



KWR 2018.089 | September 2018

Hergebruik van industrieel restwater voor de watervoorziening van de landbouw

Praktijkproef subirrigatie met gezuiverd
restwater van Bavaria

Hergebruik van industrieel restwater voor de watervoorziening van de landbouw



Praktijkproef subirrigatie met gezuiverd restwater van Bavaria

KWR 2018.089 | September 2018

Opdrachtnummer
400995

Projectmanager
ir. M. (Martin) van der Schans

Kwaliteitsborger
prof.dr.ir. J.P.M. (Flip) Witte

Auteurs
dr.ir. R.P. (Ruud) Bartholomeus, dr.ir. A.H. (Arnaut) van Loon, dr.ir. M.H.J. (Marjolein) van Huijgevoort

Verzonden aan
Dit rapport is verzonden aan Bavaria, ZLTO en de begeleidingscommissie van het project Boer Bier Water. Het rapport is openbaar.

Deze activiteit is mede gefinancierd met PPS-financiering uit de Toeslag voor Topconsortia voor Kennis en Innovatie (TKI's) van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat.

Jaar van publicatie

2018

Meer informatie
dr.ir. R.P. (Ruud) Bartholomeus
T 0306069530
E ruud.bartholomeus@kwrwater.nl

Postbus 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

KWR 2018.089 | September 2018 © KWR

Alle rechten voorbehouden.

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

Samenvatting

Gewasopbrengsten in de landbouw zijn in belangrijke mate afhankelijk van de hoeveelheid vocht in de wortelzone. 's Zomers is er dor een neerslagtekort vaak een gebrek aan bodemvocht waardoor opbrengsten terug kunnen lopen, als er niet beregend wordt. Zonder adaptieve maatregelen om schaderisico's door droogte te beperken zullen watertekorten als gevolg van het veranderende klimaat verder toenemen. Ondanks het watertekort in de landbouw, lozen industrieën restwater op het oppervlaktewater. Door het restwater niet ongebruikt af te voeren, maar te benutten voor droogtebestrijding, kunnen watertekorten worden verminderd. Brouwerij Bavaria wil samen met agrariërs en waterbeheerders haar gezuiverd restwater (effluent) inzetten om het watertekort in de landbouw te verminderen en daarmee bijdragen aan een economisch gezonde agrarische sector. Hergebruik van het restwater van Bavaria voor de landbouw is onderdeel van het initiatief 'Boer Bier Water' (www.boerbierwater.nl). In samenwerking met TKI-Watertechnologie is concreet invulling gegeven aan het hergebruik van restwater van Bavaria door nabijgelegen agrarische bedrijven. Hiertoe is bij wijze van proef een deel van het restwater via samengestelde, peilgestuurde drainage geïnfiltreerd in een landbouwbodem. Het doel van deze proef was op basis van praktijkonderzoek de technische haalbaarheid van hergebruik van restwater door agrariërs en met behulp van peilgestuurde drainage te bepalen. De proef had tevens tot doel praktijkervaring op te doen met het hergebruik van restwater door agrariërs, zodat meer inzicht wordt verkregen in de factoren die een succesvol hergebruik mogelijk maken.

Dit rapport beschrijft de bevindingen van een veldproef voor de periode 2015 t/m 2017, waarbij zowel ingegaan wordt op de technische/inhoudelijke aspecten als op inpassing van de methode in het beleid. Uit de veldproef blijkt dat met subirrigatie met gezuiverd restwater de grondwaterstand dusdanig verhoogd kan worden, dat de vochtvoorziening van het gewas verbetert. Voorafgaand aan de proef daalde de grondwaterstand in het proefperceel tot 2 à 3 m -mv. Tijdens de proef kon met subirrigatie een grondwaterstand van 0.5 à 1.5 m -mv worden gehandhaafd. De verhoging van de grondwaterstand had tevens een positief (verhogend) effect op het bodemvochtgehalte en de vochtvoorziening van het gewas. Op de schaal van de proef heeft subirrigatie geen vernattend effect op nabijgelegen percelen en diepere watervoerende lagen. Het effect van subirrigatie is lokaal groot en dempt in de omgeving snel uit. Naarmate gedurende een langere periode subirrigatie met gezuiverd restwater plaatsvindt, neemt de infiltratieweerstand van het systeem toe door verstopping, waardoor de gewenste grondwaterstand niet altijd gerealiseerd kan worden. De verstopping wordt waarschijnlijk veroorzaakt door opgebouwde biomassa. Afwisselend infiltreren en draineren kan een passende maatregel zijn om verstopping van het systeem te beheersen. De hoge natriumconcentratie in het effluent is een belangrijk aandachtspunt in verband met mogelijke ophoping in de bodem en zoutschade. Infiltratie van het effluent leidt tot periodiek hoge fosfaatconcentraties in het ondiepe grondwater. Waarschijnlijk is dit het gevolg van mobilisatie van fosfaat uit de bodem, zodat ophoping van fosfaat geen knelpunt vormt.

Het is van belang inzicht te krijgen in de kansen en risico's van hergebruik van effluentstromen ('recycled water') voor de zoetwatervoorziening. Het inzetten van gezuiverd restwater van industrieën en RWZI's voor droogtebestrijding is in Nederland een nog weinig toegepaste, maar opkomende vorm van (klimaat)adaptatie om te anticiperen op toenemende watertekorten in de landbouw. Het initiatief van Bavaria om restwater terug te geven aan de omgeving is hiervan een goed voorbeeld en draagt bij aan de benodigde kennisopbouw op dit thema.

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Aanleiding en achtergrond	1
1.2	Doelstelling en afkadering	2
1.3	Leeswijzer	3
2	Ontwerp van het subirrigatiesysteem	5
2.1	Casusomschrijving	5
2.2	Gebiedsbeschrijving en bodemopbouw	6
2.3	Ontwerp en aansturing van het subirrigatiesysteem	9
2.4	Synthese	11
3	Monitoring en meetresultaten	13
3.1	Meetopstelling	13
3.2	Waterkwantiteit	16
3.3	Waterkwaliteit	24
3.4	Synthese	31
4	Discussie en conclusies	33
4.1	Technisch/inhoudelijke aspecten	33
4.2	Inpassing in het beleid	34
5	Referenties	37
I	Ontwerp subirrigatiesysteem	39
I.1	Bodemopbouw en waterhuishouding	40
I.2	Ontwerp subirrigatie	45
II	Kolomproef: verstopping systeem	65
II.1	Inleiding	65
II.2	Aanpak	65
II.3	Resultaten	69
II.4	Conclusies	70
III	Meetresultaten veldproef 2016 en 2017 (selectie)	73
III.1	Infiltratiehoeveelheid	73
IV	Modelsimulaties met SWAP	85
V	Gevolgen van subirrigatie met effluent voor de grondwaterkwaliteit	91
V.1	Inleiding	91
V.2	Kwaliteit van het effluent	93
V.3	Grondwaterkwaliteitsveranderingen als gevolg van subirrigatie	97
V.4	Conclusies en aanbevelingen	111

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en achtergrond

Landbouwopbrengsten zijn in belangrijke mate afhankelijk van de hoeveelheid vocht in de wortelzone. 's Zomers ontstaat vaak een gebrek aan bodemvocht waardoor landbouwopbrengsten teruglopen. Gemiddeld gaat het om een jaarlijkse schadepost van 50 miljoen euro voor het zuidelijk zandgebied. Als het waterbeheer niet verandert, zullen, doordat het klimaat steeds grilliger wordt, watertekorten verder toenemen. De droogteschade kan daarmee oplopen tot 140 miljoen euro per jaar (Klijn et al., 2011). Adaptieve maatregelen om schaderisico's door droogte te beperken zijn dus van groot economisch belang.

Ondanks het watertekort in de landbouw, lozen industrieën restwater op het oppervlaktewater, zodat het ongebruikt wordt afgevoerd naar de zee. Door het restwater niet ongebruikt af te voeren, maar te benutten voor droogtebestrijding, kunnen watertekorten worden verminderd. Brouwerij Bavaria wil samen met agrariërs en waterbeheerders haar gezuiverd restwater (effluent) inzetten om het watertekort in de landbouw te verminderen en daarmee bijdragen aan een economisch gezonde agrarische sector. Hergebruik van het restwater van Bavaria voor de landbouw is onderdeel van het initiatief 'Boer Bier Water' (www.boerbierwater.nl), een samenwerking tussen Bavaria, lokale boeren en tuinders, ZLTO, gemeente Laarbeek, Waterschap Aa & Maas, Agrifirm en de lokale Rabobank.

In samenwerking met TKI-Watertechnologie is concreet invulling gegeven aan het hergebruik van restwater van Bavaria door nabijgelegen agrarische bedrijven. Hiertoe is bij wijze van proef een deel van het restwater via samengestelde, peilgestuurde drainage geïnfiltreerd in een landbouwbodem (Figuur 1-2). Het doel van deze proef was om door een onafhankelijke partij op basis van praktijkonderzoek de technische haalbaarheid van hergebruik van restwater door agrariërs en met behulp van peilgestuurde drainage te bepalen. De proef had tevens tot doel praktijkervaring op te doen met het hergebruik van restwater door agrariërs, zodat meer inzicht wordt verkregen in de factoren die een succesvol hergebruik mogelijk maken.

Peilgestuurde drainage en subirrigatie

Peilgestuurde drainagesystemen (Figuur 1-1) zijn ontwikkeld om zowel water af te kunnen voeren als vast te kunnen houden (o.a. Stuyt, 2013). Ze hebben als bijkomend voordeel dat het mogelijk is om de grondwaterstand en de bodemvochtcondities in een perceel actief te beheren (Ayars et al., 2006; Bartholomeus et al., 2015). De mogelijkheid voor zulke actieve optimalisatie van de bodemvochtgehaltes hangt echter af van de beschikbaarheid van water. Extra mogelijkheden voor actief beheer van de watervoorziening van het gewas ontstaan echter als water actief aangevoerd kan worden en via peilgestuurde drainage kan infiltreren. We noemen dit subirrigatie en heeft als doel de grondwaterstand en het bodemvochtgehalte (via capillaire nalevering) te verhogen.



Figuur 1-1: Systeem voor samengestelde peilgestuurde drainage, met een regelput, verzamelleiding en drainagebuizen (Bron Agrobeheercentrum.be).

1.2 Doelstelling en afkadering

De doelen van dit rapport zijn om (1) een praktische bijdrage te leveren aan het hergebruik van restwater van Bavaria door agrariërs in de omgeving van de brouwerij, en (2) op basis van praktijklessen bij te dragen aan een betere benutting van industrieel restwater door agrariërs in het algemeen. Hiertoe wordt in dit rapport beschreven hoe de praktijkproef met subirrigatie is ontworpen, wat de effecten op grondwaterstand, vochtbeschikbaarheid voor het gewas en grondwaterkwaliteit zijn, en welke leerpunten daaruit volgen. Specifiek komen daarbij de volgende onderwerpen aan bod:

- Het ontwerp van de proefopstelling voor subirrigatie van restwater van Bavaria via samengestelde peilgestuurde drainage.
- De effecten van subirrigatie op de waterkwantiteit (grondwateraanvulling, grondwaterstanden, bodemvocht, afvoer) met specifieke aandacht voor de hoeveelheid effluent die jaarlijks geïnfilteerd kan worden en de hoeveelheid die bijdraagt aan de vochtvoorziening van het gewas.
- Het effect van de samenstelling van het restwater op de infiltratiecapaciteit van het systeem.
- Het effect van infiltratie van restwater op de chemische samenstelling van het grondwater.
- 'Lessons Learned' over 1) het inrichten, aansturen en beheren van een subirrigatiesysteem en 2) de technische en financiële haalbaarheid van deze oplossing.

1.3 Leeswijzer

De hoofdtekst van dit rapport bevat de belangrijkste bevindingen van de proef met subirrigatie met restwater van Bavaria. Uitgebreide achtergrondinformatie is verwerkt in de bijlagen. Hoofdstuk 2 beschrijft de casus en het ontwerp van het subirrigatiesysteem. Hierbij staan de bodemopbouw van de regio en het perceel centraal. De interpretatie van de meetresultaten is beschreven in hoofdstuk 3. Er wordt aandacht besteed aan zowel waterkwantiteits- als waterkwaliteitsaspecten. Hoofdstuk 4 bevat de discussie en conclusies, waarbij onderscheid wordt gemaakt in de technisch/inhoudelijke aspecten en de inpassing van subirrigatie met gezuiverd restwater in het beleid.



Figuur 1-2: Gezuiverd restwater wordt vanuit de afvalwaterzuivering van Bavaria (groen) in drie richtingen afgevoerd: via een vijzel wordt het water direct aangevoerd naar het landbouwperceel van dhr. Van Dijk (rood) en naar het wilhelminakanaal (donkerblauw). Het kanaal dient hierbij als transportmiddel om ook percelen op grotere afstand van de zuivering van water te voorzien. De (traditionele) lozing op de Goorloop (lichtblauw) wordt zoveel mogelijk beperkt.

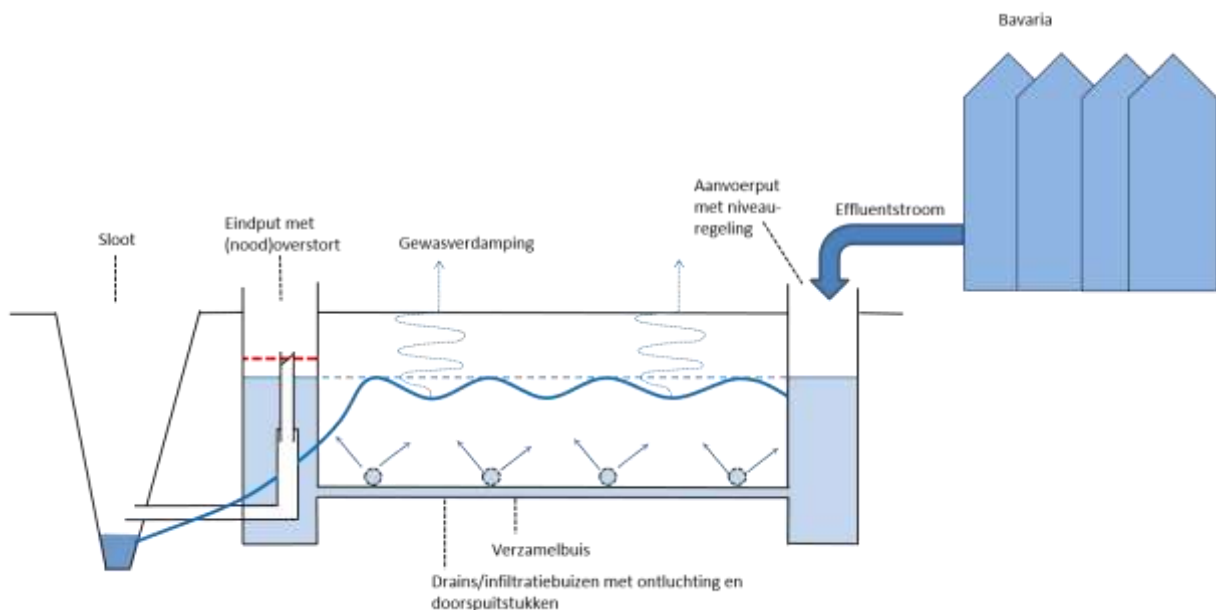
2 Ontwerp van het subirrigatiesysteem

2.1 Casusomschrijving

Nabij de brouwerij van Bavaria is in een nabijgelegen landbouwperceel een systeem voor subirrigatie, met restwater van de waterzuivering van Bavaria als aanvoerbron, gerealiseerd en getest (Figuur 1-2). Het betreft hier een perceel dat relatief hoog gelegen is, met in de zomers grondwaterstanden dieper dan twee meter beneden maaiveld (Figuur 2-3). Daarmee is dit een proef waarvan op voorhand niet te zeggen is of deze zal leiden tot een verbeterde vochtvoorziening voor het gewas, en daarmee ook succesvol zal zijn.

Ten behoeve van de proef is in een 8.5 ha groot graslandperceel van dhr. Wilfried van Dijk een stelsel van drainagebuizen aangelegd. De drainagebuizen zijn vertakt en onderling met elkaar verbonden via een verzamelleiding. Het begin van de verzamelleiding is verbonden met een voorraadreservoir dat op peil wordt gehouden met effluent uit de zuivering van Bavaria en waarin een in te stellen niveau wordt nagestreefd door geautomatiseerd te sturen met de aanvoer. Het niveau in dit reservoir bepaalt het drainageniveau, waarmee de grondwaterstand in het perceel wordt gestuurd (Figuur 2-1). De eindput (Figuur 2-1) dient als overstort indien te hoge grondwaterstanden worden gerealiseerd als gevolg van overmatige neerslag. Door deze put open te zetten kan het subirrigatiesysteem ook voor drainage gebruikt worden. Uiteraard wordt de wateraanvoer vanuit Bavaria dan stopgezet.

Deze vorm van irrigatie is relatief nieuw in Nederland. Daarom is het succes van deze proef niet gegarandeerd, en is op voorhand niet te zeggen wat een optimale uitvoering is en wat de effecten op grondwaterstanden en chemie is. Het succes is namelijk afhankelijk van diverse factoren, waaronder het ontwerp van het drainagenetwerk, de kwaliteit van het effluent (verstoppingspotentie), de bodemeigenschappen, het waterbeheer van de omgeving en de wensen en eisen van de betreffende agrariër en de buren. Bovendien kunnen ook gewenste en ongewenste neveneffecten optreden. Een gewenst neveneffect kan een verbetering van de oppervlaktewaterkwaliteit van de Goorloop zijn, doordat het effluent gezuiverd wordt onder invloed van bodempassage. Negatieve neveneffecten zijn bijvoorbeeld waterschade op nabij- en laaggelegen percelen of achteruitgang van de milieuhygiënische condities in de bodem en het grondwater.



Figuur 2-1: Schematische weergave van het systeem voor subirrigatie met restwater van Bavaria.

2.2 Gebiedsbeschrijving en bodemopbouw

Voor het ontwerp van het subirrigatiesysteem en om in te schatten hoeveel water aangevoerd kan worden naar het perceel (jaarlijks, maar ook door het jaar heen), is de bodemkundige en hydrologische situatie van het proefperceel en het omliggende gebied van belang. Een uitgebreide beschrijving hiervan is gegeven in Bijlage I. De belangrijkste aspecten vatten we hier samen.

Het proefperceel ligt ten zuidoosten van Lieshout, ten noorden van het Wilhelminakanaal, ten westen van de Zuid-Willemsvaart en ten oosten van de Goorloop (Figuur 1-2). Het oppervlaktewaterpeil in de Goorloop varieert tussen 12.5 en 13.6 m +NAP. Het waterpeil van het Wilhelminakanaal is vrij constant op 15 m +NAP. Figuur 2-2 geeft de hoogtekaart van het proefperceel en de nabije omgeving. Figuur 2-3 geeft een dwarsdoorsnede van de Goorloop naar het midden van het proefperceel, met daarin schetsmatig aangegeven de Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand (GHG) en Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (GLG), verkregen uit de wateratlas van Noord Brabant (2016). In de situatie zonder wateraanvoer/subirrigatie is er in de zomerperiode geen drainage vanuit het proefperceel naar het kanaal; de grondwaterstand in de zomer is in het perceel immers lager dan de waterstand van het kanaal.

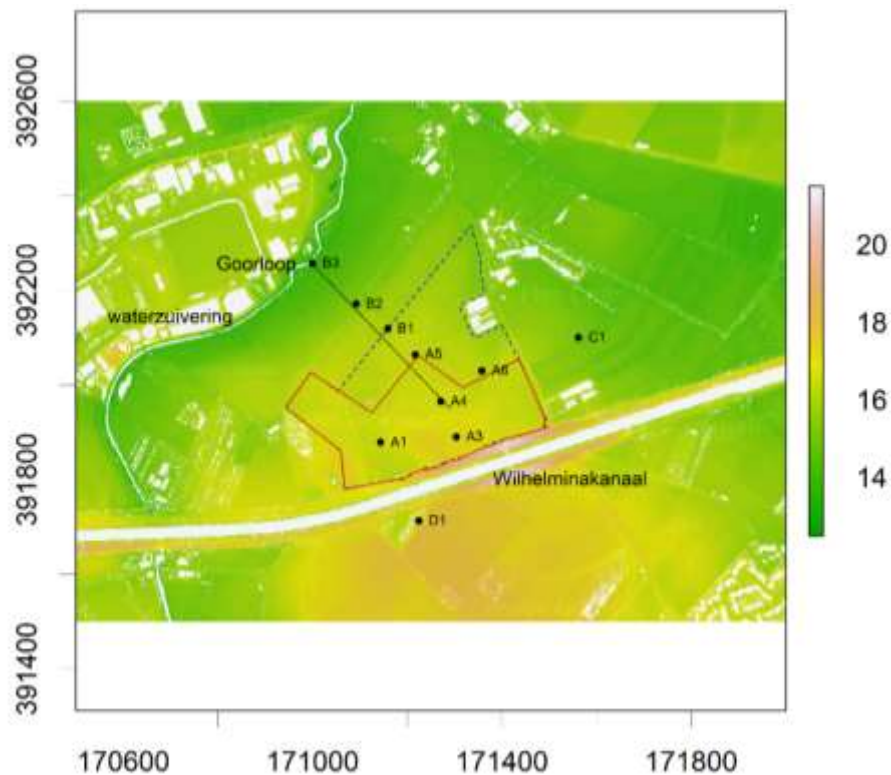
In het gebied waarin het proefperceel ligt worden drie watervoerende pakketten onderscheiden (Broks, 1989): het topsysteem (0–30 m-mv) bestaat uit de Nuenen Groep, een sterk gelaagd pakket zand-, leem- en veenafzettingen. Zeker op lokale schaal kunnen binnen dit pakket verschillende watervoerende lagen bestaan. Het middeldiepe pakket (30–70 m -mv) bestaat uit de grofzandige afzettingen van de Formaties van Sterksel en Veghel. Aan de basis daarvan ligt een scheidende laag bestaande uit de kleien van Kedichem en Tegelen, waaronder zich het diepe pakket bevindt, dat bestaat uit grofzandige en grindafzettingen van de Formatie van Tegelen en de Kiezeloöliet-Formatie (Jalink et al., 2000).

De Nuenen Groep is zeer heterogeen (Schrama & Jalink, 1998). Op de meeste plaatsen komen in de Nuenen Groep, naast zandlagen, leem- en/of veenlagen (ondiep) voor. Plaatselijk bestaat de Nuenen Groep geheel uit zand. Omdat op de meeste plaatsen ondiep slecht doorlatende leem- en/of veenlagen

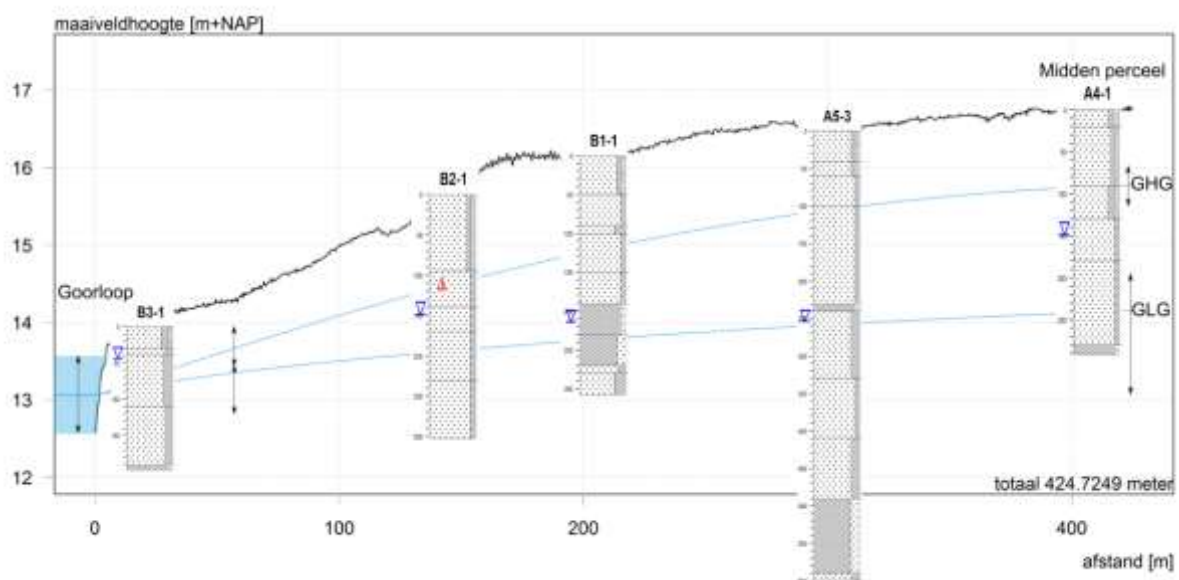
voorkomen, mag verwacht worden dat in het bovenste deel van de Nuenen Groep veel lokale en laterale grondwaterstroming plaatsvindt (Schrama & Jalink, 1998); wegzijging naar diepe watervoerende pakketten is dan beperkt.

De bodemopbouw en de aanwezigheid van de leemlagen uit de Nuenengroep is van belang voor de infiltratiecapaciteit en het effect van subirrigatie op de verhoging van de grondwaterstand. Uit lokaal bodemonderzoek binnen dit project is gebleken dat er in het proefperceel sprake is van een goed doorlatende bovengrond (bovenste 1 á 1.5 m), met daaronder een relatief slecht doorlatende ondergrond (leemlagen). Voor subirrigatie is dit een gunstige uitgangssituatie.

Uit een eerdere verkenning (Anonymous, 2014), waarin gebruik werd gemaakt van kennis uit een regionaal hydrologische model, werd geconcludeerd dat de bodem en ondergrond bestaat uit een (uniform) zandpakket, waarin weliswaar veel water geïnfiltreerd kan worden, maar waar het water ook snel zal wegzakken. De voor het gewas benodigde verhoging van de grondwaterstand leek op basis van deze analyse niet realiseerbaar. Bovenstaande, meer gedetailleerde kennis van de bodemopbouw, geeft echter aan dat de werkelijke bodemopbouw veel gunstiger is dan de schematisatie die gebruikt is in het regionale hydrologische model.



Figuur 2-2: Maaiveldhoogte (m +NAP) van het totale perceel (blauw en rood omrand) en het proefperceel (rood omrand, 8.5ha) en de omgeving. Aangegeven zijn tevens de locaties waarvoor bodembeschrijvingen zijn opgesteld. De lijn geeft het transect van de Goorloop naar het midden van het perceel (Figuur 2-3).



Figuur 2-3: Dwarsdoorsnede van de Goorloop naar het midden van het perceel (transect zie Figuur 2-2) met daarin de globale locaties van de bodemopbouw (gestippeld = zand, schuin gearceerd = leem) in dit transect en een schets van de GHG en GLG in de situatie zonder subirrigatie.

2.3 Ontwerp en aansturing van het subirrigatiesysteem

Het subirrigatiesysteem (Figuur 2-1, Figuur 2-4, Figuur 2-5) bestaat uit:

- wateraanvoer vanuit Bavaria naar aanvoerput/reservoir op het perceel met regelbaar waterniveau;
- drainage/irrigatiesysteem: samengestelde peilgestuurde drainage, bestaande uit een verzamelleiding, drainage/infiltratiebuizen en een eindput (zie Figuur 1-1).

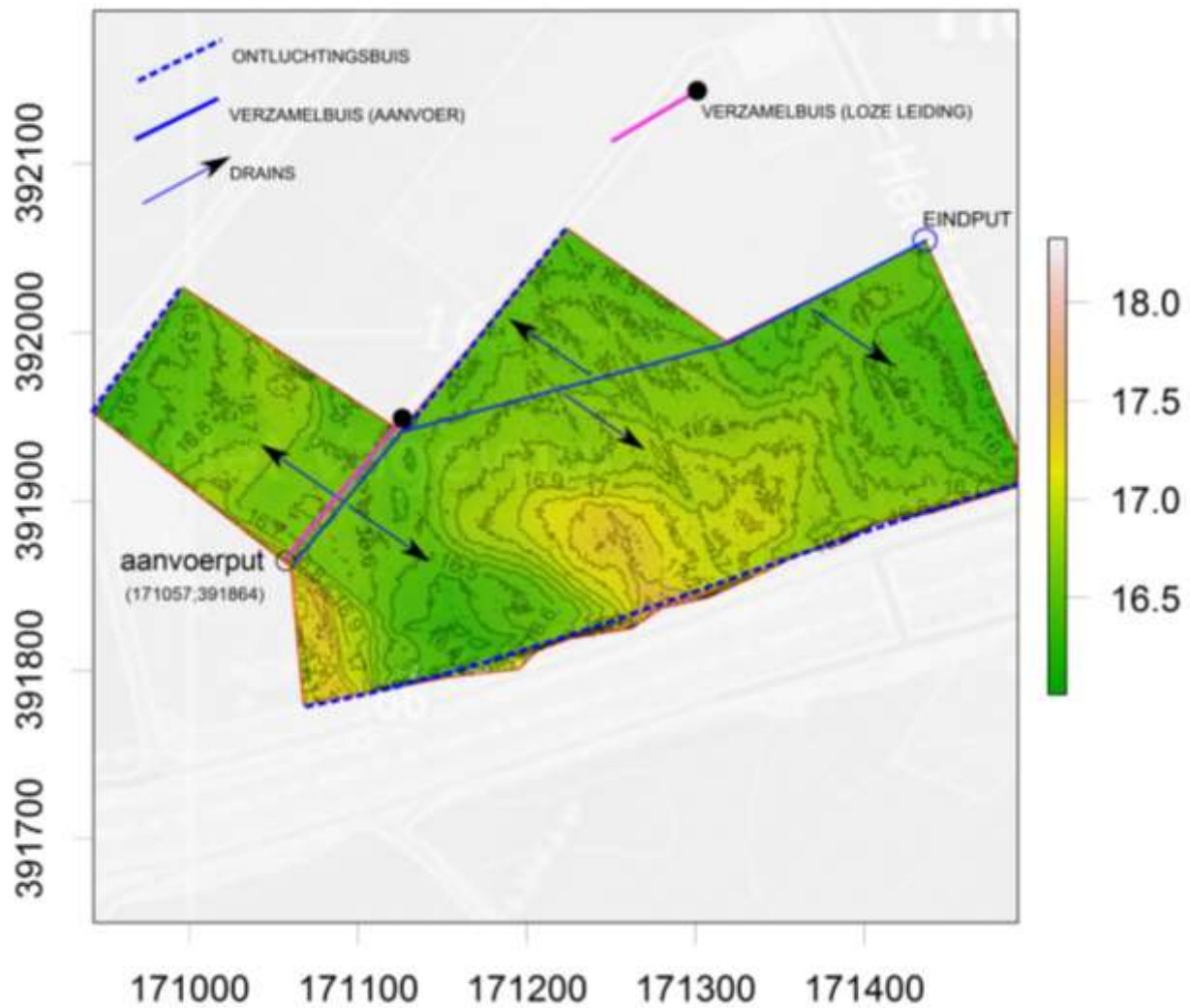
Er is voor gekozen geen subirrigatie aan te leggen in het lage deel rondom de stal. Daardoor wordt de kans op eventuele natschade aan het gewas beperkt en kan er een hoger subirrigatieniveau ingesteld worden in de rest van het perceel. De afstand tussen de drainage/infiltratiebuizen is 10 m. In bijlage I is in detail uitgewerkt hoe tot deze afstand is gekomen. Aan de uiteindes van de drainage/infiltratiebuizen zijn ontluchtingsbuizen geplaatst, om te voorkomen dat luchtinsluiting waterstroming blokkeert en de werking van het systeem beperkt.

In het ontwerp was de onderzijde van de verzamelleiding (diameter 160 mm) gepland op 15.4 m +NAP en de drains, die aftakken van de verzamelleiding, op 15.5 m +NAP. In de uitvoering is door het drainagebedrijf om praktische redenen afgeweken van de beoogde diepteligging: het systeem is 0.12 m ondieper komen te liggen (mondelinge mededeling drainagebedrijf). De drains/infiltratiebuizen liggen nog steeds in de goed doorlatende ondergrond.

Het aanvoereservoir heeft volume van 20m³, waarin het waterpeil ingesteld kan worden vanaf de waterzuivering van Bavaria. Dit waterpeil levert de aanvoerdruk op het buizenstelsel en bepaalt het subirrigatieniveau (stijghoogte in drainage/infiltratiebuizen) dat in het systeem gehanteerd wordt. De gewenste wateraanvoer naar het proefperceel ligt tussen 1 en 10 mm/d (3.5-35 m³/uur). Bavaria kan maximaal 47 m³/uur leveren door de aanvoerbuis (160 mm diameter).

In de praktijkproef wordt het waterniveau zo ingeregeld worden dat droogteschade op de hogere delen wordt beperkt, zonder natschade aan de lagere delen te veroorzaken. Er kan ook nog voor worden gekozen in de 'laagtes' geen water aan te voeren. Het hoogteverloop van het perceel zorgt er in ieder geval voor dat de diepte van de grondwaterstand t.o.v. maaiveld niet overal gelijk zal zijn

De kritieke stijgafstand voor zwak lemig fijn zand is theoretisch 110 cm (90-140 cm); dit wil zeggen dat de grondwaterstand binnen 110 cm van de onderkant van de wortelzone moet zitten om het gewas via capillaire nalevering dagelijks van 2mm vocht te voorzien. Bij deze flux wordt aangenomen dat er geen verdrogingsverschijnselen aan het gewas zullen optreden. Dit zou betekenen, uitgaande van een worteldiepte van 40 cm, dat op het hoogste deel van het perceel (17.3m+NAP) de grondwaterstand 15.8 m+ NAP mag zijn. Op de laagste delen (16.3 m +NAP) zou dit een grondwaterstand van 0.5 m -mv betekenen. Het is echter onzeker of de capillaire nalevering in zeer warme zomers ook nog voldoende is. Daarom is een wat ondiepere grondwaterstand gewenst. Echter, dit mag geen natschade veroorzaken in de lagere delen.



Figuur 2-4: Hoogtekaart van het proefperceel, met schets van het drainage/infiltratiesysteem. De verzamelleiding loopt van de put naar het pad en van daaruit midden door het perceel naar de eindput. Aan de uiteinden van de drains bevindt zich een ontluuchtingsbuis (3 stuks).



Figuur 2-5: Foto's van het systeem voor subirrigatie. Linksboven: Sleufloze aanleg van de drainage/infiltratiebuizen. Rechtsboven: verzamelleiding (geel) met daarop aangesloten drainage/infiltratiebuizen en controle/doorspuitstukken. Linksonder: aanvoerput/reservoir waarop zowel de aanvoerleiding vanuit Bavaria (in) als de verzamelleiding (uit) is aangesloten. Rechtsonder: Eindput met afvoer op de sloot. Deze voert alleen water af als de waterstand hoger is dan de ingestelde overstorthoogte. Dit is het geval bij overmatige neerslag, of bij drainage in de winterperiode (zonder wateraanvoer).

2.4 Synthese

- Voor subirrigatie is de lokale bodemopbouw van belang: een goed doorlatende bovengrond ter hoogte van de drainage/infiltratiebuizen met daaronder weerstand biedende lagen die snelle wegzijging van het aangevoerde water voorkomen.
- Model versus werkelijkheid: om het succes van hydrologische maatregelen in te schatten kan niet alleen worden vertrouwd op kennis uit regionale hydrologische modellen. De schematisatie van de bodem en ondiepe ondergrond van zulke modellen is vaak te grof om de effectiviteit van drainage/infiltratiemaatregelen op lokale schaal in te schatten. Kennis van de lokale omstandigheden is cruciaal om geschiktheid van percelen en voorwaarden voor het ontwerp van systemen te kennen.
- Ontwerp versus praktijk: het drainage/infiltratiesysteem is ondieper aangelegd dan in het ontwerp aangegeven, wat de mogelijkheden om het waterniveau actief te sturen beperkt.

3 Monitoring en meetresultaten

In dit hoofdstuk geven we een overzicht van de meetopstelling en de resultaten van de metingen tot en met oktober 2017. We gaan hierbij in op zowel waterkwantiteits- als waterkwaliteitsaspecten.

3.1 Meetopstelling

Voor de monitoring van de effecten van subirrigatie met restwater is in 2015, een half jaar voor de start van de proef, een meetnet van peilbuizen ingericht. Deze peilbuizen liggen op het proefperceel, of op percelen die daaraan grenzen (Figuur 2-2). Direct naast het proefperceel is een orgeltje peilbuizen ingericht met meetfilters op drie diepten die in het veld zijn vastgesteld op basis van de diepteligging van leemlagen. Met deze proefopstelling wordt zowel informatie vergaard over de lokale effecten als over uitstralingseffecten naar de omgeving van subirrigatie. Als gevolg van de aanleg van het subirrigatiesysteem moest een aantal van de peilbuizen worden verwijderd. Deze peilbuizen zijn weer teruggeplaatst zodat ze midden tussen twee drainage/infiltratiebuizen in liggen. Daarnaast is toen een extra meetpunt geplaatst direct naast een drainage/infiltratiebuis. Zowel de ligging van het subirrigatiesysteem als de monitoringspunten zijn weergegeven in Figuur 3-1.

Voor de analyse van de effecten van de subirrigatie zijn neerslag, aanvoerdebieten, grondwaterstanden, bodemvochtgehalten en grondwatersamenstelling gemeten. De meetopstelling van deze onderdelen en de wijze van interpretatie van de meetresultaten wordt hieronder kort toegelicht.

Neerslag is elke 15 minuten geregistreerd door een neerslagmeter bij locatie A4 (Figuur 3-1). Neerslag en het aangevoerde effluent vormen gezamenlijk de grondwateraanvulling, waarvan een deel gaat naar de vochtvoorziening van het gewas.

De hoeveelheid effluent (debiet) die naar het proefperceel wordt aangevoerd is continu gemeten bij het verdeelwerk op het Bavaria-terrein. Deze aanvoerhoeveelheid is gelijk aan de infiltratiehoeveelheid, zolang er geen water wordt afgevoerd via de put aan het einde van het irrigatienetwerk. In principe is daar geen sprake van, maar ter controle is in de regelput het waterniveau met een frequentie van zes uur gemeten, en worden wijzigingen in het drainageniveau gedocumenteerd. Zodra het waterniveau groter of gelijk aan de drainagehoogte is, is sprake van afvoer.

Grondwaterstanden zijn op tien locaties geautomatiseerd (met drukopnemers) en handmatig (ten behoeve van correctie van de drukopnemergegevens) gemeten. Vijf van deze locaties (B, C en D, Figuur 3-1) bevinden zich op nabijgelegen percelen ten behoeve van het monitoren van uitstralingseffecten die mogelijk kunnen leiden tot natschade, maar ook een verbetering van de waterhuishouding tot gevolg kunnen hebben. De overige vijf locaties liggen verspreid over het proefperceel (A, Figuur 3-1). Op locatie A5 zijn tevens stijghoogten op twee diepten gemeten om duidelijkheid te krijgen over de interactie van het freatische grondwater met diepere watervoerende lagen en eventuele daarmee samenhangende uitstralingseffecten. Op locatie A4 is de grondwaterstand (samen met het Elektrisch Geleidingsvermogen EGV en de temperatuur van het grondwater) gemeten, zowel direct naast als midden tussen twee drainage/infiltratiebuizen, om inzicht te krijgen in het verloop van de grondwaterstand tussen twee buizen. De grondwaterstanden en stijghoogten zijn minimaal elke zes uur geautomatiseerd gemeten en

elke twee tot acht weken handmatig. De monitoring is in 2015 gestart en is gedurende de doorlooptijd van de veldproef voortgezet.

Bodemvochtgehalten geven een directere indicatie voor de watervoorziening van gewassen dan grondwaterstanden, maar ze zijn wat lastiger te meten. Daarom zijn op locatie A4, midden tussen en naast drainage/infiltratiebuizen, vochtsensoren op 20, 40 en 60 cm-mv geïnstalleerd (Figuur 3-2). De sensoren registreren het vochtgehalte elke 15 minuten, en worden dagelijks geautomatiseerd uitgelezen via een telemetrieservice. De meetpunten zijn nabij peilbuizen gekozen, zodat de relatie tussen grondwaterstand en vochtgehalte in beeld komt.

De grondwatersamenstelling is gemeten om inzicht te krijgen in het effect van de infiltratie van restwater op de kwaliteit van het grondwater. Hierbij ligt de focus op de ophoping en uitspoeling van voedingsstoffen (stikstof en fosfor), omdat deze milieuhygiënische effecten op grond- en oppervlaktewater een potentiële faalfactor voor het hergebruik van effluent vormen. Deze kwaliteitseffecten kunnen het gevolg zijn van extra aanvoer van stoffen die in het restwater zitten, of doordat de aanvoer van restwater leidt tot het in oplossing gaan van stoffen die aan de bodem gebonden zijn. Waar en met welke snelheid deze effecten zich voltrekken is o.a. afhankelijk van de verspreiding van het restwater, de chemische eigenschappen van de bodem en ondergrond (zoals zuurstofgehalte) en de interacties met de bodem (zoals ionenuitwisseling).

De grondwatersamenstelling is gemeten op zes gericht gekozen locaties, die verspreid liggen over drie bemonsteringspunten, namelijk:

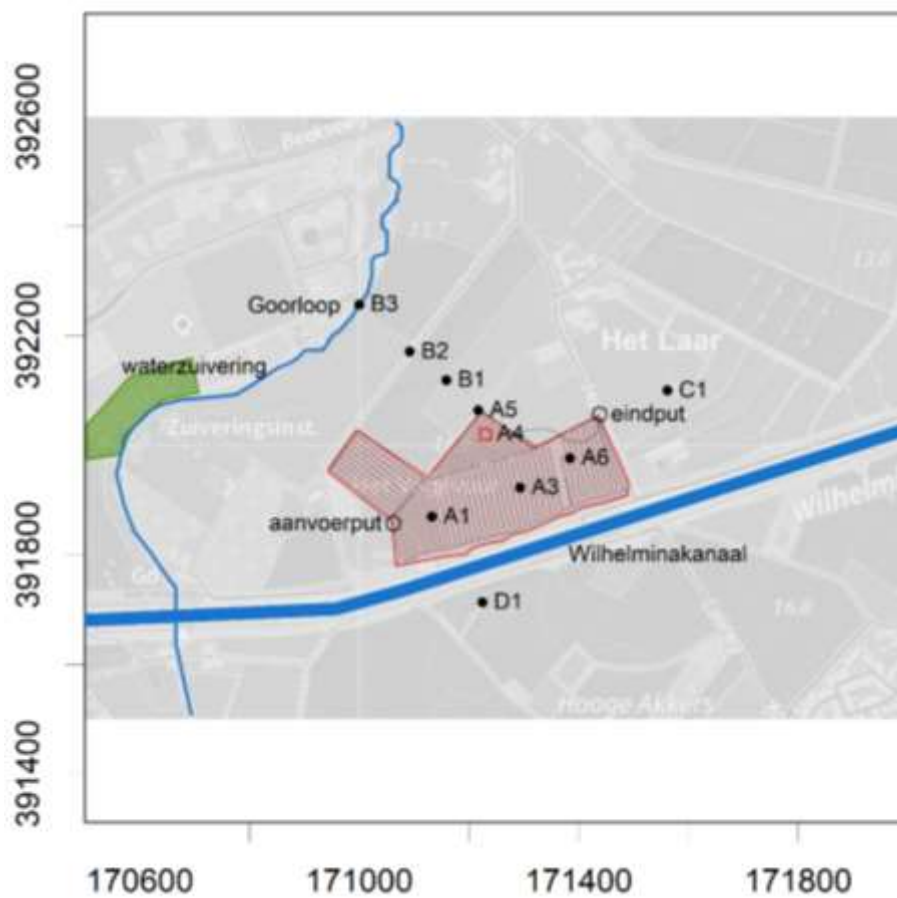
- (1) Op twee locaties, tussen en naast een drain, ter plaatse van meetpunt A4,
- (2) Op drie locaties, op verschillende diepten, ter plaatse van meetpunt A5, en
- (3) Op één locatie ter plaatse van meetpunt B1.

