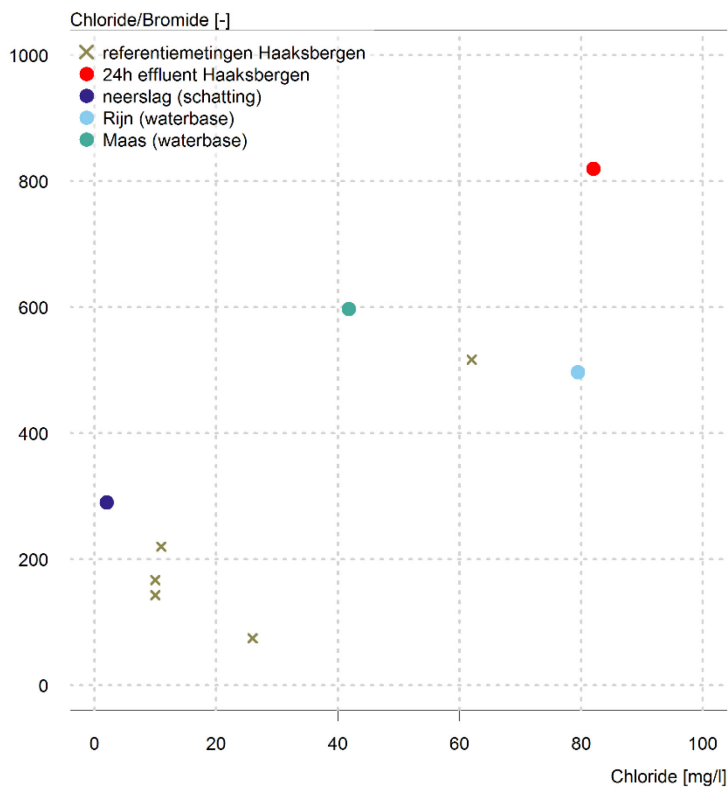
De resultaten van de referentiemeting zijn weergegeven in Tabel 3.1. Het gaat hierbij zowel om monsters van grondwater door middel van minifilters als om bodemvochtmonsters door middel van rhizons. Chlorideconcentraties in het bodemvocht zijn in alle meetpunten laag. Deze getallen zijn in lijn met de regenwatersamenstelling in Oost-Nederland, waar gezien de grote afstand tot de kust lage chlorideconcentraties te verwachten zijn. Als de chlorideconcentratie van het eveneens oostelijk gelegen LMRE meetpunt Valthermond (gemiddeld 1,5 mg/L in 2013 (wet only)) als referentie wordt genomen dan is de chlorideconcentratie in het bodemvocht een aantal keer in concentratie is toegenomen. De gemeten chlorideconcentraties reflecteren hiermee het effect van indikking door verdamping en naast regenwater weinig andere bronnen.

Het aantal bromideanalyses boven de detectiegrens van 0,05 mg/L is beperkt. Daarnaast was de hoeveelheid bodemvocht verkregen uit de rhizons, door het zeer droge voorjaar, dusdanig laag dat de monsters verdund moesten worden voor de bromideanalyse. Een dergelijke verdunning komt niet ten goede aan de detecteerbaarheid.

In Figuur 3.3 is de ratio tussen chloride en bromide (hierna aangeduid als Cl:Br) uitgezet tegen chloride voor de genomen watermonsters. Ter referentie zijn waarden voor het RWZI-effluent te Haaksbergen (24h effluentmonster van 10 september 2015), gemiddelde waarden voor de Maas en Rijn en schattingen voor regenwater opgenomen. De meeste monsters vallen in de te verwachten range van (ingedikt) regenwater. Opvallend is dat twee monsters hogere chlorideconcentraties en verhoogde bromideconcentraties laten zien. Het gaat hierbij om het grondwater bij MP1 en het grondwater bemonsterd in het ondiepe minifilter van MP2 (ongeveer drainniveau). Cl:Br van het grondwater bij MP1 plot mooi op de lijn van RWZI-effluent bijmenging. Mogelijk is hier nog invloed zichtbaar van eerdere sub-irrigatie met RWZI-effluent, of wordt het grondwater anderszins door het RWZI-water beïnvloed. De bromideconcentratie in het ondiepe minifilter van MP2 is afwijkend hoog. Cl:Br ligt hier onder de verwachte ratio als wordt uitgegaan van steenzout als bron van bromide en chloride. Dit kan duiden op vervuiling met bromide, maar mogelijk ook op een analysefout.

Tabel 3.1: Meetresultaten chloride en bromide in referentiesituatie op 8 april 2015 voor de start van de sub-irrigatie.

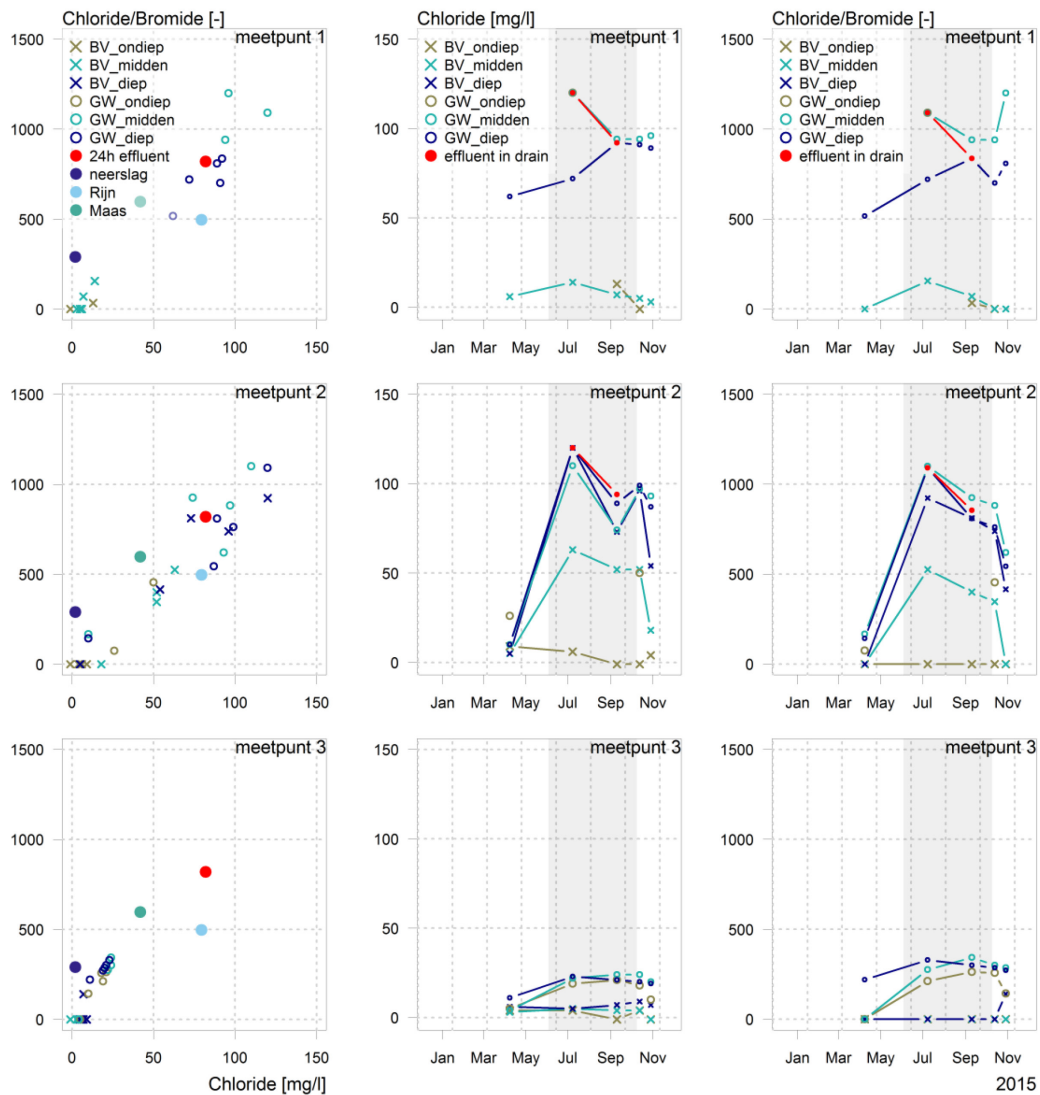
datum	code	omschrijving	Type	chloride	bromide	Cl/Br	Bijzonderheden
08-04-2015	C-15 0686	Minifilter 1_diep	grondwater	62	0.12	516.7	monster genomen uit peilbuisfilter
08-04-2015	C-15 0687	Minifilter 2_ondiep	grondwater	26	0.35	74.3	verduunning 5x ivm weinig monstervolume
08-04-2015	C-15 0688	Minifilter 2_midden	grondwater	10	0.06	166.7	
08-04-2015	C-15 0689	Minifilter 2_diep	grondwater	10	0.07	142.9	
08-04-2015	C-15 0690	Minifilter 3_ondiep	grondwater	5	< 0.05	> 100	
08-04-2015	C-15 0691	Minifilter 3_midden	grondwater	4	< 0.05	> 80	
08-04-2015	C-15 0692	Minifilter 3_diep	grondwater	11	0.05	220.0	
08-04-2015	C-15 0693	Rhizon 1_midden	bodemvocht	6	< 0.25	> 24	verduunning 5x ivm weinig monstervolume
08-04-2015	C-15 0694	Rhizon 2_ondiep	bodemvocht	9	< 0.25	> 36	verduunning 5x ivm weinig monstervolume
08-04-2015	C-15 0695	Rhizon 2_midden	bodemvocht	5	< 0.05	> 100	
08-04-2015	C-15 0696	Rhizon 2_diep	bodemvocht	5	< 0.05	> 100	
08-04-2015	C-15 0697	Rhizon 3_ondiep	bodemvocht	4	< 0.25	> 16	verduunning 5x ivm weinig monstervolume
08-04-2015	C-15 0698	Rhizon 3_midden	bodemvocht	3	< 0.05	> 60	
08-04-2015	C-15 0699	Rhizon 3_diep	bodemvocht	6	< 0.05	> 120	



