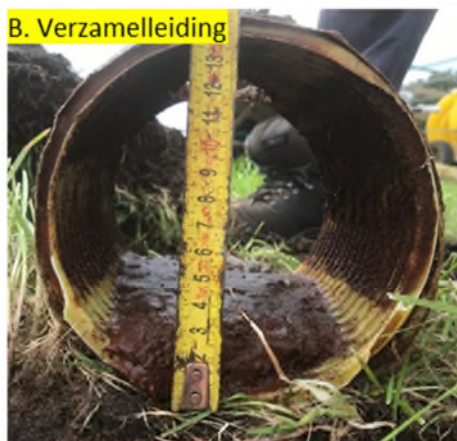


Verstopping voorkomen bij regelbare drainage met subirrigatie op hoge zandgronden

Evaluatie van veld- en kolomproeven in America, Stegeren, Lieshout en Haaksbergen



Samenwerkingspartners



Rapport

Verstopping voorkomen bij regelbare drainage met subirrigatie op hoge zandgronden

Evaluatie van veld- en kolomproeven in America, Stegeren, Lieshout en Haaksbergen

KWR 2023.085 | Oktober 2023

Opdrachtnummer

403006 (KLIMAP) & 402088 (BTO-WICE)

Projectmanager

Dr. E. (Edu) Dorland

Opdrachtgever

KLIMAP & BTO-WiCE

Auteurs

J.A. (Janine) de Wit MSc., ir. M.L. (Martin) van der Schans, Dr. A. (Arnaut) van Loon, Dr. ir. D.G. (Gijsbert) Cirkel, Dr. ir. G.A.P.H. (Gé) van den Eertwegh, Dr.ir. R.P. (Ruud) Bartholomeus

Kwaliteitsborger

Dr. N. (Niels) Hartog

Verzonden naar

Dit rapport is openbaar.

Dit onderzoek is uitgevoerd binnen het programma Water in de Circulaire Economie (WiCE) van de KWR en de drinkwatersector en het KLIMAP-project. Het 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.

Werkwijzen, rekenmodellen, technieken, ontwerpen van proefinstallaties, prototypen en door KWR gedane voorstellen en ideeën alsmede instrumenten, waaronder software, die in het onderzoeksresultaat zijn opgenomen, zijn en blijven het eigendom van KWR. Ook alle rechten die voortvloeien uit intellectuele- en industriële eigendom, alsmede de auteursrechten, blijven bij KWR berusten en derhalve eigendom van KWR.

Keywords

subirrigatie, regelbare drainage, verstopping, watervoorziening, landbouw, waterhergebruik

Jaar van publicatie
2023

Meer informatie
J.A. (Janine) de Wit
T 030-6069651
E janine.de.wit@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

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

KWR

Oktober 2023 ©

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

Samenvatting

Aanleiding en doel

Om de risico's van droogte door klimaatverandering te mitigeren en zoetwatervoorraden op lange termijn veilig te stellen zijn technieken nodig die lokaal hergebruik van water faciliteren, zoals regelbare drainage met subirrigatie (RDS). RDS is een techniek waarbij water via drains onder de wortelzone van gewassen in de bodem wordt geïnfilteerd. Uit ervaring bij de drinkwaterbedrijven is bekend dat kunstmatige infiltratiesystemen gevoelig zijn voor afname van de infiltratiecapaciteit door verstopping. Er is echter weinig bekend over verstopping van RDS-systemen, met name bij gebruik van ander water dan oppervlaktewater (zoals gezuiverd effluent, grondwater).

In dit onderzoek is in beeld gebracht welke factoren van invloed zijn op verstopping van RDS en hoe deze verstopping mogelijk te beheersen is. Hiertoe is een evaluatie uitgevoerd van hydrologische-, chemische- en moleculair-biologische monitoring bij 4 veldproeven en een kolomproef met verschillende waterbronnen: grondwater (veldproef America), oppervlaktewater (veldproef Stegeren), effluent van een zuiveringsinstallatie voor industrieel afvalwater van een bierbrouwerij (veldproef Lieshout) en effluent van een zuiveringsinstallatie voor stedelijk afvalwater (veldproef Haaksbergen).