Gezien de afstand van meetpunt B1 tot het proefperceel is de verwachting dat deze locatie niet wordt beïnvloed door de aanvoer van restwater. Dit meetpunt dient daarom, net als het effluent, als referentie voor de andere meetpunten. Met het gebruik van referentiemetingen kan het effect van wateraanvoer eenduidiger worden gescheiden van andere effecten die anders ook hadden opgetreden.

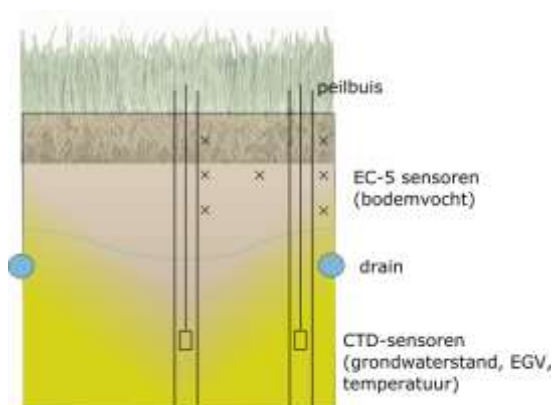
De zes geselecteerde meetfilters zijn gedurende de periode 2016-2017 op vier gericht gekozen momenten bemonsterd, namelijk op:

- 23 juni 2016, een paar weken na de start van de eerste aanvoerperiode
- 20 september 2016, aan het einde van de eerste aanvoerperiode
- 10 april 2017, vlak voor de start van de tweede aanvoerperiode
- 25 september 2017, aan het einde van de tweede aanvoerperiode.

De monsters zijn met ICP geanalyseerd en de resultaten zijn gevalideerd en geïnterpreteerd met behulp van Hydrogeochemical (Stuyfzand, 2017).



Figuur 3-1: Ligging systeem voor subirrigatie en monitoringspunten. Bij alle monitoringspunten A-D zijn peilbuizen geïnstalleerd en worden stijghoogtes gemeten. Bij A5 gebeurt dit op 3 dieptes. Bij A4 is een uitgebreide meetopstelling ingericht (Figuur 3-2).



Figuur 3-2: Schematische opstelling van bodemvocht- en CTD-sensoren direct naast en tussen twee drainbuizen. Deze opstelling is ingericht bij 'A4' in Figuur 3-1. Op deze locatie is tevens een neerslagmeter geïnstalleerd.

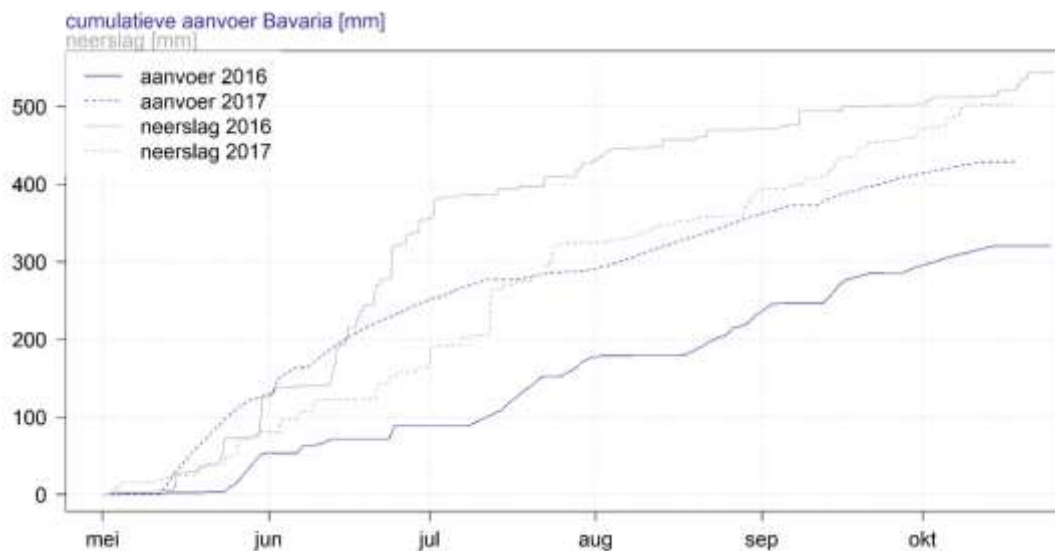
3.2 Waterkwantiteit

De monitoringsresultaten zijn uitgebreid beschreven in memo's voor zowel 2016 als 2017 welke zijn samengebracht in Bijlage III. Deze bijlage bevat grafieken van gemeten aanvoerdebieten, grondwaterstanden, stijghoogtes en bodemvochtgehaltes, inclusief toelichting en interpretatie. In deze paragraaf vatten we de belangrijkste bevindingen samen.

3.2.1 Infiltratiehoeveelheid

Figuur 3-3 geeft de gecumuleerde neerslag op en de wateraanvoer naar het perceel voor zowel 2016 als 2017. In totaal is in 2016 ongeveer 320 mm ($\pm 28.000 \text{ m}^3$) water aangevoerd. Opgemerkt moet worden dat bij aanvang van de proef de debietmeters nog niet operationeel waren. Vanwege de weersomstandigheden en enkele storingen, heeft de wateraanvoer enkele keren stilgelegen. Op dagbasis varieert de wateraanvoer tussen 3 en 10 mm/d. De benodigde hoeveelheid water is onder meer afhankelijk van de gewenste stijging van de grondwaterstand, ofwel het verschil in waterniveau in het aanvoerreservoir (op afstand in te stellen) en de grondwaterstand in het perceel. In 2016 is het niet gelukt om langdurig in een aaneengesloten periode water aan te voeren.

In 2017 is over de gemeten periode ongeveer 430 mm ($\pm 36.500 \text{ m}^3$) water aangevoerd; dit is aanzienlijk meer dan in 2016. Gezien de weersomstandigheden in de zomer van 2016 (extreem nat) en het droge eerste deel van de zomer in 2017 was dit ook verwacht. Het verschil in neerslag tussen de zomer van 2016 en die van 2017 is goed te zien in de cumulatieve neerslag tijdens de periode van wateraanvoer. Eind juni 2016 was een totale neerslag bereikt van bijna 400 mm, terwijl de totale neerslag eind juni 2017 ongeveer 200 mm was. Vanaf de start van de subirrigatie in 2017 is daarom meteen meer water aangevoerd. In juni 2017 was al meer dan 10.000 m^3 water geïrrigeerd, terwijl deze hoeveelheid in 2016 pas halverwege juli werd bereikt. De variatie in de wateraanvoer op dagbasis in 2017 is vergelijkbaar met 2016, maar in 2017 zijn er langere periodes met een hogere aanvoer per dag.



Figuur 3-3: Cumulatieve neerslag en wateraanvoer vanuit de waterzuivering van Bavaria naar de aanvoerput op het perceel van Van Dijk voor 2016 en 2017. Begin mei 2016 werd wel water aangevoerd, maar waren de debietmetingen nog niet volledig operationeel. Enkele periodes is de wateraanvoer gestopt vanwege storingen of vanwege overvloedige neerslag (juni en juli 2016). In juli 2017 is aanvoer enkele periodes gestopt vanwege neerslag, In september 2017 is de aanvoer bewust stilgelegd bij wijze van proef.

3.2.2 Effect subirrigatie op gewasverdamping

Het doel van subirrigatie is om via een stijging van de grondwaterstand de vochtbeschikbaarheid voor het gewas te verbeteren. Dit moet leiden tot een hogere gewasverdamping (transpiratie) en hiermee een hogere gewasopbrengst. Het effect van subirrigatie op de gewasverdamping is niet direct gemeten (hiervoor zou immers een referentieperceel zonder een vorm van irrigatie nodig zijn), maar is via modelsimulaties inzichtelijk gemaakt. Hiervoor is gebruik gemaakt van het hydrologische model SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant, (Kroes et al., 2009)), dat de samenhangende processen in het bodem-plant-atmosfeer systeem op punt- tot veldschaal gedetailleerd beschrijft.

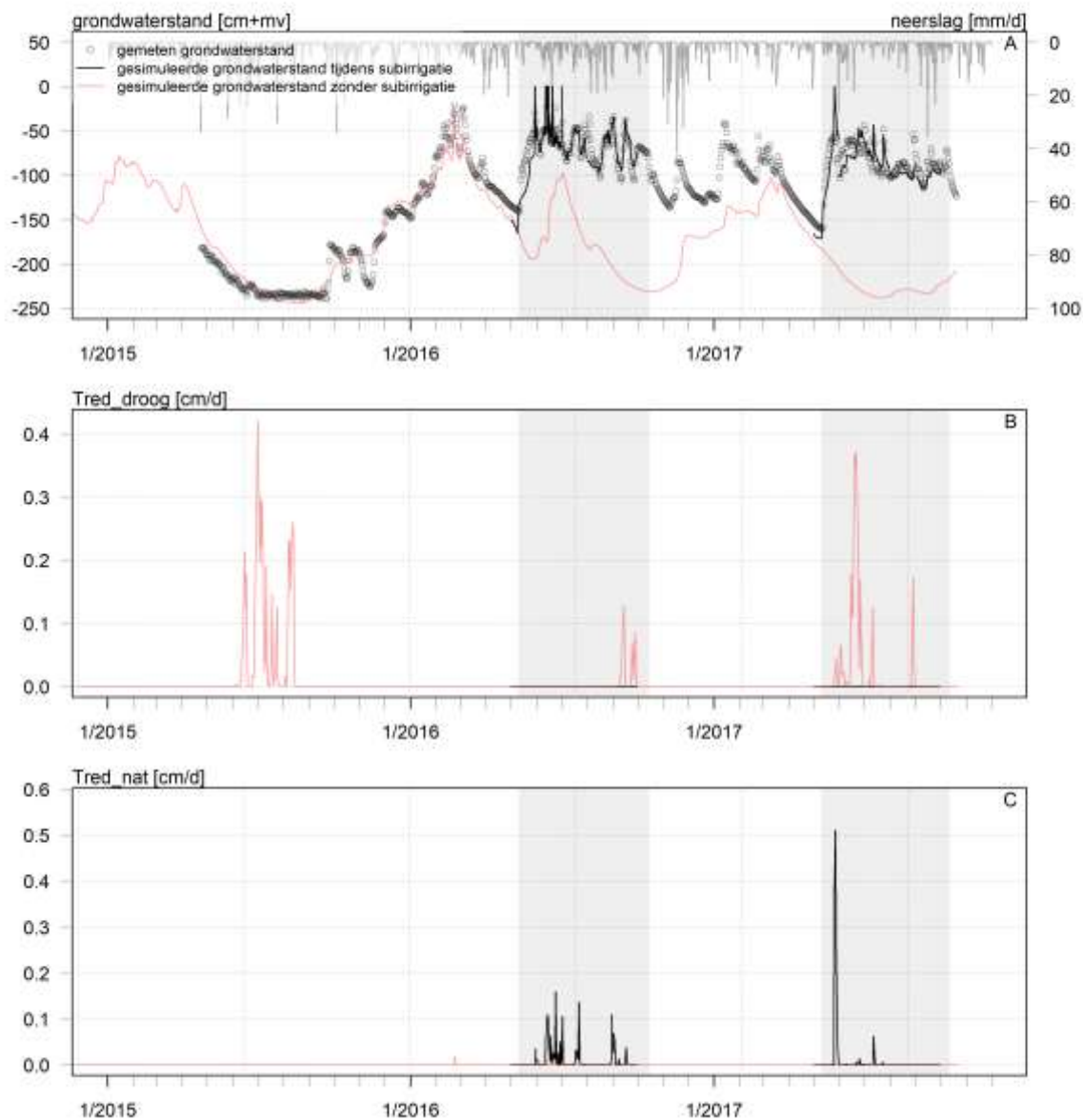
Figuur 3-4 geeft het verloop van de gemeten grondwaterstand in het midden van perceel voor zowel het jaar voorafgaand aan subirrigatie (2015) en twee seizoenen met subirrigatie (2016 en 2017). Op basis van de metingen is met SWAP een model voor het perceel gekalibreerd. De details van deze methode zijn beschreven in Bijlage IV. Met het gekalibreerde model zijn het grondwaterstandverloop én het effect van te droge of te natte condities op het gewas voor een situatie met en zonder subirrigatie met elkaar vergeleken.

Voor de situatie zonder subirrigatie geldt dat de grondwaterstand gedurende de zomer steeds dieper wegzakt (Figuur 3-4A), wat resulteert in te droge condities voor het gewas, als er niet aanvullend wordt beregend (Figuur 3-4B). Het effect van de extreme neerslag in juni/juli 2016 zichtbaar in een piek in de grondwaterstand.

Als gevolg van subirrigatie is zowel in 2016 als 2017 de natuurlijke daling van de grondwaterstand omgezet in een aanzienlijke stijging. Subirrigatie heeft geleid tot een grondwaterstand die 100–150 cm hoger is dan die zonder de maatregel was geweest. Belangrijker is dat deze hogere grondwaterstand de vochttekorten die zonder de maatregel zouden zijn ontstaan opheft, ook in het zeer droge eerste deel van de zomer van 2017 (Figuur 3-4B). In 2017 is door subirrigatie in totaal een vochttekort van 34 mm opgeheven. Voor het droge jaar 2017 geldt dus dat van de 430 mm aangevoerd water zo'n 8% ten goede komt aan het voorkómen van droogteschade aan het gewas. Opgemerkt moet worden dat vanwege de hoogteverschillen in het perceel sommige delen in werkelijkheid wat droger of juist wat natter zijn dan volgt uit de modelanalyse. De modelresultaten zijn representatief voor de 'gemiddelde' situatie op het perceel.

Van Dijk heeft de vochtvoorziening voor het gewas op de hoge delen van het perceel in de eerste helft van 2017 als onvoldoende ervaren en heeft aanvullend beregend. Het reliëf van het perceel is ongunstig om met subirrigatie over het hele perceel een goede vochtvoorziening te creëren. Dit was vooraf bekend; er is bewust gekozen om een systeem met één sturingsniveau aan te leggen.

De ondiepe grondwaterstanden maken de kans op te natte omstandigheden groter, zoals blijkt uit het optreden van transpiratiereductie door te natte omstandigheden (Figuur 3-4C). Hierbij moet worden opgemerkt dat de gesimuleerde piek van wateroverlast in 2017 de werkelijke situatie overschat, omdat een hogere grondwaterstand wordt gesimuleerd dan in werkelijkheid is waargenomen. In 2016 heeft subirrigatie in combinatie met hevige neerslag geleid tot meer wateroverlast dan dat zonder subirrigatie zou zijn opgetreden.



Figuur 3-4: A: neerslag en gemeten (bolletjes) en gesimuleerde grondwaterstand met subirrigatie (zwart) en zonder subirrigatie (rood). De simulaties zijn geldig voor de situatie zonder aanvullende berekening. Duidelijk zichtbaar is dat de grondwaterstand als gevolg van subirrigatie (in de grijs gearceerde periodes) aanzienlijk hoger is dan in de situatie zonder subirrigatie. B: gesimuleerde droogteschade (transpiratiereductie als gevolg van te droge condities; Tred_droog) voor de situatie met (zwart) en zonder (rood) subirrigatie/drainage. C: zelfde als B maar dan voor transpiratiereductie als gevolg van te natte omstandigheden (Tred_nat). De grijze vlakken geven de perioden met subirrigatie.

3.2.3 Verstopping van het systeem

Het effluent van Bavaria bevat slib, voedingsstoffen en heeft een relatief hoge temperatuur. Hierdoor is de waterkwaliteit suboptimaal wat betreft infiltreerbaarheid. Door de lage stroomsnelheden in het subirrigatiesysteem kunnen vaste bestanddelen die in het restwater aanwezig zijn zich ophopen, ze kunnen door micro-organismen worden geproduceerd, of door neerslagreacties ontstaan. Hierdoor kan de infrastructuur naar verloop van tijd verstopping, zodat een groter drukverschil over de drainbuizen nodig is om het gewenste infiltratiedebiet te bereiken. De praktische consequentie hiervan is dat extra inspanningen nodig zijn om over een langere periode voldoende te kunnen infiltreren, bijvoorbeeld voor het doorspoelen van de drainbuizen. Op voorhand was echter niet bekend over welke termijn en in welke mate verstopping op zal treden, en dus hoe groot dit probleem is.

Deze paragraaf beschrijft de inzichten in de infiltreerbaarheid van het water en verstopping van het systeem voor achtereenvolgens een kolomproef en de veldproef. De bevindingen worden tevens afgezet tegen kennis uit de literatuur.

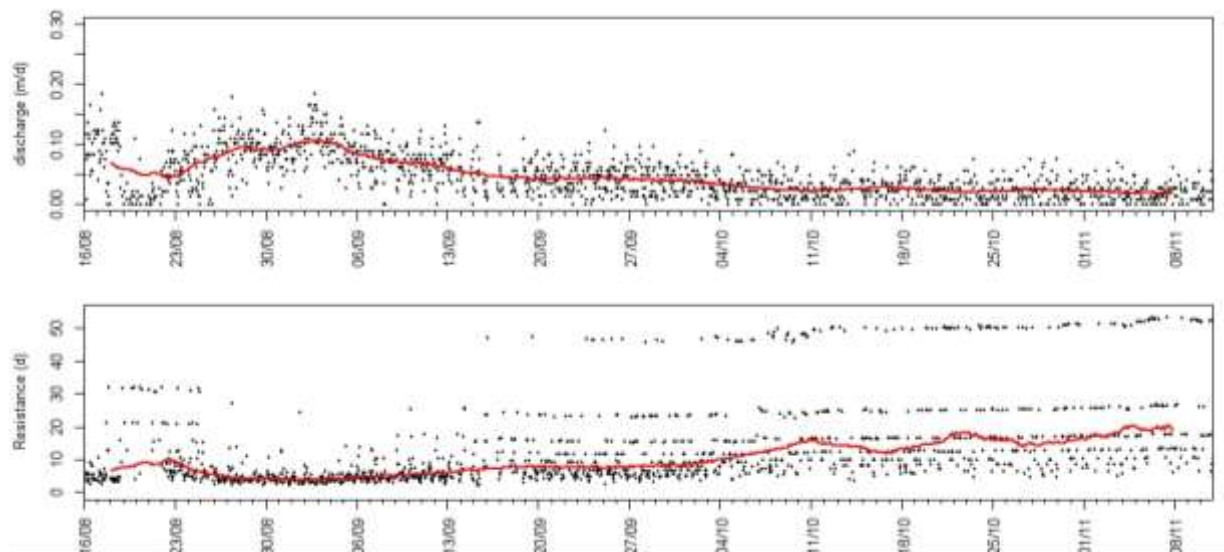
Kolomproef

Om zicht te krijgen op het risico op verstopping van het infiltratiesysteem is van november 2015 tot november 2016 een kolomproef uitgevoerd. Hiervoor zijn op het perceel van Van Dijk twee ongestoorde bodemkolommen 'gestoken', waarin een drainage/infiltratiebuis is aangebracht. Op de waterzuivering van Bavaria is hier gezuiverd restwater in geïnfiltrerd en is de infiltratiecapaciteit van het systeem in de tijd gevolgd. De opzet en de resultaten van de kolomproef zijn beschreven in Bijlage II.

Met een kolomproef kan het wateraanvoerregime nauwkeurig gestuurd worden, en zijn de fluxen eenvoudiger en nauwkeuriger te meten dan bij een veldproef. Door het drukverschil (tussen het wateraanvoerniveau en grondwaterstand) en debiet continu te monitoren, kan de verstopping in de tijd worden gevolgd en gekwantificeerd. Het doel van deze proef was om vast te stellen of de infiltratieweerstand van het subirrigatiesysteem onder invloed van effluent van Bavaria in de tijd toeneemt. In deze paragraaf worden de belangrijkste conclusies uit deze kolomproef kort samengevat.

Uit de kolomproef blijkt dat het debiet door de bodemkolom in een tijdsbestek van twee maanden afneemt van 0,1 m/d naar 0,03 m/d (Figuur 3-5, bovenste panel), terwijl gedurende dezelfde periode de druk over de kolom juist toenam van 32 naar 37 cm. Dit patroon is alleen te verklaren door een toename van de weerstand tegen infiltratie. Volgens de proef is de weerstand gedurende de eerste drie weken van infiltratie vrijwel stabiel, en stijgt daarna in negen weken tijd van 3 naar 23 dagen. Dit betekent dat in een tijdsbestek van negen weken een zeven keer hogere druk op het subirrigatiesysteem nodig is om hetzelfde debiet te kunnen handhaven.

Uit de kolomproef blijkt dus dat het effluent van Bavaria een aanzienlijke verstoppingspotentie heeft, zodat de aanvoerhoogte gedurende het groeiseizoen steeds hoger moet worden ingesteld om het gewenste aanvoerdebiet te kunnen realiseren. In de kolomproef bedraagt de termijn waarbinnen de verstopping optreedt een aantal weken en is dus veel kleiner dan de gemiddelde lengte van de periode van watervraag. Daarom loopt het systeem mogelijk in de loop van het groeiseizoen tegen haar grenzen aan, doordat de noodzakelijke aanvoerhoogte na verloop van tijd niet meer gerealiseerd kan worden. De mate waarin de verstopping beheersbaar gemaakt kan worden is daarom een wezenlijke voorwaarde om subirrigatie van effluent tot praktijksucces te maken.

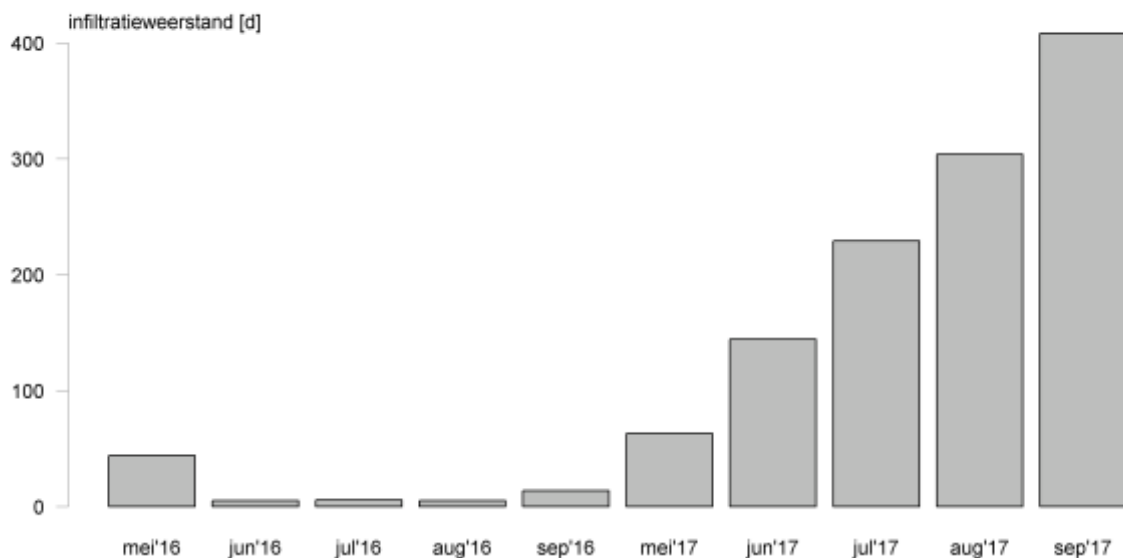


Figuur 3-5: Resultaten van de kolomproef (2016) voor het vaststellen van de verstoppingspotentie van het restwater van Bavaria. Boven: verloop van het debiet in de tijd. Onder: verloop van de infiltratieweerstand.

Veldproef

Voor de veldproef is de infiltratieweerstand ten eerste bepaald uit de wateraanvoer vanuit de waterzuivering naar de aanvoerput, en het stijghoogteverschil tussen het waterniveau in de aanvoerput en de stijghoogte bij meetpunt A4 naast de drain (zie ook Bijlage III). Hieruit volgt dat in 2017 de weerstand gedurende de zomer oploopt, vooral wanneer de subirrigatie plaatsvindt tijdens lange aaneengesloten perioden. In 2016 was er geen aaneengesloten periode van subirrigatie vanwege de natte omstandigheden, daarom is het verloop in de weerstand heel anders.

Als aanvulling op de veldmetingen geeft ook de kalibratie van het SWAP-model (zie paragraaf 'Effect subirrigatie op gewasverdamping' en Bijlage IV) inzicht in de toename van de infiltratieweerstand van het systeem in de loop van 2017 (Figuur 3-6). De toename van deze weerstand zorgt ervoor dat water moeilijker infiltreert en de grondwaterstand niet op het gewenste niveau kan worden gehouden. Na het stilleggen van de aanvoer in september 2017 was de weerstand lager, maar enkele dagen na het hervatten van de subirrigatie was er weer sprake van een stijging in de weerstand. Intussen is overigens bekend dat bij de start van subirrigatie in 2018 geen sprake meer leek van enige verstopping en steeg de grondwaterstand binnen enkele dagen met zo'n 100cm (tot 50 cm).



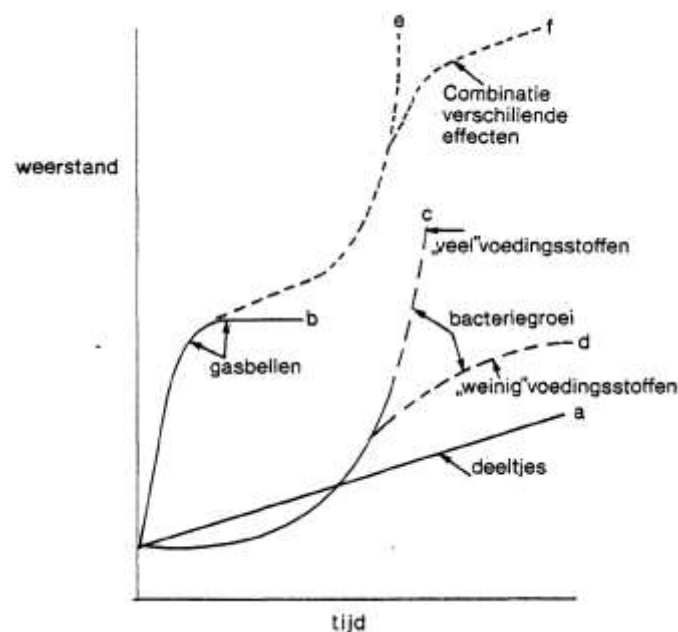
Figuur 3-6: verloop van de infiltratieweerstand, zoals bepaald met kalibratie van het model SWAP op de specifieke maanden op de x-as (zie Bijlage IV). Duidelijk zichtbaar is dat de infiltratieweerstand in 2017 in de loop van de tijd toeneemt. In 2016 bleef deze laag.

Analyse op basis van literatuur

Verstopping van infiltratiesystemen kent verschillende mogelijke oorzaken, zoals geschetst in Figuur 3-7. Verstopping door ingesloten lucht is voor het proefperceel niet waarschijnlijk, omdat alle drainage/infiltratiebuizen in het proefperceel zijn aangesloten op een ontluchtingsleiding. Ook zou dan direct na het starten de weerstand zeer snel stijgen en daarna afvlakken, wat niet gebeurt is. Verstopping door in het effluent aanwezige deeltjes is een mogelijk oorzaak. Stuyt (2013) geeft daarnaast aan dat langdurig onder water staan van drainagebuizen de hydraulische eigenschappen van de grond nabij de drains nadelig kan beïnvloeden. Voor stabiele zandgronden, zoals op het proefperceel, zal de structuur echter nauwelijks worden aangetast en is het risico op minerale verstopping klein. Verslemping van de bodem in gestabiliseerde grond nabij drains is ook niet erg waarschijnlijk (Stuyt, 2013). Echter, als te snel na de aanleg van drainagebuizen, dat wil zeggen voordat de bodem zich weer heeft kunnen stabiliseren, wordt gestart met infiltreren, kan de doorlatendheid sterk afnemen. Voor het proefperceel zat tussen de aanleg van de drainage en starten van subirrigatie ruim zes maanden, waar enkele weken voldoende wordt geacht (Stuyt, 2013).

Ook zwevende substanties, minerale delen en bacteriën in het infiltratiewater kunnen verstopping veroorzaken, die de infiltratieweerstand sterk vergroten (Olsthoorn, 1982; Stuyt, 2013). De groei van verstopping veroorzakende biomassa is een aannemelijke oorzaak van de afnemende infiltratiecapaciteit van het systeem bij Bavaria. Er wordt immers voedselrijk effluent aangevoerd. Belangrijk is ook dat in periodes zonder wateraanvoer de opgebouwde biomassa kan worden afgebroken, waardoor de mate van verstopping vermindert (Olsthoorn, 1982). Aangezien bij de start van subirrigatie in 2018 van enige verstopping geen sprake meer leek te zijn, lijkt dit proces van toepassing op het proefperceel. De verstopping kan zowel in de drain als in de grond rondom de drain optreden. Als de verstopping ook

rondom de drains zit, heeft mechanische reiniging geen zin. Gezien de afname van de infiltratieweerstand na het tijdelijk stoppen van subirrigatie, kan de verstopping mogelijk beheerst worden door gedurende korte periodes in het groeiseizoen en sowieso buiten het groeiseizoen geen effluent te infiltreren. Ten eerste kan hierdoor zuurstof bij de drains komen zodat biologische afbraak van organisch materiaal plaatsvindt en ten tweede kan de stromingsrichting in het systeem worden omgedraaid waardoor opgehoopt materiaal afgevoerd kan worden. Van belang is dit laatste te doen voordat de grondwaterstand te laag wordt, zodat de afvoer onder enige druk kan plaats vinden.



Figuur 3-7: Schematische weergave van verstoppingsverloop voor infiltratiemiddelen voor uitsluitend zwevende stof (a), gas-of luchtballen (b) en bacteriegroei (c: groot voedselaanbod, d: beperkt voedselaanbod). Verschillende vormen kunnen ook tegelijk voorkomen (e en f). Figuur overgenomen uit Olsthoorn (1982).

3.2.4 Effect subirrigatie op omgeving

De waargenomen grondwaterstandreeksen in en rond het proefperceel bevatten informatie over de invloed van subirrigatie op de stijghoogte, en daarmee over de effectiviteit van subirrigatie en de omvang van eventuele vernattingseffecten naar de omgeving. Om deze informatie te verkrijgen dienen de effecten van verschillende invloeden op de grondwaterstand van elkaar gescheiden te worden. Naast subirrigatie zijn dat in ieder geval de effecten van neerslag, verdamping en drainage of infiltratie door de Goorloop. Ook drainage of infiltratie door het Wilhelminakanaal kan effect hebben op grondwaterstanden, maar doordat de waterstand in dit kanaal nauwelijks fluctueert is deze invloed niet uit meetreeksen te filteren.

Voor het scheiden van de verschillende invloeden op de waargenomen grondwaterstandreeksen is het tijdreeksanalyseprogramma Menyanthes gebruikt. Met deze aanpak kon het verloop van de grondwaterstanden ter plaatse van de meetpunten B2, B3, C1 en D1 goed verklaard worden op basis van alleen neerslag en verdamping. Het toevoegen van subirrigatie als extra verklarende reeks verbeterde de modellen nauwelijks en het effect van subirrigatie was verwaarloosbaar klein en niet significant.

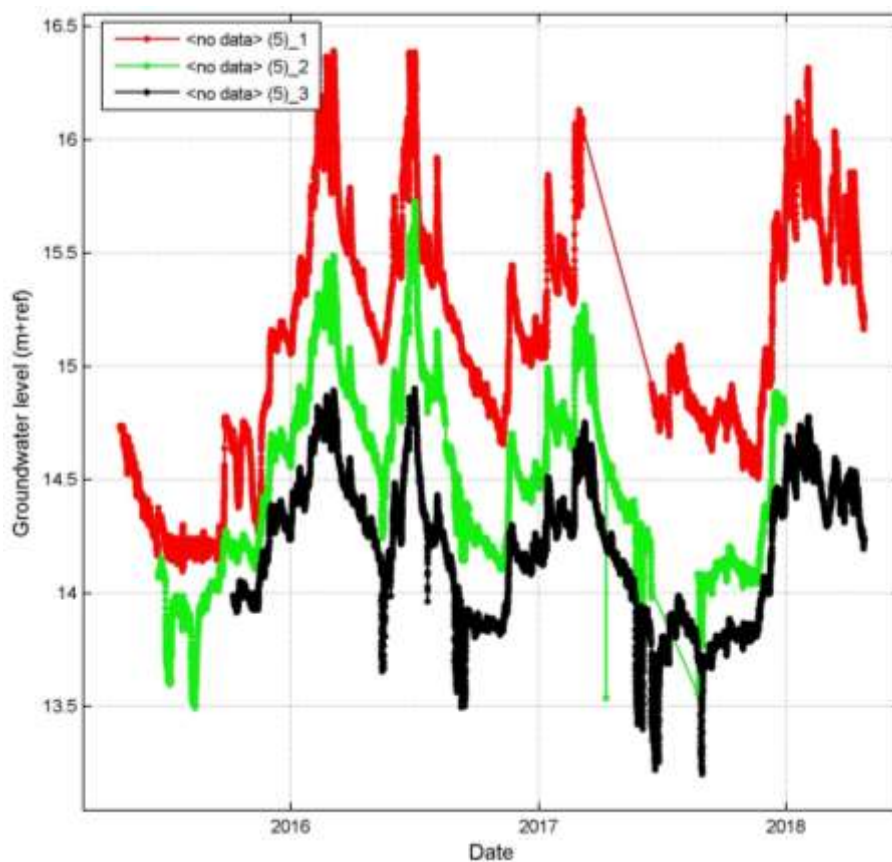
(onvoldoende hydrologisch plausibel). Ter plaatse van B1 verbeterde de tijdreeksmodellen wel aanzienlijk door subirrigatie als extra verklarende reeks toe te voegen, maar was ook hier het berekende effect onvoldoende hydrologisch plausibel. Ter plaatse van de meetpunten in het proefveld en vlak daarnaast verbeterden de modellen aanzienlijk en was het effect van subirrigatie zoals verwacht substantieel en significant (hydrologisch plausibel). Volgens de tijdreeksanalyse steeg de grondwaterstand in het perceel gemiddeld met 3.3 mm per m³ aangevoerd restwater. De tijdreeksanalyse bevestigt het beeld dat de vernattingseffecten van subirrigatie sterk ruimtelijk uitdempen en, voor deze casus, al op een afstand van enkele tientallen meters niet meer waarneembaar zijn.

Effect subirrigatie op diepe stijghoogten

De uitstraling van de effecten van de subirrigatie naar diepere watervoerende lagen is bepaald op basis van stijghoogtemetingen op drie verschillende diepten bij meetpunt A5. De reeksen van deze metingen zijn weergegeven in Figuur 3-8. Uit deze figuur blijkt dat er duidelijke stijghoogteverschillen van enkele decimeters groot tussen de meetfilters zijn waargenomen. Tevens zijn gedurende de groeiseizoenen een aantal scherpe verlagingen van de diepe stijghoogte (meetfilter 3) met zo'n 50 cm waargenomen. Deze verlagingen zijn het gevolg van tijdelijke grondwateronttrekkingen ten behoeve van de beregening van gewassen. Deze verlagingen werken gedempt door naar de stijghoogte in de bovenliggende watervoerende laag (meetfilter 2); de tijdelijke stijghoogteverlagingen bedragen daar nog zo'n 20-30 cm. Ook in het freatische grondwater is de invloed van grondwateronttrekkingen voor beregening zichtbaar, maar deze bedraagt slechts enkele centimeters.

Anderzijds blijkt uit tijdreeksanalyse van de stijghoogtereeksen dat subirrigatie een grote invloed heeft op de stijghoogte in het ondiepe meetfilter, een veel minder grote invloed op de stijghoogte in het tweede meetfilter en een verwaarloosbaar en niet significant effect op de stijghoogte in het derde meetfilter.

Dit bevestigt dat stijghoogteveranderingen sterk gedempt doorwerken over leemlagen en dat de grondwatervorraden goed verticaal van elkaar gescheiden zijn. Dit betekent dat subirrigatie een beperkte invloed zal hebben op de druk in diepere watervoerende lagen en nauwelijks invloed zal hebben op de samenstelling van het diepere grondwater door aanvoer van stoffen met het infiltrerende restwater.



Figuur 3-8: Waargenomen stijghoogten op drie dieptes ter plaatse van meetpunt A5. Rood: ondiep filter (1); groen: middelste filter (2); zwart: diepe filter (3). De meetfilters zijn van elkaar gescheiden door leemlagen.

3.3 Waterkwaliteit

3.3.1 Inleiding

De infiltratie van restwater heeft mogelijk negatieve gevolgen voor de bodem- grondwaterkwaliteit. Vooral de ophoping en uitspoeling van voedingsstoffen (stikstof en fosfor) worden gezien als een potentieel risico voor de omgevingskwaliteit. Deze kwaliteitseffecten kunnen het gevolg zijn van extra aanvoer van stoffen die in het restwater zitten, of doordat stoffen die thans aan de bodem zijn gebonden in oplossing gaan, bijvoorbeeld doordat het grondwater vaker of langer zuurstofloos wordt. In hoeverre en waar deze effecten zich voltrekken is onder andere afhankelijk van de verspreiding van het restwater, de chemische eigenschappen van de bodem en ondergrond (zoals zuurstofgehalte) en de interacties met de bodem (zoals ionenuitwisseling).

Op basis van chemische analyse van grondwatermonsters is meer inzicht verkregen in de effecten van de infiltratie van effluent op de grondwaterkwaliteit. Hierbij ligt de nadruk op de voedingsstoffen stikstof en fosfor, maar ook sporenelementen komen kort aan bod. In deze paragraaf worden de belangrijkste resultaten, conclusies en aanbevelingen samengevat. Voor meer informatie wordt verwezen naar Bijlage V.

3.3.2 Overschrijding van normen uit het Infiltratiebesluit Bodembescherming

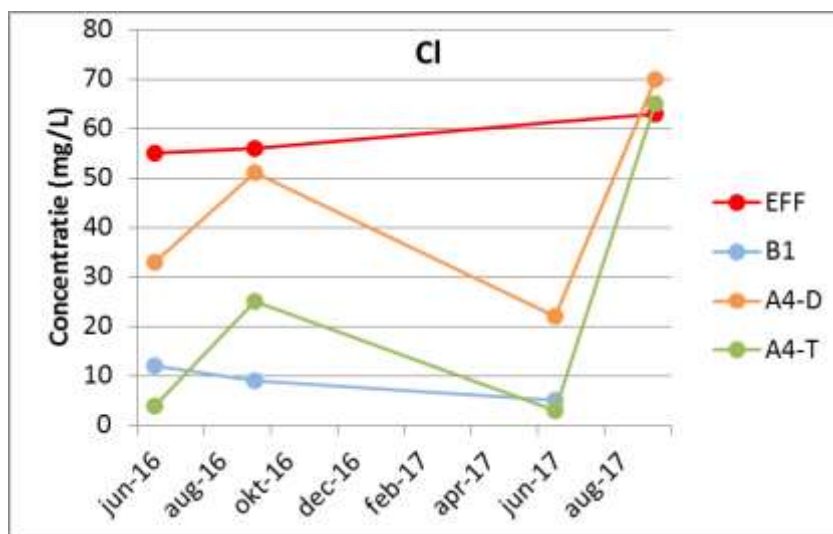
De waargenomen stofconcentraties in het effluent zijn vergeleken met wettelijk vastgestelde normen voor de infiltratie van oppervlaktewater volgens het 'Infiltratiebesluit Bodembescherming'. Het infiltratiebesluit bodembescherming heeft uitsluitend betrekking op het infiltreren van oppervlaktewater, en is dus niet van toepassing op deze situatie waarbij effluent wordt geïnfiltreerd. Wel geeft het infiltratiebesluit bodembescherming een indruk van de parameters die mogelijk een knelpunt vormen vanuit milieuhygiënisch oogpunt. Uit de analyseresultaten blijkt dat natrium, fosfaat en chroom in alle drie de effluentmetingen de norm uit het infiltratiebesluit overschrijden. De hoge concentratie natrium in het effluent hangt waarschijnlijk samen met het gebruik van natronloog bij het spoelproces. Een enkele keer is een normoverschrijding voor ammonium en nitraat waargenomen. Voor kwik geldt dat de concentratie in twee van de drie effluentmonsters lager was dan de detectielimiet, en dat in het derde monster de kwikconcentratie gelijk was aan de detectielimiet ($=2 \times$ de norm uit het infiltratiebesluit). Mogelijk gaat het hier om een vals positieve waarneming of een incidentele uitbijter. Indien hoge kwikconcentraties vaker voorkomen kunnen deze samenhangen met atmosferische kwikdepositie in de zuiveringsbassins. In dat geval zou de oorzaak buiten de bedrijfsvoering van Bavaria liggen. Nadere analyse zou hier uitsluitsel over moeten geven.

3.3.3 Kwaliteit van het effluent ten opzichte van het grondwater

De concentraties in het effluent zijn doorgaans hoger dan de concentraties in het grondwater dat nog niet beïnvloed is door geïnfiltreerd effluent. Dit is met name het geval voor ammonium (84 keer zo hoog als in het grondwater), bicarbonaat (32 keer zo hoog als in het grondwater), natrium (26 keer zo hoog als in het grondwater) en fosfaat (16 keer zo hoog dan in het grondwater). Daarnaast zijn nitriet, chloride, kalium, siliciumoxide, calcium, ijzer gemiddeld een factor twee tot zeven hoger. Het infiltreren van effluent leidt daarom tot een toenemende belasting van het grondwater met deze stoffen.

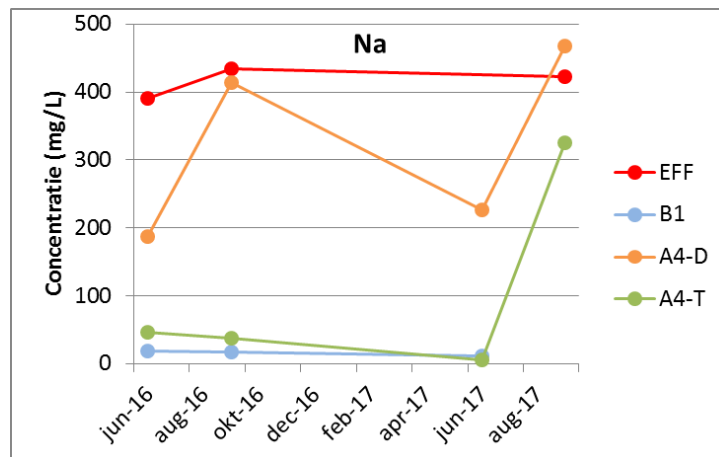
3.3.4 Waterkwaliteitsveranderingen in ondiep grondwater

Uit de stijging van chlorideconcentraties (Figuur 3-9) blijkt dat het aangevoerde effluent aan het einde van de aanvoerperioden de meetlocaties A4 naast de drain (A4-D) en A4 tussen de drains (A4-T) heeft bereikt. Wel is tussen de drains sprake van verdunning van het effluent met lokaal geïnfiltreerd regenwater dat nauwelijks chloride bevat. In het referentiemonster B1 blijft de chlorideconcentratie vrijwel constant en is geen sprake van aanvoer van effluent. Dit bevestigt dat het meetpunt B1 inderdaad als onbeïnvloede referentie kan worden gebruikt.