Figuur 3.3: Relatie tussen chlorideconcentratie en de ratio tussen chloride en bromide voor de referentiesituatie (8 april 2015), voorafgaand aan sub-irrigatie. Als referentie zijn gemiddelde waarden opgenomen voor de Maas (Eijsden), de Rijn (Lobith) en van het effluent te Haaksbergen (24-uurs monster 10 sept 2015). Daarnaast is een schatting weergegeven van Cl:Br van regenwater (Stuyfzand, 1993), gecombineerd met een schatting van de chlorideconcentratie op basis van (wet-only) metingen bij Valthermond. Datapunten met een bromideconcentratie kleiner dan de detectielimiet van 0,05 mg/L en vijfmaal verdunde monsters met bromideconcentraties beneden de detectiegrens zijn niet opgenomen.

Gedurende sub-irrigatie stijgt Cl:Br en verschuift deze in het grondwater van MP1 en MP2 naar die van het effluent (Figuur 3.4). Voor de diepe rhizon in MP2 geldt dat deze zich in de verzadigde zone bevindt, waardoor ook een hoge waarde wordt gevonden. In de onverzadigde zone van MP1 en MP2 op een diepte van resp. 40 en 60 cm-m.v., wordt een lagere, maar duidelijk verhoogde ratio gevonden. Verspreiding van het effluent is daarmee dus niet beperkt tot de verzadigde grondwaterzone. In de ondiepe rhizon op 20 cm-m.v. ligt de bromideconcentratie onder de detectiegrens. De tevens zeer lage chlorideconcentraties geven aan dat in deze ondiepe rhizons bijmenging met effluent onwaarschijnlijk is.

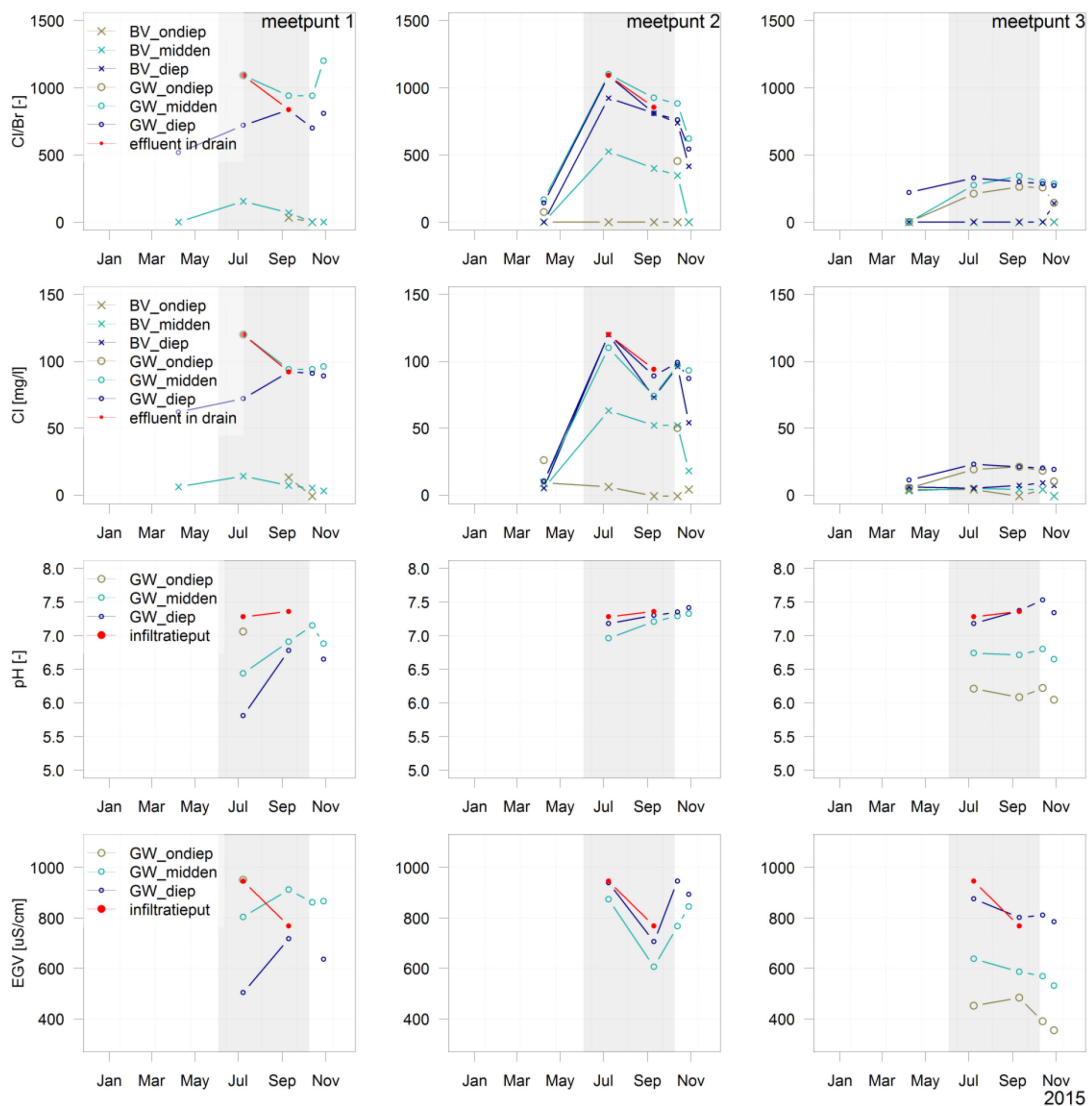
Opvallend is de stijging van Cl:Br bij MP1 na het stoppen van sub-irrigatie, terwijl in MP2 Cl:Br daalt. In MP3 is sprake van enige verhoging van Cl:Br, maar nadert de waterkwaliteit meer die van regenwater dan die van het RWZI-effluent (Figuur 3.4). Echter, de lichte verhoging van Cl:Br bij MP3 duidt er op dat er wel RWZI-effluent in de drains ter hoogte van MP3 zit. De menging met niet-effluent water is echter niet bekend.