Conclusies

De RDS-systemen Stegeren en Haaksbergen verstopten slechts in beperkte mate. De systemen America en Lieshout waren 4 jaar na inbedrijfstelling zodanig sterk verstopt dat de infiltratieweerstand meer dan een factor 25 was toegenomen. Hierdoor nam het infiltratiedebiet met 80% af, ondanks het verhogen van de druk (waterniveau) in de aanvoerput en verlaging van de grondwaterstand.

De verstopping in Stegeren, Haaksbergen en Lieshout bestond voornamelijk uit biofilm veroorzaakt door hoge biologische activiteit als gevolg van voedingsstoffen in het aanvoerwater. De verstopping in Lieshout werd verergerd door kalkneerslag door de hoge verzadiging van het effluent water en vermoedelijk ook door vorming van gasbellen. In America ontstonden ijzerneerslagen door beluchting van het anoxische (ijzerrijke) grondwater in de regelput.

De verstopping in America en Lieshout is succesvol verwijderd door respectievelijk het hoge druk (HD)-reinigen van de drains en het draineren (backflushen) en laten droogvallen van de drains. Tevens zijn op beide locaties preventieve maatregelen genomen die de verstopping afremmen. In America is beluchting van het aanvoerwater beperkt door aanpassingen in de aanvoerput. In Lieshout wordt de wateraanvoer periodiek stopgezet waardoor minder voedingsstoffen het systeem instromen (en de gewassen echter ook minder bodemvocht krijgen), worden de drains jaarlijks gebackflushed en wordt de aanvoer stopgezet in het najaar en winter zodat de drains droogvallen.

Aanbevelingen voor ontwerp, aanleg en beheer van RDS-systemen

RDS-systemen lopen kans op verstopping, met name bij toepassing van oppervlaktewater en RWZI-effluent doordat de waterkwaliteit deze bronnen een hoge verstoppingspotentie kent. Maatregelen om verstopping beheersbaar te houden zijn:

- | | |
|---------------------|---|
| Ontwerp/
aanleg: | <ul style="list-style-type: none"> • Zoek waterbronnen met een lage groeipotentie, of verlaag de groeipotentie alvorens infiltratie door voorzuivering • Bepaal de waterkwaliteit van de beoogde waterbron (Zie lijst met parameters in Kader 6.1.) en beoordeel of deze niet te ver afwijken van de richtwaarden welke de drinkwatersector hanteert voor het voorkomen van verstopping van injectieputten (zie Tabel 4-2). |
|---------------------|---|

- Leg de drains aan tussen de gemiddeld hoogste- (GHG) en laagste grondwaterstand (GLG). (NB: Hanteer bij irrigatie met anoxisch grondwater een aanleghoogte beneden de GLG om beluchting te voorkomen)
 - Voorzie individuele drains van ontluchting- en doorspuitpunten
- Beheer en onderhoud
- Laat de drains in het najaar droogvallen en voer regelmatig water af
 - Reinig de drains met een HD-reiniger als de infiltratieweerstand oploopt
- Monitoring:
- Monitor intredeweerstand door registratie van de wateraanvoer, waterniveau in de aanvoerput en grondwaterstand onder het perceel.

Aanbevelingen voor onderzoek en het ontwikkelen van praktijkrichtlijnen

Om grootschalig RDS-systemen te realiseren, zijn waterkwaliteitsrichtlijnen nodig die specifiek gericht zijn op het voorkomen van verstopping bij infiltratiedrains. De richtlijnen welke de drinkwatersector hanteert ter voorkoming van verstopping in diepinfiltratieputten (zie Tabel 4-2) zijn mogelijk onnodig streng voor infiltratiedrains. Hiervoor is het wenselijk de verstoppingsmonitoring en waterkwaliteitsanalyses op bestaande systemen te continueren, bij voorkeur aangevuld met nieuwe monitoringlocaties en kolomproeven. Met name is meer inzicht wenselijk naar de risico's op extreem snelle verstopping door de vorming van gasbellen bij aanvoer van nutriëntenrijk water.