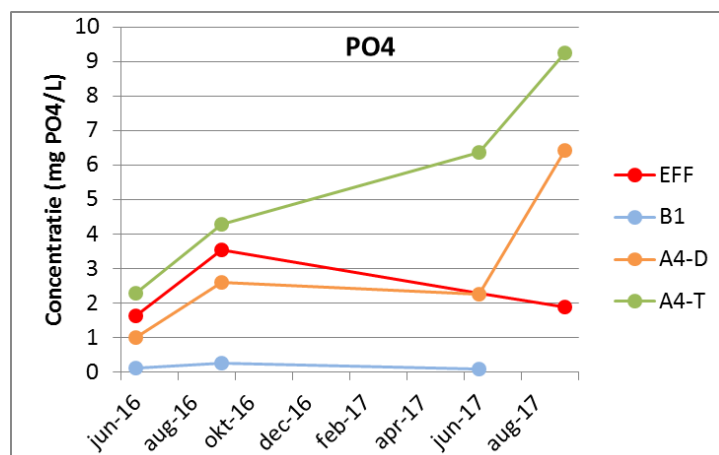
Figuur 3-9: Waargenomen chlorideconcentraties in het grondwater direct naast een drain (A4-D) en midden tussen twee drains (A4-T). De concentraties in het effluent en ter plaatse van meetpunt B1 zijn ter referentie opgenomen.

Als gevolg van infiltratie van effluent nemen de concentraties Na (Figuur 3-10) en K (zie bijlage V) in het grondwater toe tot aan de concentratie in het effluent. De concentraties in het grondwater veren na het stoppen van de wateraanvoer voor een deel weer terug naar de oorspronkelijke situatie, maar bereiken niet de lage concentraties ter plaatse van het referentiepunt. Dit wijst erop dat de aanvoer van natrium en kalium met het effluent kan leiden tot een permanente verhoging van deze stofconcentraties in het grondwater. In hoeverre deze concentraties verder stijgen bij voortzetting van de aanvoer van effluent is afhankelijk van de aanvoerhoeveelheden en de mate van uitwisseling van natrium en kalium met calcium dat aan de bodem is gebonden. Er is niet onderzocht wat de natriumconcentratie in de wortelzone is; te hoge concentraties kunnen beperkend zijn voor de gewasgroei.



Figuur 3-10: Waargenomen concentraties van natrium in het grondwater direct naast een drain (A4-D) en midden tussen twee drains (A4-T). De concentraties in het effluent en ter plaatse van meetpunt B1 zijn ter referentie opgenomen. Het verloop van de kaliumconcentratie vertoont een vergelijkbaar patroon.

Het fosfaatgehalte in het ondiepe grondwater in het proefperceel neemt gedurende beide aanvoerperiodes toe (Figuur V-6). Vlak naast de drain (A4-D) stijgt het fosfaatgehalte tot een niveau dat vergelijkbaar is met dat wat is waargenomen in het effluent, hoewel tijdens de laatste aanvoerperiode de fosfaatconcentratie verder stijgt. In het grondwater tussen de drains neemt de fosfaatconcentratie sinds de start van de aanvoer gestaag toe en zijn de concentraties al ver boven de concentratie in het effluent uitgestegen. Het grondwater bestaat hier aan het einde van de aanvoerperiode volledig uit geïnfiltreerd effluent. Dit wijst erop dat naast het aangevoerde effluent nog andere fosfaatbronnen aanwezig zijn, zoals bemesting of mobilisatie van fosfaat uit de bodem. Omdat de fosfaatconcentratie ter plaatse van het referentiepunt (B1) nauwelijks is gewijzigd, is fosforbemesting een minder waarschijnlijke verklaring en ligt de bodem als aanvullende bron van fosfaat het meest voor de hand.

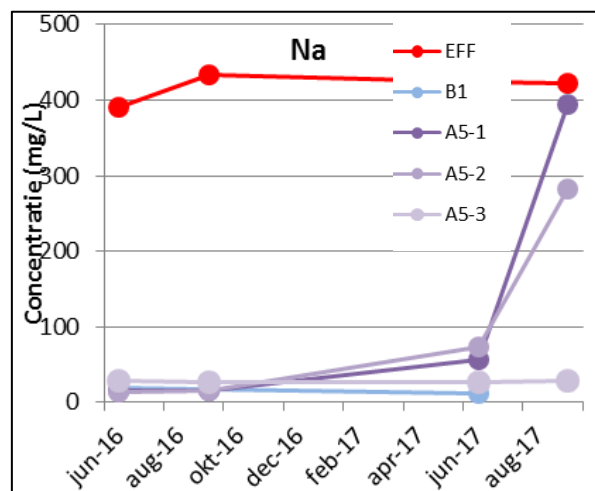


Figuur 3-11: Waargenomen concentraties van fosfaat in het grondwater direct naast een drain (A4-D) en midden tussen twee drains (A4-T). De concentraties in het effluent en ter plaatse van meetpunt B1 zijn ter referentie opgenomen.

3.3.5 Waterkwaliteitsveranderingen in diep grondwater

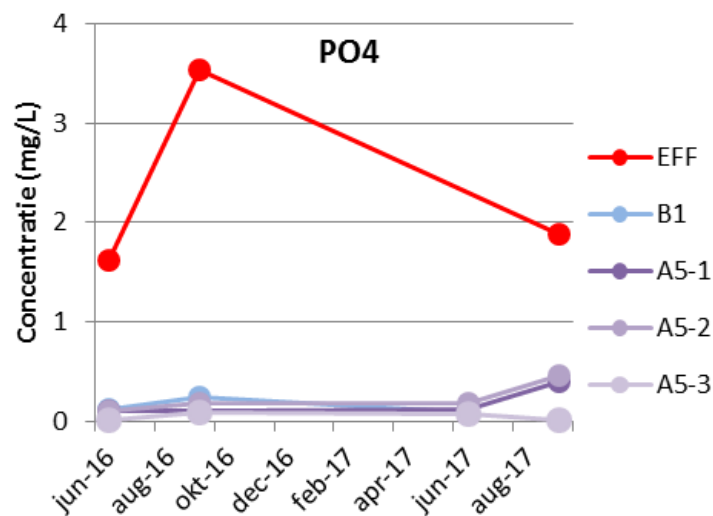
Als gevolg van de hoge topografische ligging en de aanwezigheid van diepe grondwateronttrekkingen is het proefgebied onderdeel van een regionaal infiltratiegebied. Dit betekent dat een (onbekend) deel van het neerslagoverschot infiltreert naar diepere watervoerende pakketten. Deze diepe infiltratie zal als gevolg van subirrigatie toenemen, doordat de grondwaterstand stijgt. Dit betekent dat het infiltreren van effluent op termijn zijn weerslag kan hebben op de kwaliteit van het diepere grondwater. Deze effecten zullen echter beperkt blijven tot de bovenste 9 meter, aangezien dikke lemlagen het diepe en ondiepe grondwater goed van elkaar gescheiden houden. Uit stijghoogtemetingen blijkt namelijk dat het effect van tijdelijke (diepe) grondwateronttrekkingen nauwelijks doorwerkt naar het bovenste grondwater. In het diepe grondwater (dieper dan 9 m) zijn in de meetperiode ook geen veranderingen in de grondwaterkwaliteit als gevolg van subirrigatie waargenomen.

In Figuur V-8 zijn de waargenomen concentraties van natrium ter plaatse van de meetpunten A5-1, A5-2 en A5-3 weergegeven. Na de eerste aanvoerperiode (2016) bleef het natriumgehalte in het grondwater ter plaatse van de A5-1 en A5-2 vrijwel gelijk met de referentie (B1). Dit ondanks dat volgens de chlorideverhoudingen het aandeel restwater hier op zo'n 20% is geschat. Na de tweede aanvoerperiode is de natriumconcentratie ter plaatse van beide meetpunten gestegen tot een vergelijkbare concentratie als in het effluent is waargenomen. Waarschijnlijk zorgt ionenuitwisseling met aan de bodem gebonden kalium voor een tijdelijke demping van de stijging van de nitraatconcentratie, zodat het effect van subirrigatie op de natriumconcentratie in het diepere grondwater vertraagd tot uiting komt.



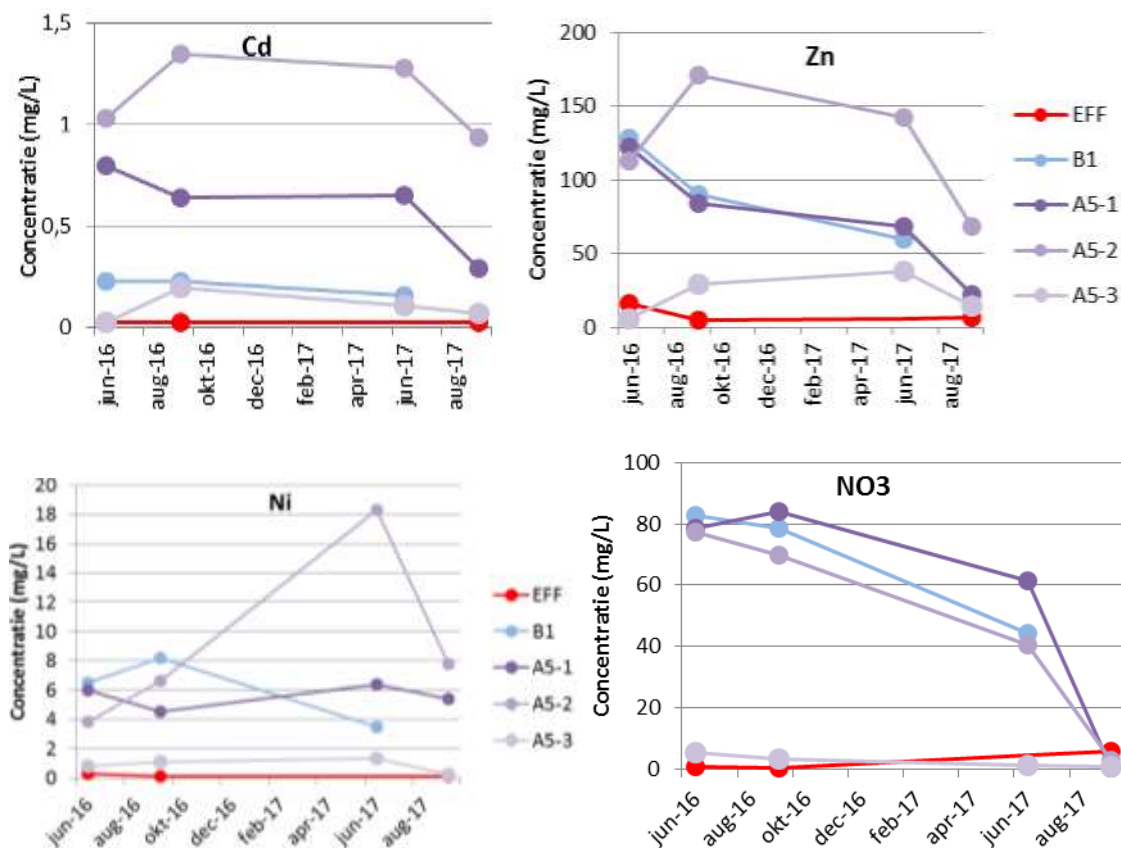
Figuur 3-12: Waargenomen concentraties van natrium in het grondwater op drie diepten. De concentraties in het effluent en ter plaatse van meetpunt B1 zijn ter referentie opgenomen.

In Figuur 3-13 zijn de waargenomen concentraties van fosfaat ter plaatse van de meetpunten A5-1, A5-2 en A5-3 weergegeven. Volgens deze figuur reageert de fosfaatconcentratie nauwelijks op de infiltratie van restwater. Waarschijnlijk wordt aangevoerd en gemobiliseerd fosfaat effectief gebonden aan ijzer, zodat het uit oplossing gaat.



Figuur 3-13: Waargenomen concentraties van fosfaat in het grondwater op drie dieptes. De concentraties in het effluent en ter plaatse van meetpunt B1 zijn ter referentie opgenomen.

Ter plaatse van A5-1, A5-2 en (in mindere mate) A5-3 zijn, ten opzichte van het effluent, verhoogde concentraties waargenomen van de sporenelementen cadmium (1,3 ug/L), nikkel (18,3 ug/L) en zink (171 ug/L). Mogelijk zijn deze sporenelementen het gevolg van de oxidatie van pyriet (een ijzersulfide) dat van nature in de ondergrond aanwezig is. Pyriet bevat kleine hoeveelheden van deze sporenelementen die in oplossing kunnen gaan zodra het in contact komt met zuurstof of nitraat. Deze hypothese wordt (globaal) bevestigd door Figuur 3-14: aan het einde van de tweede subirrigatieperiode bevindt zich op geen van de meetpunten nog nitraat in het grondwater en zijn de concentraties aan sporenelementen gedaald. De afname van nitraat is mogelijk een indirect gevolg van subirrigatie: doordat de grondwaterstand stijgt en organische moleculen worden aangevoerd, wordt het grondwater eerder suboxisch en anoxisch, zodat nitraat wordt omgezet in stikstofgas (denitrificatie). Subirrigatie heeft voor deze parameters daarom mogelijk een positief effect op de grondwaterkwaliteit. De meetperiode is echter te kort om het optreden van deze effecten aan te kunnen tonen.



Figuur 3-14: Waterkwaliteitsveranderingen van de sporenelementen Cd, Zn en Ni en nitraat op drie dieptes voor en na infiltratie restwater Bavaria.

3.3.6 Conclusies

Subirrigatie van effluent van Bavaria kan op twee manieren gevolgen hebben voor de grondwaterkwaliteit. Ten eerste kunnen diverse stoffen die in verhoogde concentraties in het effluent aanwezig zijn op de lange termijn tot ongewenste kwaliteitseffecten leiden. Gezien de normstellingen van het Infiltratiebesluit Bodembescherming en de samenstelling van het onbeïnvloede grondwater zijn vooral de hoge concentraties natrium, fosfaat en chroom aandachtspunten. De meetresultaten laten zien dat het aangevoerde natrium aan de bodem hecht en daarmee mogelijk de bodemkwaliteit beïnvloedt, wat op den duur kan leiden tot zoutschade aan het gewas. De hoge concentraties aan fosfaat in het effluent vormen echter op zichzelf waarschijnlijk geen bedreiging voor de grondwaterkwaliteit, omdat de bodem voorsnóg een grotere bron van fosfaat is dan het effluent. Van chroom is onbekend wat de achterliggende oorzaak van de verhoogde concentratie is, of dit structureel is en in hoeverre dit element tot knelpunten kan leiden.

Ten tweede kan subirrigatie leiden tot verschuivingen in bodem-waterevenwichten, doordat met de stijging van de grondwaterstand het redoxmilieu wijzigt. Hierdoor lost in tijden van subirrigatie een deel van het aan de bodem gebonden fosfaat op in het grondwater, zodat de fosfaatconcentratie in het grondwater tot boven de concentratie in het effluent uit kan stijgen. Dit effect treedt echter alleen op in de ondiepe ondergrond, waarschijnlijk omdat de bodem daar als gevolg van jarenlange fosforbemesting ver is opgeladen met fosfaat. Mogelijk wordt een deel van het vrijgekomen fosfaat door gewassen

opgenomen, of op wat grotere diepte, en in tijden van diepere grondwaterstanden, weer tijdelijk gebonden aan ijzer. Onbekend is in hoeverre en op welke termijn fosfaat in de bodem ophoopt, of onder invloed van drainage in het oppervlaktewater terecht komt. Omdat het grondwater ook veel ijzer bevat, zal een eventuele toename van de fosfaatbelasting van het oppervlaktewater waarschijnlijk goed als ijzerfosfaat gebonden worden.

Het verschuiven van de redox-milieus is echter niet alleen een mogelijk knelpunt voor subirrigatie. De waarnemingen geven aanwijzingen dat het verhogen van de grondwaterstand bijdraagt aan het verwijderen van nitraat onder invloed van denitrificatie. Mogelijk wordt hierdoor de oxidatie van pyriet geremd, zodat de belasting van het grondwater met sporenelementen afneemt. Vernatting leidt daarentegen wel tot de mobilisatie van fosfaat.

3.3.7 Aanbevelingen

Uit de waterkwaliteitsmonitoring blijkt dat natrium, fosfaat en mogelijk chroom aandachtspunten zijn bij subirrigatie met het restwater van Bavaria. Tegelijkertijd kan subirrigatie mogelijk een positieve bijdrage leveren aan het verminderen van de belasting van het grondwater met nitraat en een aantal sporenelementen die bij de oxidatie van pyriet in oplossing gaan. Om het inzicht in deze processen en de consequenties daarvan te vergroten adviseren wij het volgende:

- (1) Voortzetting van de huidige monitoring om duidelijkheid te krijgen over de positieve en negatieve effecten van subirrigatie op de langere termijn;
- (2) Uitbreiden van de chemische monitoring voor bodemvocht, zodat inzicht wordt verkregen in de kwaliteit van het water dat het gewas opneemt;
- (3) Nagaan van de herkomst, verwijderingsmogelijkheden en eventuele milieu-impact van natrium en chroom, dat in verhoogde concentraties in het effluent is waargenomen;
- (4) Omdat de effecten van de aanvoer van natrium met het effluent onbekend zijn, wordt aanbevolen om na te gaan of er op termijn procestechnische mogelijkheden zijn het gebruik van natrium te verminderen.

3.4 Synthese

Al met al kan vastgesteld worden dat:

- Als gevolg van subirrigatie de grondwaterstand in het perceel én de vochtvoorziening van het gewas dusdanig zijn gestegen, dat droogteschade aan het gewas wordt voorkomen.
- Er geen uitstralingseffecten/vernattingseffecten op de omgeving zijn waargenomen.
- Diepere lagen worden niet/nauwelijks beïnvloed door subirrigatie.
- De infiltratieweerstand van het systeem toeneemt bij langdurige wateraanvoer (binnen een groeiseizoen), waarschijnlijk door biologische verstopping. Gedurende het infiltratie seizoen in periodes de wateraanvoer stoppen en tijdelijk draineren, kan een passende maatregel zijn om verstopping van het systeem te beheersen.
- De hoge natriumconcentratie in het effluent is een aandachtspunt in verband met ophoping in de bodem en zoutschade aan het gewas. Infiltratie van het effluent leidt tot periodiek hoge fosfaatconcentraties in het ondiepe grondwater. Waarschijnlijk is dit het gevolg van mobilisatie van fosfaat uit de bodem, zodat ophoping van fosfaat geen knelpunt vormt. Het effluent bevat ook hoge concentraties chroom, maar in hoeverre dit structureel is en leidt tot knelpunten in de bodem- en waterkwaliteit is onduidelijk.

4 Discussie en conclusies

Dit hoofdstuk bevat de discussie en de conclusies van de veldproef waarbij gezuiverd restwater van Bavaria via subirrigatie wordt ingezet voor de landbouwwatervoorziening. We gaan hierbij met name in op de technische/inhoudelijke aspecten, maar besteden ook aandacht aan de inpassing van de methode in het beleid.

4.1 Technisch/inhoudelijke aspecten

De technisch/inhoudelijke aspecten zijn uitgebreid beschreven in dit rapport. Puntsgewijs worden de volgende hoofdzaken onderscheiden:

- Uit de veldproef blijkt dat met subirrigatie met gezuiverd restwater de grondwaterstand dusdanig verhoogd kan worden, dat de vochtvoorziening van het gewas verbetert. Voorafgaand aan de proef daalde de grondwaterstand in het perceel tot 2 à 3 m -mv. Tijdens de proef kon met subirrigatie een grondwaterstand van 0.5 à 1.5 m -mv worden gehandhaafd. De verhoging van de grondwaterstand had tevens een positief (verhogend) effect op het bodemvochtgehalte en de vochtvoorziening van het gewas. Vochttekorten die in de situatie zonder subirrigatie zouden optreden, kunnen door subirrigatie worden opgeheven. De proef heeft plaatsgevonden op een hoog en droog perceel waar veel infiltratie nodig is om de grondwaterstand voldoende te verhogen. Op percelen met een minder droge uitgangssituatie, met daarbij uiteraard de juiste bodemopbouw (zand op een leem- of kleilaag), zal de effectiviteit van subirrigatie hoger zijn.
- Op de schaal van de proef heeft subirrigatie geen vernattend effect op nabijgelegen percelen en diepere watervoerende lagen. De extra grondwateraanvulling die op het perceel is gerealiseerd, is namelijk klein ten opzichte van de grondwateraanvulling uit neerslag op grotere schaal. Het effect van subirrigatie is dus lokaal groot en dempt in de omgeving snel uit.
- 2016 was extreem nat en niet representatief voor een droogteproef. De eerste helft van 2017 was zeer droog en er is in 2017, in vergelijking met 2016, gedurende een lange aaneengesloten periode gezuiverd restwater aangevoerd. 2017 was daarmee het belangrijkste van de twee seizoenen voor de veldproef. Ondanks dat er in 2017 een aanzienlijke verhoging van de grondwaterstand is gerealiseerd, neemt de aanvoercapaciteit van het systeem in een lange periode van wateraanvoer wel af en is een steeds hogere druk in de wateraanvoerput nodig om de gewenste grondwaterstand te realiseren. Naarmate dus gedurende een langere periode subirrigatie met gezuiverd restwater plaatsvindt, neemt de infiltratieweerstand van het systeem toe. Dit kan komen door verstopping van de drainagebuizen, of door verstopping van de bodemmatrix. Na het tijdelijk stilzetten van de wateraanvoer, draineren, en daarna weer opstarten van de wateraanvoer veert de infiltratieweerstand weer terug richting de oorspronkelijke waarde. Waarschijnlijk komt dit doordat de biomassa die de verstopping veroorzaakt wordt afgebroken. Afwisselend infiltreren en draineren kan dus een passende maatregel kan zijn om verstopping van het systeem te beheersen, maar met de frequentie waarmee dit moet gebeuren zal in de praktijk ervaring opgedaan moeten worden.
- De hoge natriumconcentratie in het effluent is een aandachtspunt in verband met mogelijke ophoping in de bodem en zoutschade. Infiltratie van het effluent leidt tot periodiek hoge fosfaatconcentraties in het ondiepe grondwater. Waarschijnlijk is dit het gevolg van mobilisatie van fosfaat uit de bodem, zodat ophoping van fosfaat geen knelpunt vormt. Het effluent bevat

ook hoge concentraties chroom, maar in hoeverre dit leidt tot knelpunten in de bodem- en waterkwaliteit is onduidelijk.

- Het Wilhelminakanaal heeft mogelijk een grotere invloed op het grondwatersysteem dan vooraf gedacht. Doordat met subirrigatie de grondwaterstand in de zomerperiode tot boven het peil van het Wilhelminakanaal stijgt, neemt de drainage door het kanaal toe. Hierdoor wordt de effectiviteit van subirrigatie bij toepassing op grotere schaal beperkt. De Goorloop heeft waarschijnlijk een beperkte invloed op de effectiviteit van subirrigatie op het proefperceel, doordat ondiepe leemlagen de drainage door de Goorloop sterk belemmeren. Aan de randen van het proefperceel blijft de grondwaterstand minder goed op niveau. Omdat de grondwaterstand in het proefperceel zoveel verhoogd moet worden, stroomt het water ook weer sneller weg; het stijghoogteverschil met de omgeving neemt namelijk toe. In een vervolgproject binnen het programma Water in de Circulaire Economie, thema Zuinig met Zoet, wordt getracht met een 3D grondwatermodel i) gevoel te ontwikkelen voor de belangrijkste verliesposten, c.q. hoe met regionale maatregelen water langer vastgehouden kan worden, zodat de effectiviteit van subirrigatie toeneemt, en ii) de gebieden te identificeren waar mogelijk ongewenste vernatting op kan treden, zodat daar monitoringsinspanning op gericht kan worden of maatregelen kunnen worden getroffen.
- Het subirrigatiesysteem voert incidenteel water af, namelijk tijdens zeer natte perioden waarbij de grondwaterstand stijgt tot de overstorthoogte in de afvoerput. Deze afvoer is nodig om wateroverlast door ondiepe grondwaterstanden te voorkomen. De wateraanvoer vanuit Bavaria stopt automatisch als de grondwaterstand is gestegen tot het sturingsniveau in het aanvoereservoir. Omdat dit sturingsniveau hoger kan zijn dan de maximaal gewenste grondwaterstand, kan het zijn dat water gelijktijdig wordt aangevoerd én afgevoerd. Dit kan opgelost worden door de wateraanvoer niet te sturen op het waterniveau in de put, maar op de actuele grondwaterstand in het perceel.

4.2 Inpassing in het beleid

Nederlandse landbouwers en waterbeheerders worden steeds vaker geconfronteerd met toenemende droogteschade aan landbouw en natuur. Tegelijkertijd neemt de druk toe op beschikbare watervoorraden 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 beschikbare waterbronnen efficiënter worden benut.

Het Deltaprogramma Zoetwater¹ is helder over de zoetwaterproblematiek en de benodigde investeringen: *"... Het aanbod van zoetwater is echter niet altijd toereikend voor de vraag. De deltasceario's laten zien dat in de toekomst vaker watertekorten kunnen optreden door klimaatverandering, verzilting en sociaaleconomische ontwikkelingen. ... Ook vinden stapsgewijze investeringen plaats om de aanvoer van zoetwater robuuster te maken en het gebruik zuiniger. De deltabeslissing Zoetwater geeft de kaders voor een nieuwe aanpak voor het voorkomen van watertekorten."*

Het is van belang inzicht te krijgen in de kansen en risico's van hergebruik van effluentstromen ('recycled water') voor de zoetwatervoorziening. Het inzetten van gezuiverd restwater van industrieën en RWZI's voor droogtebestrijding is in Nederland een nog weinig toegepaste, maar opkomende vorm van (klimaat)adaptatie om te anticiperen op toenemende watertekorten in de landbouw. Het initiatief van

¹ <https://www.deltacommissaris.nl/deltaprogramma/inhoud/gebieden-en-generieke-themas/zoetwater>

Bavaria om restwater terug te geven aan de omgeving is hiervan een goed voorbeeld. Bavaria laat zien dat een industriële partij een belangrijke rol kan spelen in de zelfvoorzienendheid van een regio en zo mee te werken aan een meer klimaatrobuust watersysteem. Samenwerking met alle belanghebbenden is hiervoor van belang en dit is iets wat in het proces binnen 'Boer, Bier, Water' goed is afgestemd. Desalniettemin is er nog veel onbekend op dit thema.

Een uitgebreid overzicht van de huidige stand van kennis rondom waterhergebruik is recent opgesteld door Cirkel et al. (2017). Zij schrijven:

"In Nederland worden forse hoeveelheden gezuiverd afvalwater geloosd op het oppervlaktewatersysteem en vervolgens afgevoerd naar de grote rivieren en uiteindelijk de zee. Alleen al op de rwzi's wordt jaarlijks circa 2 miljard m³ huishoudelijk afvalwater, regenwater en drainagewater gezuiverd en geloosd. Dit komt overeen met een waterschijf van 48 mm op het totale oppervlak van Nederland. ... Naast deze via rwzi's geloosde afvalwaterstroom worden in Nederland zeer grote hoeveelheden (meer dan 10 miljard m³) proceswater van industriële activiteiten al dan niet via een eigen afvalwaterzuivering direct geloosd op het zoete oppervlaktewater. Het gaat hierbij voor het overgrote deel om koelwater dat eerder uit het ontvangende oppervlaktewater is onttrokken, maar ook (afval)waterstromen van allerlei andere processen. ... De kwaliteit van het gezuiverde afvalwater is een punt van aandacht. In het effluent aanwezige stoffen, zoals zware metalen en organische microverontreinigingen, kunnen zonder verdere zuivering een bedreiging vormen voor de oppervlaktewater-, bodem- en grondwaterkwaliteit."

Belangrijk is ook dat uit diverse studies blijkt dat de inzet van effluent voor irrigatie van grondgebonden landbouw economisch interessant is tijdens droge periodes. Voor hoogwaardige teelten, waaronder glastuinbouw, kan vergaand gezuiverd effluent rendabel zijn in gebieden met beperkte zoetwaterbeschikbaarheid (Cirkel et al., 2017). Het uitvoeren van een kosten-baten-analyse voor de specifieke casus van Bavaria valt echter buiten de doelstellingen van dit onderzoek.

Verder concluderen Cirkel et al. (2017) dat gebruik van effluent technisch en juridisch mogelijk is. Het is echter de vraag of de specifieke toepassing van hergebruik van effluent via subirrigatie beleidsmatig voldoende is afgedekt. Wellicht is gerichte sturing nodig om bepaalde kwaliteitsrichtlijnen van het effluent op te leggen om ongewenste kwaliteitsveranderingen van het bodem- en grondwatersysteem te voorkomen. Echter, er zijn niet alleen maar risico's. Doordat minder gezuiverd restwater geloosd wordt op het oppervlaktewater, wordt het oppervlaktewater ook minder belast met fosfor. Dit draagt bij aan het behalen van de doelen van de KaderRichtlijn Water: er is sprake van een mindere directe belasting van het oppervlaktewater. Indirect kan in de bodem geïnfiltreerd restwater alsnog het oppervlaktewater bereiken, maar bodempassage kan bijdragen aan een kwaliteitsverbetering. Al met al dienen positieve en negatieve aspecten goed afgewogen te worden.

Het inzetten van restwater van Bavaria voor de landbouwwatervoorziening in de omgeving is onder meer ingegeven vanuit de doelstelling om mogelijke droogteschade aan de landbouw als gevolg van de grondwateronttrekking te compenseren. Door de effecten van verdroging door grondwateronttrekkingen eerst zoveel mogelijk te compenseren door passende zoetwatermaatregelen, in plaats van een financiële vergoeding uit te keren, wordt samenwerking tussen industrie/waterbedrijven, waterschappen en agrariërs gestimuleerd.

Sommige beken op de hoge zandgronden zijn voor hun watervoerendheid in de zomerperiode deels of volledig afhankelijk van effluent. Het is belangrijk dat door effluent in te zetten voor de watervoorziening

in de landbouw, de ecologie van de beken niet negatief wordt beïnvloed. Het is van belang kennis te ontwikkelen over het effect van hergebruik van effluent op de watervoerendheid van beken en de belangen van zowel landbouw als natuur in samenhang te beschouwen.

Thans speelt in de provincie Brabant de discussie over de wijze waarop met stijghoogteverlagingen in diepe watervoerende pakketten wordt omgegaan en in hoeverre grondwateronttrekkingen daar een rol in spelen². De provincie heeft aangegeven zich te willen bezinnen op het huidige onttrekkingsbeleid. Mogelijk komt daarbij de onttrekking van grondwater ten behoeve van irrigatie in de landbouw aan de orde. Hierbij ligt het voor de hand om oplossingen te zoeken in het verhogen van de regionale zelfvoorzienendheid in de watervraag. Dit project geeft een goed voorbeeld van een dergelijke oplossing door gebiedsgerichte samenwerking, waarbij een partij met een wateroverschot een actieve bijdrage levert aan de watervoorziening van nabijgelegen agrarische bedrijven: door beschikbare (alternatieve) waterstromen te benutten voor de landbouwwatervoorziening kan de vraag naar (diep) grondwater voor beregening worden verminderd, waarmee het uitgespaarde grondwater beschikbaar blijft voor meer hoogwaardige toepassingen. Het huidige grondwaterbeleid is echter nog niet op dergelijk nieuwe oplossingen ingeregeld. Zou een onttrekkingsvergunning gekoppeld moeten worden aan de bijdrage die een agrariër levert aan voorraadvorming, bijvoorbeeld door middel van subirrigatie? Met subirrigatie wordt immers niet alleen het gewas van voldoende water voorzien, maar wordt tevens de grondwatervoorraad aangevuld. Om hier in de praktijk sturing aan te kunnen geven, is het noodzakelijk om inzicht te hebben in de mate waarin bijgedragen wordt aan buffering en voorraadvorming en of dit qua waterkwaliteit ook acceptabel is. Dan kan weloverwogen een beleidskoers worden ingezet, zowel op regionale als op landelijk schaal binnen het Deltaprogramma, om Nederland klaar te maken voor een meer robuuste zoetwatervoorziening.

² <https://www.h2owaternetwerk.nl/h2o-nieuws/1944-brabants-grondwatersysteem-onder-druk>

5 Referenties

Anonymous, 2014. Projectdefinitie Hergebruik Proceswater Bavaria - Verdrogingsbestrijding Lieshout.

Ayars, J.E., Christen, E.W., Hornbuckle, J.W., 2006. Controlled drainage for improved water management in arid regions irrigated agriculture. *Agric Water Manag*, 86(1-2): 128-139.

DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2006.07.004>

Bartholomeus, R.P., Van den Eertwegh, G.A.P.H., Simons, G.W.H., 2015. Naar online en optimale sturing van Klimaat Adaptieve Drainage. *Stromingen*, 24(4): 27-41.

Broks, 1989. Geohydrologisch onderzoek winplaats Lieshout WOB. Broks Adviezen, 's Hertogenbosch.

Cirkel, G., van den Eertwegh, G., Cirkel, G., Eertwegh, G.v.d., Stofberg, S., Bartholomeus, R., 2017. Kennisdocument hergebruik van restwater voor de landbouw-watervoorziening. BTO 2017.009.

De Wit, C.T., 1958. Transpiration and crop yields. *Agricultural Research Reports*, 64.4. Pudoc, Wageningen, 88 pp.

Doherty, J., 2010. PEST: Model independent parameter estimation, Watermark Numer. Comput., Brisbane, Queensland, Australia.

Jalink, M.H., Laeven, M.P., Van Boschginga, W., 2000. Winplaatsonderzoek Lieshout, Eindrapport, KOA 99.225, Kiwa N.V. Onderzoek en Advies, Nieuwegein.

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.

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.

Olsthoorn, T.N., 1982. Verstopping van persputten. Keuringsinstituut voor Waterleidingartikelen.

Rijkswaterstaat, 1985. Verbetering Zuid-Willemsvaart in Noord-Brabant - Principeplan, Rijkswaterstaat, Directie Noord-Brabant.

Schrama, E.J., Jalink, M.H., 1998. Winplaatsonderzoek Lieshout, Onderzoek Nuenen Groep, KOA 99.188, Kiwa N.V. Onderzoek en Advies, Nieuwegein.

Stichting voor Bodemkartering, 1981. Bodemkaart van Nederland; Schaal 1:50000; Toelichting bij kaartblad 51 Oost Eindhoven, Stichting voor Bodemkartering, Wageningen.

Stuyfzand, P., 2017. Hydrogeochemical (HGC 2.4), for storage, management, control, correction and interpretation of water quality data in Excel® spread sheet. BTO2012.244(s) updated in June 2017.

Stuyt, L.C.P.M., 2013. Regelbare drainage als schakel in toekomstig waterbeheer, Alterra, Alterra-rapport 2370, 488 blz, 269 fig.; 40 tab., Wageningen.

Van Bakel, P.J.T., 2013. De betekenis van Hooghoudt nog lang niet 'uitgehold'. *Stromingen*, 19(2): 53-62.

Van Dam, J.C., Groenendijk, P., Hendriks, R.F.A., Kroes, J.G., 2008. Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP. *Vadose Zone Journal*, 7(2): 640-653. DOI:DOI:10.2136/vzj2007.0060

Van der Gaast, J.W.J., Massop, H.T.L., Vroon, H.R.J., Staritsky, I.G., 2006. Hydrologie op basis van karteerbare kenmerken, Wageningen, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte. AlterraRapport 1339. 111 blz. 54 figuur; 27 tab.; 64 ref.

Van der Molen, W., Wesseling, J., 1991. A solution in closed form and a series solution to replace the tables for the thickness of the equivalent layer in Hooghoudt's drain spacing formula. *Agric Water Manag*, 19(1): 1-16.

Wösten, J.H.M., Veerman, G.J., de Groot, W.J.M., Stolte, J., 2001. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks. Vernieuwde uitgave 2001 [Water retention and permeability characteristics of top and sub soils in the Netherlands: the Staring series. Renewed edition 2001]. Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte, Wageningen, 86 pp.

I Ontwerp subirrigatiesysteem

Deze bijlage is ontleend aan de memo 'ontwerp subirrigatie Van Dijk / Bavaria' van 19 oktober 2015, verzonden aan Marthijn Jungeburth, Chistian Heidt, Wilfried van Dijk, Henk Barth, Bart Bardoel, Jan van Bakel, Arnaut van Loon en Martin van der Schans.

In deze bijlage is het ontwerp van de subirrigatie op het perceel van dhr. Wilfried van Dijk, Het Laar 2, Aarle Rixtel vastgelegd. Allereerst wordt de bodemopbouw en de waterhuishoudkundige situatie beschreven, gevolgd door de berekening van de benodigde drainafstand en het ontwerp van de subirrigatie (begrenzing proefperceel, ligging verzamelleiding, diepte drains). Ten slotte is de schets van de wateraanvoer gegeven.

Samenvattend:

- Uit de bodemopbouw en doorlatendheidsproeven volgt dat er sprake is van een goed doorlatende bovengrond (bovenste 1 á 1.5 m), met daaronder een relatief slecht doorlatende ondergrond. Voor sub-irrigatie is dit een gunstige Ausgangssituatie.
- Drainafstand van 10 m voldoet.
- De onderzijde van de verzamelleiding (diameter 160mm) komt te liggen op 15.4 m+NAP. De drains (diameter 6mm) die aftakken van de verzamelleiding, komen op 15.5 m+NAP. Uit de doorlatendheidsproeven volgt dat op de punten A1 (16.53 m+NAP), A4 (16.75 m+NAP) en A6 (16.34 m+NAP) (Figuur I-1) de doorlatendheid hoog is tot resp. 1.4, 1.25 en 1.25 m-mv, ofwel tot 15.13, 15.50 en 15.09 m+NAP. De drains liggen daarmee in de goed doorlatende ondergrond.
- Er wordt een extra loze verzamelleiding aangelegd, waardoor in de toekomst eventueel een groter oppervlak aangesloten kan worden. Op deze extra verzamelleiding worden geen drains aangesloten. Alle drains worden aangesloten op de blauwe verzamelleiding uit Figuur 2-4.
- Ontluchtingsbuizen worden geplaatst aan het eind van de drains. Voor de gekozen opstelling komt dit neer op drie ontluchtingsbuizen.
- Oppervlakte proefperceel: 8.5 ha
- Wateraanvoer naar perceel: tussen 1 en 10 mm/d ($3.5\text{--}35\text{ m}^3/\text{h}$). Bavaria kan maximaal $47\text{ m}^3/\text{h}$ leveren door de aanvoerbuis van 160 mm diameter.
- Theoretisch is de kritieke stijgafstand voor zwak lemig fijn zand 110 cm (bandbreedte 90-140 cm). Dit betekent dat de grondwaterstand binnen 110 cm van de onderkant van de wortelzone moet zitten voor een capillaire nalevering van 2mm/d. Bij deze flux wordt aangenomen dat er geen verdrogingsverschijnselen aan het gewas zullen optreden. Dit zou betekenen, uitgaande van een worteldiepte van 40 cm, dat de grondwaterstand op de hoge 'bult' $17.3 - 0.4 \cdot 1.1 = 15.8\text{ m+NAP}$ mag zijn. Op de laagste delen zou dit een grondwaterstand van $16.3 - 15.8 = 0.5\text{ m-mv}$ betekenen. Het is echter onzeker of de capillaire nalevering in zeer warme zomers ook nog voldoende is. Daarom is een wat ondiepere grondwaterstand gewenst. Echter, dit mag geen natschade veroorzaken in de lagere delen.
- De grondwaterstand die voor het perceel geen droogte- en geen natschade oplevert wordt uiteindelijk in de veldproef bepaald. De berekeningen hier zijn indicatief.
- Het aanvoerreservoir (zie Figuur I-19 voor schets en details) heeft een diameter 3 m, waarin waterpeil ingesteld wordt op in te stellen niveau (naar verwachting tussen 15.5 en 16.2 m+NAP). Dit reservoir levert de aanvoerdruk op het systeem en bepaalt het sub-irrigatieniveau (stijghoogte in drains) dat in het systeem gehanteerd wordt.
- Het reservoir wordt zoveel mogelijk continu bijgevoerd, maar ook 'pulserend' vullen is mogelijk. Dat laatste houdt in dat het niveau in de punt niet constant is, maar steeds leegloopt tot een ingesteld minimum niveau en dan weer vult tot een ingesteld maximum. Het is van belang dat een zo rustig mogelijk waterniveau gehanteerd wordt; turbulentie moet worden voorkomen.

Daarmee moet rekening worden gehouden bij het inregelen van de wateraanvoer (d.w.z. geleidelijk aan vullen).

- In verband met geringe hoeveelheden en snelheden in de aanvoerbuisk van Bavaria wordt de put, indien mogelijk, 1x per dag gelegeerd en vervolgens met geopende afsluiter gevuld tot gewenst niveau met inachtneming van maximale niveau in de put. Het minimale niveau tot waar de put gelegeerd kan worden hangt af van de grondwaterstand in het perceel. Geheel leeg laten lopen van de put zal dus niet gaan, omdat er een verband is met de grondwaterstand in het perceel.

I.1 Bodemopbouw en waterhuishouding

Voor het ontwerp van het sub-irrigatiesysteem en om in te schatten hoeveel water aangevoerd kan worden naar het perceel (jaarlijks, maar ook door het jaar heen), is het van belang kennis te hebben van de bodemkundige en hydrologische situatie van het proefperceel en het omliggende gebied.

Gebiedsbeschrijving

Het proefperceel ligt ten zuidoosten van Lieshout, ten noorden van het Wilhelminakanaal, ten westen van de Zuid-Willemsvaart en ten oosten van de Goorloop (Figuur I-1). Figuur I-10 geeft de hoogtekarte van het proefperceel en de nabije omgeving.



Figuur I-1: Ligging proefperceel.

Uitgebreide analyses van de geografische en geohydrologische situatie zijn uitgevoerd in het kader van Winplaatsonderzoek voor de waterwinning in Lieshout (Jalink et al., 2000). Onderstaande informatie is deels overgenomen uit deze rapportage.

Het proefperceel ligt in een zwak golvend dekzandlandschap dat deels in gebruik is als landbouwgrond of bebouwd gebied. Daarnaast komen grote oppervlakten natuurgebied voor. Er worden drie watervoerende pakketten onderscheiden (Broks, 1989): Het topsysteem bestaat uit de Nuenen Groep, een sterk gelaagd pakket zand-, leem- en veenafzettingen, dat varieert in dikte van ca. 20 m in het zuidoosten tot ca. 36 m in het noordwesten van het gebied. Zeker op lokale schaal kunnen binnen dit pakket verschillende watervoerende lagen bestaan. Het middel-diepe pakket bestaat uit de grofzandige afzettingen van de Formaties van Sterksel en Veghel. Aan de basis daarvan ligt een scheidende laag

bestaande uit de kleien van Kedichem en Tegelen, waaronder zich het diepe pakket bevindt, dat bestaat uit grofzandige en grindafzettingen van de Formatie van Tegelen en de Kiezeloöliet-Formatie (Jalink et al., 2000).

Uit onderzoek naar de verbetering van de Zuid Willemsvaart volgt dat binnen de formaties van Sterksel en Veghel zich de klei van Rosmalen bevindt, die van de Maas tot Schijndel voorkomt als een aaneengesloten laag van 2 à 10 m dikte (op ca. NAP-20m) (Rijkswaterstaat, 1985).

De waterwinning Lieshout onttrekt grondwater aan het diepe pakket (wvp 2). Naast de winning van Brabant Water zijn de winning van Bavaria (op 2 kilometer afstand ten oosten van de winplaats Lieshout; deze winning vindt overwegend plaats uit het middeldiepe watervoerende pakket) en het oppervlaktewaterbeheer door het Waterschap De Aa en het Waterschap De Dommel van invloed op de hydrologie in het gebied (Jalink et al., 2000).