Figuur 3.4: links: Relatie tussen chlorideconcentratie en de ratio tussen chloride en bromide. Als referentie zijn gemiddelde waarden opgenomen voor de Maas (Eijsden), de Rijn (Lobith) en van het RWZI-effluent te Haaksbergen (waarde van één 24h-monster d.d. 10-9-2015). Daarnaast is een schatting weergegeven van regenwater (Stuyfzand, 1993). Midden en rechts: Chloride en Chloride-bromide ratio voor MP1-3 en voor het sub-irrigatiewater in de drain bij MP1 en MP2 als functie van de tijd. Bij MP3 is het water in de drain niet bemonsterd. BV = bodemvocht, GW = grondwater. Het grijze vlak geeft de periode van sub-irrigatie. Waarde -1 voor chlorideconcentratie betekent dat de concentratie onder de detectiegrens ligt. Waarde 0 voor chloride/bromide geeft aan dat of chloride, of bromide onder de detectiegrens ligt.

3.2.2 pH en EGV

Ondanks de verschillen in Cl:Br voor MP2 en MP3 zijn het EGV en de pH van het diepe minifilter voor MP2 en MP3 nagenoeg gelijk. De pH en het EGV zijn daarmee geen goede tracers om de aan/afwezigheid van RWZI-effluent aan te tonen. Bij MP3 nemen het EGV en de pH toe met de diepte, wat duidt op een grotere invloed van regenwater ondiep in het profiel. De afname van het EGV bij MP2 in de periode van sub-irrigatie wordt waarschijnlijk veroorzaakt door een grotere invloed van regenwater in deze periode (Figuur 3.1). Wederom valt de tegengestelde trend op in MP1; het EGV stijgt juist in de periode met neerslag. Ook is de pH bij MP1 lager dan bij MP2.



Figuur 3.5: Chloride-bromide ratio, Chlorideconcentratie, pH en EGV voor MP1 t/m 3 en voor het sub-irrigatiewater in de drain bij MP1 en MP2 als functie van de tijd. Bij MP3 is het water in de drain niet bemonsterd. BV = bodemvocht, GW = grondwater. Het grijze vlak geeft de periode van sub-irrigatie. Waarde -1 voor chlorideconcentratie betekent dat de concentratie onder de detectiegrens ligt. Waarde 0 voor chloride/bromide geeft aan dat of chloride, of bromide onder de detectiegrens ligt.

3.2.3 Restanten van geneesmiddelen

Voor 31 monsters is het grondwater geanalyseerd op aanwezigheid van restanten van geneesmiddelen en metabolieten. Op basis van expert-oordeel is een eerste analyse gemaakt van de stoffen die in RWZI-effluent verwacht mogen worden en die naar verwachting de bodem kunnen passeren (Tabel 3.2). Van vier stoffen, twee mobiel en twee niet-mobiel, die in hoge concentraties in effluent voorkomen, is het concentratieverloop voor de meetpunten weergegeven in Figuur 3.6. De gemeten concentraties van alle stoffen is opgenomen in Bijlage 1.

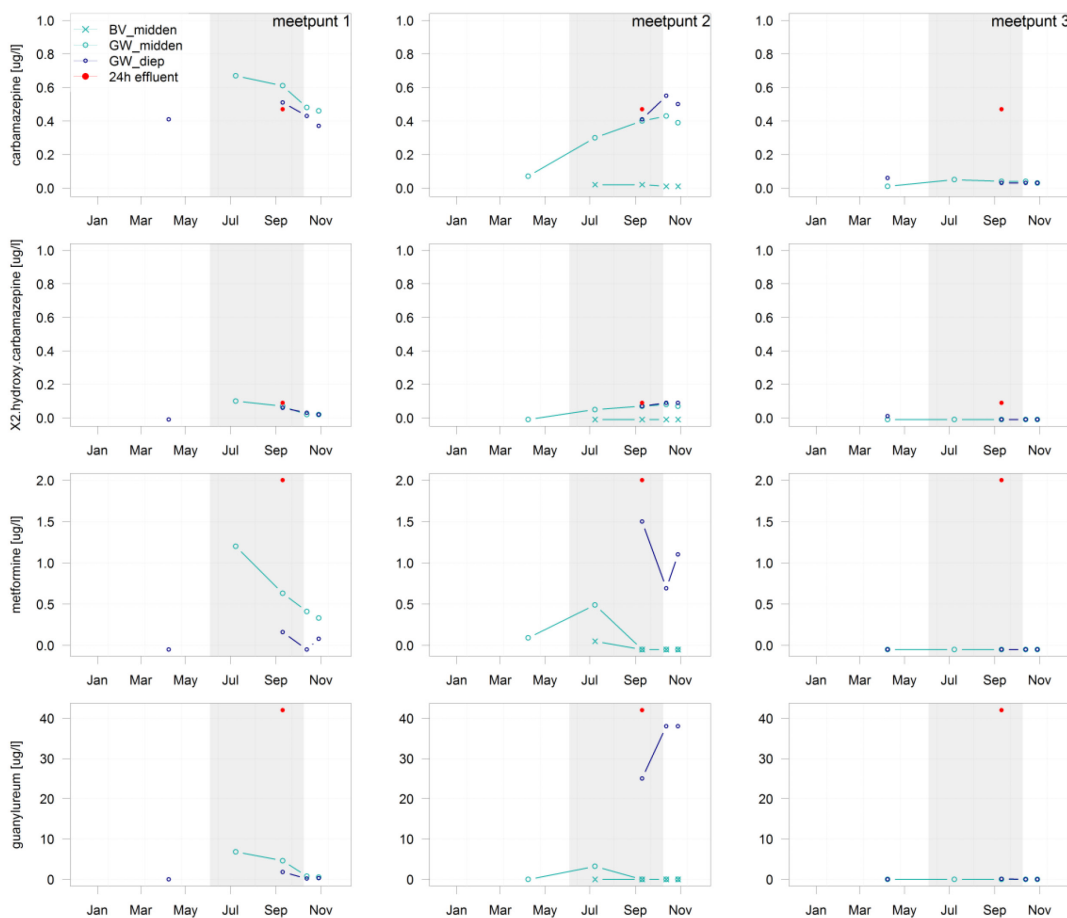
Het concentratieverloop van de mobiele stoffen carbamazepine en 2-hydroxy carbamazepine is in MP2 en MP3 in lijn met het verloop van Cl:Br; voor MP2 geldt dat door sub-irrigatie de concentraties stijgen en dat de concentraties in het grondwater verschuiven in de richting van de effluentconcentratie. Na het stoppen van sub-irrigatie dalen de concentraties weer. De concentraties in de onverzadigde zone bij MP2 en MP3 zijn laag. Opvallend is het tegengestelde concentratieverloop voor MP1. De carbamazepineconcentratie in MP1 is hoog in de referentiemeting voorafgaand aan sub-irrigatie. Voor de andere stoffen in Figuur 3.6 ligt de referentieconcentratie onder de detectiegrens. Direct na de start van sub-irrigatie zijn de geneesmiddelenconcentraties bij MP1 hoog en dalen de concentraties gedurende sub-irrigatie. De oorzaak hiervan is vooralsnog onduidelijk. Mogelijk moet de oorzaak gezocht worden in toestroom van effluent vanuit de richting van de RWZI.