Inhoud

Samenvatting	4
Inhoud	6
1 Inleiding	8
1.1 Aanleiding	8
1.2 Doel, scope en leeswijzer	8
2 Achtergrond	10
2.1 Regelbare drainage met subirrigatie	10
2.2 Verstoppingsprocessen	11
2.3 Stijghoogteverliezen rondom infiltratiedrains	12
3 Werkwijze	14
3.1 Opzet onderzoek	14
3.2 Veldproeven	14
3.3 Kolomproeven (locatie Lieshout)	15
3.4 Hydrologische monitoring veldproeven	16
3.5 Biochemische analyses op waterfase	18
3.6 Biochemische analyses op verstoppingsmateriaal	19
4 Resultaten	22
4.1 Verloop van de infiltratieweerstand	22
4.2 Invloed grondwaterstand op infiltratieweerstand	25
4.3 Verstoppingssnelheid	26
4.4 Biochemische samenstelling waterfase	26
4.5 Biochemische samenstelling verstoppingsmateriaal	30
5 Discussie	33
5.1 Verstopping van de drains bij aanleg	33
5.2 Oorzaken verstopping in gebruiksfase	34
5.3 Evaluatie van beheer- en onderhoudsmaatregelen	35
5.4 Evaluatie van het ontwerp	37
5.5 Evaluatie van de monitoring	37
5.6 Vergelijking RDS met andere type MAR-systemen	38
6 Conclusies en aanbevelingen	40
6.1 Conclusie	40
6.2 Aanbevelingen voor ontwerp, aanleg en beheer van RDS-systemen	40
6.3 Aanbevelingen voor onderzoek en het ontwikkelen van praktijkrichtlijnen	41
7 Referenties	43

I	Controle hydrologische gegevens	46
I.I	America	46
I.II	Stegeren	47
I.III	Lieshout	47
I.IV	Lieshout kolom 1 & 2	48
I.V	Haaksbergen	48
II	Vergelijking stijghoogte- en debietmetingen	49
II.I	America	49
II.II	Stegeren	50
II.III	Lieshout	50
II.IV	Lieshout kolom 1 & 2	51
II.V	Haaksbergen	51
III	Veldmetingen en labanalyses waterkwaliteit	52
III.I	Waterkwaliteit Effluent RWZI Lieshout	52
III.II	Waterkwaliteit RDS-systeem Lieshout	53
III.III	Waterkwaliteit RDS-systemen	54
III.IV	Waterkwaliteit Stegeren	58
IV	Metingen verstoppingsmateriaal	61
IV.I	XRF analyses op verstoppingsmateriaal	61
IV.II	Natchemische analyses op verstoppingsmateriaal	62
IV.III	ATP en TOC analysis op verstoppingsmateriaal	63
V	Meetlocaties	64

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Nederland is afgelopen decennia in toenemende mate geconfronteerd met droogteschade aan landbouwgewassen en natuur. Daarnaast neemt de druk op de beschikbare grondwatervoorraden voor hoogwaardige toepassingen zoals de productie van drinkwater toe. Om de risico's van droogte te mitigeren en zoete grondwatervoorraden ook op lange termijn veilig te stellen is een selectiever gebruik hiervan nodig. Om in alternatieven te kunnen voorzien, zijn technieken nodig die lokaal hergebruik van water faciliteren. Een voorbeeld hiervan is regelbare drainage met subirrigatie (RDS). RDS is een techniek waarbij water via drains onder de wortelzone van gewassen in de bodem wordt geïnfilteerd en, bij te hoge grondwaterstanden, ook water via de drains kan worden afgevoerd (De Wit et al., 2022; van Bakel et al., 2013; van den Eertwegh et al., 2013). Uit veldproeven op de hoge zandgronden blijkt dat een deel van het aangevoerde water ten goede komt aan de gewasverdamping, en wordt de rest afgevoerd naar het oppervlaktewater of het regionale grondwatersysteem. Subirrigatie is dus een vorm van kunstmatige infiltratie, ook wel aangeduid als Managed Aquifer Recharge (MAR). Subirrigatie wordt in Nederland al meer dan 50 jaar toegepast voor infiltratie van met name oppervlaktewater, maar afgelopen jaren zijn ook andere bronnen benut zoals grondwater, afstromend hemelwater en gezuiverd effluent (De Wit et al., 2022; De Wit et al., 2024).