De hydrologische situatie bij de start van de winning Lieshout is beschreven door op basis van metingen uit mei 1990 en toen reeds beschikbare grondwaterstands- en stijghoogtereeksen. In een groot deel van het gebied ten noorden van het Wilhelminakanaal en ten oosten van de waterscheiding tussen Dommel en Aa, daar waar het proefperceel ligt, werden neerwaarts gerichte stijghoogteverschillen berekend van 0,25 tot 0,75 m. Plaatselijk werden nog grotere verschillen berekend. Grondwater kan vanuit de Nuenen Groep wegzijgen naar het middeldiepe pakket (Jalink et al., 2000). Intussen is de situatie wel veranderd, door verplaatsingen van onder meer de winning van Bavaria. Desalniettemin is er nog sprake van wegzijging in het proefperceel.

Formatie	Onttrekkingen	WOB-nummering wvp	Dikte	k/c-waarde
Nuenen	Bavaria b.v.	Wvp 0 Freatische pakket	30 m	k=6m/d
Nuenen leemlagen			3 m	c= 500-1.500 d
Veghel/Sterksel		Wvp 1 Middeldiepe pakket	70 m	k = 35 à 45 m/d
Kedichem/Tegelen	PS Lieshout		40 m	c =40.000 d
Tegelen		Wvp 2 Diepe pakket	90 m	k =15 m/d
Reuver-klei				c=200.000 d

Figuur I-2: Geohydrologische schematisatie van de ondergrond van de omgeving Lieshout zoals gebruikt door Broks (1989). Opgemerkt wordt door Jalink et al. (2000) dat de schematisatie van de Nuenen Groep sterk vereenvoudigd is: er komt in de bovenste 4 meter leem voor en de totale leemdikte in de Nuenen Groep varieert tussen <1 en 14 m (Stichting voor Bodemkartering, 1981).

Nuenen Groep

Door Broks (1989) is het topsysteem als homogene laag gesimuleerd, maar dit is het nadrukkelijk niet gezien de heterogeniteit van de Nuenen Groep (Schrama & Jalink, 1998).

Gelaagdheid van de Nuenen Groep: De heterogeniteit van de Nuenen Groep in het onderzoeksgebied is verschillend. Op de meeste plaatsen komen in de Nuenen Groep, naast zandlagen, leem en/of veenlagen voor. Deze leem en/of veenlagen komen nagenoeg overal in het onderzoeksgebied ondiep voor. In het westen van het onderzoeksgebied komen deze lagen ook diep voor en zijn deze lagen aanzienlijk dikker dan in de rest van het gebied. Plaatselijk bestaat de Nuenen Groep geheel uit zand. Deze plaatsen bevinden zich in het ten noorden van de waterwinning Lieshout gelegen deel van het onderzoeksgebied, ten noorden van Nuenen en in Breugel (Schrama & Jalink, 1998).

Invloed van de Nuenen Groep op de hydrologie: Omdat op de meeste plaatsen ondiep slecht doorlatende leem en/of veenlagen voorkomen, mag verwacht worden dat in het bovenste deel van de Nuenen Groep veel lokale en laterale grondwaterstroming plaatsvindt (Schrama & Jalink, 1998).

Analyse van de aanwezige leemlagen is van belang voor de infiltratiecapaciteit en het effect van sub-irrigatie op de verhoging van de grondwaterstand.

Analyse bodemkaart proefperceel

De bodem in het proefperceel is bEZ21-VII: 'hoge bruine enkeerdgronden; leemarm en zwak lemig fijn zand', met grondwatertrap VII (Figuur I-3, Figuur I-4). Uit de toelichting op de bodemkaart 51OOST is hier onderstaande informatie opgenomen (Stichting voor Bodemkartering, 1981):

"Hoge bruine enkeerdgronden liggen ten zuiden van Breugel en in de omgeving van Lieshout en Aarle-Rixtel. Tot 25 á 30 cm diepte wordt matig humusarm, zwak lemig zeer fijn zand aangetroffen. Daaronder ligt een lichter gekleurde, zeer humusarme laag met meestal op 50 á 70 cm diepte weer een wat donkerder laag van 10 á 20 cm dikte. Deze laag bevat meestal iets meer humus en is vermoedelijk de oorspronkelijke bovengrond (A1b). Hieronder bevindt zich vaak een 10 á 14 cm dikke, zeer humusarme, zwak lemige, zeer fijnzandige moderpodzol-B, die geleidelijk overgaat naar de C1-horizont (Stichting voor Bodemkartering, 1981)."

bEZ21 Hoge bruine enkeerdgronden; leemarm en zwak lemig fijn zand

KAARTEENHEDEN

Code	GHG cm-mv.	GLG cm-mv.	Bewortel- bare diepte cm	Humushoudende bovengrond				Profielschets
				dikte cm	humus %	lutum %	leem %	M50 µm
bEZ21-VI	40-80	160-200	90-120	70-110	3		10-17	130-160
bEZ21-VI	40-80	160-200	90-120	70-110	3		10-17	130-160
bEZ21-VII	100-120	200-240	90-120	70-110	2		10-17	130-160

Profielschets nr. 23, kaarteenheid bEZ21-VII

Analyse, zie aanhangsel 2, nr. 12

	% humus	% leem	M50	Omschrijving
Aanp	0-30 cm	2,5	17	135
			(10-17)	(130-160)
Aan2	30-70 cm	0,8	11	140
			(130-160)	(130-160)
A1b	70-110 cm	1,1	12	150
			(140-160)	(140-160)
B2b	110-120 cm	0,7	7	155
			(140-160)	(140-160)

GHG 110 cm, GLG 230 cm - mv.
Bewortelbaar tot 120 cm.

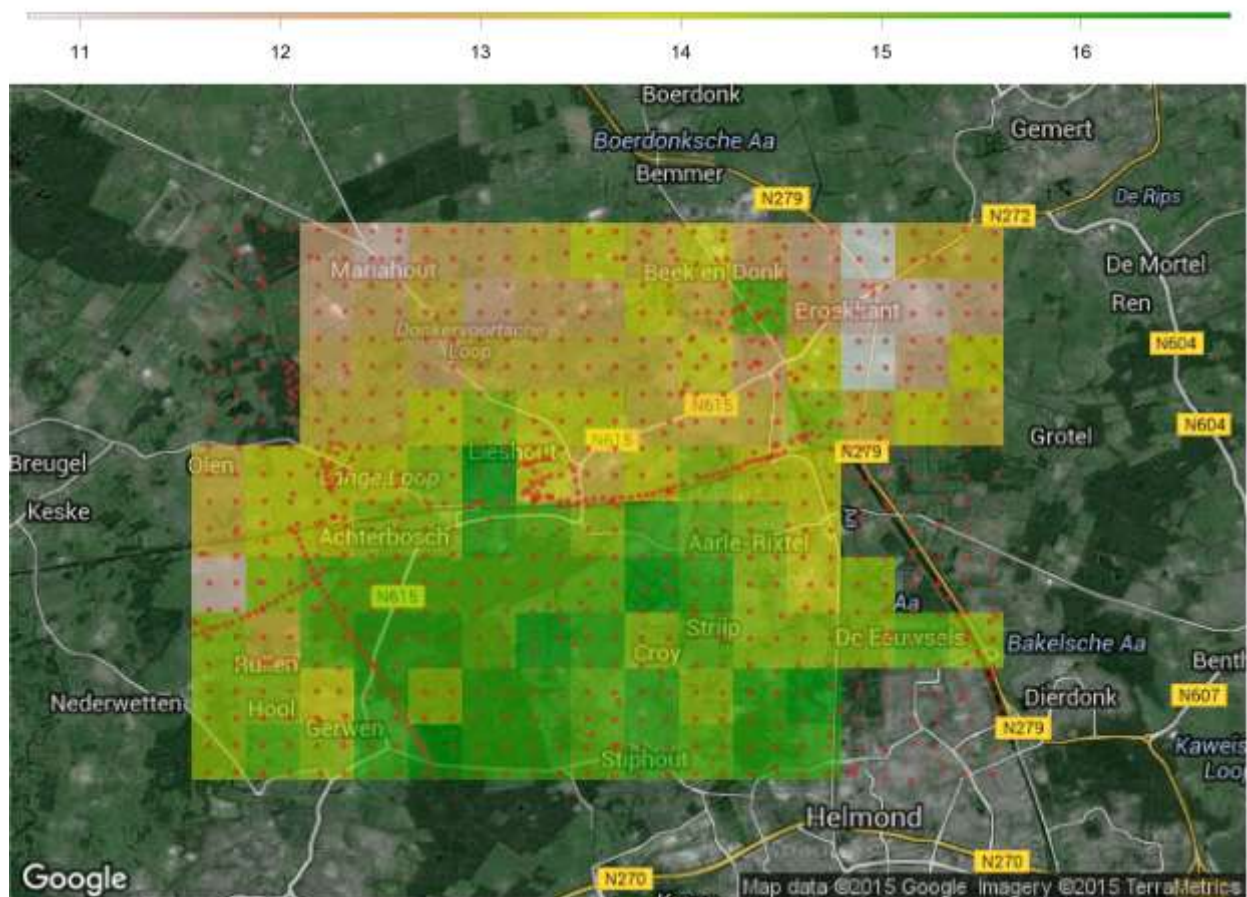
Figuur I-3: Toelichting bodemkaart 51OOST



Figuur I-4: Bodemkaart; uit KOA 99.224 het laar: bEZ21 → hoge enkeerdgronden, leemarm en zwak lemig (0-17.5%)

Analyse boorgegevens

DinoLoket bevat beschrijvingen van een groot aantal (relatief diepe) boringen op en rondom het proefperceel. Hieruit volgt dat de ondiepe leemlaag algemeen voorkomt op een diepte van 11 tot 17m+NAP (Figuur I-5).



Figuur I-5: diepteligging in m+NAP van de bovenste leemlaag o.b.v. boorbeschrijvingen DinoLoket. De rode punten geven de gebruikte boorlocaties.

Waterpeil Goorloop

Het oppervlaktewaterpeil in de Goorloop varieert tussen 12.5 en 13.6 m+NAP (volgt uit uurwaarden van Waterschap Aa en Maas).

Waterpeil Wilhelminakanaal

Kaart met sluizen Wilhelminakanaal:

<https://www.google.com/maps/d/viewer?ll=51.508261,5.221838&t=h&source=embed&ie=UTF8&m=0&spn=0.020767,0.146717&hl=nl&mid=zs91QIDR-oHU.kgnPUkklaiQM>

Mail van RWS: 'Wij beschikken niet over waterstandsdata van dit deel van het Wilhelminakanaal, maar het kanaalpeil is hetzelfde (NAP + 1500 cm) tot Sluis IV bij Haghorst.'

- Uit de tijdreeks van RWS bij Sluis VI Haghorst blijkt dat het waterpeil vrij constant is op 15 m + NAP.
- De waterpassing van Bavaria geeft een waterpeil van 15.024 + NAP bij het perceel.

Mocht het kanaal niet goed afgesloten zijn, dan nog is er in de huidige situatie geen drainage vanuit het perceel.

I.2 Ontwerp subirrigatie

Doel: Ontwerpen en inrichten proefopstelling voor subirrigatie, welke wordt uitgerust met sensoren voor de monitoring van effecten op waterkwantiteit o.b.v. een monitoringsplan. Ook worden voorzieningen getroffen om waterkwaliteitsmonsters te nemen.

I.2.1 Bepaling drainageafstand

Voor de bepaling van de benodigde afstand tussen de drainagebuizen is gebruik gemaakt van de formule van Hooghoudt, aangepast voor situaties met subirrigatie (Van Bakel, 2013):

$$L = \sqrt{\frac{8k_2dm_u + 8k_1(h_p - m_u)m_u + 4k_1m_u^2}{q_i}}; m_u < h_p \quad (0.1)$$

met (zie Figuur I-6):

L = drainafstand [m]

q_i = infiltratie-intensiteit [m/d]

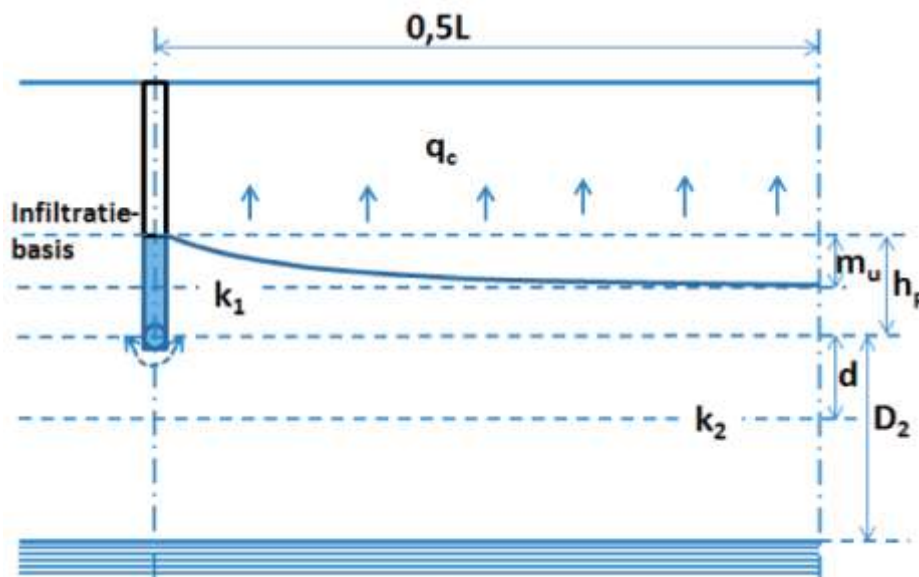
h_p = peilopzet [m]

m_u = uitholling [m]

k_1 en k_2 = verzadigde horizontale doorlatendheid respectievelijk boven en onder drainniveau [m/d]

d = dikte van de equivalentlaag [m]

In de theorie van Hooghoudt voor stroming naar drains door een doorlatende ondergrond, wordt met de radiale weerstand nabij de drains rekening gehouden door de dikte van de aquifer D_2 aan te passen naar de dikte van de equivalentlaag d . d is berekend uit L , D_2 en de straal van de drainagebuizen r [m] volgens Van der Molen & Wesseling (1991).



Afbeelding 3: Schematische voorstelling van 'Hooghoudt' voor subinfiltratie.

Figuur I-6: Schematische voorstelling van de formule van Hooghoudt voor subirrigatie (uit Van Bakel (2013))

Uit de bodemopbouw en doorlatendheidsproeven (losse bijlage, rapportage Landslide) volgt dat er sprake is van een goed doorlatende bovengrond (bovenste 1 á 1.5 m), met daaronder een relatief slecht doorlatende ondergrond. Voor subirrigatie is dit een gunstige uitgangssituatie.

Voor het ontwerp van het systeem gaan we uit van de laagst gemeten doorlatendheden. Voor k_1 , geldig voor de bodemlaag boven de drains volgt deze direct uit de metingen. Voor k_2 dient de gemiddelde

doorlatendheid over alle lagen onder drainniveau tot aan de scheidende laag worden bepaald (Figuur I-7).

Voor het ontwerp van het systeem zijn de parameters gekozen zoals weergegeven in Tabel I-1, met daarbij een bandbreedte voor k_1 , m_u en q_i . Figuur I-8 geeft de berekende drainafstand L als functie van de infiltratie-intensiteit q_i , voor $m_u = 0.1$ en 0.2 m.

Uitgaande van $m_u = 0.1$ m, $k_1 = 3$ m/d en $q_i = 0.01$ m/d volstaat een drainafstand L van 11.2 m.

Bij een peilopzet van 0.5 m, k_1 is 1 m/d (een lage waarde), k_2 is 0.25 m/d en een drainafstand L is 10m is de drainageweerstand bij een uitholling van 0.1 m ongeveer 20 dagen. Dat is aanmerkelijk lager dan hoort bij een drainage die is aangelegd volgens het bekende drainagecriterium, nl. ca. 100 dagen. Een aanwijzing dat het drainagesysteem bij een drainafstand van 10 m ruimschoots zal voldoen.

Vervolgens zijn simulaties met SWAP uitgevoerd om in te schatten hoeveel water gesubirrigéerd kan worden. Gezien de gunstige bodemcondities (hoge doorlatendheid boven drainniveau en een lage doorlatendheid daaronder), zal de drainageweerstand van het regionale systeem beperkend zijn. Echter, door de beperkte beschikbare gegevens van het regionale systeem is deze weerstand op voorhand moeilijk in te schatten. Daarom is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd, waarin het effect van de drainageweerstand naar de Goorloop op de grondwaterstand in het proefperceel is onderzocht.

Grondwaterstandsreeksen zijn niet beschikbaar, maar uit de wateratlas van de Provincie Noord-Brabant volgt: Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand (GHG): 100-140 cm-mv, Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (GLG): 200-250 cm-m.

Bodemopbouw

De bodemopbouw in SWAP is geschematiseerd volgens het bodemprofiel in Figuur I-7. Anisotropie is niet beschouwd.

Meteorologie en berekening

Meteorologie van station Eindhoven is invoer (www.knmi.nl, station 370). In de huidige situatie wordt tevens berekend. Het moment van berekening en de hoeveelheid wordt automatisch bepaald in SWAP, op basis van het voorkómen van droogtestress.

Onderrandvoorwaarde

De stijghoogte in het diepe watervoerende pakket is niet goed bekend. Wel is bekend dat er sprake is van wegzijging vanuit het freatische pakket. Broks (1989) geeft voor de weerstand van de scheidende laag een waarde van 500-1500d (zie ook Jalink et al., 2000). Uit simulaties volgt dat bij deze gegeven c-waarde de wegzijging zo groot is, dat de gegeven GHG op het perceel niet kan worden gerealiseerd. Dat de schematisatie van Broks (1989) te globaal is wordt ook al beschreven door Jalink et al. (2000): *N.B. de schematisatie van de Nuenen Groep is sterk vereenvoudigd: in het gehele gebied komt leem voor in de bovenste 4 m. De leemdikte in de Nuenen Groep varieert tussen < 1 en 14 m. Bron: Stichting voor Bodemkartering (1981).* Vanwege de vele leemlagen zal met name laterale stroming plaatsvinden (Schrama & Jalink, 1998); wat zou betekenen dat de wegzijging naar het diepe watervoerende pakket beperkt is. Om in het model de wegzijging te beperken is een waarde voor de weerstand van de scheidende laag van 5000d gehanteerd. De stijghoogte in het diepe watervoerende pakket is geschat uit peilbuisgegevens nabij de brouwerij (buis B51E0128) en is gemiddeld -350cm+mv, met een amplitude van 75cm.

Drainage

In de huidige situatie ontwatert de Goorloop het perceel en ligt op een afstand van ongeveer 425 m van het midden van het perceel (Figuur I-11). Waterstanden van de Goorloop (op dagbasis) zijn ingevoerd

als ontwateringsbasis. Hoe groot de flux naar de Goorloop is, wordt in belangrijke mate bepaald door de drainageweerstand:

“De drainageweerstand is gedefinieerd als de weerstand tegen grondwaterstroming naar gesloten of open leidingen, te berekenen als de quotiënt van de opbolling en de specifieke grondwaterafvoer bij stationaire stroming. Hierbij wordt uitgegaan van de maximale opbolling midden tussen de sloten en een grondwaterafvoer per eenheid van oppervlakte van het stroomgebied” (uit Van der Gaast et al., 2006):

$$c_d = \frac{m}{q} \quad (0.2)$$

waarin:

c_d = drainageweerstand

m = opbolling; verschil Goorloop en GHG ≈ 2.5 m

q = specifieke afvoer

Het is lastig om met deze formule de drainageweerstand voor het gebied goed in te schatten. Strikt genomen geldt deze vergelijking alleen als een perceel zich midden tussen twee waterlopen bevindt; dat is voor het proefperceel niet het geval. Ook dient er een aanname gedaan te worden over de specifieke afvoer. Om in te schatten bij welke drainageweerstand van de Goorloop de huidige GHG en GLG kunnen worden gereproduceerd zijn SWAP simulaties uitgevoerd met drainageweerstanden naar de Goorloop van 500 tot 5000 dagen. Uit de simulaties blijkt dat alleen met een hoge drainageweerstand van de Goorloop de gegeven GxG's kunnen worden gereproduceerd (Figuur I-12).

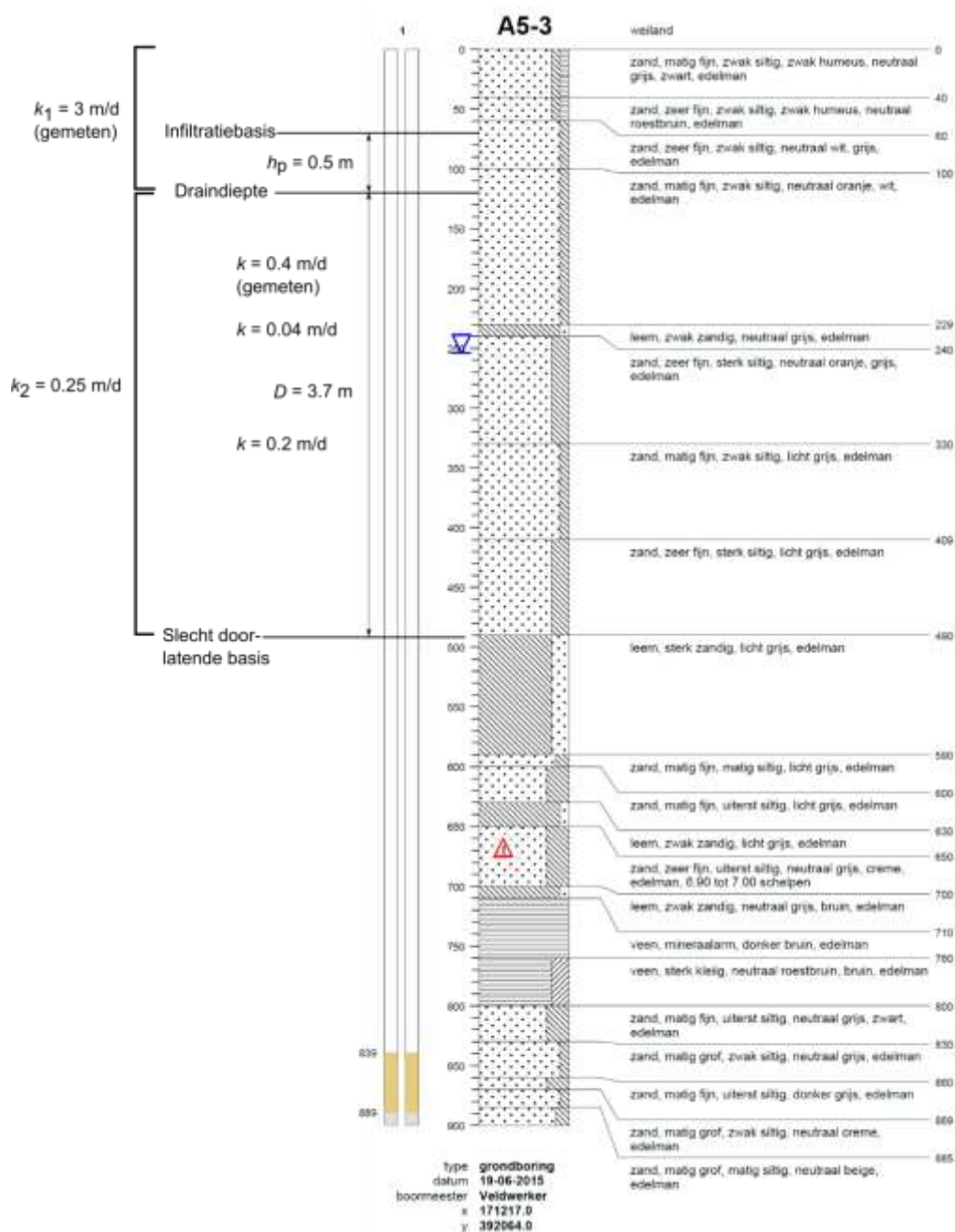
Vervolgens zijn de simulaties herhaald, maar nu met een systeem voor subirrigatie. De volgende kenmerken zijn gehanteerd: drainage- en infiltratieweerstand = 20d, diepte drains = 1.20m-mv en infiltratiebasis is 0.7m-mv. Dit beperkt de hoeveelheid subirrigatie die nodig is om de gewenste grondwaterstand te realiseren. De maximale infiltratieflux q_i bij hoge drainageweerstand naar de Goorloop is 0.005m/d. Eerder werd bepaald dat uitgaande van $m_u = 0.1$ m, $k_i = 3$ m/d en $q_i = 0.01$ m/d een drainafstand L van 11.2 m volstaat. Bij $q_i = 0.005$ m/d volstaat een drainafstand van 16.2m.

In de simulaties van Figuur I-13 is uitgegaan van een constant niveau voor subirrigatie gedurende het hele jaar. Indien in de winter een laag niveau wordt gehanteerd, is bij aanvang van de subirrigatie in het groeiseizoen een grotere flux q_i nodig om de grondwaterstand op het gewenste niveau te brengen. Figuur I-14 toont de benodigde q_i bij een drainageweerstand naar de Goorloop van 2500 d en een geleidelijke verhoging van de peilopzet h_p van 1 tot 15 april. De maximale subirrigatieflux is 12 mm/d. Een (tijdelijk) hoge flux kan bij $L = 10$ m gerealiseerd worden, maar mogelijk is m_u dan tijdelijk groter of duurt het langer voordat de grondwaterstand op het gewenste niveau is.

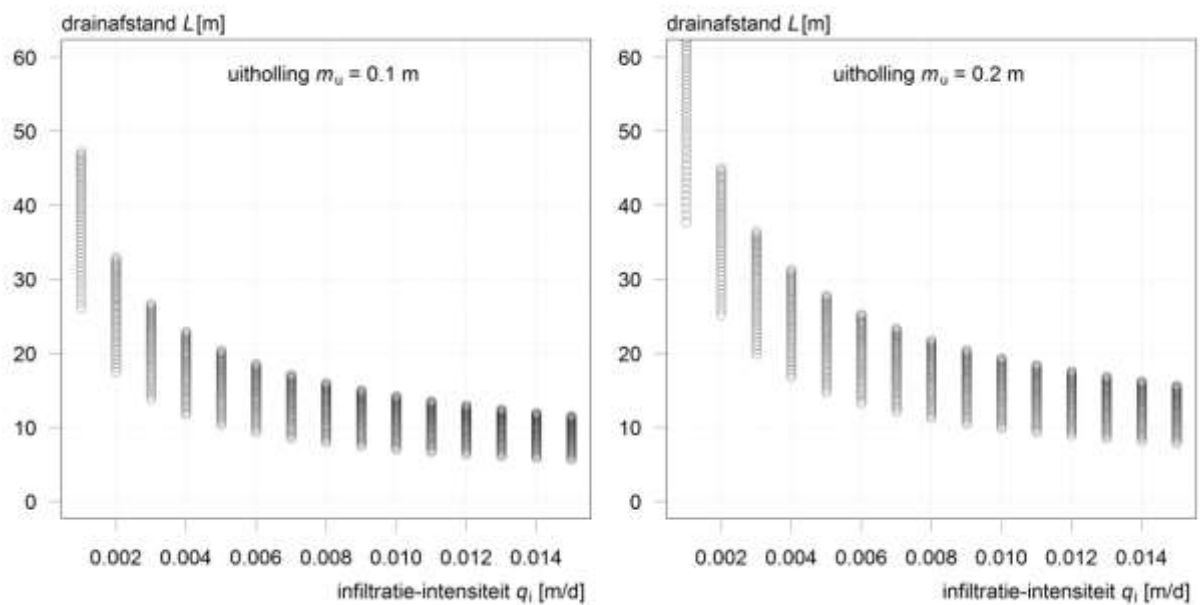
Conclusie: $L = 10$ m is voldoende voor subirrigatie op het perceel.

Tabel I-1: parameterwaarden voor de bepaling van de benodigde drainafstand van het subirrigatiesysteem.

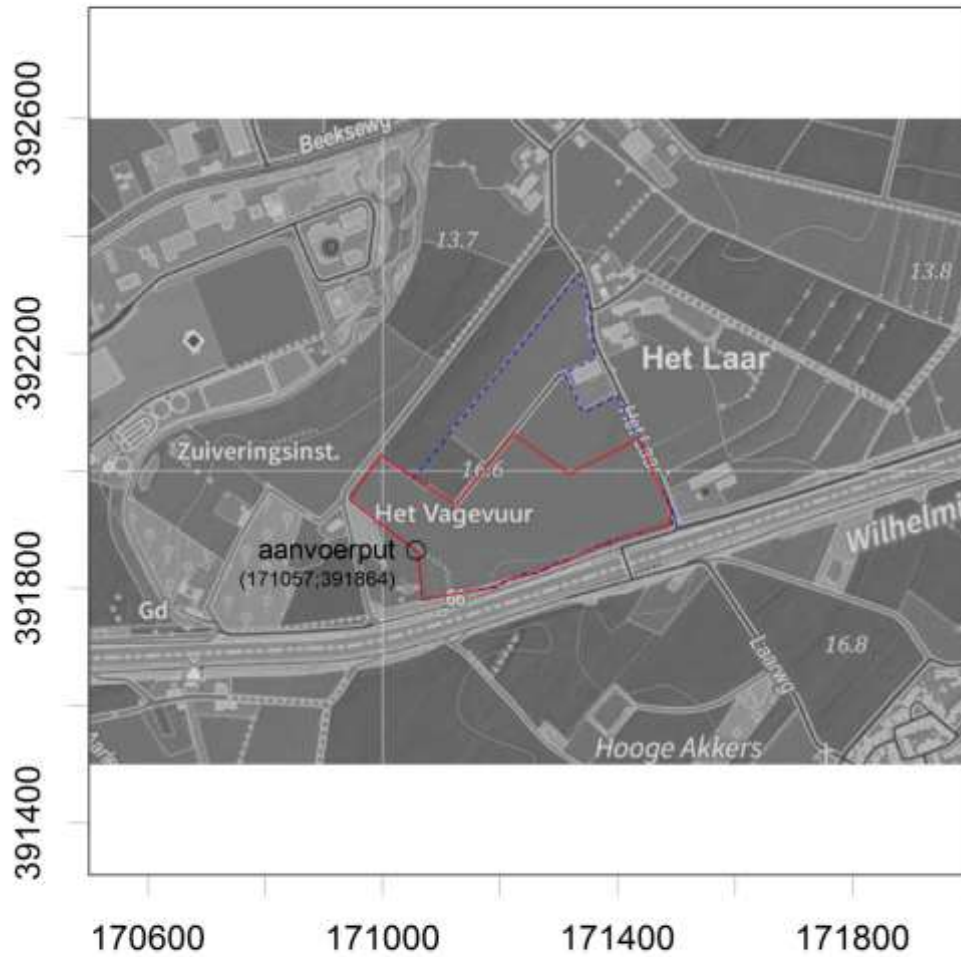
parameter	waarde	opmerking
diepte drains	1.20 m-mv	Gangbare waarde voor peilgestuurde drainage
infiltratiebasis	0.7 m-mv	
h_p	0.5 m	Een hogere waarde resulteert in een dikker doorstroomt profiel boven drainniveau. Door de hoge doorlatendheid van deze laag is L groter bij een hogere waarde van h_p .
m_u	0.1 – 0.2 m	Kleine uitholling voor vlakke grondwaterstand tussen drains
k_1	1-5 m/d	Conservatieve bandbreedte van doorlatendheid boven drainniveau
k_2	0.25 m/d	Gewogen waarde doorlatendheid onder drainniveau
D_2	3.7 m	Berekende drainafstand is nauwelijks gevoelig voor D_2 door de lage waarde van k_2
r	0.03 m	
q_i	0.001-0.015 m/d	



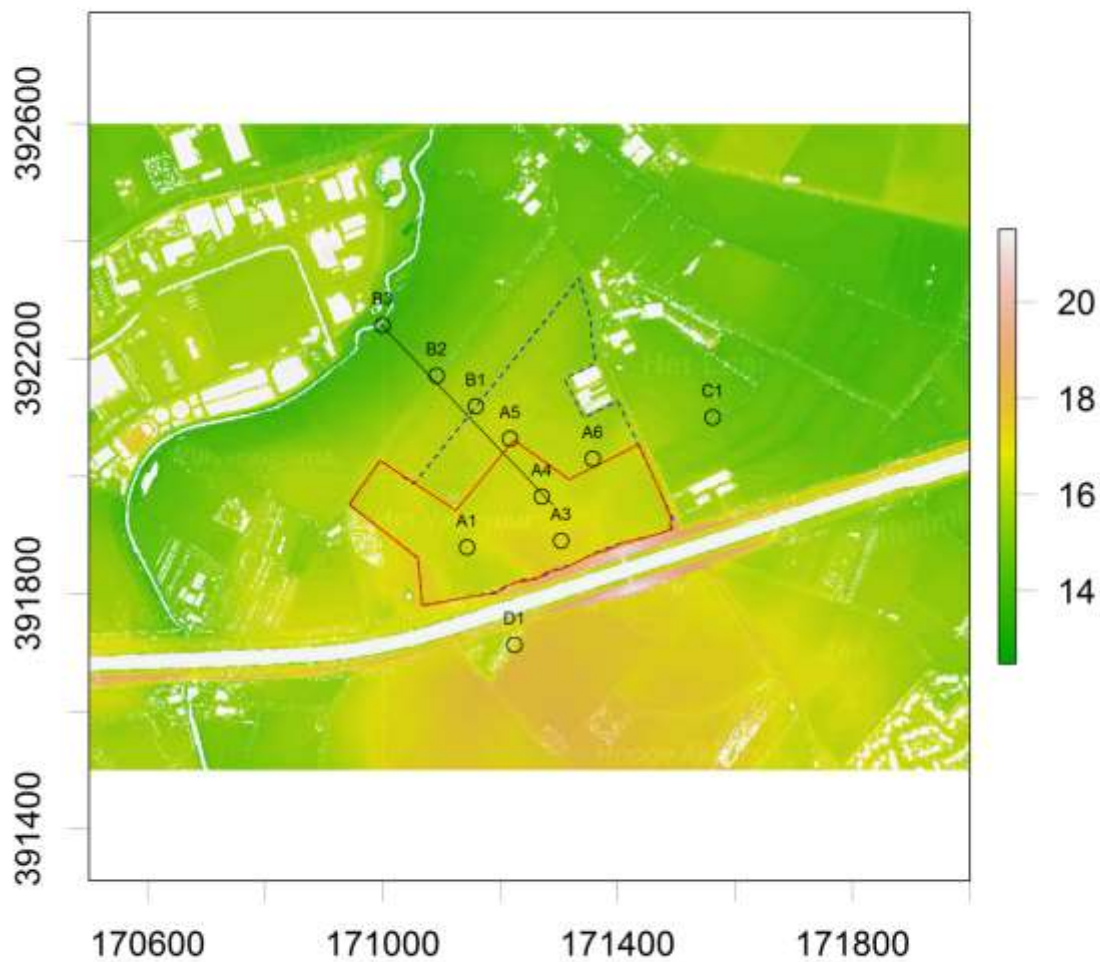
Figuur I-7: boorprofiel A5-3 met daarin aangegeven de parameters waarop de afstand tussen de drainbuizen is gebaseerd.



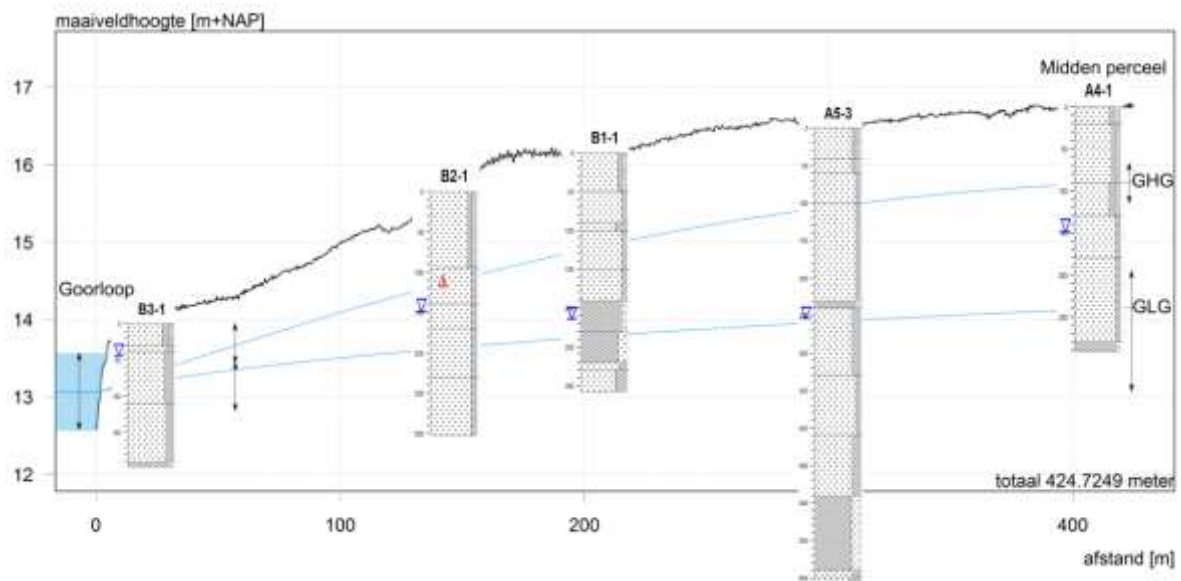
Figuur I-8: Drainageafstand als functie van de infiltratie-intensiteit, met de parameterwaarden uit Tabel I 1. De getoonde bandbreedte wordt veroorzaakt door de verschillende waarden van de doorlatendheid boven drainniveau k_i : hoe hoger k_i , des te groter L mag zijn. Linker vs. rechter figuur: uitgaande van uitholling tussen drains van 0.1 m en 0.2 m.



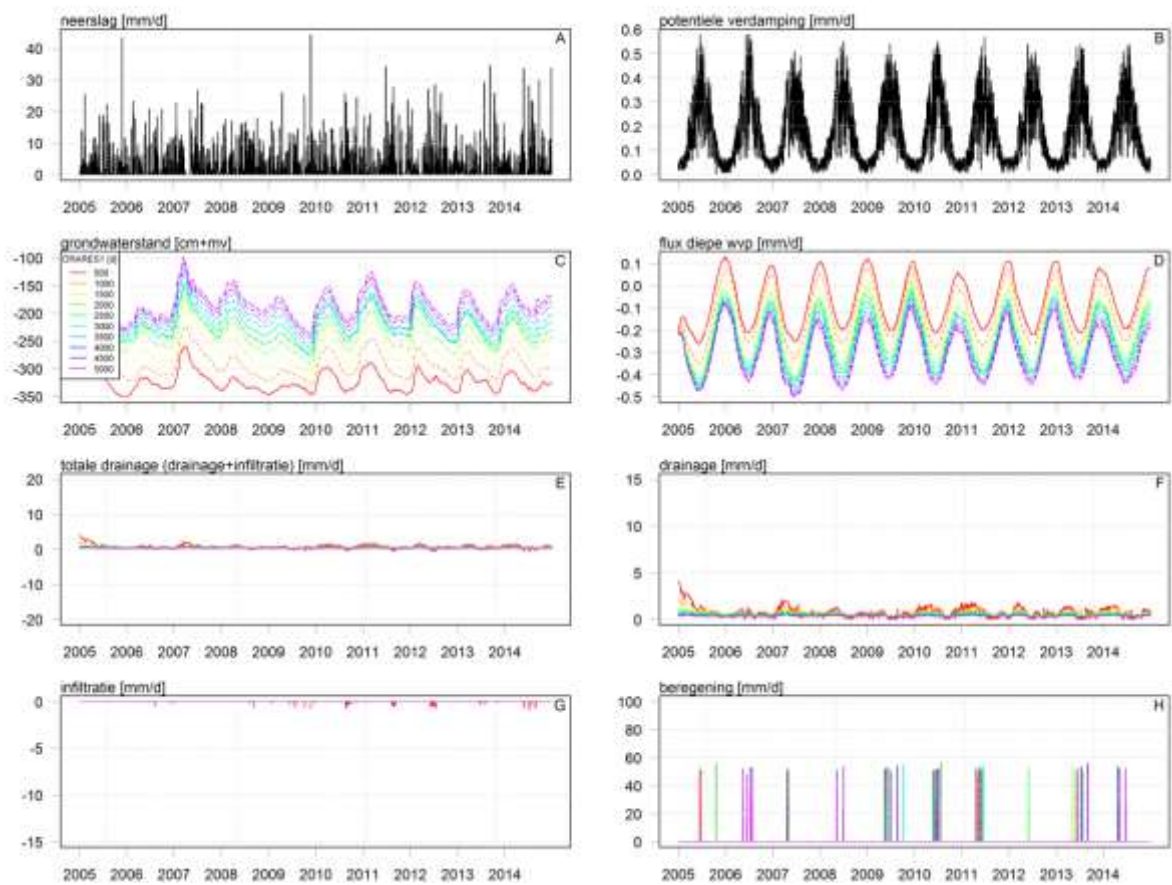
Figuur I-9: Totale perceel W. van Dijk (blauw), afbakening proefperceel (rood) en locatie aanvoerput (zwart).



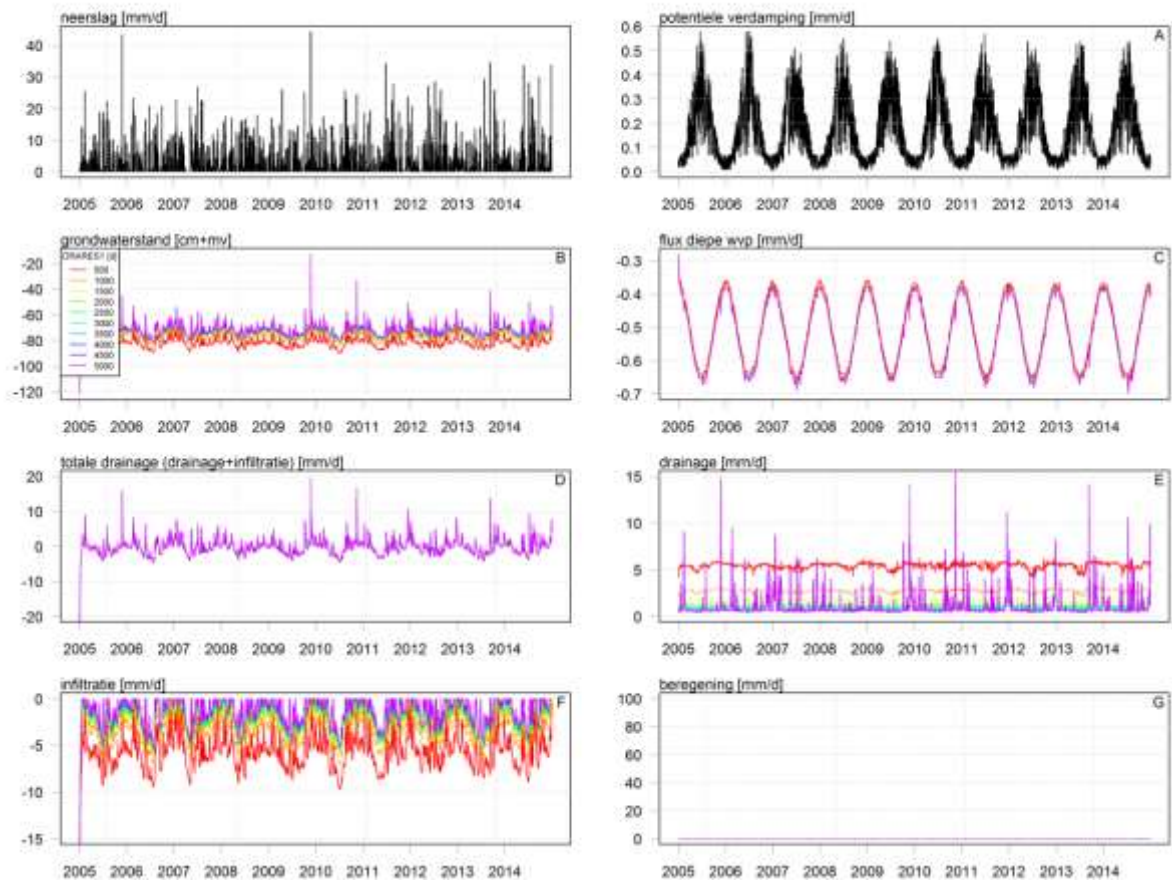
Figuur I-10: Maaiveldhoogte (m+NAP) van het totale perceel (blauw omrand) en het proefperceel (rood omrand, 8.5ha) en de omgeving. Aangegeven zijn tevens de locaties waarvoor bodembeschrijvingen zijn opgesteld. De lijn geeft het transect van de Goorloop naar het midden van het perceel (Figuur I-11).