De concentraties in het grondwater van de niet-mobiele stoffen metformine en guanylureum zijn gedurende sub-irrigatie lager dan de concentratie in het effluent en zijn in enkele monsters ook lager dan de detectiegrens. Een verklaring voor het tegengestelde patroon in het diepe minifilter voor metformine en guanylureum in MP2 en de hoge concentratie guanylureum na het stoppen van sub-irrigatie kan op basis van de beperkte beschikbare metingen niet gegeven worden.

Tabel 3.2: Expert-inschatting (Thomas ter Laak, KWR) van de geneesmiddelen die in RWZI-effluent voorkomen en welke daarvan de bodem kunnen passeren.

Geneesmiddel of omzettingsproduct	Mobiel
10,11-trans-diol-carbamazepine ^c	x
2-hydroxy carbamazepine ^c	x
3-hydroxy carbamazepine ^c	x
4-acetaminophen sulphate ^c	
4-formylaminoantipyrine ^c	x
α-hydroxy metoprolol ^c	
AMPH ^c	x
atenolol ^a	
bezafibrate ^a	
carbamazepine ^a	x
carbamazepine-10,11-epoxide ^c	
clindamycin	
clofibric acid	x
diatrizoate (amidotrizoic acid) ^a	x
diclofenac ^a in basische bodem misschien ook mobiel	
erytromycin A ^a	
phenazone ^a (obsoleet medicijn)	x
furosemide ^a	
gemfibrozil ^a	
guanylurea ^c (zeer hoge concentraties in effluent)	
hydroxy ibuprofen ^c	
ketoprofen ^a	
lincomycin ^a	
metformin ^a (zeer hoge concentraties)	
metoprolol ^a	
N4-acetyl sulfamethoxazole ^{c,d}	x
naproxen ^a	
o-Desmethyl tramadol	
oxcarbamazepine ^{a(c)}	
paracetamol ^a (alleen als zuivering slecht werkt)	
propranolol ^a	
propyphenazon ^a	x
salicylic acid ^c (mogelijk ook van nature aanwezig)	x
sotalol ^a	
sulfamethoxazole ^{a(b)}	x
tramadol ^a	
trimethoprim ^{a,b}	
venlafaxine ^a	

^a humaan geneesmiddel; ^b (voornamelijk) diergeneesmiddel; ^c omzettingsproduct van human geneesmiddel; ^d omzettingsproduct van diergeneesmiddel; ^e natuurlijk hormoon; ^f recovery voor waterige matrices, recovery voor vast materiaal is onbekend



Figuur 3.6: Concentraties van restanten van geneesmiddelen in het grondwater en bodemvocht te Haaksbergen. Als referentie zijn de concentraties in het 24h-effluentmonster d.d. 10-9-2015 gegeven. Carbamezapine en 2-hydroxy carbamazepine zijn mobiel en kunnen de bodem passeren, metformine en guanylureum zijn niet mobiel. BV = bodemvocht, GW = grondwater. Het grijze vlak geeft de periode van sub-irrigatie. Een waarde <0 betekent dat de concentratie beneden de detectiegrens ligt.

3.3 Verstopping van het systeem

3.3.1 BBP proef

Voor het effluentwater geldt: BP-7 = 400 ng ATP/L (± 60) en BPC14 = 3100 d.ng ATP/L (± 600). De waarden voor drinkwater liggen voor beide parameters meer dan een factor 10 lager. Geconcludeerd moet worden dat de groeipotentie van een biofilm in het KAD-systeem groot is. De biofilm is ook waargenomen in de regelput (Figuur 3.7). Tijdens een veldbezoek op 26 november is waargenomen dat deze biofilm in deze regelput weer verdwenen was.



Figuur 3.7: Biofilmvorming in het KAD-systeem ('regelput').

3.3.2 MFI-meting

Er is een drietal metingen uitgevoerd waaruit volgt dat de MFI aanzienlijk hoger is ($MFI = 30.2, 6.2$ en 21.9 s/L^2) dan de waarde die beschouwd wordt als 'goed infiltratiewater' ($MFI < 3 \text{ s/L}^2$; Van Beek et al. (1998)). Hieruit volgt dat bij het infiltreren van RWZI-effluent verstopping van het drainagesysteem nadrukkelijk een punt van aandacht is.

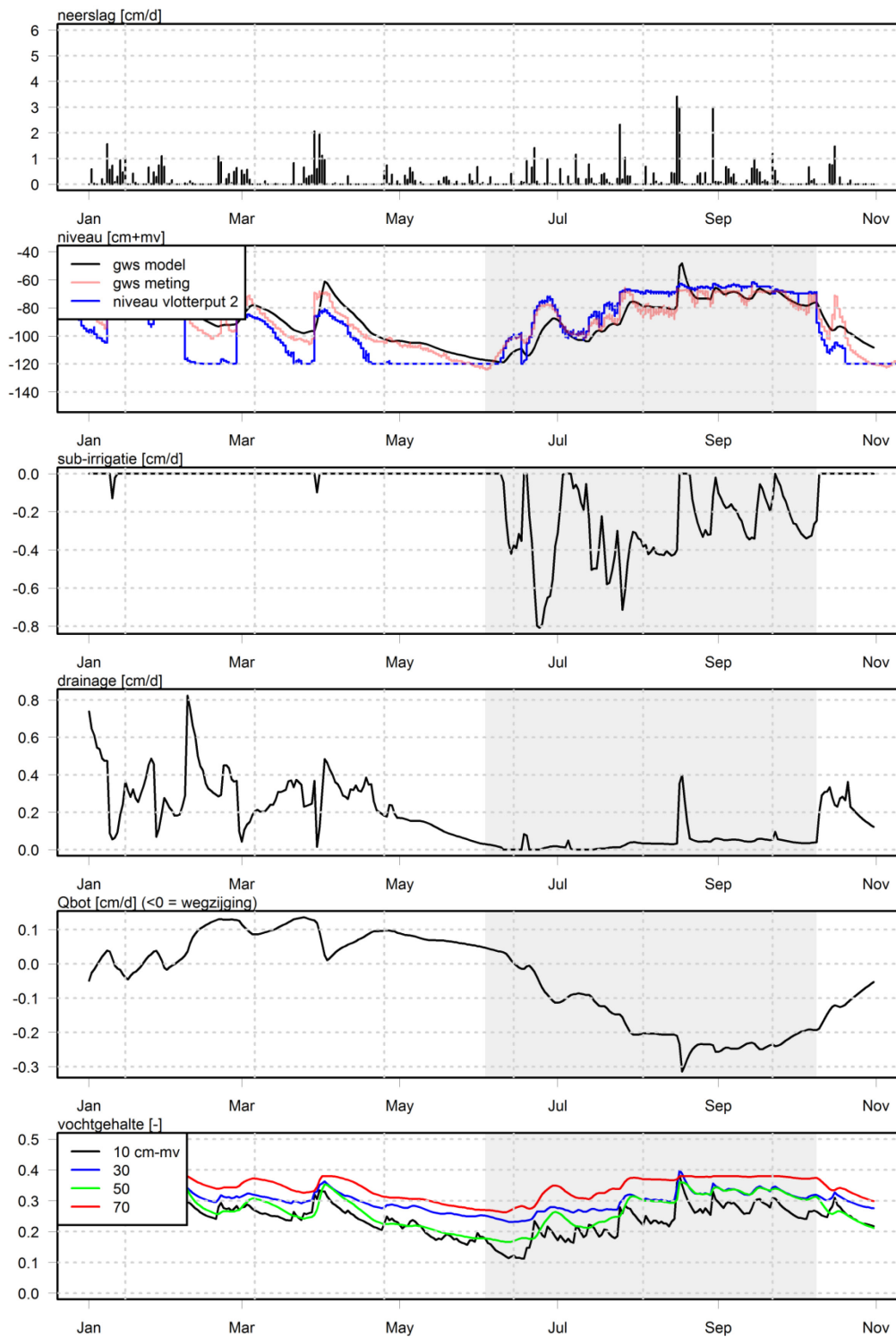
3.4 Modelling van water- en stoftransport in de bodem