Systemen voor kunstmatige infiltratie zijn gevoelig voor afname van de infiltratiecapaciteit door verstopping van de infiltratiemiddelen of reductie in doorlatendheid van de omliggende bodem. Bij infiltratieputten en infiltratiebekkens voor drinkwaterproductie wordt het water daarom meestal eerst voorgezuiverd (Bonte et al., 2009; Olsthoorn, 1982). Ook bij infiltratie-transport riolering (IT-riool), bedoeld voor de infiltratie van afstromend hemelwater, wordt steeds vaker voorzuivering toegepast om zowel grondwaterverontreiniging als afname van de infiltratiecapaciteit te voorkomen (Lemmen et al., 2008). Volgens Boogaard and Wentink (2011) wordt in de ontwerpfase van dergelijke systemen ook wel gewerkt met een veiligheidsfactor van 0.5 om te anticiperen op afname van de infiltratiecapaciteit door verstopping. Diverse studies vonden dat verstoppingen ook kunnen optreden in landbouwkundige drains bij infiltratie van oppervlaktewater (Van Bakel and Stuyt (2022); Hellings (1965), Kalisvaart (1958), Stuyt (1998)). Voor zover bekend bij de auteurs van dit rapport, zijn geen eerdere systematische studies uitgevoerd naar de relatie tussen waterkwaliteit en verstopping van landbouwkundige infiltratiedrains, en specifiek niet bij toepassing van gezuiverd restwater (effluent).

Om verstopping van kunstmatige infiltratiesystemen te voorkomen zijn de afgelopen decennia verschillende ontwerp- en beheersmaatregelen ontwikkeld zoals het voorzuiveren van infiltratiewater of het periodiek terugspoelen van infiltratieputten. Deze richtlijnen en beheersmaatregelen zijn echter niet zonder meer toepasbaar op landbouwkundige infiltratiedrains omdat deze onderhevig zijn aan een ander infiltratieregime. Er is daarom een gebrek aan kennis over welke ontwerp- en beheersmaatregelen nodig zijn om verstopping van RDS te voorkomen.

1.2 Doel, scope en leeswijzer

Het doel van dit onderzoek was allereerst het in beeld brengen van factoren die van invloed zijn op verstopping van RDS bij toepassing van verschillende waterbronnen voor infiltratie. Daarnaast is bepaald welke oplossingsrichtingen nodig zijn om verstopping te voorkomen of beheersen, rekening houdend met de benodigde hoeveelheid wateraanvoer. Hiertoe is een evaluatie uitgevoerd naar verstopping bij vier veldproeven met elk een andere wateraanvoerbron: oppervlaktewater (veldproef Stegeren), grondwater (veldproef America), RWZI effluent van overwegend huishoudelijk afvalwater (veldproef Haaksbergen) en AWZI effluent van een bierbrouwerij (veldproef Lieshout).