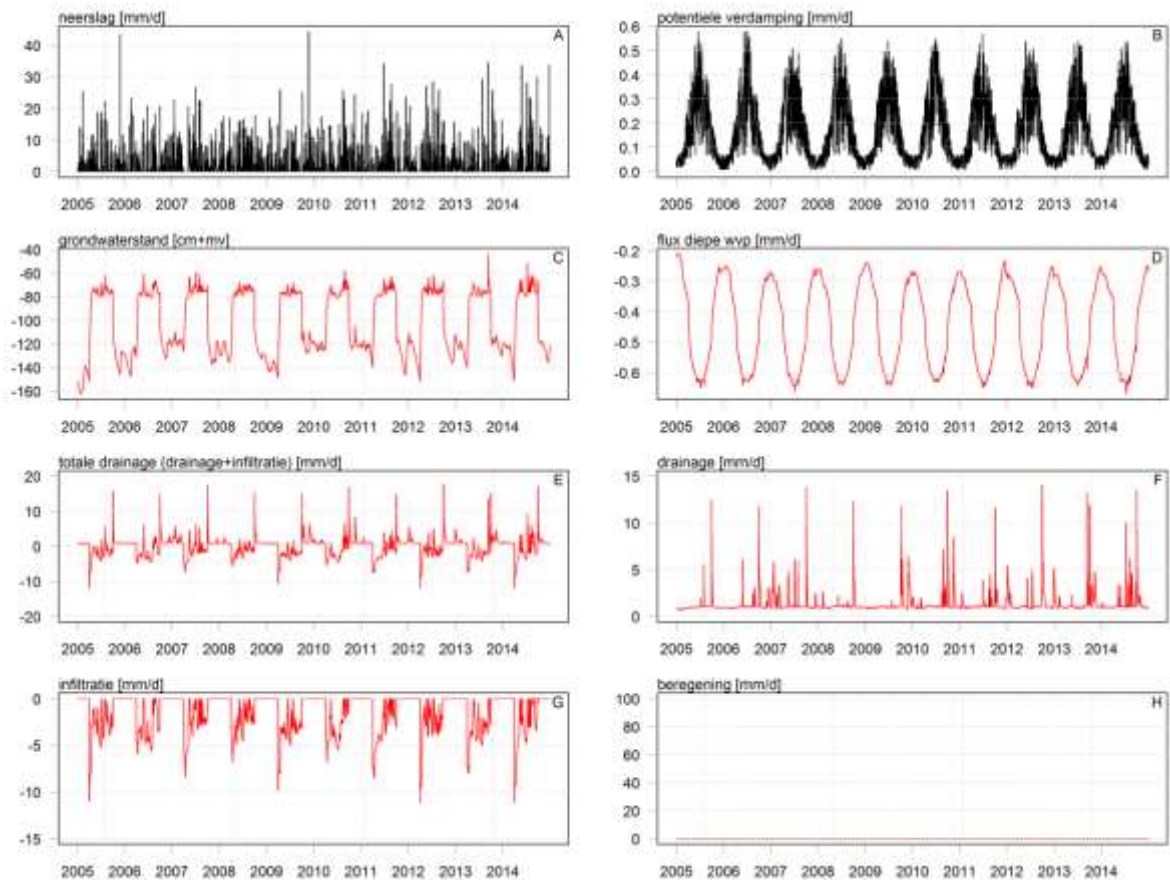
Figuur I-11: Dwarsdoorsnede van de Goorloop naar het midden van het perceel (transect zie Figuur 2-2) met daarin de globale locaties van de bodemopbouw in dit transect en een schets van de GHG en GLG.



Figuur I-12: Resultaten van SWAP-simulaties met verschillende waarden voor de drainageweerstand naar de Gooorloop (DRARES1). Subirrigatie is niet meegenomen, met als doel de uitgangssituatie te reproduceren. Alleen voor hoge weerstanden wordt een grondwaterstandsverloop (C) verkregen dat past bij de GHG en GLG van het perceel. Drainage en infiltratie (E, F, G) betreft de flux naar de Gooorloop.



Figuur I-13: Zelfde als Figuur I-12 maar nu met subirrigatie op het perceel met een drainage- en infiltratieweerstand van 20d. Voor elk van de schematisaties kan een vrij ondiepe grondwaterstand (C) worden gerealiseerd op het perceel, maar de benodigde hoeveelheid water (G) verschilt aanzienlijk. SWAP simulaties met verschillende waarden voor de drainageweerstand naar de Goorloop (DRARES1). Drainage en infiltratie (E, F, G) betreft de flux naar de Goorloop en het systeem voor subirrigatie.



Figuur I-14: Subirrigatie alleen in het groeiseizoen; geen subirrigatie in de winter. Drainageweerstand naar de Goorloop = 2500d. Om bij aanvang van het groeiseizoen de grondwaterstand op het gewenste niveau te krijgen is tijdelijk een hogere flux q_i nodig.

1.2.2 Ontwerp drainage/infiltratiesysteem

Figuur I-15 geeft de hoogtekkaart van het totale perceel en de gekozen afbakening van het proefperceel. Er is voor gekozen geen subirrigatie aan te leggen in het lage deel rondom de stal. Daardoor wordt de kans op eventuele natschade aan het gewas beperkt en kan er een hoger subirrigatieniveau ingesteld worden in de rest van het perceel.

Figuur I-16 geeft de hoogtekkaart van uitsluitend het proefperceel met daarop een schets van het subirrigatiesysteem. Dit hele perceel wordt aangesloten op één verzamelleiding. De afstand tussen de drains is 10 m.

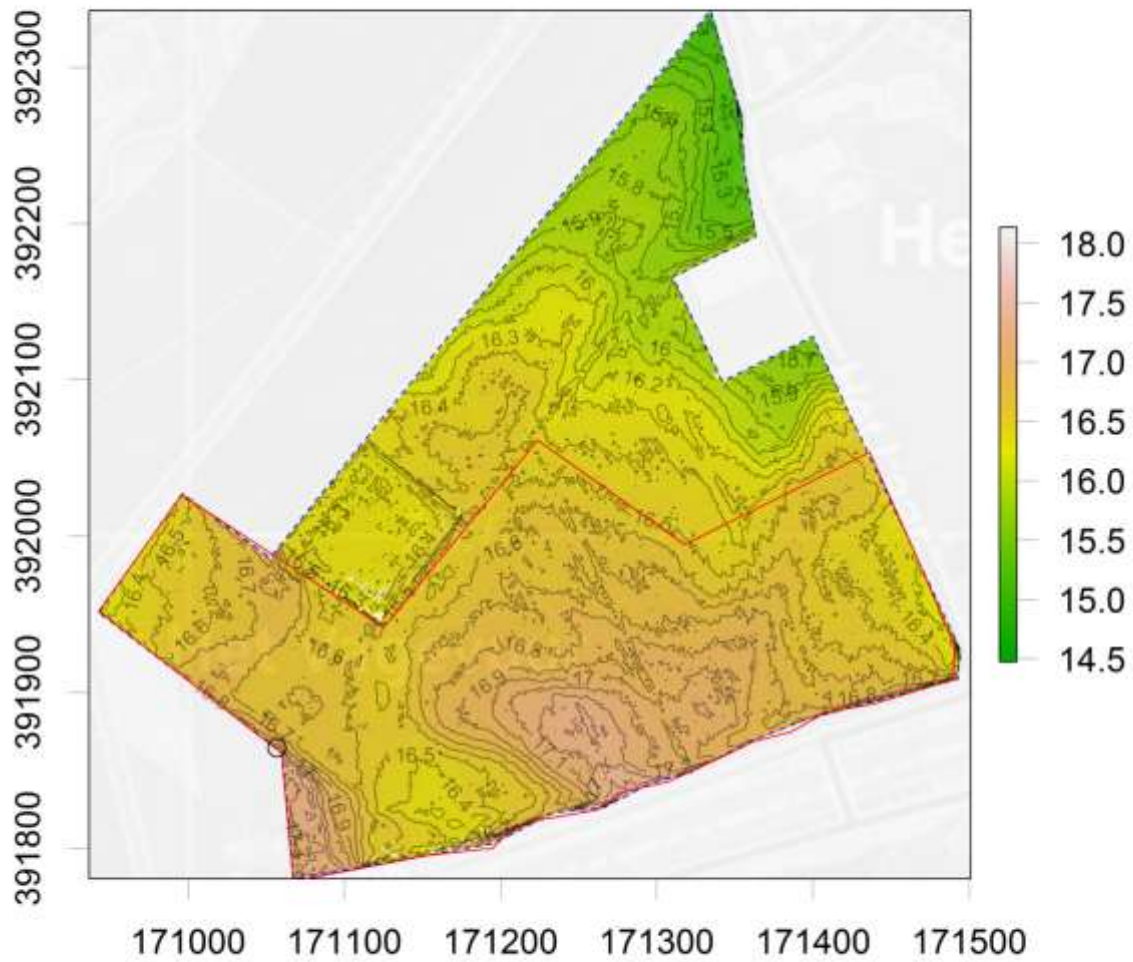
Ook wordt er een loze verzamelleiding aangelegd, waardoor in de toekomst eventueel een groter oppervlak aangesloten kan worden. LET OP: op deze extra verzamelleiding worden geen drains aangesloten. Alle drains worden aangesloten op de blauwe verzamelleiding.

Ontluchtingsbuizen worden geplaatst aan het eind van de drains. Voor de gekozen opstelling komt dit neer op drie ontluchtingsbuizen.

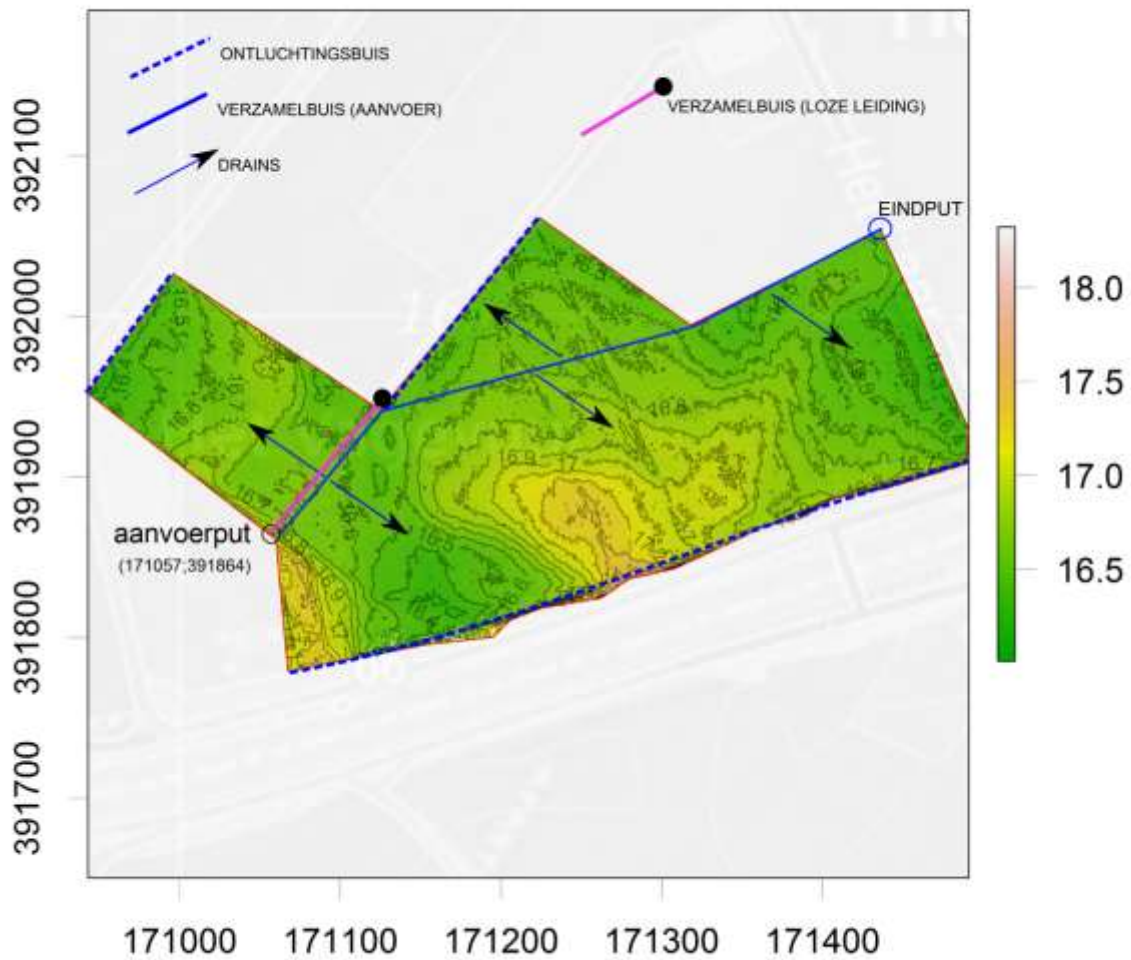
De onderzijde van de verzamelleiding (diameter 160mm) komt te liggen op 15.4 m+NAP. De drains, die aftakken van de verzamelleiding, komen op 15.5 m+NAP. Uit de doorlatendheidsproeven volgt dat op de punten A1 (16.53 m+NAP), A4 (16.75 m+NAP) en A6 (16.34 m+NAP) (Figuur 2-2) de doorlatendheid hoog is tot resp. 1.4, 1.25 en 1.25 m-mv, ofwel tot 15.13, 15.50 en 15.09 m+NAP. De drains liggen daarmee in de goed doorlatende ondergrond. Figuur I-17 geeft de hoogte van het maaiveld boven drainniveau. Figuur I-18 geeft een histogram van de verdeling van deze hoogte. In een klein deel van het perceel zitten de drains ondieper dan 1 m-mv. In een ander deel is de diepte van de drains meer dan 1.5 m-mv. In de praktijkproef moet het waterniveau zo ingeregeld worden dat droogteschade op de hogere delen wordt beperkt, zonder natschade aan de lagere delen te veroorzaken. Er kan ook nog voor worden gekozen in de 'laagtes' geen water aan te voeren. Het hoogteverloop van het perceel zorgt er in ieder geval voor dat de diepte van de grondwaterstand ten opzichte van maaiveld niet overal gelijk zal zijn

De kritieke stijgafstand voor zwak lemig fijn zand is 110 cm (90-140 cm), dit betekent dat de grondwaterstand binnen 110 cm van de onderkant van de wortelzone moet zitten voor een capillaire nalevering van 2mm/d. Bij deze flux wordt aangenomen dat er geen verdrogingsverschijnselen aan het gewas zullen optreden. Dit zou betekenen, uitgaande van een worteldiepte van 40 cm, dat de grondwaterstand op de 'bult' $17.3 - 0.4 - 1.1 = 15.8$ m+NAP mag zijn. Op de laagste delen zou dit een grondwaterstand van $16.3 - 15.8 = 0.5$ m-mv betekenen. Het is echter onzeker of de capillaire nalevering in zeer warme zomers ook nog voldoende is. Daarom is een wat ondiepere grondwaterstand gewenst. Echter, dit mag geen natschade veroorzaken in de lagere delen.

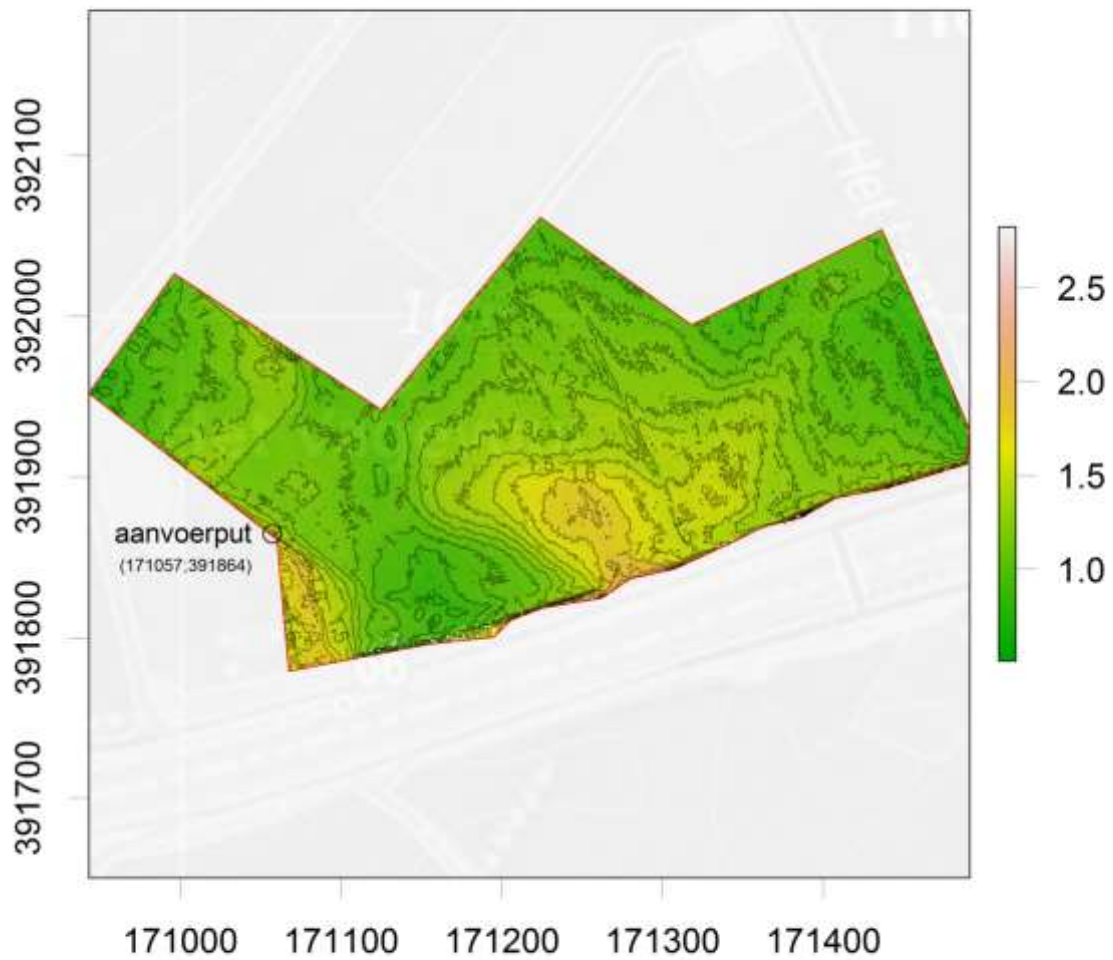
De grondwaterstand die voor het perceel geen droogte- en geen natschade oplevert wordt uiteindelijk in de veldproef bepaald. De berekeningen hier zijn indicatief.



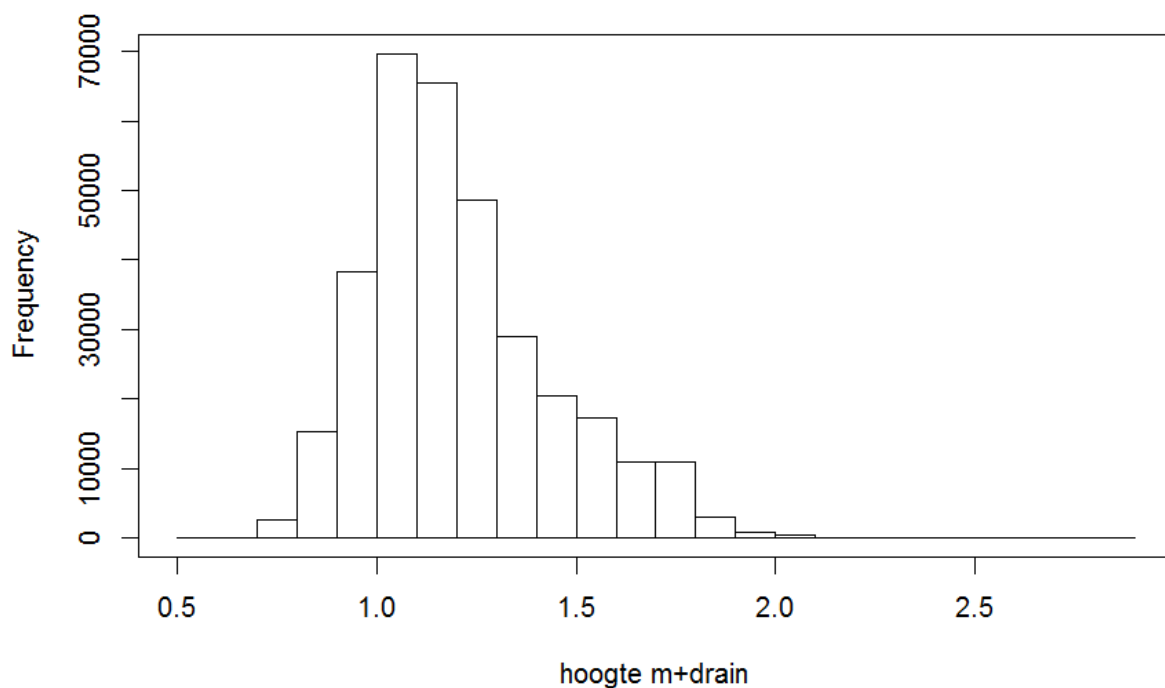
Figuur I-15: Hoogtekaart van het totale perceel (blauw) en het proefperceel (rood). Subirrigatie vindt niet plaats rondom de stal, waar het maaiveld sterk afloopt.



Figuur I-16: Hoogtekaart van het proefperceel, met schets van het drainagesysteem. De verzamelleiding loopt van de put naar het pad en van daaruit midden door het perceel naar de eindput. Aan de uiteinden van de drains bevindt zich een ontluchtingsbuis (3 stuks).



Figuur I-17: Hoogte (m) boven drainniveau van 15.5 m+NAP. Risico op droogteschade bestaat op de 'bult'. Risico op natschade bestaat aan de oostkant van het perceel aan de verharde weg, en aan de uiterste noordwestkant aan het zandpad. Er kan voor worden gekozen de drains niet tot deze wat lagere delen door te leggen.



Figuur I-18: Histogram van de hoogte boven drainniveau (15.5 m+NAP) van het proefperceel. In een klein deel van het perceel zitten de drains ondieper dan 1 m-mv. In een ander deel is de diepte van de drains meer dan 1.5 m-mv. In de praktijkproef moet het waterniveau zo ingeregeld worden dat droogteschade op de hogere delen wordt beperkt, zonder natschade aan de lagere delen te veroorzaken.

Ontwerp wateraanvoer

Het aanvoereservoir (Figuur I-19) heeft een diameter 3 m, waarin waterpeil ingesteld wordt op in te stellen niveau (naar verwachting tussen 15.5 en 16.2 m+NAP). Dit reservoir levert de aanvoerdruk op het systeem en bepaalt het subirrigatieniveau (stijghoogte in drains) dat in het systeem gehanteerd wordt.

Het reservoir wordt zoveel mogelijk continu bijgevuld, maar ook 'pulserend' vullen is mogelijk. Dat laatste houdt in dat het niveau in de put niet constant is, maar steeds leegloopt tot een ingesteld minimum niveau en dan weer vult tot een ingesteld maximum. LET OP: het is hierbij van belang dat een zo rustig mogelijk waterniveau gehanteerd wordt; turbulentie moet worden voorkomen. Daarmee moet rekening worden gehouden bij het inregelen van de wateraanvoer (d.w.z. geleidelijk aan vullen).

We gaan uit van een diameter van de aanvoerput van 3 m. Het waterniveau in de put is ook het waterniveau dat in het perceel gehanteerd wordt. Tabel I-2 geeft de benodigde vulfrequentie (in geval van niet-continue aanvoer) van de aanvoerput voor verschillende putdiameters, bij een uitvoer naar het perceel van 5mm/d en een fluctuatie van het niveau in de put van 0.1 m. Voor een lagere vulfrequentie kan een hogere fluctuatie worden geaccepteerd. In de praktijk moet blijken hoe groot de flux naar het perceel daadwerkelijk is.

Aanvoerbuis vanuit waterzuivering: 0.160m diameter, met minimale stroomsnelheid van 0.4m/s. Dit komt overeen met een debiet van 29.0m³/h. Het maximale aanvoerdebiet is 47m³/h. Voor een perceel van 8.5ha komt dit overeen met een maximale aanvoer van 13.3mm/d.

Er zijn twee aansluitingen naar het subirrigatiesysteem: één voor het proefperceel, één voor eventuele uitbreiding.

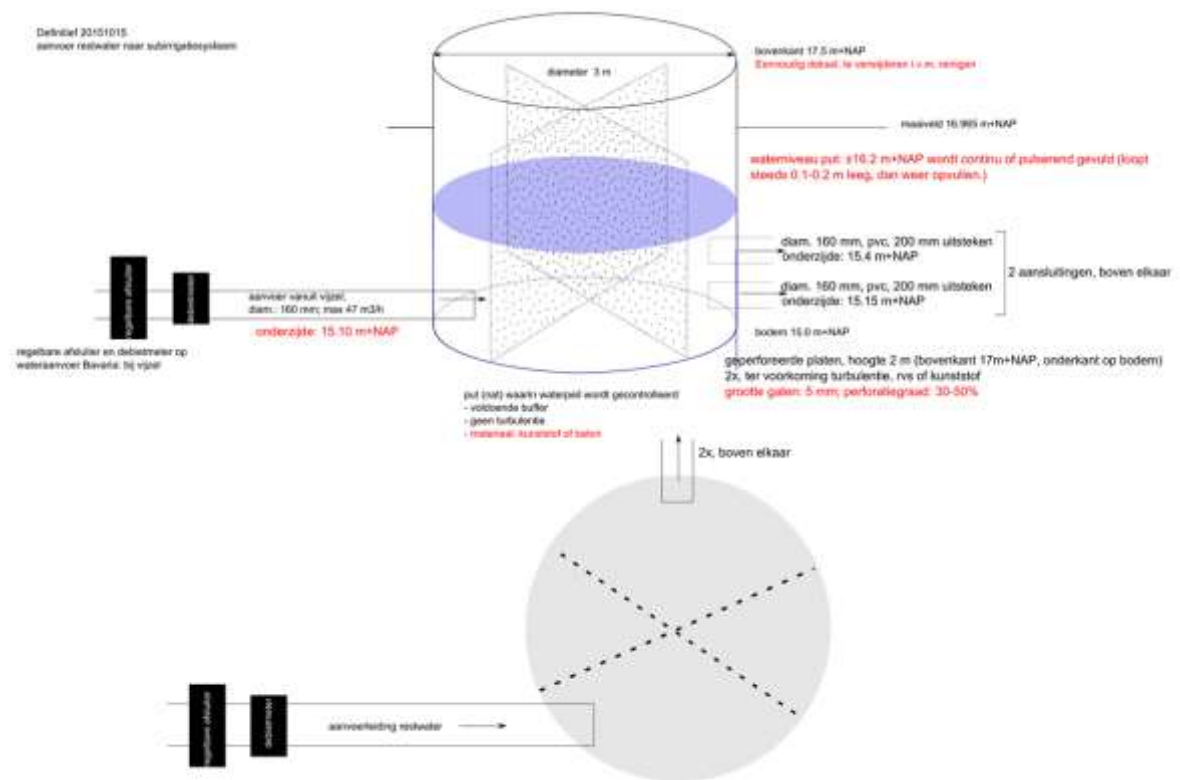
De locatie van de put: x 171057.0362 y 391864.3616. LET OP: dit is de rand van het perceel en dus de rand van de put (en niet het middelpunt).

Voor een niet-turbulent/niet-golvend waterniveau in de put, worden geperforeerde schotten geplaatst. De grootte van de gaten moeten dusdanig groot zijn, dat ze niet verstopt raken. Een rustig niveau in de put is nodig om de grondwaterstand in het perceel goed te kunnen sturen. De schotten zorgen er ook voor dat eventueel aanwezig slib kan bezinken en niet in het subirrigatiesysteem terecht komt.

Niveaumeters voor het meten van de waterstand in de put worden geplaatst in een geperforeerde buis, waarmee de invloed van sterke fluctuaties worden voorkomen. Deze worden geleverd en aangebracht door KWR en hebben geen invloed op de water niveauregeling in de put van Bavaria NV. Bavaria NV zal zelf zorgdragen voor een regelcomponent in de put om het waterniveau te regelen.

Tabel I-2: Benodigde vulfrequentie van de aanvoerput voor verschillende putdiameters, uitgaande van een flux naar het perceel van 5mm/d = 17.7 m³/h en een fluctuatie van het niveau in de put van 0.1 m. Bij een diameter van 3 m wordt de put 25 keer per uur gevuld.

max. aanvoer naar put	47.04849158	m ³ /h							
fluctuatie	0.1	m							
naar perceel	17.70833333	m ³ /h							
diameter [m]	area [m ²]	volume per fluctuatie [m ³]	duur tot min. niveau [h]	duur tot min. niveau [s]	aantal vullingen [/h]	uit [m ³ /h]	in [m ³ /h]	check	
1	0.785398163	0.078539816	0.00443519	15.96668266	225.4695027	17.708333	17.708333		
1.5	1.767145868	0.176714587	0.009979177	35.92503599	100.2086679		17.708333		
2	3.141592654	0.314159265	0.017740759	63.86673065	56.36737568		17.708333		
2.5	4.908738521	0.490873852	0.027719935	99.79176664	36.07512043		17.708333		
3	7.068583471	0.706858347	0.039916707	143.700144	25.05216697		17.708333		
3.5	9.621127502	0.96211275	0.054331073	195.5918626	18.40567369		17.708333		
4	12.56637061	1.256637061	0.070963034	255.4669226	14.09184392		17.708333		



Figuur I-19: Schets aanvoerput

II Kolomproef: verstopping systeem

II.1 Inleiding

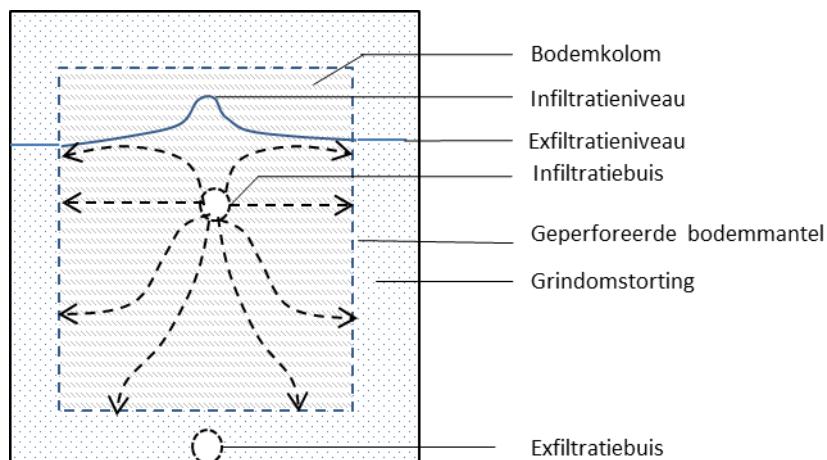
Het effluent van Bavaria bevat slib, voedingstoffen en heeft een relatief hoge temperatuur. Hierdoor is de waterkwaliteit mogelijk suboptimaal wat betreft infiltreerbaarheid. Door de lage stroomsnelheden in het subirrigatiesysteem kunnen vaste bestanddelen die in het restwater aanwezig zijn zich ophopen, ze kunnen door micro-organismen worden geproduceerd, of door neerslagreacties ontstaan. Hierdoor kan de infrastructuur naar verloop van tijd verstoppingen, zodat een groter drukverschil over de drainbuizen nodig is om het gewenste debiet te kunnen bereiken. De praktische consequentie hiervan is dat extra inspanningen nodig zijn om over een langere periode voldoende te kunnen infiltreren, bijvoorbeeld voor het doorspoelen van de drainbuizen. Op voorhand is echter niet bekend over welke termijn en in welke mate verstopping op zal treden, en dus hoe groot dit probleem is.

Om meer zicht te krijgen op het risico op verstopping van het infiltratiesysteem is een kolomproef uitgevoerd. Met een kolomproef kan het aanvoerregime nauwkeurig gestuurd worden, en zijn de fluxen eenvoudiger en nauwkeuriger te meten dan bij een veldproef. Door het drukverschil en debiet continue te monitoren, kan de verstopping in de tijd worden gevolgd en gekwantificeerd. Het doel van deze proef was om vast te stellen of de infiltratieweerstand van het subirrigatiesysteem onder invloed van effluent van Bavaria in de tijd toeneemt.

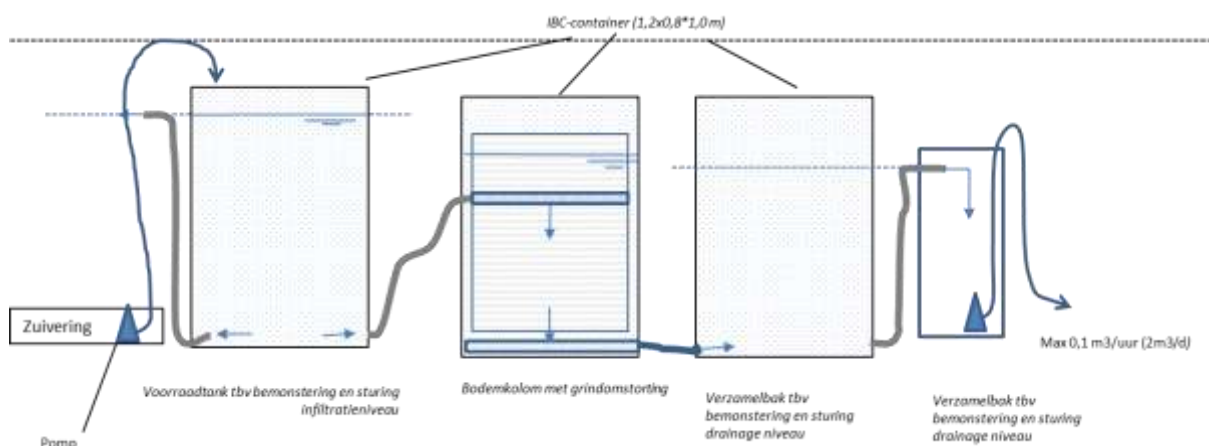
II.2 Aanpak

Overzicht

Twee ongestoorde bodemkolommen, met daarin een drainbuis, zijn gekoppeld aan een voorraadvat dat op peil is gehouden met continue aanvoer van effluent uit de zuivering van Bavaria. De bodemkolommen zijn tevens, via geperforeerde mantels, gekoppeld aan twee uitstroomvaten waarin het niveau constant wordt gehouden (Figuur II-1 en Figuur II-2). Door het drukverschil over de bodemkolommen en het debiet uit de bodemkolommen met drukopnemers te meten, kon het verloop van de weerstand over de bodemkolom in de tijd worden berekend. De weerstand is namelijk gelijk aan het drukverschil gedeeld door het debiet. De toename van de weerstand is als maat voor verstopping gebruikt.



Figuur II-1: Principetekening van de kolomproef



Figuur II-2: Conceptuele weergave van de proefopstelling

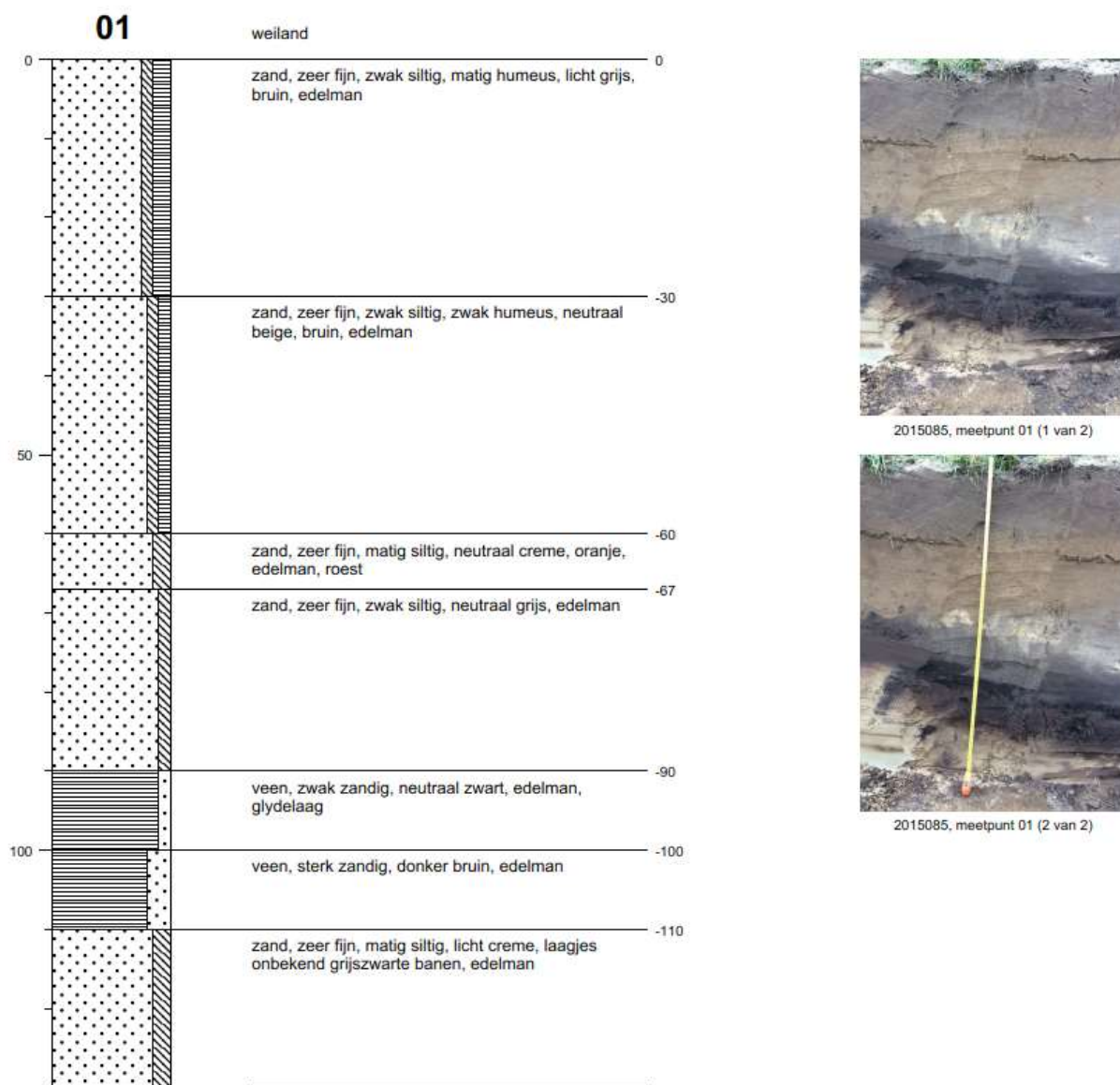
Bodemkolommen

Op het perceel van Wilfried van Dijk zijn twee ongestoorde bodemkolommen van 1x0,5x0,5 m (lengte x breedte x hoogte) gestoken. Hiertoe is eerst 75 cm grond afgegraven, zodat de bodemkolommen representatief zijn voor de praktijkproef met een draindiepte van 1 meter. Vervolgens is een roestvrijstalen mantel loodrecht naar beneden in de bodem gedrukt. De lange zijden van de mantel zijn geperforeerd (doorlaat 42 %), en de korte zijden zijn niet-geperforeerd (Figuur II-3). Daarna is een geperforeerde roestvrijstalen bodemplaat onder de mantel doorgetrokken, en is een drainbuis met een diameter van 6 cm en kokosomhulsel (identiek aan de praktijkproef) over de lengte van de bodemkolom ingebracht. Ten slotte is de bodemkolom, inclusief mantel en bodemplaat, in een container gehesen en omstort met filterzand (korrelgrootteverdeling 1,0-1,6 mm).

Ten behoeve van de onderlinge vergelijkbaarheid zijn de bodemkolommen op beperkte afstand van elkaar gestoken. Bij het steken van de bodemkolommen bleek echter al dat de bodem sterk heterogeen is en dat de bodemkolommen wezenlijk verschillen in textuur. Ongeveer 2 meter ten noorden van bodemkolom 2 is een beschrijving van het bodemprofiel opgesteld (Figuur II-4). Dit bodemprofiel komt op hoofdlijnen overeen met het profiel van bodem waar de bodemkolom gestoken is. Volgens de beschrijving bestaat de bodemkolom uit 20 cm zeer fijn, zwak siltig en niet humeus zand, met daaronder 20 cm zwak tot sterk zandig veen en 10 cm zeer fijn, matig siltig zand. Op basis van veldwaarnemingen is vastgesteld dat de veenlaag in de bodemkolom minder dik is en dat mogelijk een hoekje leem in de bodemkolom terecht is gekomen.



Figuur II-3: Geperforeerde RVS-mantel voor het steken van een ongestoorde bodemkolom en profiel van de bodemkolom (kolom 2)



Figuur II-4: profielbeschrijving ter plaatse van de tweede bodemkolom die is gestoken op het proefperceel

Proefopzet

Gedurende de periode november 2015 tot en met november 2016 zijn voor beide kolommen een constant, en onderling vergelijkbaar, aanvoerniveau en afvoerniveau nagestreefd. Tijdens de inregelperiode van de wateraanvoer, gedurende de eerste maanden, is hiervan afgeweken. Later traden afwijkingen op als gevolg van het uitvallen van de aanvoerpomp door stroomstoringen en het dichtgroeien van de aan- en afvoerleidingen met algen. In dit rapport worden alleen de resultaten voor de periode 16-8-2016 t/m 8-11-2016 beschreven. Deze resultaten zijn vergelijkbaar met die voor andere tijdvensters waarbij de proefopstelling goed functioneerde.

Monitoring

Tijdens de proeven is het waterniveau in het voorraadvat en in beide uitstroomvaten geautomatiseerd, op uurbasis, gemeten. Het verschil tussen de waterniveaus is gelijk aan het drukverschil over de proefopstelling (drain, bodemkolom en mantel). Op dezelfde meetmomenten zijn tevens de waterniveaus in de opvangbakken, die via slangen aan de uitstroomvaten zijn gekoppeld, gemeten. Deze waterniveaus zijn op basis van ijklijnen omgerekend naar volumes, en vervolgens, op basis van de meetfrequentie, naar debieten. De eerstvolgende metingen na het leegpompen van de voorraadvaten zijn vanwege verstoring verwijderd.

Analyses

De hydraulische weerstand van de proefopstelling is gedefinieerd als het debiet genormaliseerd naar het drukverschil over de drain, c.q. het debiet bij 1 meter drukverschil. Het verloop van de weerstand in de tijd is daarmee berekend door op elk meetmoment het debiet te delen door het drukverschil. Voor een goede schatting van de weerstand is het daarom noodzakelijk dat alle drukopnemers goed functioneerden en er geen verstoringen in de wateraanvoer of -afvoer plaatsvonden.