3.4.1 SWAP

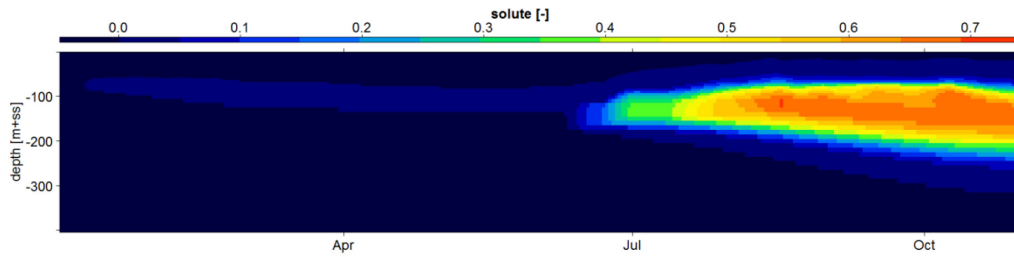
Drainage- en infiltratieweerstand van het KAD-systeem en de stijghoogte in het diepe watervoerende pakket zijn enigszins getuned om de gemodelleerde en gemeten grondwaterstand te benaderen. Het SWAP-model reproduceert de gemeten grondwaterstand redelijk goed (Figuur 3.8). In werkelijkheid reageert de grondwaterstand sneller op een neerslaggebeurtenis dan met het model wordt berekend. In werkelijkheid is vanuit de zuivering een redelijk constant debiet van ongeveer 4 mm/d aangevoerd. Modelresultaten geven aan dat de hoeveelheid sub-irrigatie varieert in de tijd, wat wordt veroorzaakt door een variabel niveauverschil tussen vlotterput 2 en de grondwaterstand. Mogelijk is het aangevoerde effluent dus in sommige periodes maar ten dele ten goede gekomen aan grondwateraanvulling via sub-irrigatie.

In het model wordt in het voorjaar een opwaartse waterstroming vanuit het diepe watervoerende pakket berekend. Vermoedelijk is dit in werkelijkheid niet het geval. Echter, gegevens van stijghoogtes uit het watervoerende pakket onder de leemlaag zijn vooralsnog niet bekend, evenals beekpeilen, wat de modelparametrisatie hindert.

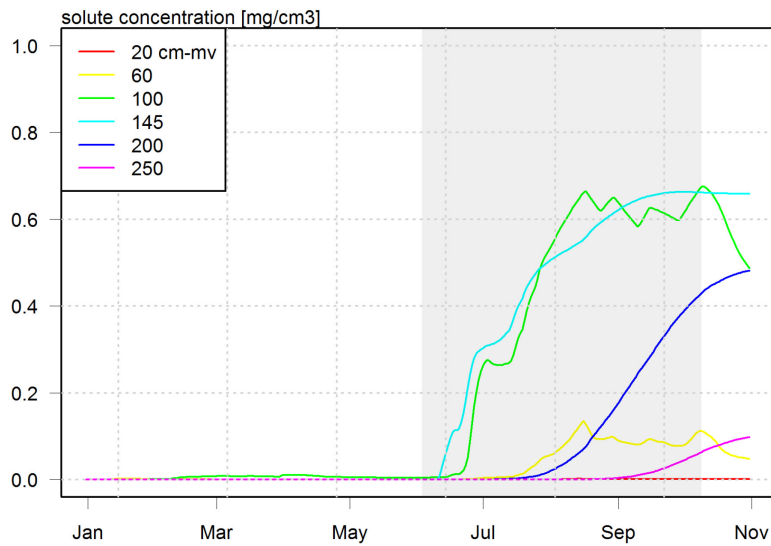
Het via sub-irrigatie ingebrachte grondwater verspreidt zich langzaam over het diepte-profiel. In Figuur 3.9 is het aandeel sub-irrigatie over de diepte (1D) weergegeven in de tijd. Figuur 3.10 geeft de gesimuleerde stofconcentraties op de dieptes van de rhizons en minifilters van MP3. Per definitie simuleert SWAP de situatie in een verticale bodemkolom midden tussen twee drains. De opgegeven stofconcentratie in het water in de drains is 1,0 mg/L (zie methode). Uit de simulaties volgt dat sub-irrigatiewater midden tussen twee drains terecht komt, maar dat de stofconcentratie tijdens sub-irrigatie lager is dan die in de drains. Ook volgt uit Figuur 3.10 dat de stofconcentratie in het diepste minifilter laag is. Uit de metingen volgt echter dat juist in het diepste minifilter de concentraties het hoogst zijn. Vermoedelijk wordt de wegzijging in het model onderschat. Model en metingen zijn wel consistent wat betreft de invloed van sub-irrigatie op de wortelzone, want de stofconcentraties in de wortelzone zijn laag.



Figuur 3.8: Resultaten simulaties met SWAP voor MP3 (2015). A) Neerslag B) Grondwaterstand gemeten en gemodelleerd C) Hoeveelheid sub-irrigatie D) Hoeveelheid drainage via drains en naar de beek E) Flux naar het diepe watervoerende pakket F) Bodemvochtgehalte. Het grijze vlak geeft de periode van sub-irrigatie in 2015.



Figuur 3.9: Resultaten simulaties met SWAP voor MP3 (2015): verspreiding sub-irrigatiewater in de tijd (x-as) en de diepte (y-as), aangeduid met de stofconcentratie (kleurprofiel).

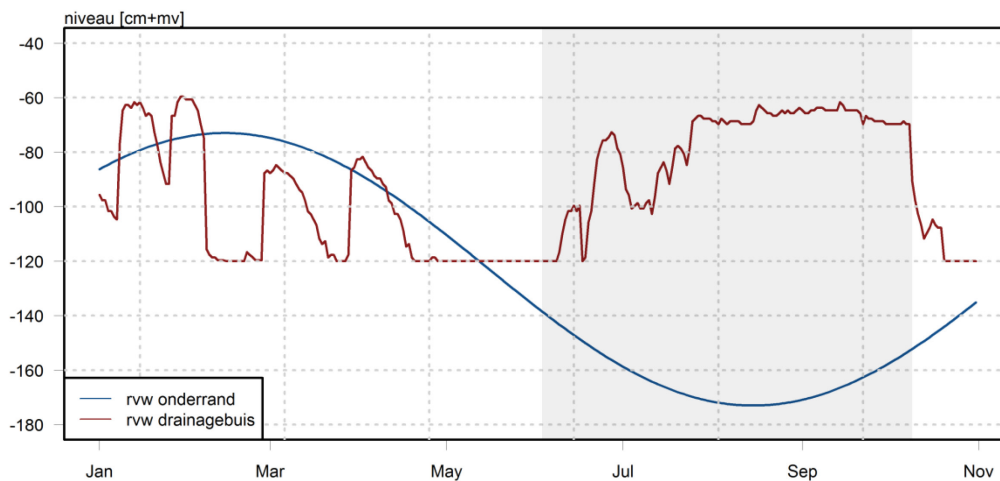


Figuur 3.10: Resultaten simulaties met SWAP voor MP3 (2015), tussen twee drains: verspreiding sub-irrigatiewater in de tijd (x-as) en op de dieptes waarop bodemvocht- en grondwatermonsters zijn genomen. Het grijze vlak geeft de periode van sub-irrigatie.