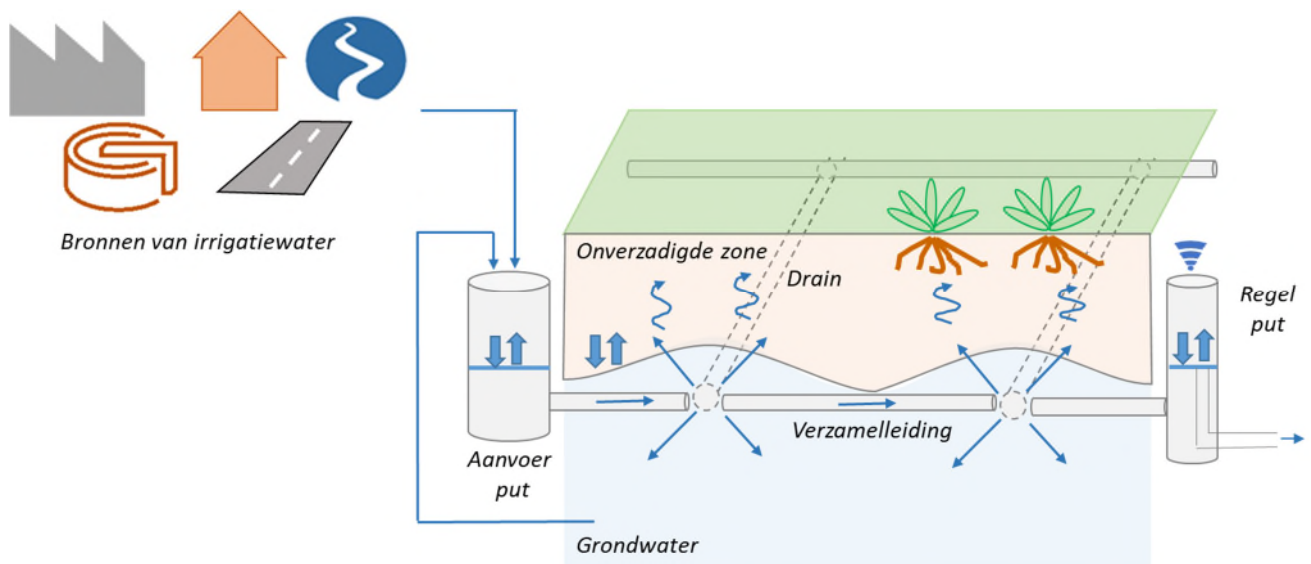
Dit rapport is als volgt georganiseerd. H2 biedt achtergrondinformatie over RDS en verstopping. Vervolgens worden de werkwijze (H3) en resultaten toegelicht (H4). Na de discussie (H5) volgen de conclusies en aanbevelingen (H6).

2 Achtergrond

2.1 Regelbare drainage met subirrigatie

RDS bestaat uit een stelsel van drainagebuizen welke via één of meer verzamelleidingen verbonden zijn met een regelput (Figuur 2-1). In het algemeen worden de drainagebuizen op ongeveer 6 - 10 meter afstand parallel aangelegd op een diepte van zo'n 1.2 meter-mv. Via de regelput kan de druk (stijghoogte) in de drains en daarmee de drainagebasis actief geregeld worden. Is het perceel te nat, dan kan water worden afgevoerd door het uitstroomniveau in de regelput te verlagen. Water kan ook worden vastgehouden, bijvoorbeeld om piekafvoer te verminderen of water vast te houden, door het uitstroomniveau in de regelput te verhogen. Tot slot kan water worden aangevoerd door het waterniveau in de regelput te verhogen tot boven de actuele grondwaterstand in het veld. Water infiltreert dan via de drainagebuizen naar het grondwater en bereikt via capillaire opstijging de wortelzone. Dit wordt ook wel aangeduid als subirrigatie (Figuur 2-1). Overigens wordt het water vaak via aparte putten aangevoerd (aanvoerput) en afgevoerd (regelput). Bij sommige systemen, ook wel aangeduid als Klimaat Adaptieve Drainage ((KAD), van den Eertwegh et al. (2013)), wordt het uitstroomniveau actief en traploos gestuurd, bijvoorbeeld op basis van weersvoorspellingen (Bartholomeus et al., 2015). RDS heeft dus drie functies: water vasthouden, aanvullen en draineren (De Wit et al., 2022; Singh et al., 2022).

Hoewel er vaak (veel) meer wateraanvoer nodig is dan bij klassieke beregeningstechnieken (De Wit et al., 2024; De Wit et al., 2021), kan de waterefficiëntie hoger zijn doordat er vrijwel geen verdampingsverlies is omdat het vocht de wortelzone vanaf de onderkant aanvult. Water verlaat de bodem daardoor via transpiratie van gewassen. Doordat het overtollige water diepere grondwatervoorraden aanvult blijft dit beschikbaar voor andere functies (Massey et al. (1983); Smith et al. (1985); De Wit et al. (2024)).