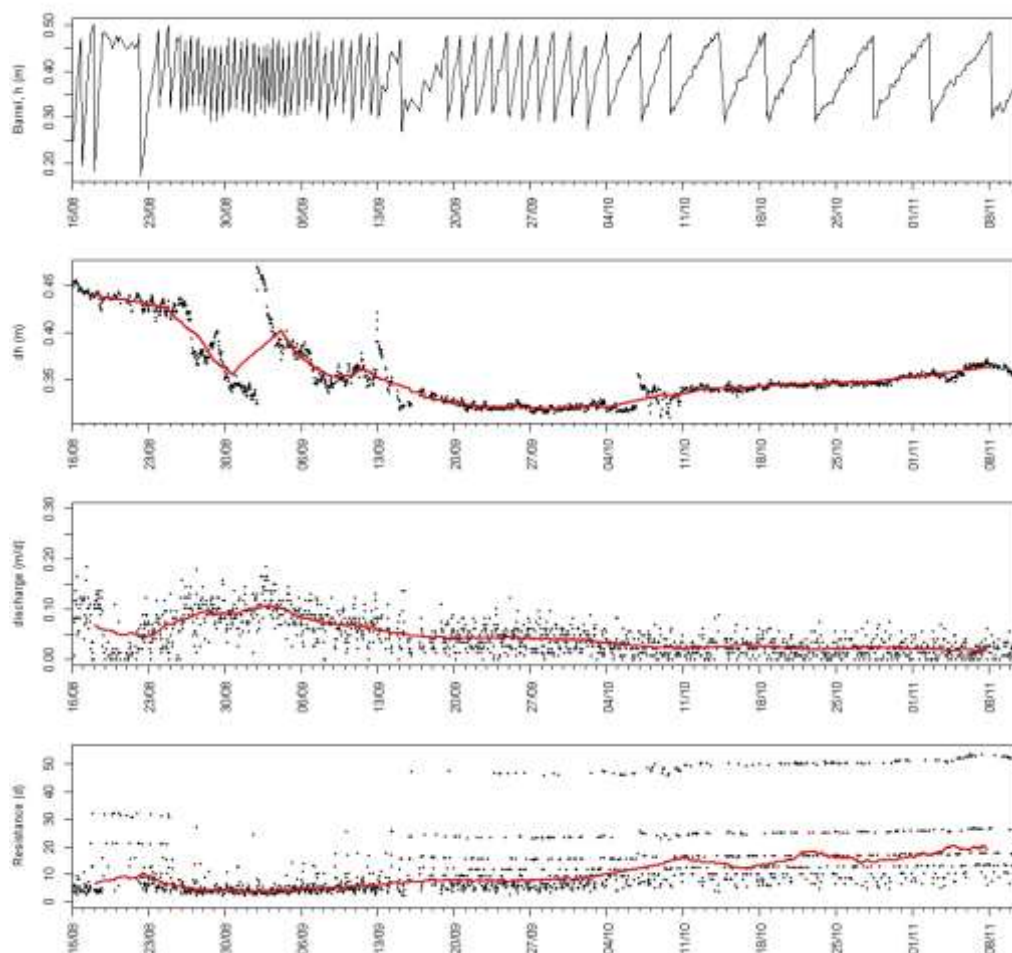
II.3 Resultaten

In Figuur II-5 staan de resultaten van de kolomproef voor de periode 16-8-2016 tot en met 8-11-2016 weergegeven. Hieronder worden de hoofdlijnen uit deze figuur kort beschreven.

In het bovenste panel van Figuur II-5 staat het gemeten verloop van de waterstand in het opvangvat weergegeven. Dit vat wordt langzaam gevuld met water dat door de kolom heen is gestroomd en het wordt leeggepompt met een pomp zodra het waterniveau de afslaghoogte bereikt. Hierdoor heeft het verloop van de waterstand in het vat de vorm van een zaagtand. Uit de figuur blijkt dat de zaagtand steeds verder uitgerekt wordt. Dit komt doordat het vat steeds minder snel gevuld wordt en daardoor ook minder vaak wordt leeggepompt. Kortom: het debiet door de kolom neemt geleidelijk af.

Het exacte verloop van het debiet is weergegeven in het derde panel. De zwarte punten in dit panel zijn de waarden die zijn berekend op de meetwaarden voor elk meetmoment. De rode lijn is het voortschrijdend gemiddelde. Uit deze rode lijn blijkt dat het debiet in eerste instantie nog toenam tot ruim 0,1 m/d (10 mm/d), maar daarna in een tijdsbestek van zo'n 2 maanden (namelijk vanaf 1/9) afneemt tot 0,03 m/d (3 mm/d). Deze afname van het debiet vond voor een groot deel plaats in een periode (namelijk vanaf 27/9) dat het drukverschil over de bodemkolom juist met 5 cm (15%) toenam (zie het tweede panel). Dit is een duidelijke aanwijzing dat de weerstand tegen infiltratie van effluent met de tijd is toegenomen.

In het onderste panel van Figuur II-5 staat het verloop van de weerstand weergegeven. Deze weerstand is berekend door het drukverschil (panel 2) te delen door het debiet (panel 3). De zwarte punten geven wederom de berekende weerstand op basis van de ruwe data voor elk meetmoment. De rode lijn het voortschrijdende gemiddelde daarvan. Uit deze figuur blijkt dat de weerstand gedurende de eerste 3 weken infiltratie vrijwel stabiel is. Daarna stijgt de weerstand in negen weken tijd van 3 naar 23 dagen. Dit zou betekenen dat in een tijdsbestek van negen weken een zeven keer hogere druk op het subirrigatiesysteem nodig is om hetzelfde debiet te kunnen handhaven.



Figuur II-5: Verloop van de weerstand over de bodemkolom met de tijd (onderste panel), zoals berekend is op basis van het drukverschil over de bodemkolom (tweede panel) en het debiet door de bodemkolom (derde panel). Het debiet is berekend uit het verloop van de waterstand in het opvangvat dat met een pomp zo nu en dan werd geleegd (bovenste panel).

II.4 Conclusies

Het effluent van Bavaria heeft een aanzienlijke verstoppingspotentie, zodat de aanvoerhoogte gedurende het groeiseizoen steeds hoger moet worden ingesteld om het gewenste aanvoerdebiet te

kunnen realiseren. De termijn waarbinnen de verstopping optreedt bedraagt een aantal weken en is veel kleiner dan de gemiddelde lengte van de periode van watervraag. Daarom loopt het systeem mogelijk in de loop van het groeiseizoen tegen haar grenzen aan, doordat de noodzakelijke aanvoerhoogte na verloop van tijd niet meer gerealiseerd kan worden. De mate waarin de verstopping beheersbaar gemaakt kan worden is daarom een wezenlijke voorwaarde om subirrigatie van effluent tot praktijksucces te maken. Mogelijk geschikte maatregelen hiervoor zijn (1) het tijdelijk stopzetten of pulseren van de aanvoer, (2) het geregeld leegpompen of leeg laten lopen van het infiltratiesysteem, (3) het onder hoge druk schoonspoelen van de drains, of (4) het chemisch spoelen van de drains.

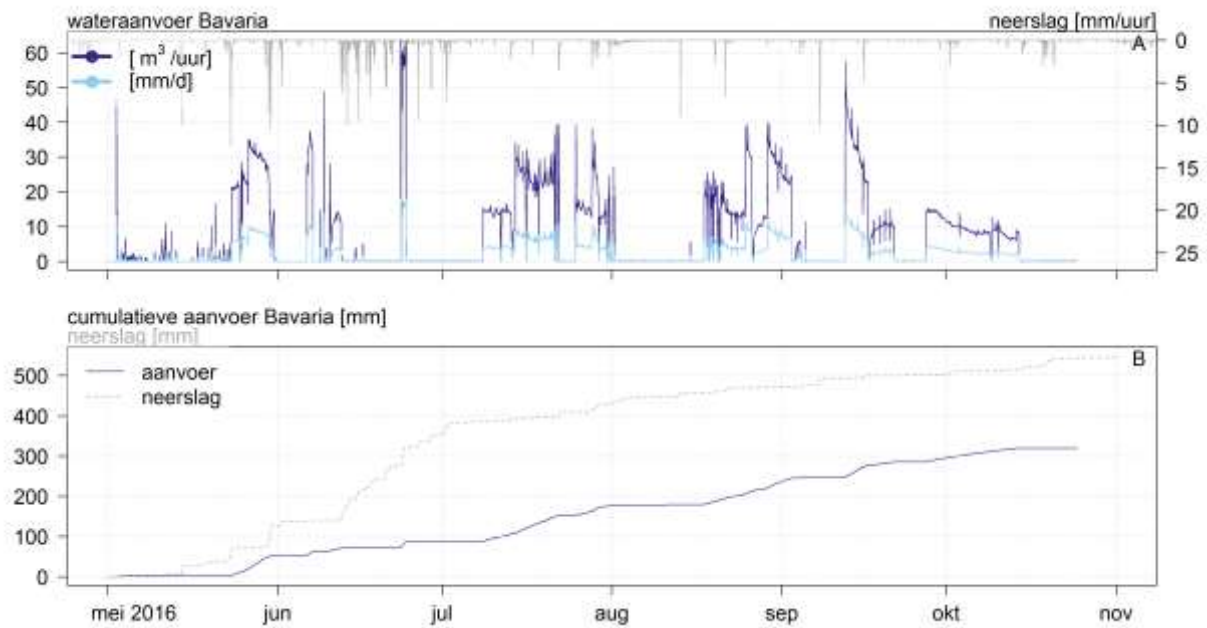
III Meetresultaten veldproef 2016 en 2017 (selectie)

Deze bijlage geeft de meetresultaten van de veldproef en is een combinatie van twee losse memo's over de resultaten over respectievelijk 2016 en 2017 die aan de Raad van Toezicht van Boer Bier Water, de familie van Dijk, Bavaria en ZLTO zijn gedeeld.

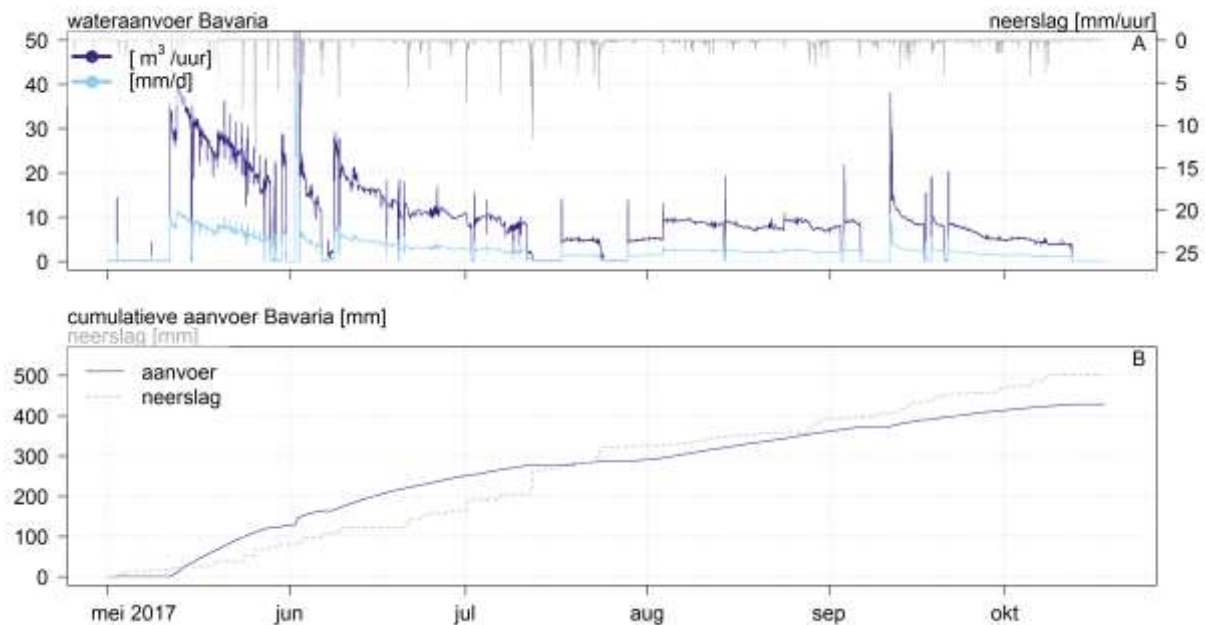
III.1 Infiltratiehoeveelheid

2016: In totaal is in 2016 ongeveer 320 mm ($\pm 28.000 \text{ m}^3$) water aangevoerd (Figuur III-1B). Opgemerkt moet worden dat bij aanvang van de proef de debietmeters nog niet operationeel waren. Vanwege de weersomstandigheden en enkele storingen, heeft de wateraanvoer enkele keren stilgelegen (Figuur III-1A). Op dagbasis varieert de wateraanvoer tussen 3 en 10 mm/d (Figuur III-1A). De benodigde hoeveelheid water is onder meer afhankelijk van de gewenste stijging van de grondwaterstand, ofwel het verschil in waterniveau in het aanvoerreservoir (op afstand in te stellen) en de grondwaterstand in het perceel. Uit Figuur III-1A blijkt dat het in 2016 niet gelukt is om langdurig in een aaneengesloten periode water aan te voeren.

2017: Er is ongeveer 430 mm ($\pm 36.500 \text{ m}^3$) water aangevoerd in 2017 over de gemeten periode (Figuur III-2B). In 2017 is dus aanzienlijk meer water aangevoerd naar het perceel dan in 2016 (Figuur III-1 en Figuur III-2), dit was gezien de weersomstandigheden in de zomer van 2016 (extreem nat) ook verwacht. Het verschil in neerslag tussen de zomer van 2016 en die van 2017 is goed te zien in de cumulatieve neerslag tijdens de periode van wateraanvoer. Eind juni 2016 was een totale neerslag bereikt van bijna 400 mm, terwijl de totale neerslag eind juni 2017 ongeveer 200 mm was. Vanaf de start van de subirrigatie in 2017 is daarom meteen meer water aangevoerd, in juni 2017 was al meer dan 10.000 m^3 water geïrrigeerd, terwijl deze hoeveelheid in 2016 pas halverwege juli werd bereikt. De variatie in de wateraanvoer op dagbasis in 2017 is vergelijkbaar met 2016, maar in 2017 zijn er langere periodes met een hogere aanvoer per dag. De aanvoer is stilgelegd van 6 tot 11 september om de effecten van een herstart van het systeem op de infiltratie en grondwaterstanden te analyseren.



Figuur III-1: Wateraanvoer vanuit de waterzuivering van Bavaria naar de aanvoerput op het perceel van Van Dijk voor 2016. A: tijdreeks van gemeten wateraanvoer. B: cumulatieve aanvoer. Begin mei werd wel water aangevoerd, maar waren de debietmetingen nog niet volledig operationeel. Enkele periodes is de wateraanvoer gestopt vanwege storingen of vanwege overvloedige neerslag (juni en juli 2016).



Figuur III-2: Wateraanvoer vanuit de waterzuivering van Bavaria naar de aanvoerput op het perceel van Van Dijk voor 2017. A: tijdreeks van gemeten wateraanvoer. B: cumulatieve aanvoer. In juli is aanvoer enkele periodes gestopt vanwege neerslag, in september is de aanvoer bewust stilgelegd bij wijze van proef.

Grondwaterstanden en stijghoogten: Uit Figuur III-B blijkt duidelijk dat in 2015, het jaar zonder subirrigatie, de grondwaterstand in de zomer dieper wegzakte dan in 2016 en 2017, de jaren met subirrigatie. Subirrigatie vanaf mei 2016 heeft ervoor gezorgd dat in plaats van een daling van de grondwaterstand (ingezet vanaf maart 2016) er juist sprake is van een stijging van de grondwaterstand. Aanvankelijk wordt tijdens subirrigatie in alle meetpunten een nagenoeg gelijke grondwaterstand gemeten. Vanaf medio augustus blijft de stijging van de grondwaterstand bij meetpunt A6 als gevolg van subirrigatie achter ten opzichte van de grondwaterstand in de rest van het perceel.

In Figuur III-4 wordt ingezoomd op de periode mei-juli 2016. Hieruit volgt dat na de start van subirrigatie (infiltratie van water vindt plaats als het waterniveau in het aanvoereservoir hoger is dan de grondwaterstand) begin mei direct een stijging van de grondwaterstand tussen de drains is te zien bij A1 en A3, gevolgd door A4. Begin juni is de grondwaterstand bij A4 gestegen van 15.1 m+NAP naar 16.1 m+NAP. Door de overvloedige neerslag in de maand juni heeft de wateraanvoer veelal stilgelegen en is er zelfs water afgevoerd via het drainagesysteem. Dit blijkt uit de hogere grondwaterstand in het perceel dan de waterstand in de eindput.

Het duidelijke effect van subirrigatie zoals dat te zien is in het perceel bij meetpunt A4, is niet terug te zien bij de meetpunten buiten het perceel, in een raai loodrecht op de Goorloop (Figuur III-6). Wel is in deze meetpunten het effect van neerslag te zien. Figuur III-6B toont tevens het verschil in grondwaterstand bij de Goorloop en het perceel: het niveauverschil varieert in de tijd tussen 1.5-3 m.

In 2017 is een vergelijkbaar beeld te zien in de grondwaterstanden als in 2016. Voor de start van de subirrigatie in mei 2017 was er sprake van een duidelijke daling van de grondwaterstanden, maar zodra de subirrigatie begon, stegen de grondwaterstanden in het perceel. In de meetpunten A1 en A6 werd een lagere grondwaterstand gemeten dan voor de punten A3 en A4 vanaf de start van de subirrigatie. Dit was anders in 2016, waar alle punten na de start van de subirrigatie dezelfde stand bereikte.

In 2017 is gekozen voor een hogere waterstand in de aanvoerput dan in 2016, de verwachting was dat hierdoor de grondwaterstand in het perceel ook hoger zou zijn. Dit verschil is niet duidelijk te zien in de gemeten data, deels komt dit door de extreem natte zomer van 2016 waardoor de grondwaterstanden hoog bleven. Andere mogelijke oorzaken zijn een toename van de weerstand in het systeem en de gradiënten van de grondwaterstanden in het systeem.

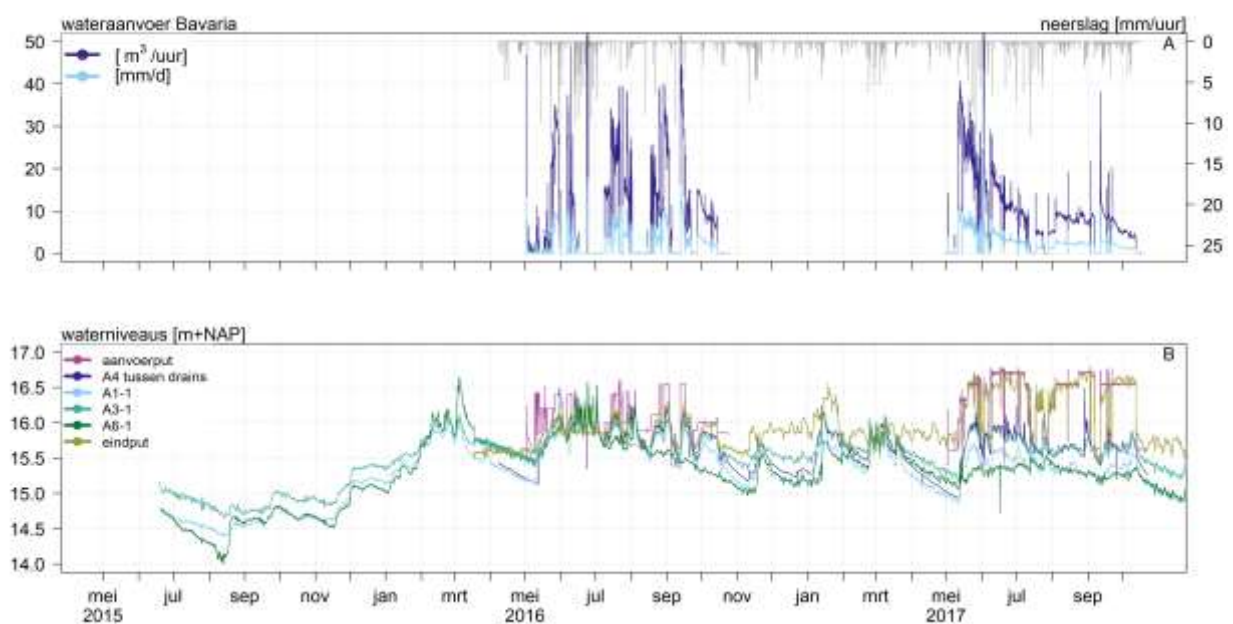
In Figuur III-5 wordt ingezoomd op de periode mei-oktober 2017. In juli heeft de aanvoer van water door neerslag enkele dagen stilgelegen gedurende twee perioden. Dit gebeurde in 2017 veel minder vaak dan in 2016. De start van de subirrigatie zorgde voor een duidelijke stijging in de grondwaterstanden bij A1, A3 en A4. Meetpunt A6 laat een minder duidelijke stijging zien, maar door de subirrigatie bleef de grondwaterstand wel duidelijk hoger dan in 2015. Gedurende de hele zomer is ook te zien dat de grondwaterstand bij A6 minder sterk reageerde op neerslagpieken dan de overige meetpunten. Zowel A1 als A6 bleven op een lagere grondwaterstand dan A3 en A4 gedurende de zomer ondanks het hogere peil in de aanvoerput. De verwachting is dat de hogere gradiënten op de grenzen van het perceel, veroorzaakt door het hoogteverschil, de stijging van het grondwater op deze locaties beperkt. In september 2017 is de aanvoer enkele dagen stilgelegd. Er is een duidelijke stijging in het debiet te zien, zodra de aanvoer weer is opgestart. Na de pauze van enkele dagen is een hogere aanvoer nodig om weer voldoende water in het systeem te brengen. De grondwaterstanden lieten direct een dalende trend zien in de periode zonder aanvoer, vooral bij meetpunt A3 en A4. Na het herstellen van de aanvoer stegen de grondwaterstanden direct, alleen de grondwaterstanden bij A6 reageerden trager, net als in het begin van de zomer.

In de langere meetreeksen van de meetpunten buiten het perceel is nog steeds geen effect van de subirrigatie zichtbaar, zowel in de punten loodrecht op de Goorloop als in de punten parallel aan de Goorloop (Figuur III-6 en Figuur III-7), behalve voor meetpunt A5-1. Vergeleken met de zomer in 2015 is de grondwaterstand bij A5-1 duidelijker hoger in de zomer van 2017. Vanwege de locatie van dit meetpunt op de grens van het perceel is uitstraling van de effecten van de subirrigatie over deze korte afstand te verwachten. Via tijdreeksanalyse (met het programma Menyanthes) zijn de verklarende variabelen voor de variantie in de grondwaterstanden bepaald. Voor de meetpunten buiten het perceel zijn dit met name neerslag en verdamping. De variantie in de grondwaterstanden bij de meetpunten in het perceel en A5-1 wordt verklaard door neerslag, verdamping en subirrigatie.

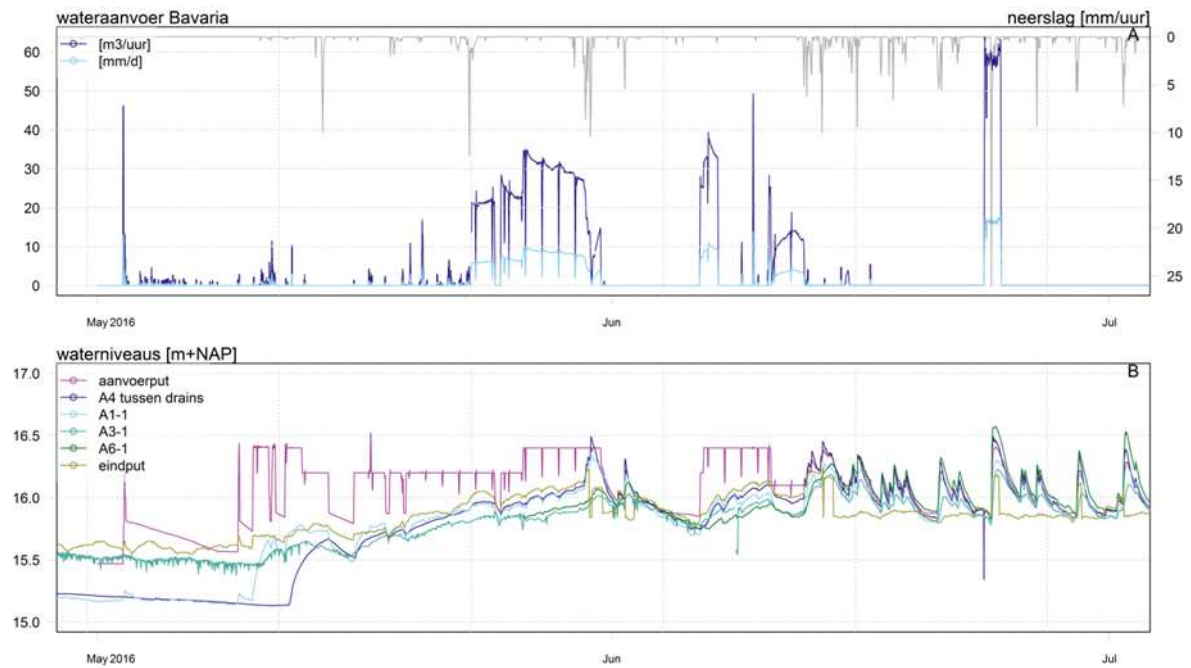
Uit de verlaging van de stijghoogtes in meetpunten A5-2 en A5-3 (Figuur III-8) blijkt dat eind mei, juni en augustus waarschijnlijk grondwater is onttrokken voor beregening. Eind augustus is een dip te zien

in de grondwaterstanden bij meetpunten B1, B2 en B3, terwijl een duidelijk stijging te zien is bij meetpunten A3 en A4.

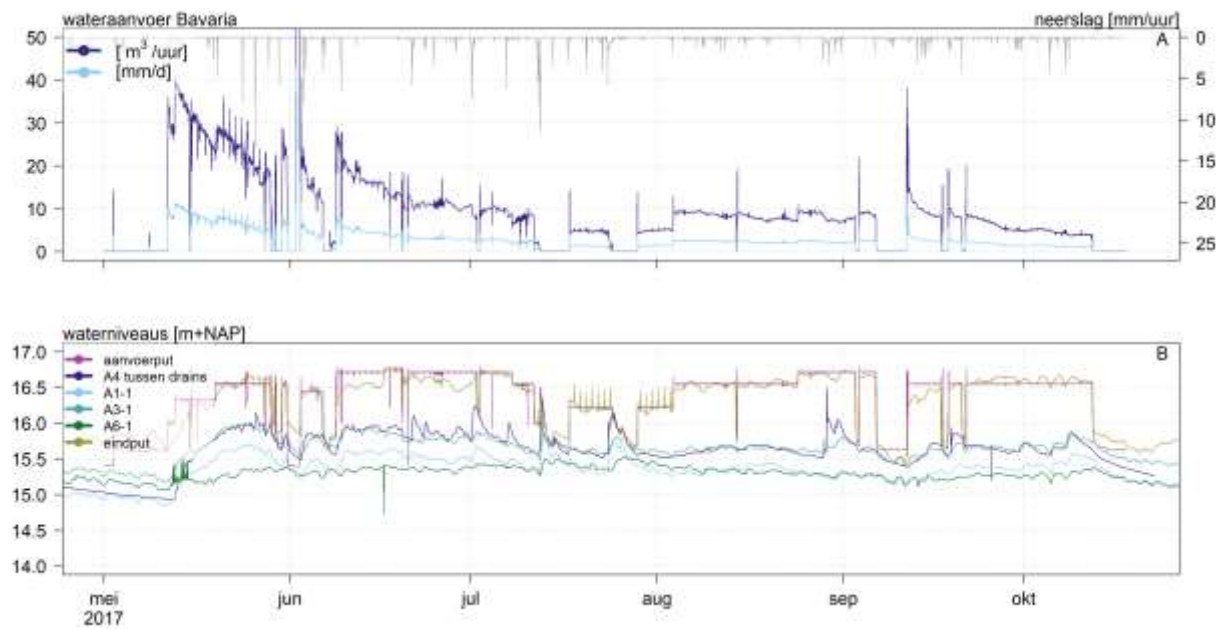
De uitstraling van de effecten van de subirrigatie naar diepere watervoerende lagen kan bepaald worden door de metingen op drie verschillende diepten bij A5. De grondwaterstanden op de verschillende diepten laten zien dat uitstraling niet/nauwelijks plaatsvindt (Figuur III-8). Bij A5-1 zijn er zoals genoemd wel effecten te zien, maar de grondwaterstanden bij A5-2 en A5-3 dalen in de zomer van 2017 naar hetzelfde niveau als in 2015. Diepere lagen worden niet/nauwelijks beïnvloed door de subirrigatie vanwege de hoge weerstand tussen de grondwaterlagen.



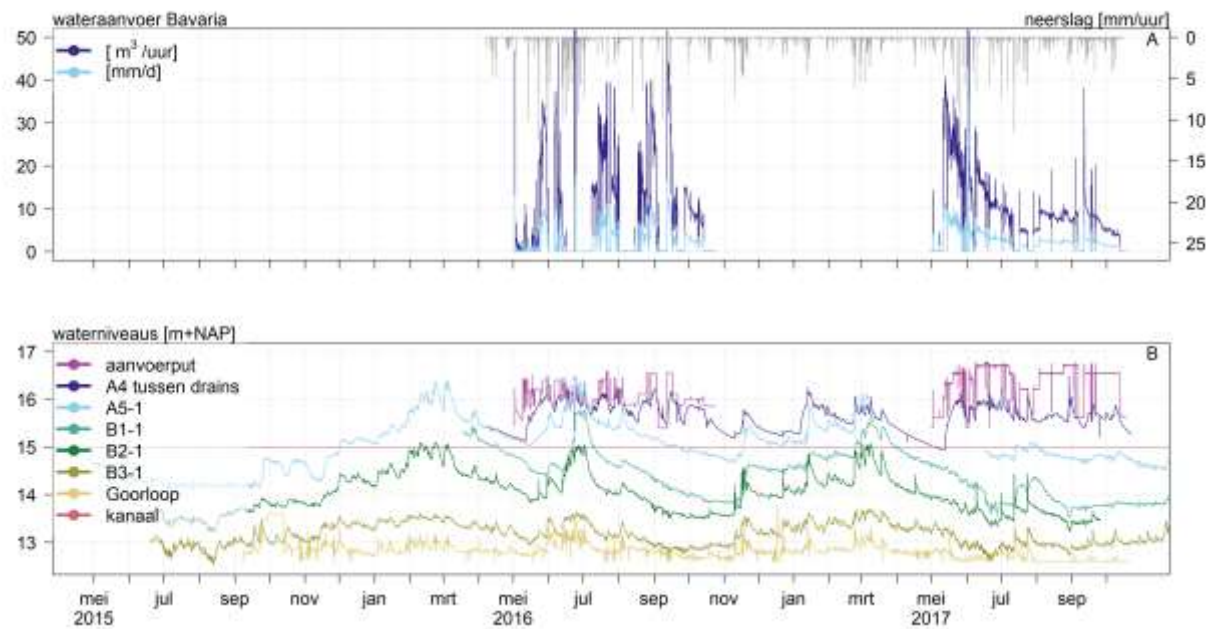
Figuur III-3: A: tijdreeks van gemeten wateraanvoer en neerslag (zoals gemeten op het perceel in 2016 en 2017). B: Gemeten waterniveaus in het aanvoerreservoir, de eindput en grondwaterwaterstanden in het perceel bij de meetpunten A1, A3, A6 en A4; alle meetpunten staan midden tussen twee drains.



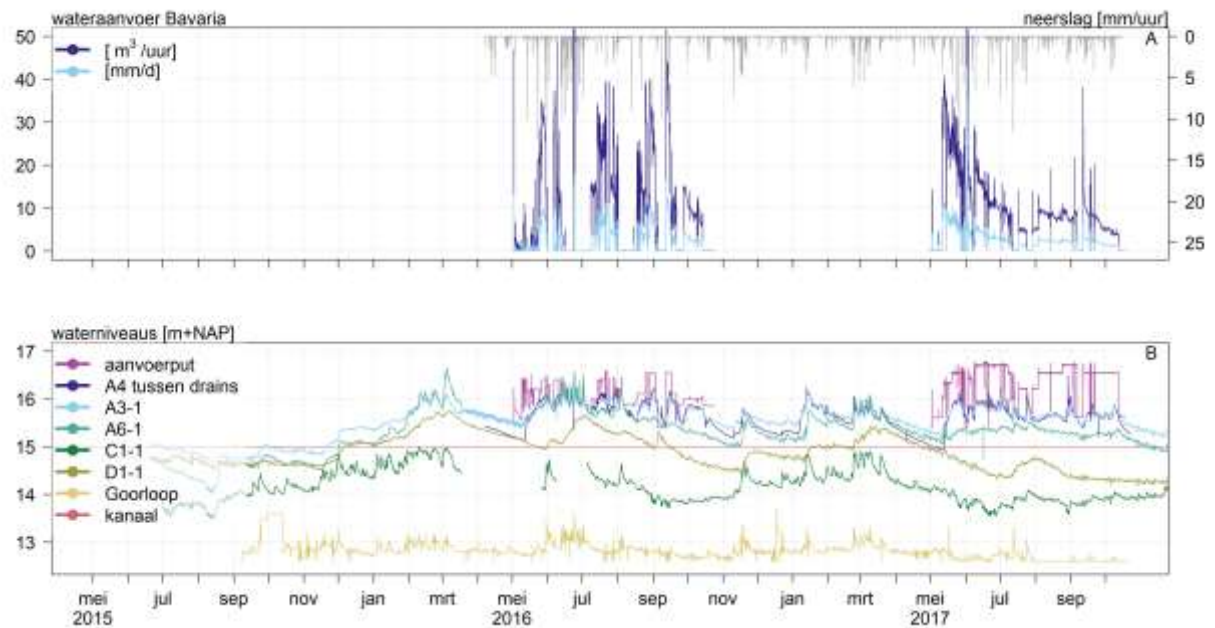
Figuur III-4: zelfde figuur als Figuur III-3, maar nu ingezoomd op de periode mei-juli 2016.



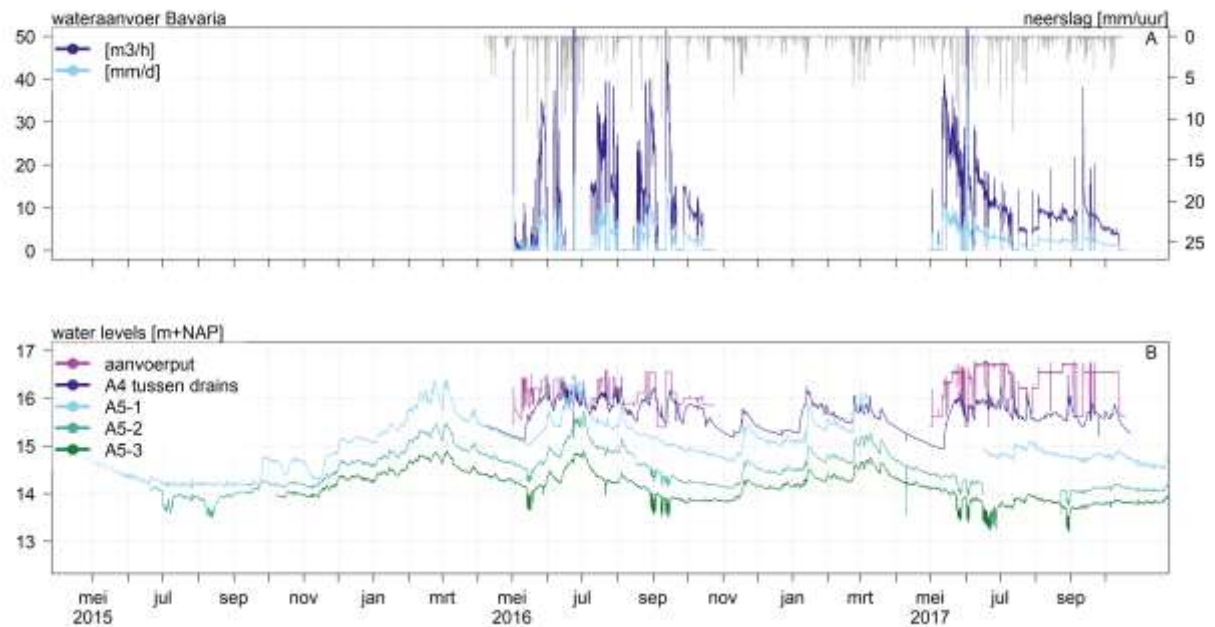
Figuur III-5: zelfde figuur als Figuur III-3, maar nu ingezoomd op de periode mei-oktober 2017.



Figuur III-6: zelfde figuur als Figuur III-3, maar nu voor de meetpunten in de raai loodrecht op de Goorloop.



Figuur III-7: zelfde figuur als Figuur III-3, maar nu voor meetpunten parallel aan de Goorloop en het meetpunt aan de overkant van het kanaal.



Figuur III-8: zelfde figuur als Figuur III-3, maar nu voor meetpunten bij A5 op verschillende diepten.

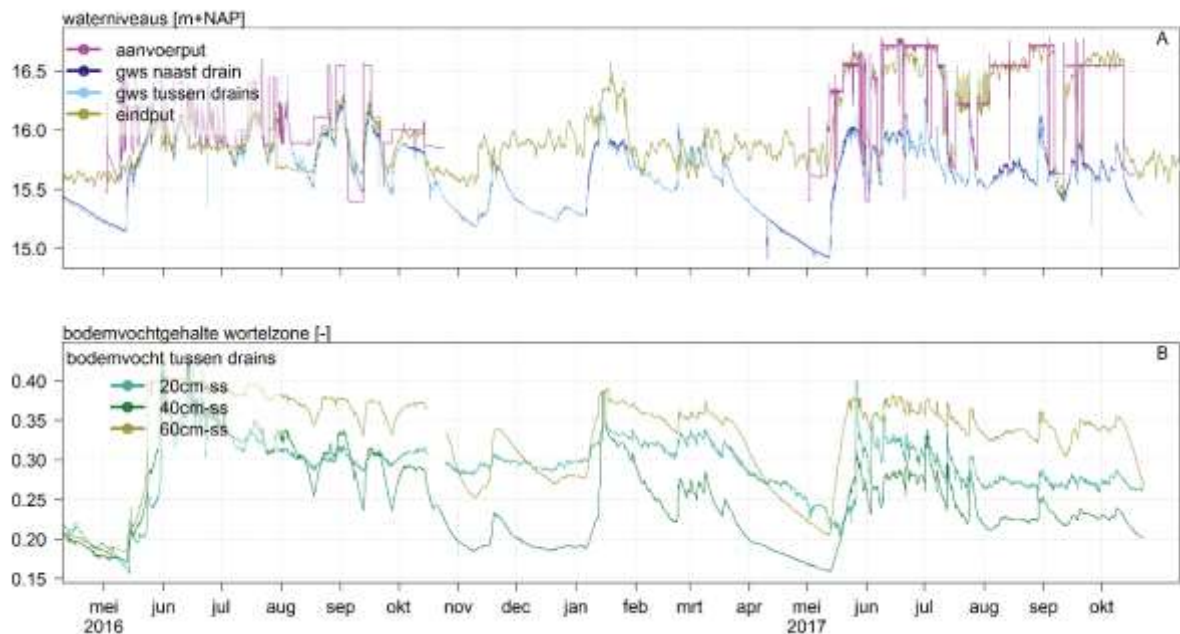
Vochtgehalte:

Figuur III-9 geeft de gemeten grondwaterstanden en bodemvochtgehalten bij meetpunt A4. Na het starten van subirrigatie in mei 2016 stijgen de vochtgehalten. Echter, het verloop is in de maanden mei en juni 2016 wat grillig door de neerslag. Door de hevige neerslag in juni 2016 raakt de bodem verzadigd. In de maanden augustus en september 2016, met weinig neerslag, verhoogt subirrigatie het vochtgehalte. Medio oktober 2016 zijn de bodemvochtmetingen tijdelijk verstoord door sabotage door een koe...

De start van de subirrigatie in mei 2017 is duidelijk te zien in de toename van het bodemvochtgehalte, waarbij het bodemvochtgehalte op 20cm diepte iets later reageert. Neerslag tijdens de zomer is duidelijk terug te zien in de pieken van het bodemvochtgehalte. Over het algemeen blijft het bodemvochtgehalte hoog gedurende de periode waarin subirrigatie plaatsvindt, zeker vergeleken met de waarden net voor de start van de subirrigatie. Tijdens de test in september 2017 is vooral op 60cm diepte een duidelijke daling te zien na het stilleggen van de aanvoer, gevolgd door een sterke stijging zodra de aanvoer hersteld is.

Opvallend zijn de hoge vochtgehalten tussen de drains op 20cm t.o.v. 40 cm in 2017; het vochtgehalte zou hoger zijn op 20cm-mv dan op 40cm-mv. In 2016 treden deze verschillen niet op en ook is dit patroon niet zichtbaar bij het meetpunt direct naast de drains. De gemeten bodemvochtgehalten op 20cm tussen drains zijn daarom waarschijnlijk onjuist.

Het verschil in grondwaterstanden naast en tussen de drains is nihil, wat erop duidt dat de doorlatendheid van de bodem waarin de drains liggen hoog is.



Figuur III-9: A: Gemeten waterniveaus in de aanvoerput en eindput en grondwaterwaterstanden in het perceel bij meetpunt A4 direct naast en tussen twee drains. B: Gemeten bodemvochtgehalte bij meetpunt A4, midden tussen twee drains en op drie dieptes: 20, 40 en 60 cm – maaiveld.

Drainage naar de omgeving

Uit modelsimulaties met en kalibratie aan metingen van het model SWAP (bijlage IV), blijkt dat de drainageweerstand naar de Goorloop zeer groot is. De drainageweerstand van het kanaal, echter, is een factor tien lager. Het kanaal speelt dan ook een belangrijke rol in het watersysteem. De verhoging van de grondwaterstand in het perceel, zorgt ervoor dat de drainage naar het kanaal toeneemt. De modelsimulaties indiceren dat het grootste deel van het aangevoerde water weer wordt afgevoerd via het kanaal.