3.4.2 Hydrus_2D

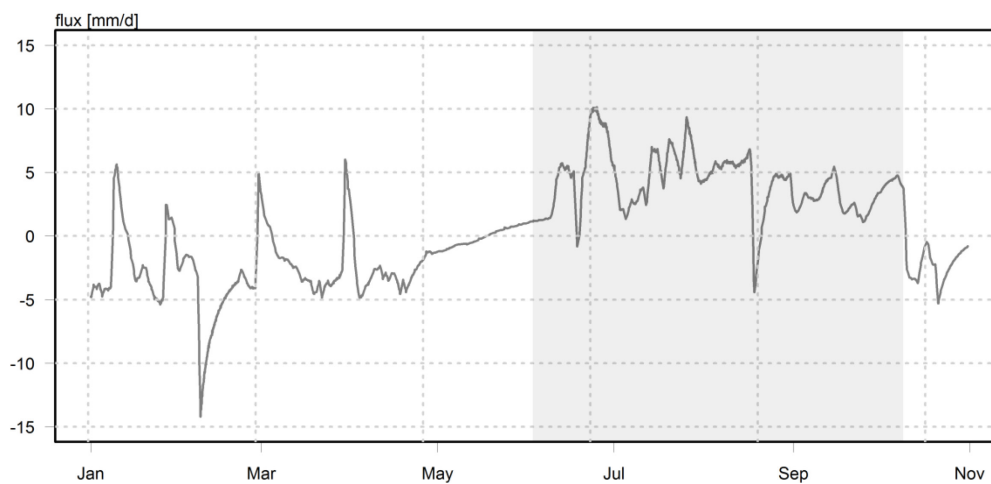
De 2D-hydrologische berekeningen met Hydrus in een XZ-transect lichten we toe aan de hand van de gehanteerde randvoorwaarden, de berekende sub-irrigatiefluxen, en berekende grondwaterstanden bij drain en midden tussen de drains.

De randvoorwaarden voor de stijghoogte aan de onderrand en voor de drainagebuis zijn variabel in de tijd (Figuur 3.11).



Figuur 3.11: Simulaties met Hydrus_2D voor 2015. Randvoorwaarden onderrand en drainagebuis als functie van de tijd in de vorm van een stijghoogte [cm+m.v.]. De drainagediepte is 120 cm-m.v. Het grijze vlak geeft de periode van sub-irrigatie.

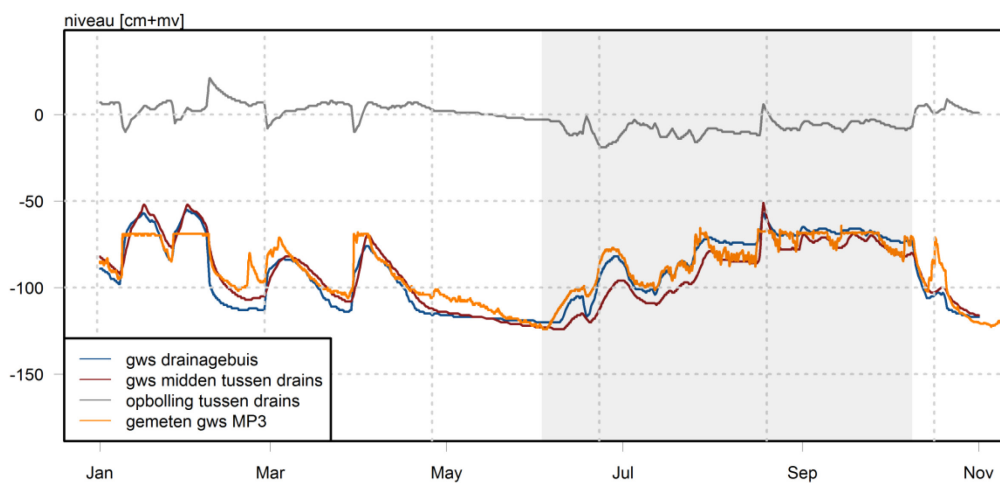
Wanneer we deze randvoorwaarden gebruiken, dan berekent Hydrus over de periode van sub-irrigatie een gemiddelde wateraanvoer via de drainage van 4,2 mm/dag. Dit komt goed overeen met de metingen in de veldproef. Figuur 3.12 laat het verloop in de tijd zien. De berekende variatie in de tijd is een gevolg van de randvoorwaarde voor de drainagebuis, voor de onderrand, en van de weersomstandigheden. Op 16 augustus 2015 viel bijvoorbeeld 34 mm neerslag, en op 17 augustus 2015 nog eens 30 mm. Deze neerslag heeft drainage tot gevolg gehad, die ook in het veld waargenomen is.



Figuur 3.12: Simulaties met Hydrus_2D voor 2015. Berekende flux 1-1-2015 tot en met 31-10-2015 via de drainagebuis in [mm/d]. IN (sub-irrigatie) is positief, UIT (drainage) is negatief. Het grijze vlak geeft de periode van sub-irrigatie.

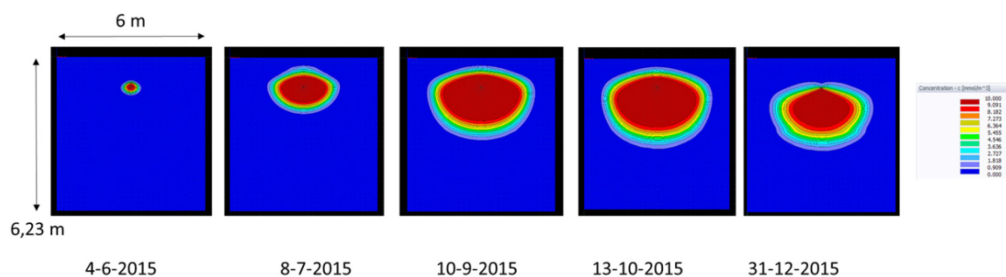
De berekende wegzijging over de onderrand van het model is tijdens de periode van sub-irrigatie gemiddeld ruim 3,6 mm/d. Deze waarde lijkt aan de grote kant, en kan onder andere door verdere aanpassing van de onderrandvoorwaarde in het model verbeterd worden.

De berekende grondwaterstanden bij de drain en midden tussen de drain zijn te zien in Figuur 3.13, naast de opbolling midden tussen de drains. Deze waarden vertonen een redelijke gelijkheid met het waargenomen patroon en verloop van de grondwaterstand midden tussen de drains in MP3.



Figuur 3.13: Simulaties met Hydrus_2D. Berekende grondwaterstanden 1-1-2015 tot en met 31-10-2015 bij de drainagebuis en midden tussen de drains in [cm+m.v.]. Opbolling midden tussen drains in [cm]: >0 betekent drainage, <0 betekent sub-irrigatie. Meetpunt MP3 bevindt zich midden tussen twee drains. Het grijze vlak geeft de periode van sub-irrigatie.

Naast hydrologische berekeningen zijn er berekeningen gedaan aan het conservatieve transport van stoffen, i.c. aan de verspreiding in de XZ-richting van de tracer die in het RWZI-effluent aanwezig is en geen reacties ondergaat in de bodem. Figuur 3.14 laat de berekende verspreiding zien vlak na de start van de sub-irrigatie, op drie dagen dat er monsternamen in het veld plaatsgevonden heeft en aan het eind van het jaar (enige tijd na het stoppen van sub-irrigatie).



Figuur 3.14: Simulaties met Hydrus_2D. Berekende verspreiding van tracer in RWZI-effluent in de bodem ten gevolge van sub-irrigatie op één dag na begin van de sub-irrigatie (links), op drie dagen van monsternamen in het veld en aan het eind van het jaar. Sub-irrigatie stopte op 9 oktober 2015. De meest rode kleur komt overeen met de modelmatig toegediende tracer in RWZI-effluent (10 mmol/L).

De berekende verspreiding van de tracer in de bodem laat zien dat er een zone rondom de drain van grofweg 5 m breed en 3,5 m diep beïnvloed wordt door RWZI-effluent. De maximaal opwaartse verspreiding reikt op enig moment tot 0,3 m-m.v. (beïnvloed), waarbij water met een effluentconcentratie tot op ongeveer 0,7 m-m.v. terechtkomt. Dit patroon is ook gemeten in het bodemvocht bij MP2.

Qua laterale verspreiding reikt de berekende invloed tot maximaal 2,5 m vanaf de drain, niet geheel tot midden tussen twee drains, hetgeen wel gemeten is in MP3.

Effluentwaterconcentraties reiken lateraal tot 1,5 à 1,75 m vanaf de drain. De verticaal gezien maximale diepte van invloed is 3,5 à 4 m-m.v., waarbij water met effluentconcentratie tot ruim 2,5 m-m.v. reikt. Dit is een diepte van ongeveer 1,3 m-drainniveau, hetgeen spoort met de waarnemingen in MP2 in de diepste filters. De verwachting is dat als de wegzijging over de onderrand geringer wordt, de laterale verspreiding groter wordt ten nadele van de verticale neerwaartse verspreiding.

Al met al is de eerste poging om de 2D-verspreiding in de bodem te berekenen van de tracer die aanwezig is in het effluent redelijk geslaagd te noemen. In het vervolgproject zullen we ook aandacht gaan besteden aan reactief stoftransport.

4 Discussie en conclusie

Op de Hoge Zandgronden neemt de druk op beschikbare waterbronnen door klimaatverandering toe, terwijl RWZI's dagelijks zoet restwater lozen op het oppervlaktewater. Gangbare irrigatiemethoden zijn weinig efficiënt als gevolg van 'verwaaiing en verdamping' van het aangevoerde water. Bovendien leggen zij lokaal een sterke claim op beschikbare bronnen: in droge perioden kan de grondwateronttrekking voor beregening 2 tot 3 maal groter kan zijn dan alle overige Nederlandse onttekingen samen (Stuurman et al., 2008). Sub-irrigatie kan efficiënter zijn doordat gewassen via de wortelzone, in plaats van via de lucht, van water worden voorzien. Uiteraard wordt aandacht gevraagd voor verspreiding van o.a. geneesmiddelen in gewas en grondwater bij sub-irrigatie met RWZI-effluent. Overtuigd van het belang om waterstromen in de toekomst optimaal te benutten, heeft Waterschap Vechtstromen het initiatief genomen om RWZI-effluent in een proefopstelling te hergebruiken middels sub-irrigatie. Door de techniek in een praktijkopstelling te testen en effecten in het veld te monitoren is een belangrijke stap gezet om de kansen en bedreigingen objectief vast te stellen.

In 2013 en 2015 heeft sub-irrigatie met RWZI-effluent plaatsgevonden op een maïsperceel te Haaksbergen. Gemiddeld is van 3 juni tot 9 oktober 2015 ongeveer 220m³/d effluent in het KAD-systeem ingelaten, wat neerkomt op ongeveer 4 mm/d voor het proefperceel. Ongeveer 3% van het totaal beschikbare effluent in deze periode is gebruikt voor sub-irrigatie. Sub-irrigatie zorgt voor een dusdanige verhoging van de grondwaterstand dat droogtestress bij het gewas wordt voorkomen.

De ratio tussen chloride en bromide (Cl:Br) blijkt bruikbaar om effluentwater te traceren. Het eerste jaar van monitoring laat zien dat effluent zich in ieder geval tot 2,5 m-m.v. verspreidt gedurende sub-irrigatie. Onbekend is nog in hoeverre dit water zich naar de diepere ondergrond, onder de leemlaag, en naar de beek verspreidt. Uit Cl:Br volgt onder meer dat het sub-irrigatiewater de wortelzone wel kan bereiken, maar resten van geneesmiddelen worden daar nauwelijks teruggevonden. In het midden van het perceel, midden tussen twee drains (MP3) is Cl:Br verhoogd gedurende sub-irrigatie, maar is de ratio aanzienlijk lager dan die van het effluent. In het midden van het perceel zijn direct naast/in een drain geen monsters genomen, waardoor de samenstelling van het hier aangevoerde water niet bekend is. Uit modelberekeningen volgt echter dat de invloed van sub-irrigatiewater tot bijna midden tussen twee drains kan reiken. De stofconcentraties midden tussen twee drains zullen echter beduidend lager zijn dan die in en onder de drains.

De temporele trend bij MP1, dat direct gelegen is bij de inlaat van het effluent in het KAD-systeem, is nog niet goed te verklaren. Mogelijk is er sprake van een artefact door een lekkage vanuit de duiker waar het RWZI-effluent door afvloeit naar de Bolscher Beek. De vraag is of het voor de proef met sub-irrigatie van belang is hier veel aandacht aan te besteden. In vervolgmonitoring is het mogelijk zinvoller een ander meetpunt in te richten in het midden van het perceel, direct naast een drain. Bovendien zou een filter onder de scheidende leemlaag geplaatst moeten worden om het diepere grondwater (>tot 2,5 m-m.v) te bemonsteren.

Metingen in 2015 laten nadrukkelijk nog niet zien wat de verblijftijd van het sub-irrigatiewater in het systeem is en of het bijvoorbeeld snel weer afgevoerd wordt via de

drainage in de winter en via de Bolscher Beek. Om hier een beeld van te krijgen moeten ook in de eerste maanden van 2016 monsters worden genomen en geanalyseerd, om zo de waterkwaliteit in de periode na sub-irrigatie in beeld te brengen.

Uit metingen blijkt dat het risico op verstopping van het KAD-systeem door vaste bestanddelen in het aangevoerd effluent en door vorming van biofilm reëel is. Er moeten maatregelen worden genomen om verstopping van het KAD-systeem te voorkomen dan wel te kunnen verhelpen.

Om een beeld te krijgen van de effecten van sub-irrigatie over meerdere jaren, in het perceel en het diepere grondwater, en om scenario's te kunnen doorrekenen zijn simulatiemodellen nodig. Ook kan sub-irrigatie voordelen hebben voor de oppervlaktewaterkwaliteit, omdat de verblijftijd in de bodem kan zorgen voor extra afbraak en dus een lagere emissie van stoffen naar het oppervlaktewater. In deze studie hebben de modelanalyses zich beperkt tot het jaar 2015, om ondersteuning te bieden aan de interpretatie van de veldmetingen. Om meerjarige simulaties verantwoord te kunnen uitvoeren is nader onderzoek naar hydrologische randvoorwaarden, in ieder geval beekpeil en stijghoogte in het diepe watervoerende pakket, nodig. Nu zijn er nog teveel onduidelijkheden en op basis van de korte meetserie is het niet opportuun om de modellen te kalibreren. Ook moet de transportmodellering van stoffen worden uitgebreid met sorptie en afbraak om meerjarige verspreiding van stoffen te kunnen simuleren. Parametrisatie is echter geen sinecure.