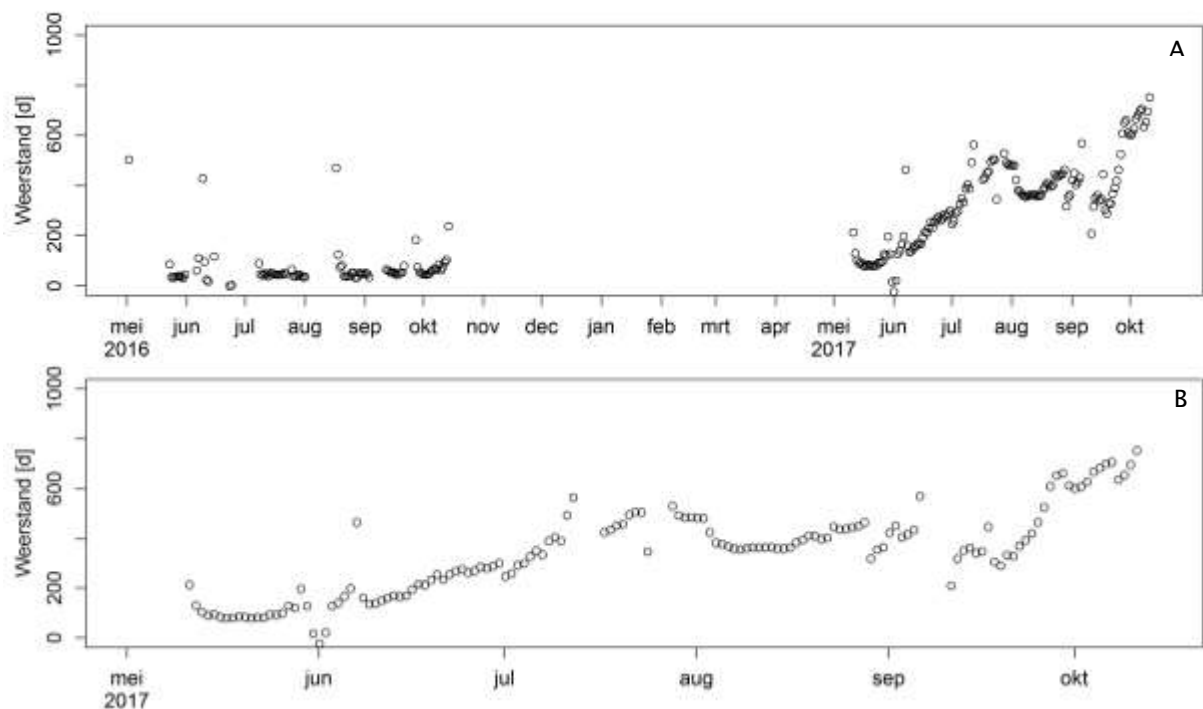
Weerstand

Figuur III-10 en Figuur III-11 geven een grove schatting van het verloop van de infiltratieweerstand gedurende de veldproef. Deze infiltratieweerstand (c in dagen) is bepaald uit de aanvoer (q in m/d) vanuit de waterzuivering naar de aanvoerput, en het stijghoogteverschil (ΔH in m) bij meetpunt A4 naast de drain:

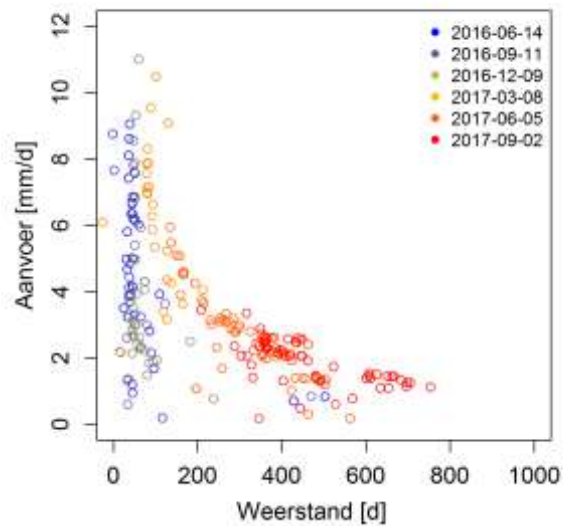
$$c = \frac{\Delta H}{q}$$

In 2017 loopt de weerstand gedurende de zomer op, vooral wanneer de subirrigatie plaatsvindt tijdens lange aaneengesloten perioden. In 2016 was er geen aaneengesloten periode van subirrigatie vanwege de natte omstandigheden, daarom is het verloop in de weerstand heel anders. In augustus 2017 blijven

de aanvoer en het stijghoogteverschil vrijwel gelijk (Figuur III-5), wat resulteert in een constante infiltratieweerstand. Na het stilleggen van de aanvoer in september 2017 was de weerstand lager, maar enkele dagen na het hervatten van de subirrigatie was er weer sprake van een stijging in de weerstand. Overigens moet opgemerkt worden dat de berekende weerstanden wel erg hoog zijn; echter, ze komen overeen met de waarden gevonden in Bijlage IV. Mogelijk hangen deze hoge waarden samen met een grondwaterstand die tot onder het niveau van de ligging van de drains valt. Sowieso neemt de infiltratieweerstand toe als gevolg van langdurige wateraanvoer.



Figuur III-10: Infiltratieweerstand gedurende de hele periode van de veldproef (A) en tijdens de zomer van 2017 (B).



Figuur III-11: Aanvoer versus weerstand. De kleuren geven de tijdsperiode aan.

Ook uit modelsimulaties met en kalibratie van het model SWAP blijkt dat de infiltratieweerstand in het systeem in de tijd toeneemt. Figuur III-10 laat zien dat de weerstand in de tijd niet constant is, maar dat deze toeneemt. Het tijdelijk stoppen en daarna weer opstarten van de wateraanvoer lijkt de weerstand (tijdelijk) te kunnen verminderen. Uitvoeriger modelsimulaties en analyses kunnen gedaan worden om het verloop van de drainageweerstand in de tijd beter in beeld te krijgen. Daarnaast kan in de praktijk een aangepaste aansturing van het systeem nodig zijn, waarbij aanvoer en afvoer van water wordt afgewisseld, om eventuele vervuiling van het systeem te voorkomen.

IV Modelsimulaties met SWAP

Het SWAP-model

Om optimale bodemvochtcondities voor gewasgroei vast te stellen dienen de samenhangende processen in het bodem-plant-atmosfeer systeem expliciet beschouwd worden. Het dynamische 1-D Soil-Water-Atmosphere-Plant model SWAP (Kroes et al., 2009; Van Dam et al., 2008) beschrijft deze processen in detail. SWAP gebruikt als invoer meteorologische condities, bodemfysische parameters, een hydrologische omderrandvoorwaarde, de schematisatie van de drainagesituatie en gewaseigenschappen. Uitvoer op dagbasis is onder meer grondwaterstand, bodemvochtgehalte, de bodemtemperatuur en transpiratiereductie. Deze laatste is het verschil tussen potentiële en werkelijke transpiratie, veroorzaakt door te natte (gegeven via 'Tredwet') of te droge ('Treddry') omstandigheden in de wortelzone. Transpiratiereductie wordt vertaald naar relatieve gewasopbrengst volgens de 1:1 lineaire relatie van De Wit (1958). We hebben gebruikt gemaakt van SWAP 3.26.

Voor de schematisatie van de bodem is het bodemprofiel van meetpunt A5-3 vertaald naar bouwstenen van de Staringreeks (Wösten et al., 2001). Meteorologische condities zijn genomen van meetstation Eindhoven (nr. 370), gecombineerd met op het perceel gemeten neerslag. Het gewas is geschematiseerd volgens de eenvoudige gewasmodule voor gras.

Er zijn drie ontwateringseenheden onderscheiden: de Goorloop, het Wilhelminakanaal en het subirrigatiesysteem, elk met hun eigen drainage- en infiltratieweerstand. Gemeten waterstanden van elk van de systemen is modelinvoer. Voor het drainage/subirrigatiesysteem is dit het waterniveau in de eindput.

Kalibratie

SWAP is gecombineerd met PEST (Doherty, 2010) voor kalibratie van het model aan gemeten grondwaterstanden en bodemvochtgehalten op 40 en 60 cm-mv. Metingen voor grondwaterstanden bestaan uit A5-1 (voor de periode voor april 2016) en A4-tussen drains; bodemvochtgehalten zijn gemeten bij A4 tussen drains. Opvallend zijn de hoge vochtgehalten op 20cm t.o.v. 40 cm in 2017, het vochtgehalte zou hoger zijn op 20cm-mv dan op 40cm-mv. In 2016 treden deze verschillen niet op en ook is dit patroon niet zichtbaar bij het meetpunt direct naast de drains. Bodemvochtgehalten op 20cm tussen drains zijn daarom beoordeeld als niet betrouwbaar en waarschijnlijk onjuist en worden daarom niet meegenomen in de modelkalibratie. Voor de hele periode zijn de volgende parameters gefit:

- Bodemfysische parameters (verzadigde doorlatendheid, verzadigd vochtgehalte, Van Genuchten parameters α en n).
- Verticale weerstand van de scheidende laag naar het ondergelegen watervoerende pakket
- Drainageweerstand naar de Goorloop
- Drainageweerstand naar het Wilhelminakanaal
- Drainage- en infiltratieweerstand van het drainage/subirrigatiesysteem.

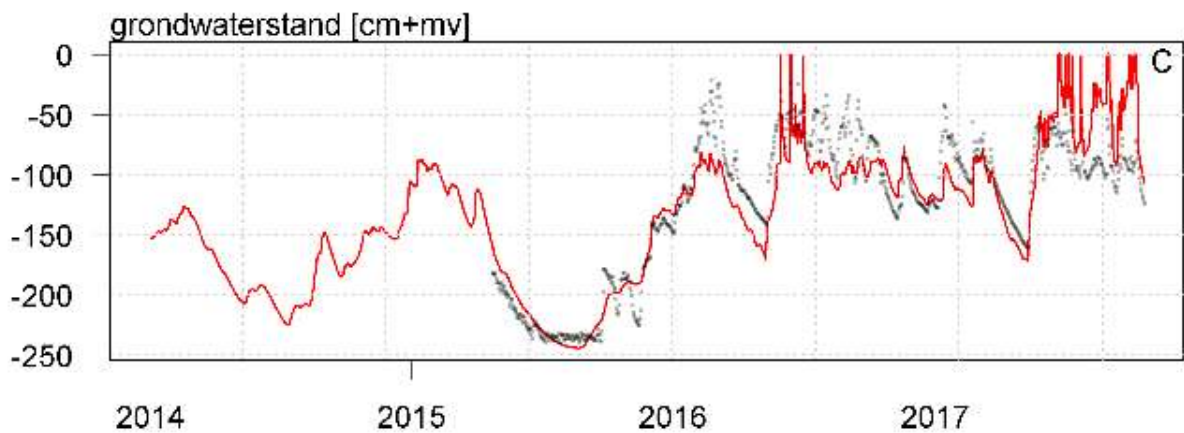
De simulaties zijn uitgevoerd van 1 januari 2014 t/m 20 oktober 2017. In de eerste stap is het model gekalibreerd op alle metingen in deze periode. Uit deze kalibratiestap volgt dat het model gemiddeld

wel goed presteert, maar dat tijdens subirrigatie in 2016 te lage en in 2017 te hoge grondwaterstanden worden gesimuleerd (Figuur IV-1). De metingen en de steeds grotere aanvoerdruk die nodig is om de grondwaterstand op peil te houden en de afnemende infiltratiehoeveelheid, duiden er op dat de infiltratieweerstand geen constante is, maar in de loop van de tijd toeneemt. Daarom is vervolgens is per maand de infiltratieweerstand van het subirrigatiesysteem gefit, waarbij alle andere gefitte parameters gelijk zijn gehouden. Het maandelijks bepalen van de infiltratieweerstand levert een aanzienlijk betere overeenkomst van de modelresultaten met de metingen op (Figuur IV-3).

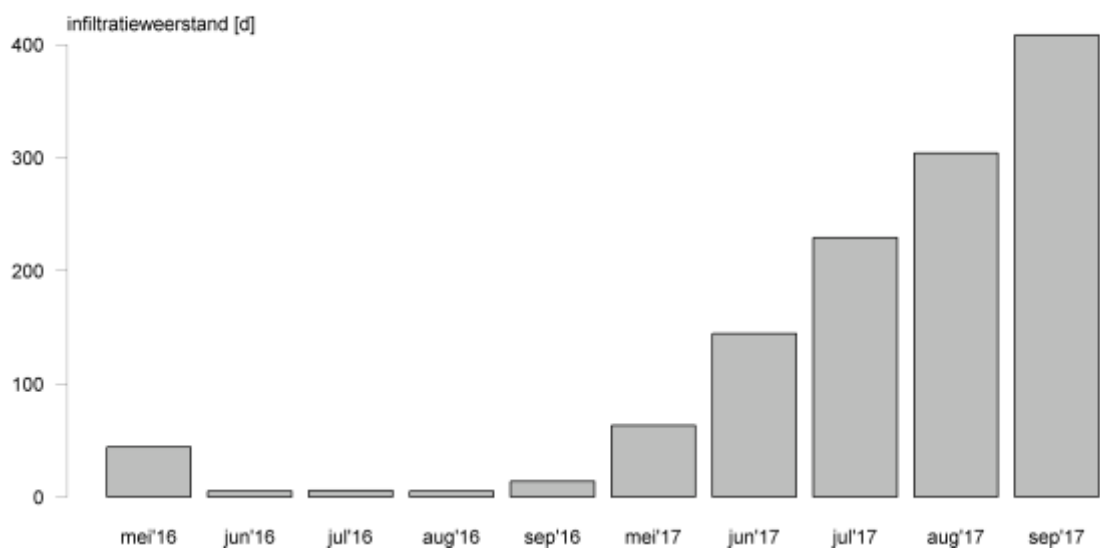
Overigens dient te worden opgemerkt dat de verzadigde doorlatendheid van de bodemlaag waarin de drainage/infiltratiebuizen zijn aangebracht (K_{sat3}) veel hoger is dan die van de andere lagen. De parameterwaarde is gelijk aan de maximale opgelegde waarde. Dit kan erop duiden dat het model niet gevoelig is voor deze parameter. Het is echter ook mogelijk dat K_{sat3} niet constant is, maar verandert in de tijd, doordat de bodem zich na aanleg van de buizen opnieuw 'instelt'. Echter, modelkalibratie per maand aan K_{sat3} leidt, in tegenstelling tot aan de infiltratieweerstand, niet tot een goede modelfit. Daarom is het plausibel dat het daadwerkelijk de toename van infiltratieweerstand (Figuur IV-2) is die ervoor dat er moeilijker water geïnfiltreerd kan worden en de grondwaterstand niet op het gewenste niveau kan worden gehouden.

Tabel IV-1: parameterwaarden na modelkalibratie op alle metingen in 2015-2017.

Parameter	Waarde	Betekenis
Rimlay [d]	1367.1	Weerstand scheidende laag
$ksat1$ [cm/d]	2.17	Verzadigde doorlatendheid 0-40cm-mv
$ksat2$ [cm/d]	6.41	Verzadigde doorlatendheid 40-60cm-mv
$ksat3$ [cm/d]	200.00	Verzadigde doorlatendheid 60-100cm-mv
$ksatp$ [cm/d]	31.73	Verzadigde doorlatendheid 100-225cm-mv
$ksatexm1$ [cm/d]	5.73	'gemeten' verzadigde doorlatendheid 0-40cm-mv
$ksatexm2$ [cm/d]	16.94	'gemeten' verzadigde doorlatendheid 40-60cm-mv
$ksatexm3$ [cm/d]	528.00	'gemeten' verzadigde doorlatendheid 60-100cm-mv
$ksatexm4$ [cm/d]	83.77	'gemeten' verzadigde doorlatendheid 100-225cm-mv
$osat1$ [cm ³ /cm ³]	0.30	Verzadigd vochtgehalte 0-40cm-mv
$osat2$ [cm ³ /cm ³]	0.37	Verzadigd vochtgehalte 40-60cm-mv
$osat3$ [cm ³ /cm ³]	0.48	Verzadigd vochtgehalte 60-100cm-mv
$osat4$ [cm ³ /cm ³]	0.30	Verzadigd vochtgehalte 100-225cm-mv
α_1 [/cm]	1.07E-02	Van Genuchten parameter α 0-40cm-mv
α_2 [/cm]	1.24E-02	Van Genuchten parameter α 40-60cm-mv
α_3 [/cm]	4.72E-03	Van Genuchten parameter α 60-100cm-mv
α_4 [/cm]	1.65E-02	Van Genuchten parameter α 100-225cm-mv
n_{par1} [-]	2.50	Van Genuchten parameter n 0-40cm-mv
n_{par2} [-]	2.50	Van Genuchten parameter n 40-60cm-mv
n_{par3} [-]	1.54	Van Genuchten parameter n 60-100cm-mv
n_{par4} [-]	1.17	Van Genuchten parameter n 100-225cm-mv
$drares1$ [d]	7500.0	Drainageweerstand naar Goorloop
$drares2$ [d]	598.2	Drainageweerstand naar Wilhelminakanaal
$drares3$ [d]	13.5	Drainageweerstand drainage/subirrigatiesysteem
$infres3$ [d]	78.4	Infiltratieweerstand drainage/subirrigatiesysteem



Figuur IV-1: Gemeten (punten) en gemodelleerde grondwaterstand, na modelkalibratie op alle metingen in 2015-2017.

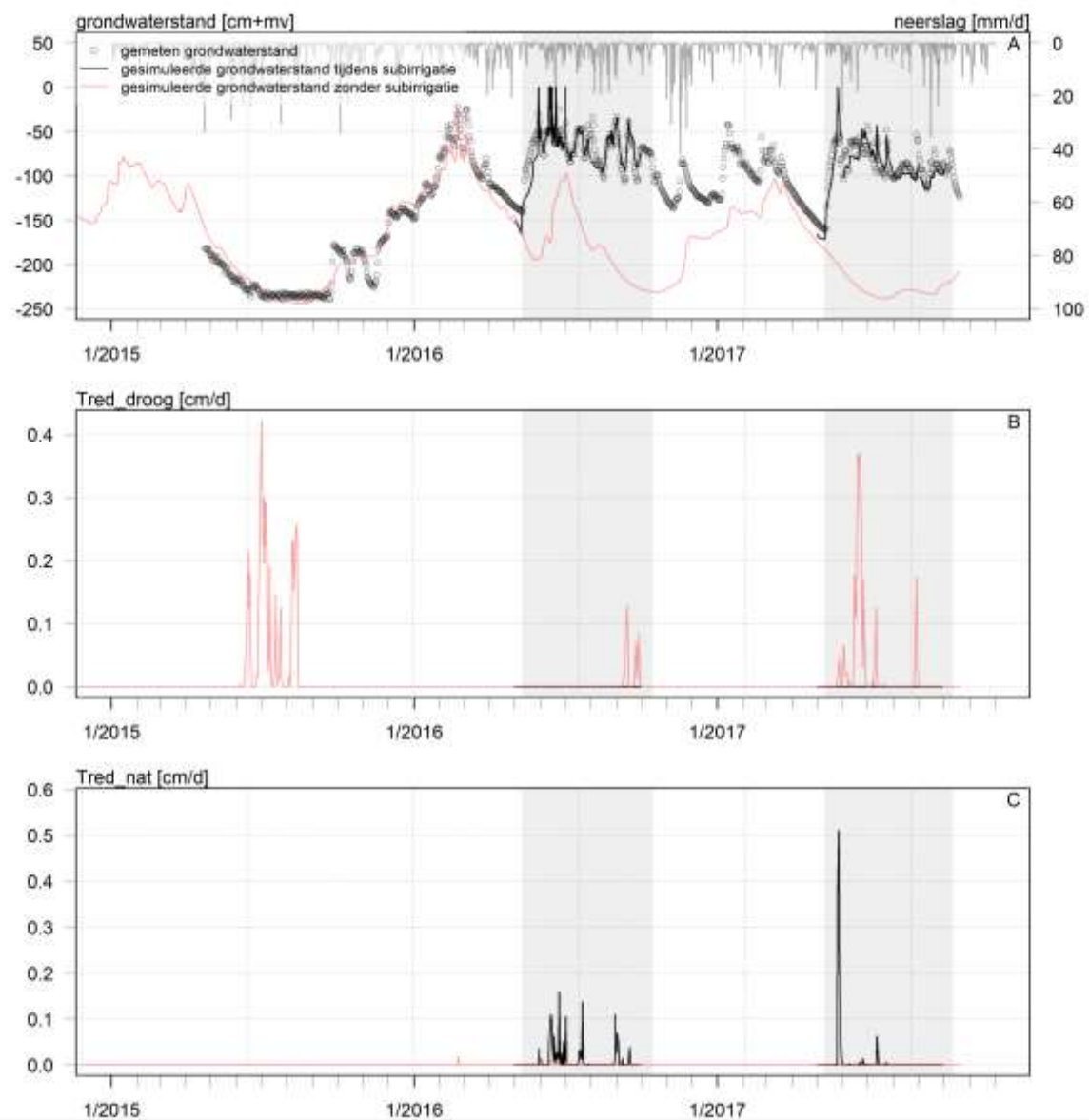


Figuur IV-2: Verloop van de infiltratieweerstand, zoals bepaald met kalibratie van het model SWAP op de specifieke maanden op de x-as. Duidelijk zichtbaar is dat de infiltratieweerstand in 2017 in de loop van de tijd toeneemt. In 2016 bleef deze laag.

Scenario-analyse met en zonder subirrigatie

De modelkalibratie is uitgevoerd met de op het perceel gemeten neerslag. Voor het doorrekenen van scenario's is gerekend met uurwaarden van neerslag voor meteostation Eindhoven (nr. 370). Er is ook aanvullend berekend met een haspel. Dit is ook door de neerslagmeter geregistreerd. Om het effect van de situatie met en zonder subirrigatie op te droge en te natte condities voor het gewas te vergelijken, is gerekend voor de situatie zonder aanvullende berekening, omdat deze juist bedoeld is om te droge condities te voorkomen.

SWAP geeft de transpiratiereductie als gevolg van te droge en te natte condities weer via respectievelijk Treddry en Tredwet (Figuur IV-3).



Figuur IV-3: A: neerslag en gemeten (bolletjes) en gesimuleerde grondwaterstand met subirrigatie (zwart) en zonder subirrigatie (rood). De simulaties zijn geldig voor de situatie zonder aanvullende berekening. Duidelijk zichtbaar is dat de grondwaterstand als gevolg van subirrigatie (in de grijs gearceerde periodes) aanzienlijk hoger is dan in de situatie zonder subirrigatie. B: gesimuleerde droogteschade (transpiratiereductie als gevolg van te droge condities; Tred_droog) voor de situatie met (zwart) en zonder (rood) subirrigatie/drainage. C: zelfde als B maar dan voor transpiratiereductie als gevolg van te natte omstandigheden (Tred_nat). De grijze vlakken geven de perioden met subirrigatie.

V Gevolgen van subirrigatie met effluent voor de grondwaterkwaliteit

V.1 Inleiding

Aanleiding en doel

Bavaria loost jaarlijks 1.5 miljoen m³ restwater op het oppervlaktewater. Tegelijkertijd maken agrariërs in de omgeving op grote schaal gebruik van grondwater voor de beregening van gewassen. Door restwater te hergebruiken voor de regionale watervoorziening, verbetert de watervoorziening voor de landbouw, stijgen de gewasopbrengsten en verminderen de beregeningskosten. Door restwater terug te brengen in het grondwatersysteem laat Bavaria een kleinere watervoetafdruk achter. In 2016 en 2017 is een veldproef uitgevoerd om vast te stellen of een deel van het effluent door middel van subirrigatie (via onderling verbonden drainagebuizen) ten goede kan komen aan de watervoorziening van agrariërs in de omgeving.

Een van de vragen die daarbij speelt is in hoeverre de infiltratie van restwater zou leiden tot veranderingen in de grondwaterkwaliteit. Vooral de ophoping en uitspoeling van voedingsstoffen (stikstof en fosfor) wordt gezien als een potentieel risico voor de omgevingskwaliteit. Deze kwaliteitseffecten kunnen het gevolg zijn van extra aanvoer van stoffen die in het restwater zitten, of doordat de aanvoer van restwater leidt tot het in oplossing gaan van stoffen die aan de bodem gebonden zijn. Waar en met welke snelheid deze effecten zich voltrekken is o.a. afhankelijk van de verspreiding van het restwater, de chemische eigenschappen van de bodem en ondergrond (zoals zuurstofgehalte) en de interacties met de bodem (zoals ionenuitwisseling).

De doelen van deze memo zijn om (1) de resultaten van de monitoring van de grondwatersamenstelling te documenteren, om vervolgens (2) conclusies te trekken over de effecten van de infiltratie van effluent op de grondwaterkwaliteit en (3) adviezen te formuleren voor risicobeheersing van deze effecten en vervolgonderzoek en -monitoring.

Meetopstelling, bemonstering en analyse

Om inzicht te verkrijgen in het effect van infiltratie van restwater op de grondwaterkwaliteit is tijdens de uitvoering van de veldproef de grondwatersamenstelling op 6 locaties verspreid over drie bemonsteringspunten in de tijd gevolgd (Figuur V-1). Deze locaties zijn gericht gekozen, namelijk

- (1) Op twee locaties, tussen en naast een drain, ter plaatse van meetpunt A4,
- (2) Op drie locaties, op verschillende diepten, ter plaatse van meetpunt A5, en
- (3) Op een locatie ter B1.

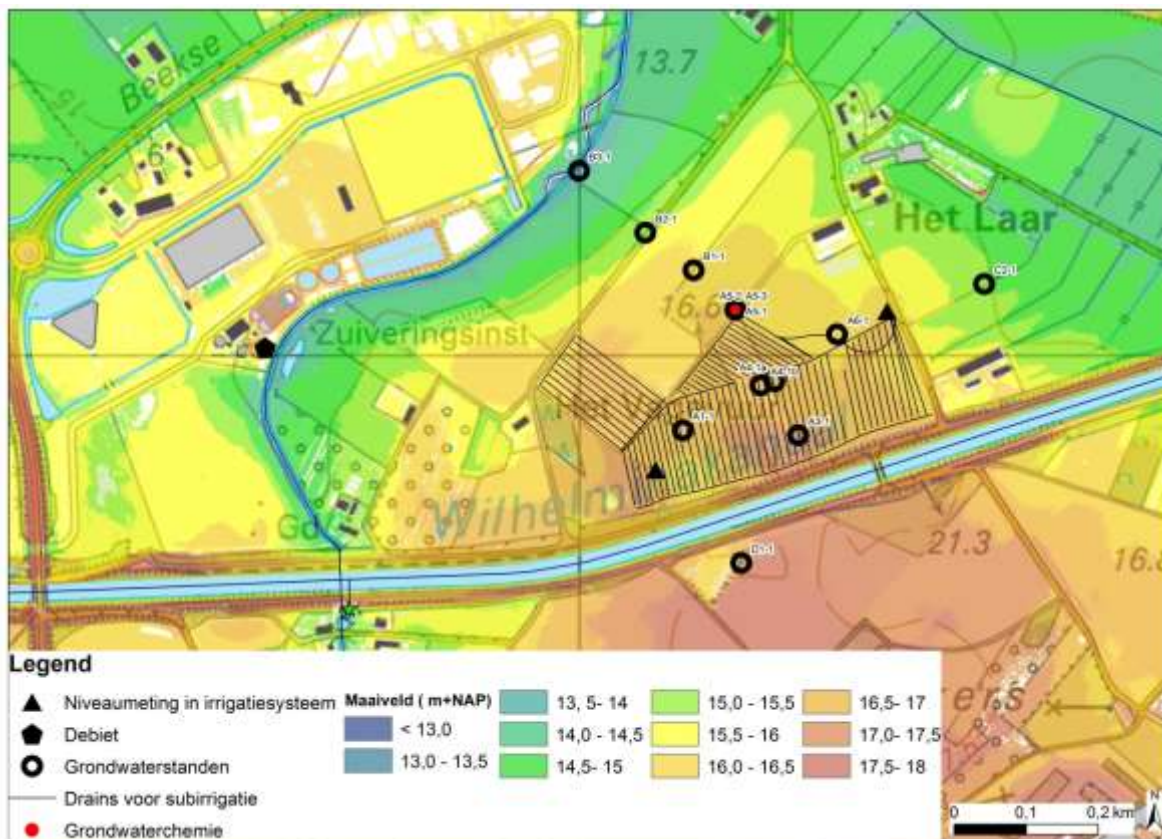
Gezien de afstand van meetpunt B1 tot het proefperceel is de verwachting dat deze locatie nog niet beïnvloed wordt door de aanvoer van restwater. Dit meetpunt dient daarom, net als het effluent, als referentie voor de watersamenstelling ter plaatse van de andere meetpunten. Met het gebruik van

referentiemetingen kan het effect van wateraanvoer eenduidiger worden gescheiden van andere effecten die anders ook hadden opgetreden.

De zes geselecteerde meetfilters zijn gedurende de periode 2016-2017 op vier gericht gekozen momenten bemonsterd, namelijk op:

- 23 juni 2016, een paar weken na de start van de eerste aanvoerperiode
- 20 september 2016, aan het einde van de eerste aanvoerperiode
- 10 april 2017, vlak voor de start van de tweede aanvoerperiode
- 25 september 2017, aan het einde van de tweede aanvoerperiode.

De monsters zijn met ICP geanalyseerd en de resultaten zijn gevalideerd en geïnterpreteerd met behulp van HydroGeoChemCal {Stuyfzand, 2017 #1943}.



Figuur V-1: overzicht van het meetnet op en rond het proefperceel. Ter plaatse van de meetpunten A4, A5 en B1 zijn monsters verzameld ten behoeve van waterkwaliteitsanalyse.

Leeswijzer

De opbouw van deze bijlage is als volgt:

- In hoofdstuk V.2. wordt de kwaliteit van het effluent beschreven ten opzichte van twee referenties, namelijk (1) de normen uit het Infiltratiebesluit Bodembescherming en (2) de samenstelling van het beïnvloede grondwater ten opzichte van het referentiemeetpunt B2.
- In hoofdstuk V.3 worden grondwaterkwaliteitsveranderingen als gevolg van subirrigatie beschreven.
- In hoofdstuk V.4 worden de conclusies en adviezen beschreven

V.2 Kwaliteit van het effluent

Vergelijking met normen voor infiltratie van oppervlaktewater

Om een indicatie te krijgen van de kwaliteit van het effluent zijn de waargenomen stofconcentraties in het effluent vergeleken met wettelijk vastgestelde normen voor de infiltratie van oppervlaktewater volgens het 'Infiltratiebesluit Bodembescherming' (Tabel V-1). Het infiltratiebesluit bodembescherming heeft uitsluitend betrekking op het infiltreren van oppervlaktewater, en is dus niet van toepassing op deze situatie waarbij effluent wordt geïnfiltreerd. Wel geeft een vergelijking van de effluentsamenstelling met de normen uit het infiltratiebesluit bodembescherming een indruk van de parameters die mogelijk een knelpunt vormen vanuit milieuhygiënisch oogpunt. Hier hebben we ons beperkt tot de anorganische parameters. Vanwege het gehanteerde productieproces is het niet de verwachting dat organische stoffen (microverontreinigingen) in problematische concentraties in het restwater voorkomen.

Uit Tabel V-1 blijkt dat natrium, fosfaat en chroom in alle drie de effluentmetingen de norm uit het infiltratiebesluit overschrijden. Een enkele keer is dit het geval voor ammonium, nitraat en kwik. Voor kwik geldt dat de concentratie in twee van de drie effluentmonsters lager was dan de detectielimiet, en dat in het derde monster de kwikconcentratie gelijk was aan de detectielimiet (=2 x de norm uit het infiltratiebesluit). Mogelijk gaat het hier om een vals positieve waarneming of een incidentele uitbijter. Indien hoge kwikconcentraties vaker voorkomen kunnen deze samenhangen met atmosferische kwikdepositie in de zuiveringsbassins. In dat geval zou de oorzaak buiten de bedrijfsvoering van Bavaria liggen. Nadere analyse zou hier uitsluitsel over moeten geven.

De hoge concentratie natrium in het effluent hangt waarschijnlijk samen met het gebruik van natronloog bij het spoelproces. Natrium wordt niet verwijderd door de toegepaste zuivering en is alleen met intensieve zuiveringstechnieken goed te verwijderen. Fosfaat, ammonium en nitraat hangen waarschijnlijk samen met organische stof dat bij het brouwproces overblijft en voor een deel de zuivering passeert. De herkomst van chroom en kwik is onbekend. De herkomst, verwijderingsmogelijkheden (zuivering) en milieu-impact van deze parameters vereisen nader onderzoek om ongewenste effecten in de omgeving zo veel mogelijk te beperken en een duurzame toepassing van effluent als irrigatiebron te garanderen.

Tabel V-1: Aangetroffen concentraties vergeleken met de wettelijke normen uit het infiltratiebesluit bodembescherming.

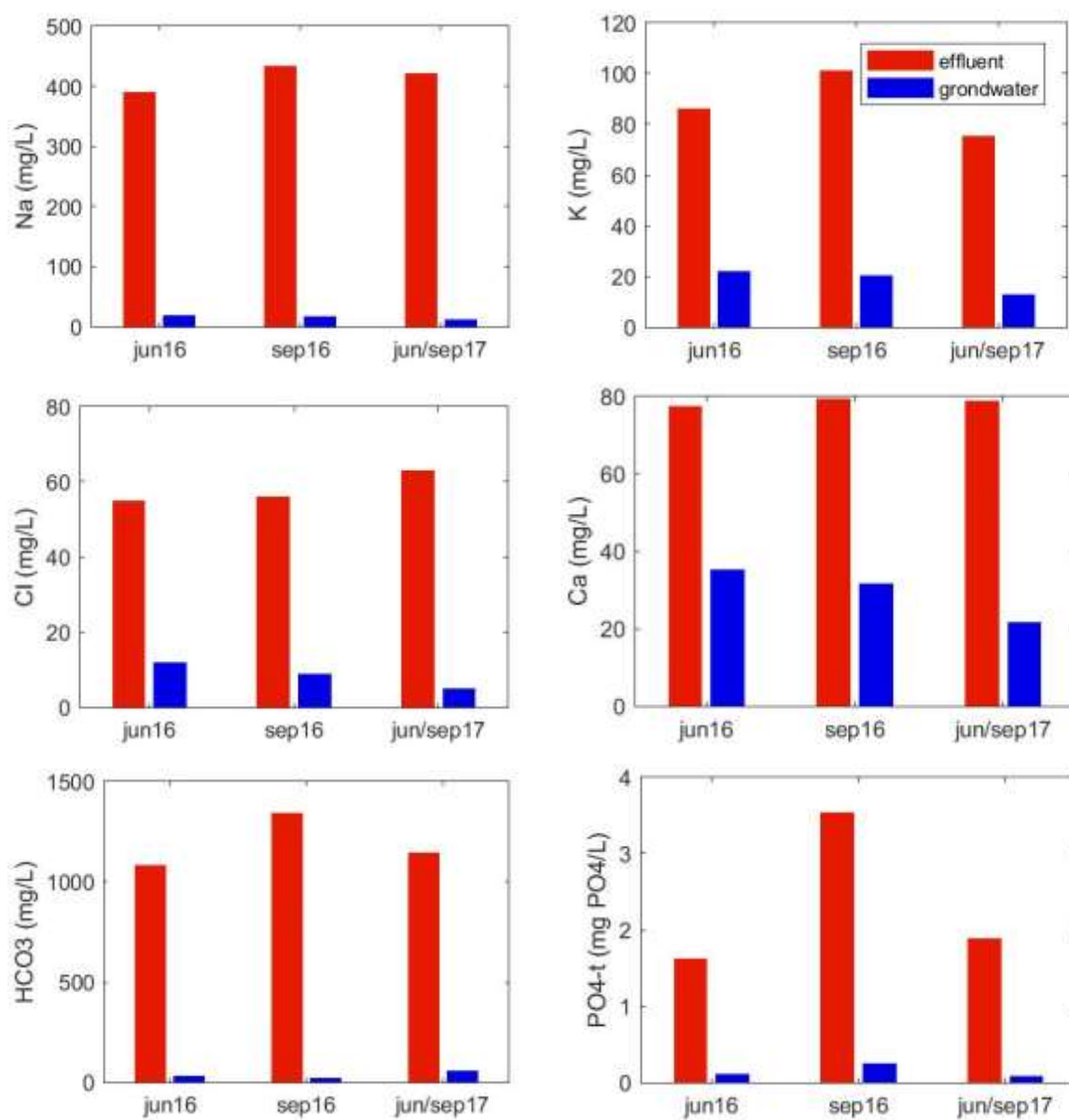
MACRO PARAMETERS	Normering infiltratiebesluit bodembescherming	gemiddelde concentratie in het effluent	aantal overschrijdingen van de norm uit het infiltratiebesluit van de drie metingen
zuurgraad (pH)	Punt van aandacht	8,4 (data van 2014)	-
zwev.stof	0,5	niet gemeten	-
calcium (Ca ²⁺)	Punt van aandacht	79	-
chloride (Cl)	200	58 (78 in 2014)	0
waterstofcarbonaat (HCO ₃ ⁻)	Punt van aandacht	1200	-
natrium (Na⁺)	120	415	3
ammonium (NH₄⁺)	2,5	5	1
nitraat (NO₃⁻)	5,6	2,2	1
totaal-fosfaat (PO₄²⁻ tot)	0,4	2,3 (1,75 in 2014)	3
sulfaat (SO ₄ ²⁻)	150	35 (48 in 2014)	0
fluoride (F)	1	niet gemeten	-
cyaniden totaal (CN (tot))	10	niet gemeten	-
ZWARE METALEN			
arseen (As)	10	0,8	0
barium (Ba)	200	31	0
cadmium (Cd)	0,4	<0,05	0
cobalt (Co)	20	0,25	0
chroom (Cr)	2	16 (max 28)	3
koper (Cu)	15	2,5	0
kwik (Hg)	0,05	0,1	1
nikkel (Ni)	15	0,3	0
lood (Pb)	15	<0,2	0
zink (Zn)	65	9 (max 16)	0

Vergelijking met samenstelling van het beïnvloede grondwater

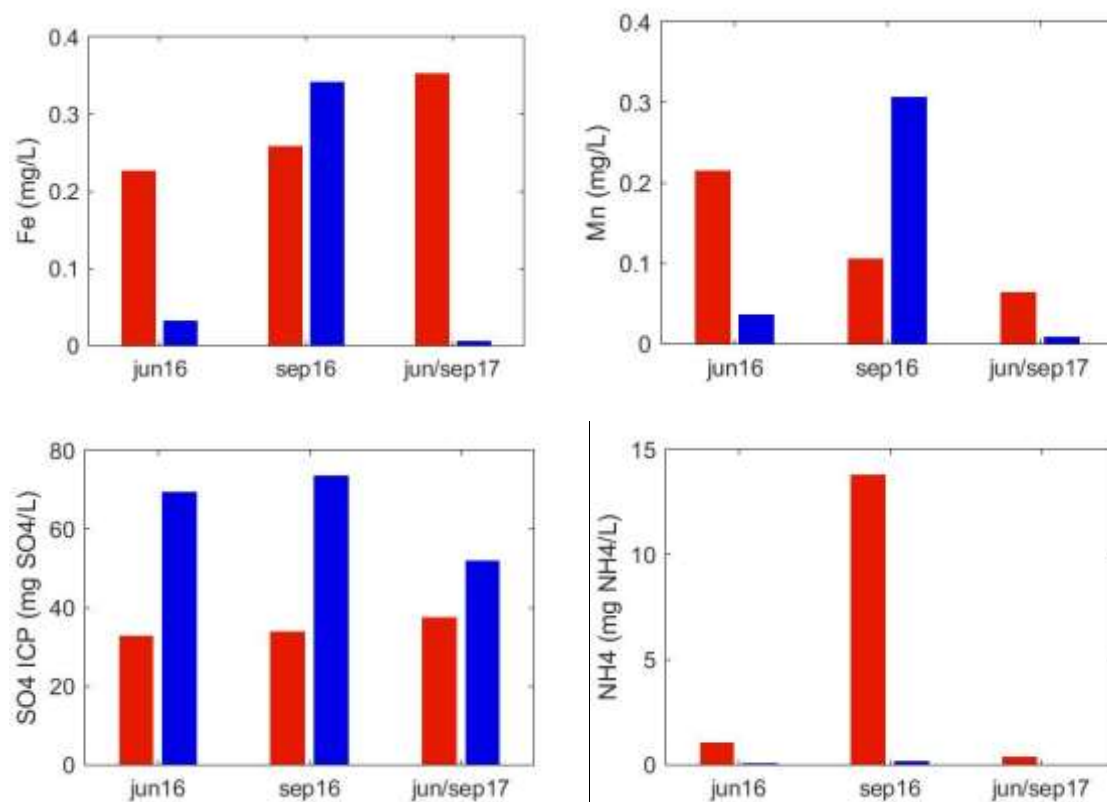
Het effluent en het onbeïnvloede grondwater ter plaatse van het referentiepunt B1 zijn in de periode van wateraanvoer drie keer bemonsterd en geanalyseerd. De concentraties in het effluent zijn doorgaans hoger dan de concentraties in het onbeïnvloede grondwater (Figuur V-2). Dit is met name het geval voor ammonium (84 keer zo hoog als in het grondwater), bicarbonaat (32 keer zo hoog als in het grondwater), natrium (26 keer zo hoog als in het grondwater) en fosfaat (16 keer zo hoog dan in

het grondwater). Daarnaast zijn nitriet, chloride, kalium, siliciumoxide, calcium, ijzer gemiddeld een factor twee tot zeven hoger in het effluent vergeleken met de aangetroffen concentraties in grondwater.

De samenstelling van het beïnvloede grondwater varieert sterker in de tijd dan de samenstelling van het effluent. De grootste variatie is waargenomen voor Fe, Mn, SO_4 en NH_4 (coëfficiënt of $\text{variation} > 100\%$), gevolgd door PO_4 , HCO_3 , Cl en NO_3 . De variaties voor ijzer en mangaan (Figuur V-3) hangen waarschijnlijk samen met de seizoenale fluctuatie van de zuurstofconcentratie in het grondwater. Omdat ijzer en mangaan slecht in water oplossen onder oxische omstandigheden (zuurstofhoudend), slaan deze stoffen in de loop van het groeiseizoen (bij diepe grondwaterstanden) op de bodem neer. Deze stoffen lossen veel beter in water op onder anoxische omstandigheden (zuurstofloos, bij ondiepe grondwaterstanden), zodat ijzer en mangaan dat in de bodem aanwezig is in oplossing gaat en de concentraties in grondwater doet stijgen. De fluctuatie van het redoxmilieu, en daarmee van de concentratie ijzer en mangaan, hangt samen met afwisselingen van natte en droge periodes. Het jaar 2016 had een relatief natte zomer, waardoor de grondwaterstand steeg en het redoxmilieu op de diepte van het meetfilter veranderde van oxisch naar anoxisch. Subirrigatie kan daarom indirect leiden tot hoge concentraties ijzer en mangaan, doordat met de stijging van de grondwaterstand deze stoffen vanuit de bodem oplossen in het grondwater.



Figuur V-2: Concentraties van de hoofdcomponenten gemeten in het effluent van restwater Bavaria en in het grondwater (peilbuis B1) op drie verschillende momenten gedurende de infiltratieproef.



Figuur V-3: Concentraties Fe, Mn, SO₄ en NH₄ gemeten in het effluent van restwater Bavaria en in het grondwater ter plaatse van het onbeïnvloede referentiepunt B1 op drie verschillende momenten gedurende de infiltratieproef. De concentraties van deze stoffen zijn afhankelijk van de redoxtoestand van de bodem, die met de grondwaterstand fluctueert met de seizoenen.

V.3 Grondwaterkwaliteitsveranderingen als gevolg van subirrigatie

Inleiding

De infiltratie van restwater heeft mogelijk gevolgen voor de grond- en oppervlaktewaterkwaliteit, doordat extra stoffen met het effluent worden aangevoerd, of doordat stoffen onder invloed van het aangevoerde effluent (als gevolg van stijging van de grondwaterstand) in oplossing gaan. Waar en wanneer deze effecten optreden is afhankelijk van de verspreiding van het aangevoerde restwater door de ondergrond. Om dit in beeld te brengen zijn vijf waarnemingsfilters in het proefperceel (Figuur V-1) aan het begin en einde van beide infiltratieperiodes bemonsterd, namelijk

- Ter plaatse van A4, tussen twee drains en naast een drain
- Ter plaatse van A4, op drie diepten

De gegevens uit deze meetopstelling bevatten informatie over de verspreiding van het effluent naar de Goorloop en naar de diepte.