In 2015 is de sub-irrigatie uitgevoerd onder de weercondities van dat specifieke jaar. Om de continuïteit van de praktijkproef te waarborgen, om onder andere weercondities te meten, om volgend seizoen eerder te starten met sub-irrigatie, en vooral een aantal zaken verdiepend uit te zoeken, is het goed om vanaf 2016 de volgende onderwerpen aan bod te laten komen:

- Voortzetten en uitbreiden/aanpassen van de monitoring van effecten van sub-irrigatie met RWZI-effluent op het KAD-perceel Haaksbergen, met nadrukkelijke aandacht voor verspreiding naar het grondwater
- Uitbreiden met monitoring van microbiologie (bacteriën/virussen)
- RWZI-effluent wordt afgevoerd via het oppervlaktewater. Het kan echter het grondwatersysteem alsnog bereiken door infiltratie vanuit beken, of doordat beregend wordt vanuit het oppervlaktewater. In de zomerperiode worden sommige beken op de hogere zandgronden vooral gevoed met RWZI-effluent (Figuur 4.1). We stellen daarom voor ook grondwaterkwaliteitsanalyse uit te voeren nabij een infiltrerende beek, gevoed met RWZI-effluent. Daarnaast stellen we voor om de verspreiding van microverontreinigingen bij sub-irrigatie met effluent te vergelijken met die bij beregening met, deels uit effluent bestaand, oppervlaktewater.
- Modellering uitbreiden van reactief stoftransport in de bodem na sub-irrigatie
- Samenstellen van kennisdocument over internationale toepassingen van gezuiverd restwater in de zoetwatervoorziening
- Doorkijk maken naar toepassing van RWZI-effluent op grotere schaal: beschikbare bronnen, regionale toepassing, effecten op de regionale grondwateraanvulling.
- Verder bevorderen van de samenwerking tussen watertechnologen (waterketen) en hydrologen (watersysteem), waterschappen en drinkwaterbedrijven.

Het inzetten van restwater voor droogtebestrijding is een vooruitstrevende technologische vorm van (klimaat)adaptatie om te anticiperen op toenemende watertekorten in de landbouw. Ondiepe sub-irrigatie van effluent via KAD is een nieuwe inpassing van water uit de waterketen in het watersysteem, waarbij het water ingebracht wordt daar waar en wanneer het nodig is. Het beeld uit de veldmetingen en modelberekeningen maakt het evident dat de vochtvoorziening van het gewas door sub-irrigatie wordt verbeterd.

Behalve RWZI's zijn ook restwaterstromen van industrieën beschikbaar om in te zetten voor de regionale watervoorziening. Bij hergebruik van RWZI-effluent voor sub-irrigatie zullen de meeste vragen omtrent waterkwaliteit en gezondheid worden gesteld. Dit onderzoek geeft een eerste aanzet om verspreiding van geneesmiddelen richting grondwater en wortelzone te kwantificeren. Om risico's beter in te kunnen schatten is meerjarige monitoring, ook gericht op andere stoffen en het diepere grondwater, noodzakelijk.



Figuur 4.1: Voeding van de Bolscherbeek met effluent (links) is in de zomerperiode groter dan de natuurlijke afvoer (rechts, over de stuw).

5 Referenties

- Bartholomeus, R.P., Simons, G.W.H., Van den Eertwegh, G.A.P.H., 2015a. Anticipating on amplifying water stress: Optimal crop production supported by climate-adaptive water management. KWR 2015.062, KWR, Nieuwegein.
- Bartholomeus, R.P., Van den Eertwegh, G.A.P.H., Simons, G.W.H., 2015b. Naar online en optimale sturing van Klimaat Adaptieve Drainage. Stromingen, 24(4): 27-41.
- Droogers, P., Kuipers, L., Van Bakel, P.J.T., Van Iersel, A., 2010. Klimaat Adaptieve Drainage: een innovatieve methode om piekafvoeren en watertekorten te verminderen. September 2010. Eindrapportage Haalbaarheidsonderzoek. Opdrachtgever: Ministerie van Verkeer en Waterstaat – SBIR programma. FutureWater Rapport nr. 96.
- Kroes, J.G., Van Dam, J.C., Groenendijk, P., Hendriks, R.F.A., Jacobs, C.M.J., 2009. SWAP version 3.2, Theory description and user manual. Alterra report 1649 (update 02), Wageningen University and Research Centre, Wageningen.
- Makkink, G.F., 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters. Journal of the Institution of Water Engineers, 11: 277-288.
- Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour. Res, 12(3): 513-522.
- Oosterhuis, M., Groteboer, A., van der Wiele, P., 2011. Emissie geneesmiddelen bij de bron aanpakken. H 2 O, 44(9): 30.
- Schaap, J., Lamberink, K., Hoving, I., Van Essen, E., Van Bakel, J., 2014. Monitoringsrapport Landbouw Op Peil, Aequator Groen & Ruimte bv, Dronten.
- Šejna, M., Šimůnek, J., van Genuchten, M.T., 2011. The HYDRUS Software Package for Simulating Two-and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media, User Manual, Version, 2: 280.
- Skaggs, R., Tang, Y., 1979. Effect of drain diameter, openings and envelopes on water table drawdown. Transactions of the ASAE [American Society of Agricultural Engineers].
- Stuurman, S., Baggelaar, P., Berendrecht, W., Buma, J., De Louw, P., Oude Essink, G., 2008. Toekomst van de Nederlandse grondwatervoorraad in relatie tot klimaatverandering, TNO-rapport 2008-U-R0074/B. TNO Bouw en Ondergrond, Utrecht.
- Stuyfzand, P.J., 1993. Hydrochemistry and hydrology of the coastal dune are of the Western Netherlands. KIWA, afd. Onderzoek & Advies, Nieuwegein.
- Ter Maat, J., Van der Vat, M., 2015. Cumulatieve effecten van externe ingrepen voor de zoetwatervoorziening in de 21e eeuw, Deltares.
- Van Beek, C.G.E.M., Vasak, L., Nieuwaal, A., Stefess, G.D., Bakker, L.M.M., 1998. NOBIS 96-3-06 Ontwerp en onderhoud van infiltratie- en onttrekkingsmiddelen, CUR/NOBIS, Goude.
- Van den Eertwegh, G.A.P.H., Kuipers, L., Klerk, W., Van Bakel, J., Stuyt, L., Van Iersel, A., Talsma, M., 2013. KlimaatAdaptieve Drainage: een innovatieve methode om piekafvoeren en watertekorten te verminderen. Eindrapportage Fase 2 'Onderzoek en Ontwikkeling'. Referentienummer SBIR113008. , FutureWater rapport nr. 121.
- Van der Aa, N., Kommer, G., de Groot, G., Versteegh, J., 2008. Geneesmiddelen in bronnen voor drinkwater. Monitoring, toekomstig gebruik en beleidsmaatregelen, Pharmaceuticals in sources for drinking water. Monitoring, future consumption and policy measures. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu RIVM.
- Van der Kooij, D., Veenendaal, H.R., 2014. Bepaling van de biomassa-productiepotentie (BPP) van drinkwater; BTO 2014.038, Nieuwegein.
- Van Genuchten, M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci Soc Am J, 44: 892-898.
- Zoetwatervoorziening Oost Nederland, 2012. Regionale rapportage Regio Oost voor deelprogramma Zoetwater.

Bijlage I

Concentraties van restanten van geneesmiddelen in het grondwater en bodemvocht te Haaksbergen. Als referentie zijn de concentraties in het 24h-effluentmonster d.d. 10-9-2015 gegeven. BV = bodemvocht, GW = grondwater. Het grijze vlak geeft de periode van sub-irrigatie. Een waarde <0 betekent dat de concentratie beneden de detectiegrens ligt.