Waterkwaliteitsveranderingen binnen het proefperceel

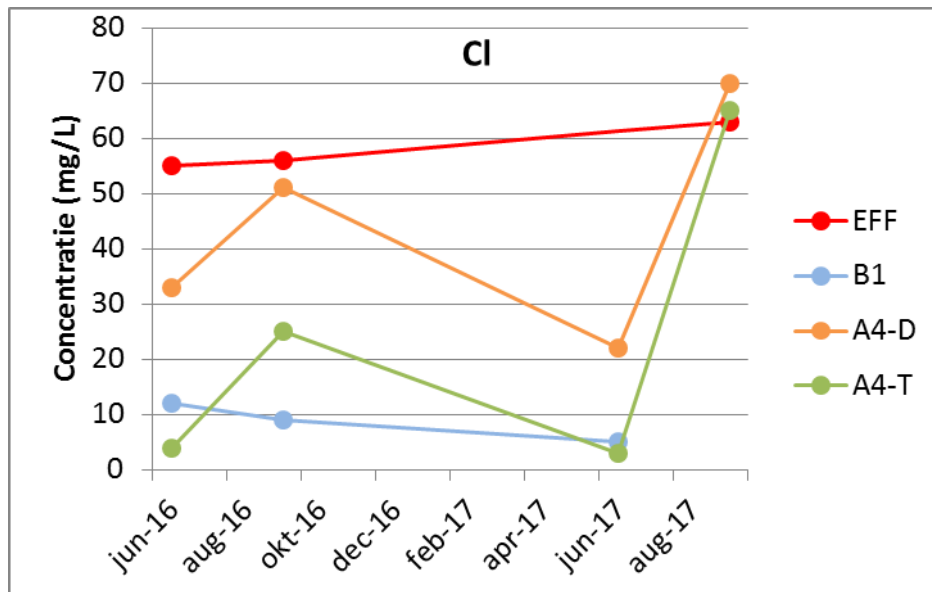
Inleiding

In deze paragraaf worden de effecten van subirrigatie op de waterkwaliteit binnen het proefperceel beschreven. Hiertoe worden de waargenomen veranderingen van een aantal parameters als uitgangspunt genomen. Deze parameters zijn gemeten direct naast een drainage/infiltratiebuis (A4-D) en tussen twee buizen (A4-T) in. Ter referentie zijn de concentraties in het effluent (EFF) en die ter plaatse van het referentie meetpunt B1 (onbeïnvloed grondwater) gebruikt. Hieruit ontstaat het volgende beeld over de verplaatsing van het geïnfiltreerde effluent door de ondergrond en de effecten op de grondwatersamenstelling.

Verplaatsing van het geïnfiltreerde effluent door de ondergrond

Uit waargenomen chlorideconcentraties (Figuur V-4) blijkt dat het aangevoerde effluent de meetlocaties A4-D en A4-T bereikt. Chloride stroomt namelijk mee met het grondwater, zonder dat het onderhevig is aan afbraak of aan de bodem hecht. Chloride kan daarom als tracer voor grondwaterstromen worden gebruikt. In het referentiemonster B1 blijft de chlorideconcentratie vrijwel constant en is geen sprake van aanvoer van effluent. Het chloride dat hier is waargenomen is waarschijnlijk afkomstig uit neerslag en ingedikt onder invloed van verdamping.

In tegenstelling tot de chlorideconcentratie ter plaatse van B1 stijgt deze ter plaatse van de meetlocaties A4-D en A4-T gedurende de perioden van aanvoer en bereikt hij vergelijkbare waarden als in het effluent is waargenomen (Figuur V-4). Wel is sprake van verdunning van het effluent met lokaal geïnfiltreerd regenwater dat nauwelijks chloride bevat. Deze mengverhouding verandert met de afstand van de drains en is geschat door uit te gaan van een constante chlorideconcentratie van 55 mg/L in het effluent en een verwaarloosbare hoeveelheid in regenwater. Hieruit volgt dat het grondwater naast de drains aan het einde van de eerste aanvoerperiode voor zo'n 90% uit effluent bestaat. Voor het grondwater tussen de drains is dat zo'n 50%. Na de tweede aanvoerperiode bestaat het grondwater op beide locaties voor 100% uit effluent. Het verschil tussen beide aanvoerperioden wordt verklaard doordat tijdens de tweede periode veel meer effluent is aangevoerd dan tijdens de eerste periode.



Figuur V-4: Waargenomen chlorideconcentraties in het grondwater direct naast een drain en midden tussen twee drains. De concentraties in het effluent en ter plaatse van meetpunt B1 zijn ter referentie opgenomen.

Effecten op watertypen

Watertypen geven een indruk van de stoffen die dominant zijn in de watersamenstelling. Doordat restwater wat samenstelling betreft afwijkt van het oorspronkelijke grondwater (zie paragraaf V.2), heeft subirrigatie tot gevolg dat het grondwatertype in het proefperceel wijzigt van een CaSO_4 -type, naar een NaHCO_3 -type en op sommige plaatsen vervolgens in een CaHCO_3 -type (kalkoplossing) (Tabel V-2). Deze opeenvolgende veranderingen blijken uit het volgende patroon:

Het grondwater ter plaatse van het referentiepunt B1 is te typeren als zoet water met belangrijkste hoofdcomponenten Ca en SO_4 . Dit grondwater wordt niet beïnvloed door effluent en geeft een beeld van de waterkwaliteit zonder subirrigatie.

Het effluent is te typeren als zoetwater ($\text{Cl}=60 \text{ mg/L}$) met als belangrijkste hoofdcomponenten Na en HCO_3 . Het watertype van het grondwater direct naast de drain neemt vrijwel direct het watertype aan van het geïnfilterde effluent: NaHCO_3 . Tijdens de eerste metingen in juni 2016 is het grondwater ter plaatse van A4D (direct naast de drain) al getypeerd als NaHCO_3 , waarschijnlijk omdat de monsters na de start van de wateraanvoer zijn genomen. Door de korte afstand tot de drainage/infiltratiebuis bestaat het grondwater hier in tijden van aanvoer volledig uit effluent.

Op de locatie tussen de drains (A4-T) verandert het watertype tijdens de eerste aanvoerperiode in een CaHCO_3 . Waarschijnlijk wordt deze toename in calciumionen in grondwater veroorzaakt door uitwisseling van calcium dat aan bodemdeeltjes is gebonden met het overschot aan natriumionen dat met het effluent wordt aangevoerd. Dit geeft aanwijzingen dat de infiltratie van effluent leidt tot

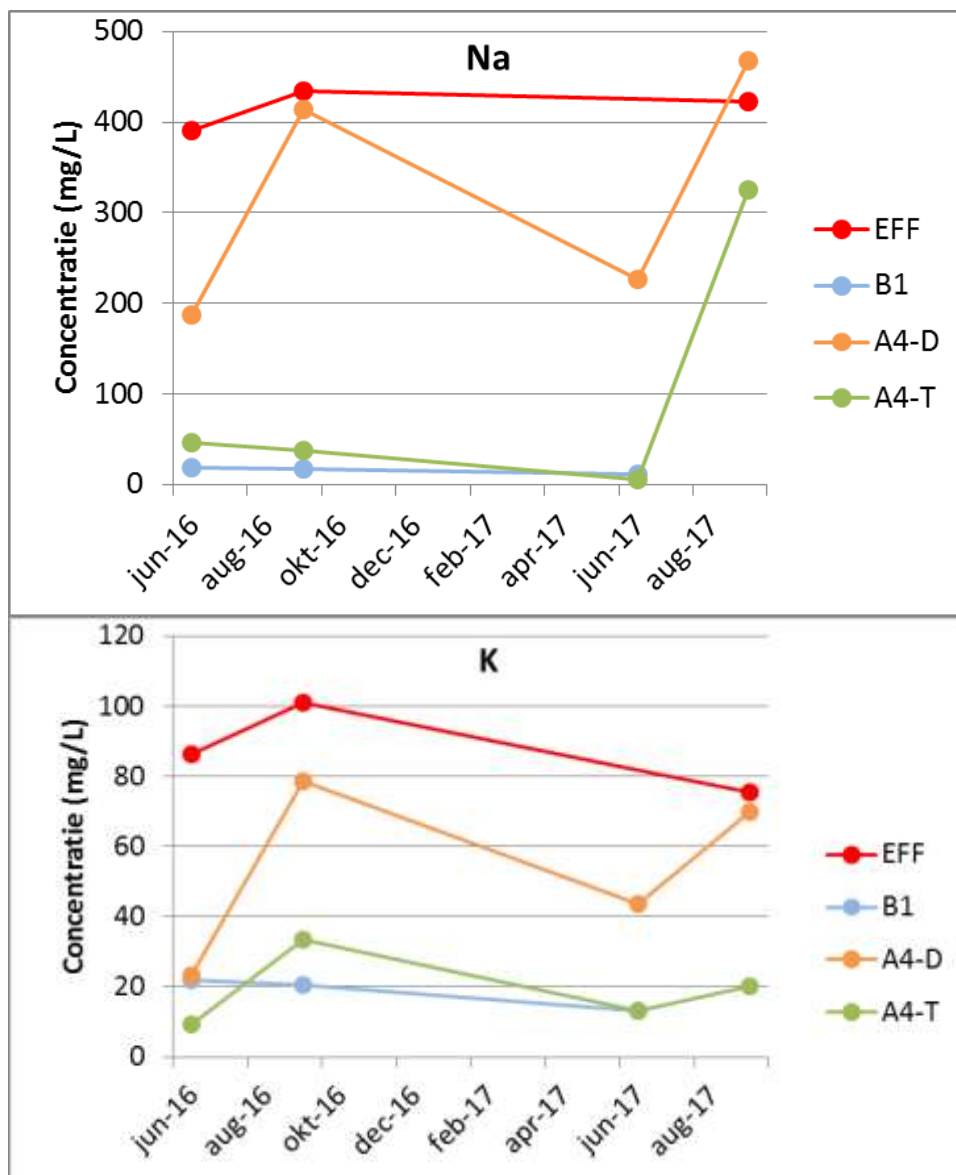
vervanging van calcium voor natrium aan het bodemcomplex. Het is niet bekend wat dit (op de lange termijn) betekent voor de bodemkwaliteit.

Tabel V-2: Chemische water typen van het effluent en het grondwater voor en na subirrigatie.

Watertypen	Jun-16	Sep-16	Jun-17	Sep-17
EFF	F5NaHCO ₃ +	F5NaHCO ₃ +		F2NaHCO ₃
B1	g1CaSO ₄ +	g1CaSO ₄ +	g*CaSO ₄ +	
A4-D	F3NaHCO ₃ +	F5NaHCO ₃ +	g4NaHCO ₃ +	F5NaHCO ₃ +
A4-T	G1NaHCO ₃ +	g3CaHCO ₃ +	G2CaHCO ₃ +	F4NaHCO ₃ +

Effecten op natrium- en kaliumgehalten

Tijdens de aanvoerperioden nemen de concentraties Na en K in het grondwater op beide locaties (A4-D en A4-T, Figuur V-5) toe. Aan het einde van beide infiltratieperioden zijn de concentraties in het grondwater vlak naast de drain vrijwel gelijk met die in het effluent, terwijl de concentraties ter plaatse van het referentiepunt permanent veel lager zijn. De verhoogde concentraties in het grondwater in het proefperceel veren onder invloed van het neerslagoverschot voor een deel weer terug naar de oorspronkelijke situatie, maar bereiken niet de lage concentraties ter plaatse van het referentiepunt. Dit geeft aanwijzingen dat de aanvoer van natrium en kalium met het effluent kan leiden tot een permanente verhoging van deze stofconcentraties in het grondwater. In hoeverre deze concentraties verder stijgen bij voortzetting van de aanvoer van effluent is afhankelijk van de aanvoerhoeveelheden en de mate van uitwisseling van natrium en kalium met calcium dat aan de bodem is gebonden. Om hier inzicht in te krijgen is voortzetting van de monitoring in combinatie met de simulatie van uitwisselprocessen (bijvoorbeeld met EasyLeacher) noodzakelijk.



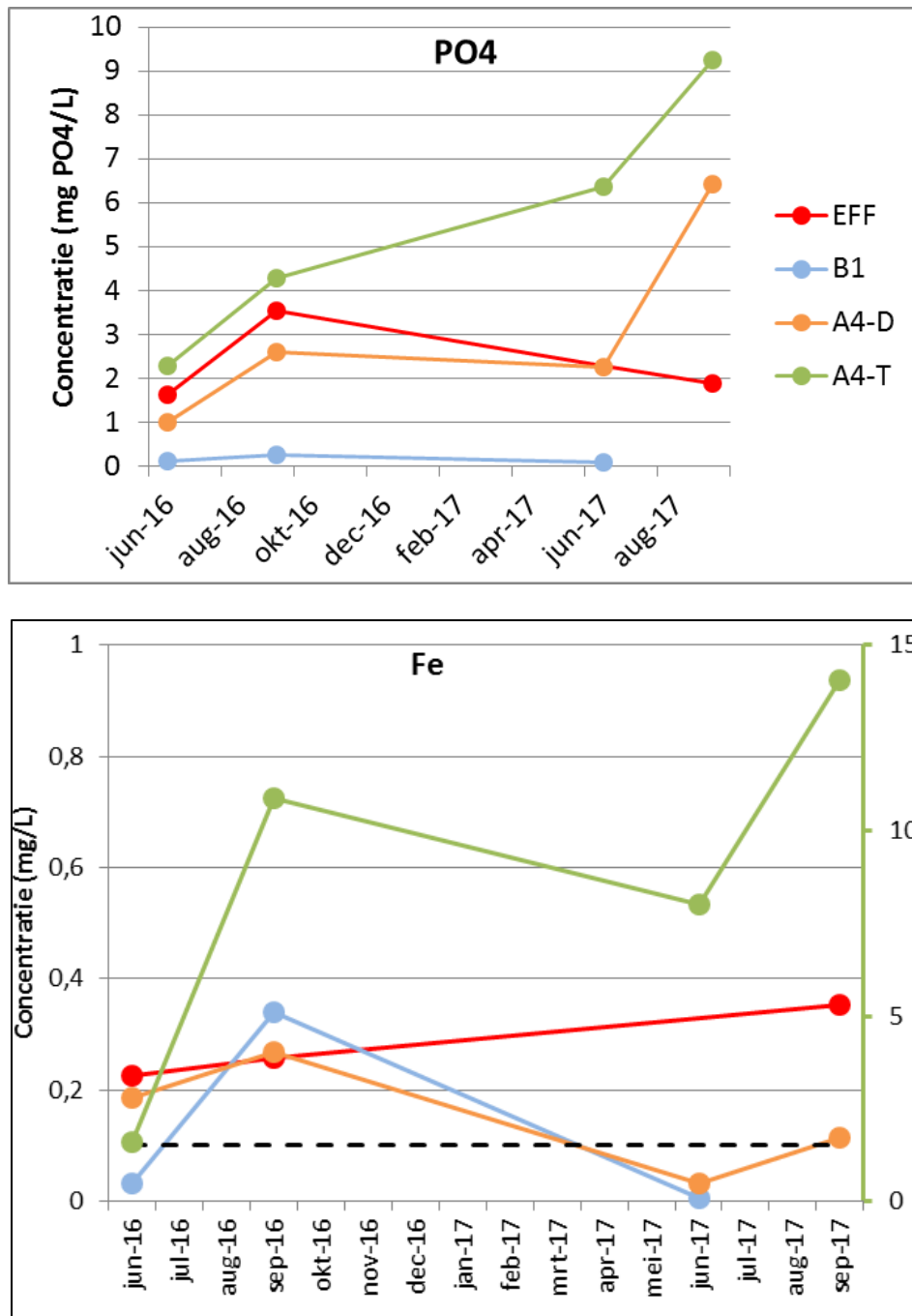
Figuur V-5: Waargenomen concentraties van natrium en kalium in het grondwater direct naast een drain en midden tussen twee drains. De concentraties in het effluent en ter plaatse van meetpunt B1 zijn ter referentie opgenomen.

Effecten op fosfaatgehalten

Het fosfaatgehalte in het grondwater in het proefperceel neemt gedurende beide aanvoerperioden toe (Figuur V-6). Vlak naast de drain (A4-D) stijgt het fosfaatgehalte tot een niveau dat vergelijkbaar is met dat wat is waargenomen in het effluent, hoewel tijdens de laatste aanvoerperiode de fosfaatconcentratie daar verder stijgt. In het grondwater tussen de drains neemt de fosfaatconcentratie

sinds de start van de aanvoer gestaag toe en zijn de concentraties al ver boven de concentratie in het effluent uitgestegen (Figuur V-6). Het grondwater bestaat hier aan het einde van de aanvoerperiode volledig uit geïnfiltreerd effluent. Dit wijst erop dat naast het aangevoerde effluent nog andere fosfaatbronnen aanwezig zijn, zoals bemesting of mobilisatie uit de bodem. Omdat de fosfaatconcentratie ter plaatse van het referentiepunt (B1) nauwelijks fluctueert, is fosforbemesting een minder waarschijnlijke verklaring en ligt de bodem als aanvullende bron van fosfaat het meest voor de hand.

Fosfaat dat in de bodem is gebonden aan o.a. ijzeroxides komt in oplossing wanneer het redoxmilieu verandert van oxiderend (zuurstofhoudend) naar reducerend (zuurstofloos). Uit de fluctuatie van ijzer en mangaan op locatie A4-D blijkt inderdaad dat het redoxmilieu schommelt tussen suboxisch (Fe en Mn concentraties $<0,1$ mg/L) in juni en een anoxisch milieu (Fe en Mn concentraties $>0,1$ mg/L) in september (Figuur V-6). Waarschijnlijk hangt deze fluctuatie samen met de grondwaterstand, die het transport van zuurstof door de bodem belemmert. Omdat deze afwisseling van suboxische en anoxische milieus ook te zien is bij het referentiemonster B1 (Figuur V-6) is de mobilisatie van fosfaat niet alleen het resultaat van infiltrerend irrigatiewater, maar ook van de seizoensschommelingen van de waterstand. De permanente stijging van het fosfaatgehalte moet echter voor een deel het directe of indirecte gevolg zijn van de aanvoer van effluent. Om vast te stellen hoe lang en hoe ver de fosfaatconcentraties doorstijgen bij voortzetting van de aanvoer van effluent is voortzetting van de monitoring noodzakelijk.



Figuur V-6: Waargenomen concentraties van fosfaat en ijzer in het grondwater direct naast een drain en midden tussen twee drains. De concentraties in het effluent en ter plaatse van meetpunt B1 zijn ter referentie opgenomen.

Waterkwaliteitsveranderingen in diep grondwater

Inleiding

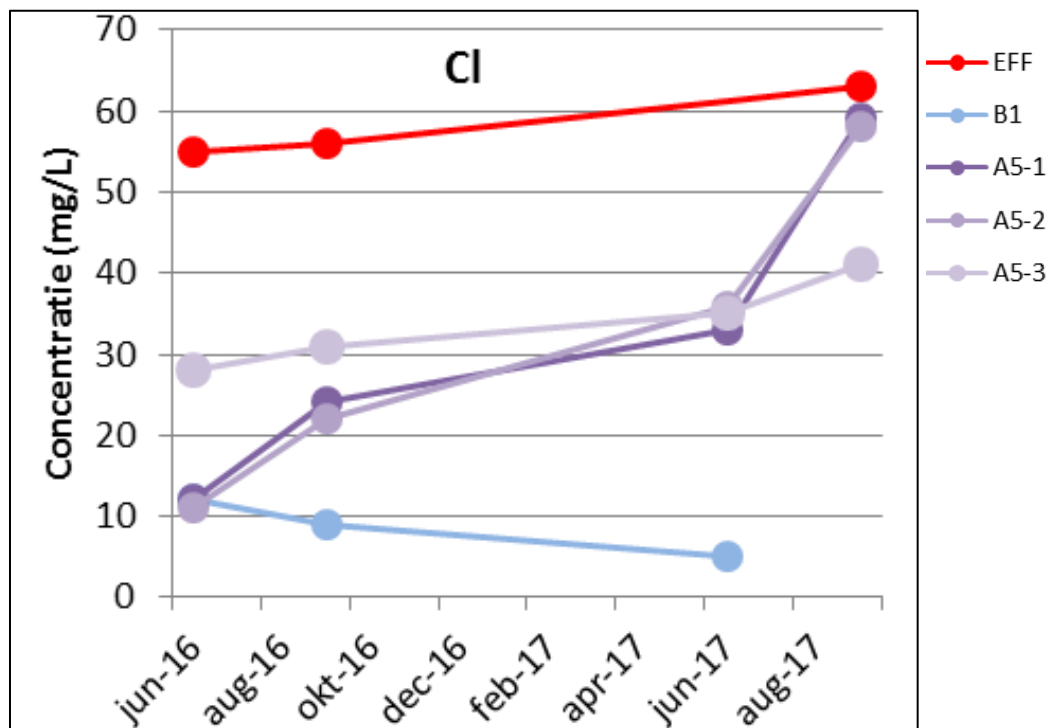
Als gevolg van de hoge topografische ligging is het proefgebied van oudsher een infiltratiegebied. Dit betekent dat een (onbekend, maar beperkt) deel van het neerslagoverschot infiltreert naar diepere watervoerende pakketten die benut worden voor het winnen van grondwater. Het infiltreren van grondwater zal als gevolg van subirrigatie toenemen, doordat daarmee de grondwaterstand wordt verhoogd. Dit betekent dat het infiltreren van effluent op termijn zijn weerslag kan hebben op de kwaliteit van het diepere grondwater. Om deze effecten inzichtelijk te maken is ter plaatse van meetpunt A5 op drie diepten het grondwater bemonsterd. De concentraties die op verschillende diepten zijn gemeten zijn vergeleken met die in het effluent en ter plaatse van het referentiepunt B1 zijn gemeten. Met deze aanpak kan het effect van subirrigatie op de diepere grondwaterkwaliteit worden gescheiden van andere invloeden die anders ook hadden opgetreden.

In deze paragraaf worden de resultaten van de kwaliteitsmonitoring op drie verschillende diepten besproken. Achtereenvolgens komen aan de orde (1) het verplaatsen van het effluent, (2) effecten op watertypen, (3) effecten op natrium- en kaliumgehalten en (4) effecten op sulfaatgehalten.

Verplaatsing van het geïnfiltreerde effluent

De verspreiding van het effluent in de ondergrond is op basis van veranderingen van de chlorideconcentratie inzichtelijk gemaakt (Figuur V-7). Echter, deze aanpak is niet geschikt voor het diepe meetpunt A5-3, aangezien de chlorideconcentratie daar bij aanvang van de proef al flink hoger was dan bij het referentiepunt (B1). Hieruit blijkt dat het diepe grondwater van zichzelf al veel chloride bevat en dat de chlorideconcentratie daar kan fluctueren zonder dat sprake is van aanvoer van effluent. Hierdoor is het daar niet mogelijk om chloride als indicator voor de verspreiding van effluent te gebruiken. Overigens, gezien de aanwezigheid van dikke leemlagen tussen de meetfilters A5-2 en A5-3 is het niet de verwachting dat het effluent reeds het meetpunt A5-3 heeft bereikt. Blijkens het stijghoogteverschil over deze leemlaag van 20-50 cm is het grondwater boven en onder deze leemlagen namelijk goed van elkaar gescheiden.

Voor de meetpunten A5-2 en A5-1 is chloride wel bruikbaar als tracer voor het effluent. Immers, de chlorideconcentratie op beide meetpunten was bij aanvang van de aanvoer gelijk aan dat op het referentiepunt. Na aanvang van de aanvoer steeg de chlorideconcentratie op beide meetpunten ten opzichte van het referentiepunt (Figuur V-7). Op basis van concentratieverhoudingen schatten wij het aandeel effluent ter plaatse van A5-2 en A5-1 aan het einde van de eerste aanvoerperiode op ongeveer 20%. Aan het einde van de tweede aanvoerperiode bestaat het grondwater ter plaatse van deze meetpunten volledig uit geïnfiltreerd effluent. Het vergelijkbare verloop van de chlorideconcentratie in beide meetpunten duidt op een beperkte weerstand van de leemlagen tussen beide filters. Dit komt niet overeen met het waargenomen stijghoogteverschil van ongeveer 50 cm over deze leemlaag, duidend op een hoge weerstand tegen grondwaterstroming waardoor het water verticaal goed van elkaar gescheiden zou moeten blijven.



Figuur V-7: Waargenomen chlorideconcentraties in het grondwater direct naast een drain en midden tussen twee drains. De concentraties in het effluent en ter plaatse van meetpunt B1 zijn ter referentie opgenomen.

Effecten op watertypen

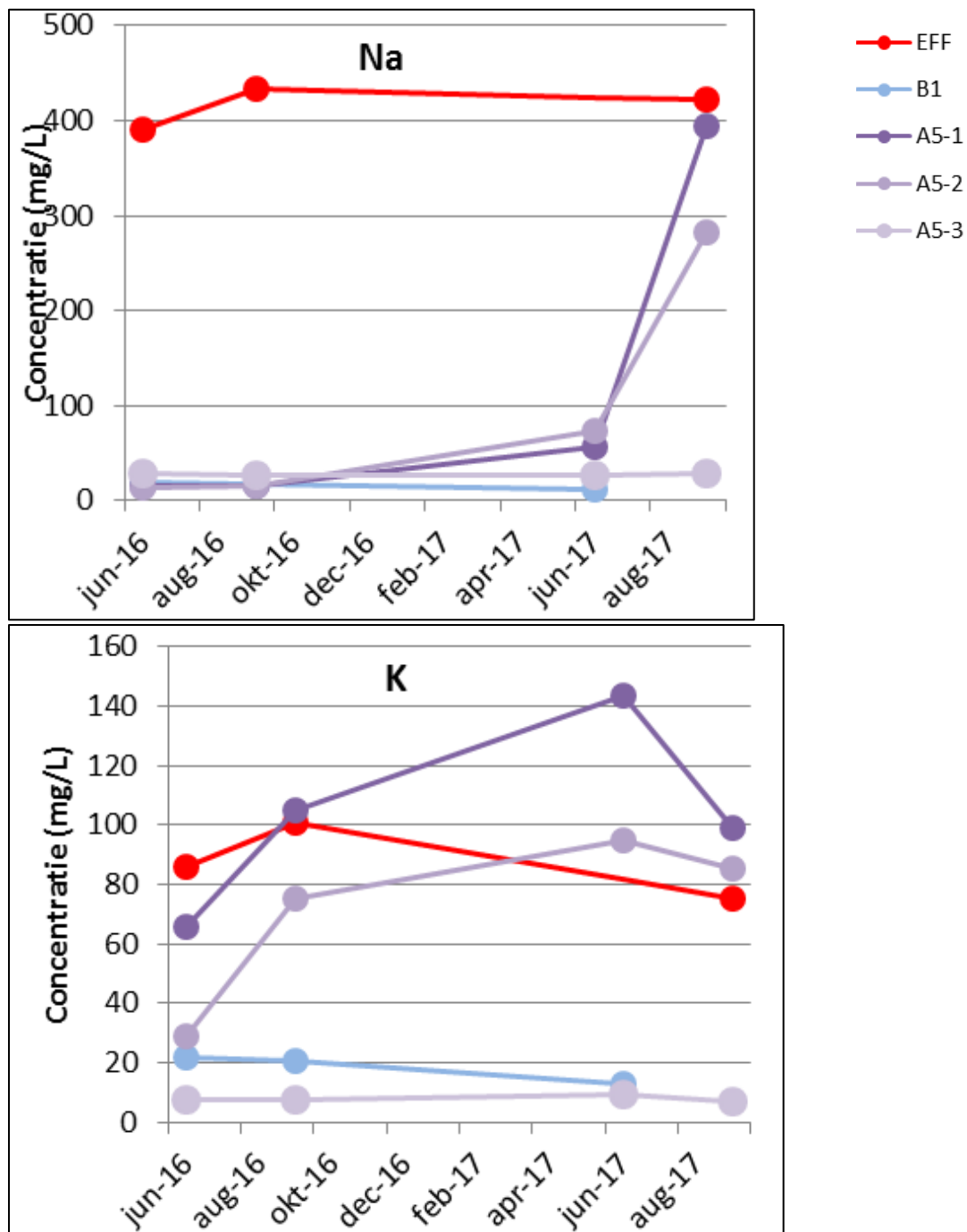
Watertypen geven een indruk van de stoffen die dominant zijn in de watersamenstelling. Doordat restwater wat samenstelling afwijkt van het oorspronkelijke grondwater, heeft subirrigatie tot gevolg dat het grondwatertype onder invloed van de aanvoer van effluent wijzigt (Tabel V-3). Uit deze tabel blijkt dat het grondwater inderdaad het watertype van het effluent overneemt, maar dat, in tegenstelling tot het water direct naast de drain, nog geen sprake is van een CaHCO_3 -type, maar van een NaHCO_3 -type. De verwachting is dat het watertype na aanhoudende subinfiltratie wel het karakter van een CaHCO_3 -type aanneemt. Uit deze tabel blijkt tevens dat het watertype onder de leemlaag (A5-3) nauwelijks wijzigt. Dit bevestigt dat de leemlaag voorkomt dat het effluent snel op diepte komt.

Tabel V-3: Chemische water typen van het effluent en het grondwater voor en na subirrigatie

Monster	Jun-16	Sep-16	Jun-17	Sep-17
EFF	F5NaHCO3+	F5NaHCO3+		F2NaHCO3
B1	g1CaSO4+	g1CaSO4+	g*CaSO4+	
A5-1	g1KNO3+	g1KNO3+	F3KHCO3+	F4NaHCO3+
A5-2	g1CaNO3+	g1KMix+	F3NaHCO3+	F4NaHCO3+
A5-3	g3CaHCO3+	F3CaHCO3+	F4CaHCO3+	F3CaHCO3+

Effecten op natrium- en kaliumgehalten

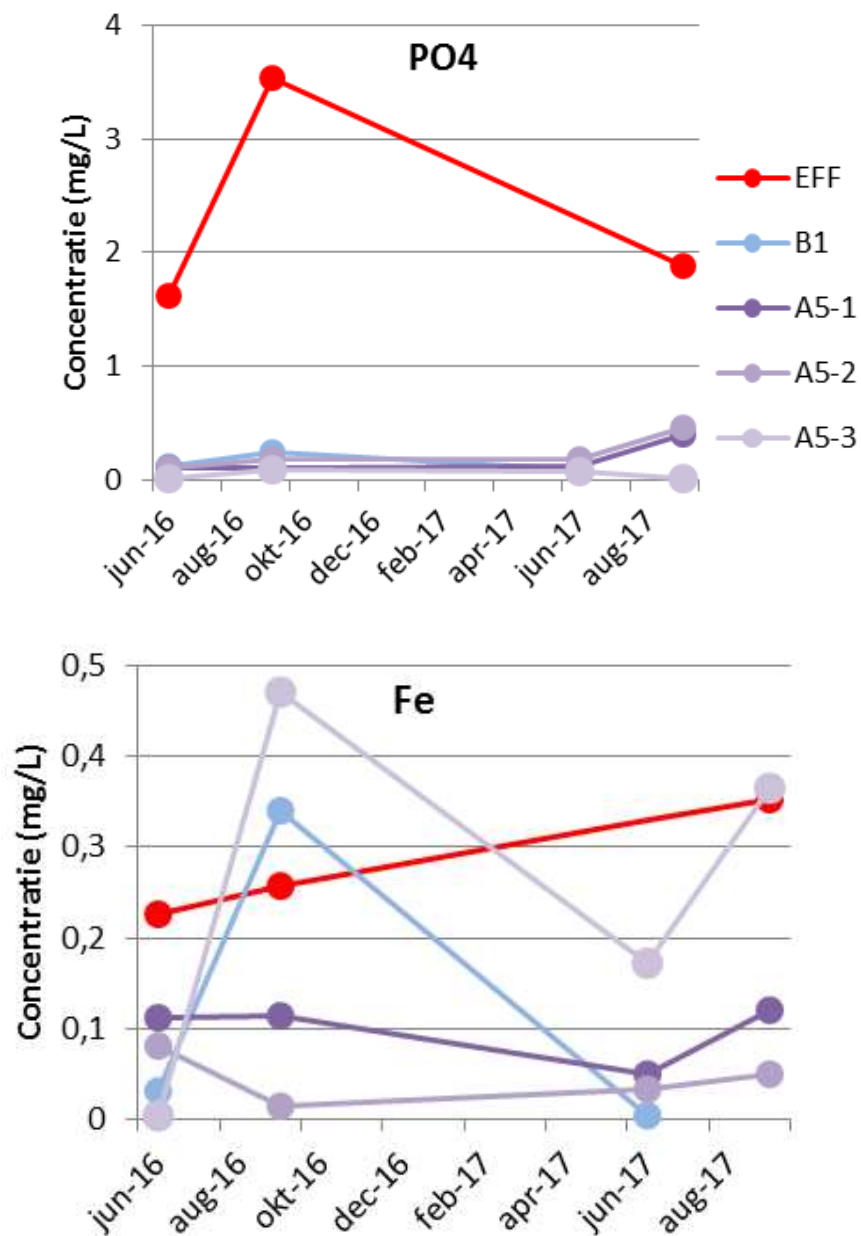
In Figuur V-8 zijn de waargenomen concentraties van natrium en kalium ter plaatse van de meetpunten A5-1, A5-2 en A5-3 weergegeven. Uit deze figuur blijkt dat het natriumgehalte in het effluent vele malen hoger is dan het natriumgehalte in het grondwater voordat sprake was van aanvoer van effluent. Na de eerste aanvoerperiode bleef het natriumgehalte in het grondwater ter plaatse van de A5-1 en A5-2 vrijwel gelijk met de referentie (B1). Dit ondanks dat volgens de chlorideverhoudingen het aandeel restwater hier op zo'n 20% is geschat. Waarschijnlijk zorgt ionenuitwisseling met aan de bodem gebonden kalium voor een tijdelijke demping van de stijging van de nitraatconcentratie. Dit wordt bevestigd door de waarneming dat de kaliumconcentraties in het grondwater tot boven de concentratie in het effluent stijgen (Figuur V-8). Na de tweede aanvoerperiode is de natriumconcentratie ter plaatse van beide meetpunten gestegen tot een vergelijkbare concentratie als in het effluent is waargenomen. Als gevolg van ionenuitwisseling komt het effect van subirrigatie op de natriumconcentratie in het diepere grondwater vertraagd tot uiting. Op grotere diepte, namelijk ter plaatse van A5-3, is geen sprake van een toename van de natriumconcentratie ten opzichte van de referentie.



Figuur V-8: Waargenomen concentraties van natrium en kalium in het grondwater op drie diepten. De concentraties in het effluent en ter plaatse van meetpunt B1 zijn ter referentie opgenomen.

Effecten op fosfaatgehalten

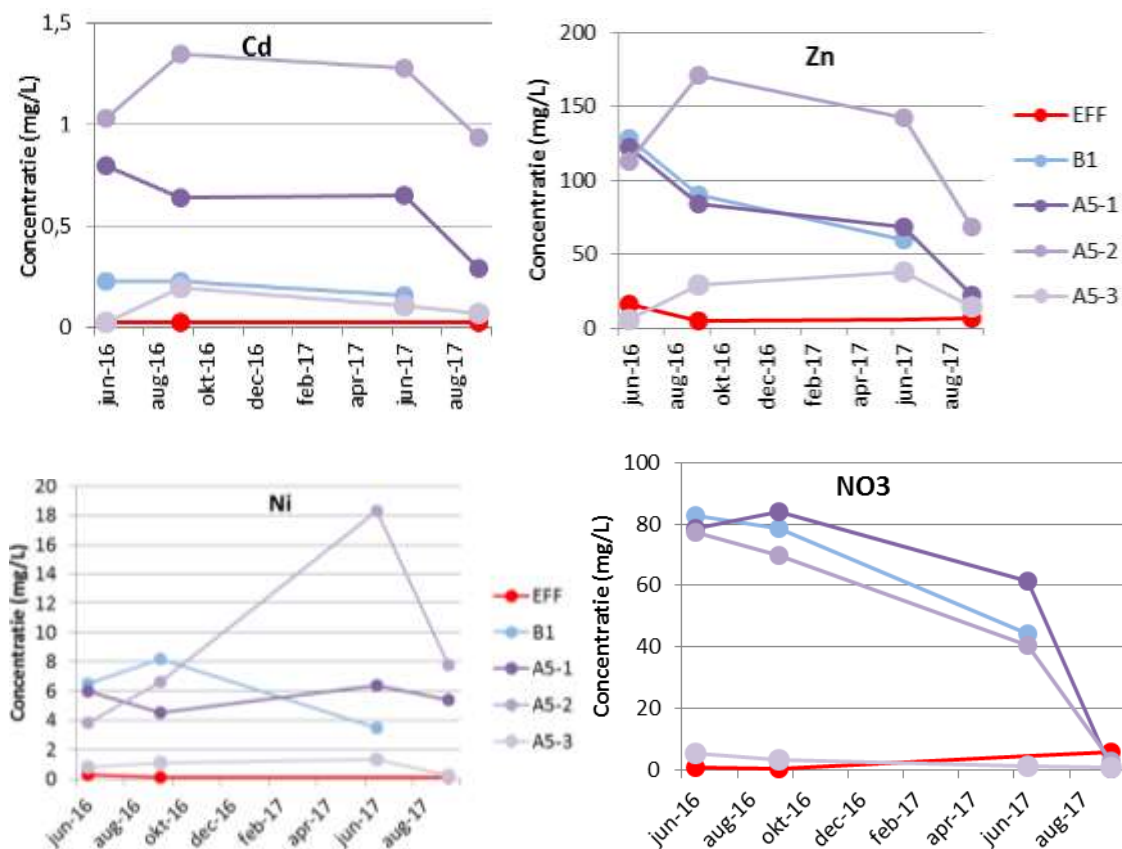
In Figuur V-9 zijn de waargenomen concentraties van ijzer en fosfaat ter plaatse van de meetpunten A5-1, A5-2 en A5-3 weergegeven. Uit deze figuur blijkt dat ijzer ook hier gedurende het groeiseizoen mobiliseert (toename ijzer). Mogelijk heeft de stijging van de grondwaterstand als gevolg van de aanvoer van effluent hier een aandeel in. In tegenstelling tot het grondwater nabij het meetpunt A4, reageert de fosfaatconcentratie hier echter nauwelijks op. Waarschijnlijk hangt dit verschil samen met de verdergaande fosfaatverzadiging van de ondiepe ondergrond als gevolg van fosforbemesting in vergelijking met de diepere ondergrond. Hierdoor bevat de ondergrond (relatief) weinig fosfaat dat in oplossing kan gaan.



Figuur V-9: Waargenomen concentraties van fosfaat en ijzer in het grondwater op . De concentraties in het effluent en ter plaatse van meetpunt B1 zijn ter referentie opgenomen.

Effecten op sporenelementen

Ter plaatse van A5-1, A5-2 en (in mindere mate) A5-3 zijn, ten opzichte van het effluent, verhoogde concentraties waargenomen van de sporenelementen Cd (1,3 µg/L), nikkel (18,3 µg/L) en zink (171 µg/L). Mogelijk zijn deze sporenelementen het gevolg van de oxidatie van pyriet (een ijzersulfide) dat van nature in de ondergrond aanwezig is. Pyriet bevat kleine hoeveelheden van deze sporenelementen die in oplossing kunnen gaan zodra het in contact komt met zuurstof of nitraat. Deze hypothese wordt (globaal) bevestigd door Figuur V-10: aan het einde van de tweede subirrigatieperiode bevindt zich op geen van de meetpunten meer nitraat in het grondwater en zijn de concentraties aan sporenelementen gedaald. De afname van nitraat is waarschijnlijk een indirect gevolg van subirrigatie: doordat de grondwaterstand stijgt, wordt het grondwater eerder suboxisch en anoxisch, zodat nitraat wordt omgezet in stikstofgas (denitrificatie). Subirrigatie heeft voor deze parameters daarom mogelijk een positief effect op de grondwaterkwaliteit.



Figuur V-10: Waterkwaliteitsveranderingen van de sporenelementen Cd, Zn en Ni en nitraat op diepte voor en na infiltratie restwater Bavaria.

V.4 Conclusies en aanbevelingen

Conclusies

Subirrigatie van effluent van Bavaria kan op twee manieren gevolgen hebben voor de grondwaterkwaliteit. Ten eerste kunnen diverse stoffen die in verhoogde concentraties in het effluent aanwezig zijn op de lange termijn tot ongewenste kwaliteitseffecten leiden. Gezien de normstellingen van het Infiltratiebesluit Bodembescherming en de samenstelling van het onbeïnvloede grondwater zijn vooral de hoge concentraties natrium, fosfaat en chroom aandachtspunten. De meetresultaten laten zien dat het aangevoerde natrium aan de bodem hecht en daarmee mogelijk de bodemkwaliteit beïnvloedt. De hoge concentraties aan fosfaat in het effluent vormen echter op zichzelf waarschijnlijk geen bedreiging voor de grondwaterkwaliteit, omdat de bodem vooralsnog een grotere bron van fosfaat is dan het effluent. Van chroom is onbekend in hoeverre dit element tot knelpunten kan leiden.

Ten tweede kan subirrigatie leiden tot verschuivingen in bodem-waterevenwichten doordat met de stijging van de grondwaterstand het redoxmilieu wijzigt. Hierdoor lost in tijden van subirrigatie een deel van het aan de bodem gebonden fosfaat op in het grondwater, zodat de fosfaatconcentratie in het grondwater tot boven de concentratie in het effluent uit kan stijgen. Dit effect treedt echter alleen op in de ondiepe ondergrond, waarschijnlijk omdat de bodem daar als gevolg van jarenlange fosforbemesting ver is opgeladen met fosfaat. Mogelijk wordt een deel van het vrijgekomen fosfaat door gewassen opgenomen, of op wat grotere diepte, en in tijden van diepere grondwaterstanden, weer tijdelijk gebonden aan ijzer. Onbekend is in hoeverre en op welke termijn fosfaat in de bodem ophoopt, of onder invloed van drainage in het oppervlaktewater terecht komt. Omdat het grondwater ook veel ijzer bevat, zal een eventuele toename van de fosfaatbelasting van het oppervlaktewater waarschijnlijk goed als ijzerfosfaat gebonden worden.

Het verschuiven van de redox-milieus is echter niet alleen een mogelijk knelpunt voor subirrigatie. De waarnemingen geven aanwijzingen dat het verhogen van de grondwaterstand bijdraagt aan het verwijderen van nitraat onder invloed van denitrificatie. Mogelijk wordt hierdoor de oxidatie van pyriet geremd, zodat de belasting van het grondwater met spore-elementen afneemt.

Aanbevelingen

Uit de waterkwaliteitsmonitoring blijkt dat natrium, fosfaat, en chroom en aandachtspunten zijn bij een opschaling van subirrigatie van het restwater van Bavaria. Tegelijkertijd kan subirrigatie mogelijk een positieve bijdrage leveren aan het verminderen van de belasting van het grondwater met nitraat en een aantal spore-elementen die bij de oxidatie van pyriet in oplossing gaan. Om het inzicht in deze processen en de consequenties daarvan te vergroten adviseren wij het volgende:

- (1) Voortzetting van de huidige monitoring om duidelijkheid te krijgen over de positieve en negatieve effecten van subirrigatie op de langere termijn;
- (2) Uitbreiden van de chemische monitoring voor bodemvocht, zodat inzicht wordt verkregen in de kwaliteit van het water dat het gewas opneemt;
- (3) Nagaan van de herkomst, verwijderingsmogelijkheden en eventuele milieu-impact van natrium en chroom, dat in verhoogde concentraties in het effluent is waargenomen;
- (4) Omdat de effecten van de aanvoer van natrium met het effluent onbekend zijn, is het vanuit het voorzorgsprincipe aan te bevelen om na te gaan of andere vormen van het reinigen van flessen haalbaar is.