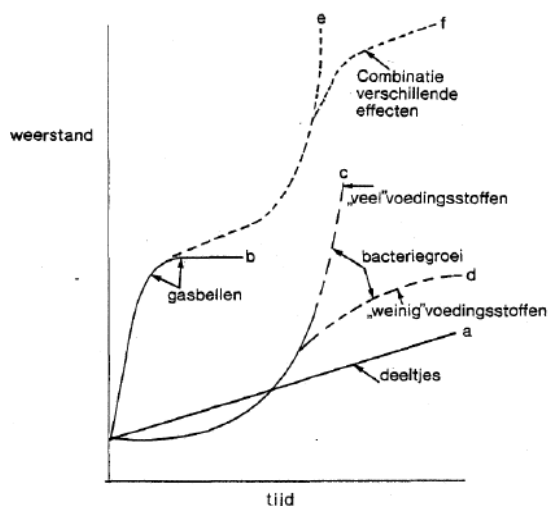


Figuur 2-1: Schematische weergave van een RDS systeem.

2.2 Verstoppingsprocessen

Afgelopen decennia is veel onderzoek gedaan naar verstopping van systemen voor kunstmatige infiltratie van water in de bodem. Hierbij wordt vaak onderscheid gemaakt tussen verschillende verstoppingsprocessen (Figuur 2-2) (Jeong et al., 2018; Martin, 2013; van Beek et al., 2020):

- (Bio)chemische verstopping omvat precipitatie (neerslag) van ijzer, mangaan, aluminium of calcium veroorzaakt door temperatuurverschillen of menging van oxisch en anoxisch (ijzerrijk) of zuur en basisch water. De processen verlopen soms uitsluitend chemisch (bijvoorbeeld de vorming van aluminiumhydroxiden) maar bij oxidatie van ijzer en mangaan spelen soms ook microbiologische processen een rol.
- Biologische verstopping treedt op door groei van micro-organismen (biomassa) als gevolg van nutriënt- en substratrijk aanvoerwater.
- Mechanische verstopping wordt veroorzaakt door het vastlopen van colloïdale deeltjes rond de infiltratiesysteem welke worden meegevoerd met het infiltratiewater, of bodemdeeltjes die tijdens drainage worden meegevoerd vanuit de omgeving van de drain. Drains kunnen ook verstopten bij aanleg door versmering van de bodem tijdens het bewerken van de drainagesleuf.
- Gasverstopping treedt op bij injectie van gasbellen die vastlopen in de poriehalzen van de bodem. Gasbellen kunnen ook in-situ gevormd worden, bijvoorbeeld door microbiologisch processen.



Figuur 2-2: Schematische weergave van het verstoppingsverloop voor infiltratiemiddelen voor uitsluitend zwevende stof (a), gas- of luchtellen (b) en bacteriegroei (c: veel voedselaanbod, d: beperkt voedselaanbod). Verschillende vormen kunnen ook tegelijk voorkomen (e en f). De weerstand t.o.v.de tijd is dus belangrijk. Figuur ontleent aan Olsthoorn (1982).

Aangezien de verstoppingsprocessen samenhangen met de samenstelling van het infiltratiewater, zijn afgelopen decennia verschillende richtwaarden afgeleid tot hoe ver water moet worden voorgezuiverd om verstopping te voorkomen. Tabel 2-1 toont praktijkrichtlijnen die Nederlandse waterbedrijven hanteren bij het voorzuiveren van water bij verticale diepinfiltratieputten, waarbij ook is aangegeven voor welk verstoppingsproces de parameters zijn ontwikkeld.

Tabel 2-1. Praktijkrichtlijnen voor diepinfiltratieputten welke gehanteerd worden door Nederlandse drinkwaterbedrijven.

Verstoppingsproces	Parameter	Grens-waarde	Eenheid	
Chemisch	Aluminium Al	<0.1	mg/l	(1)
	Calciet SI_{Ca}	<1	-	(2)
	Ijzeroxide Fe	<0.01	mg/L	(3)
Mechanisch	MFI	<2	s2/L	(4)
	TSS	<0.1	mg/l	(5)
	SAR	<3/<6	-	(6)
Biologisch	AOC	<10	ug/l	(7)
	DOC	<2	mg/l	(8)
	ATP	<10	ng/l	(9)
Gas	gasdruk	atmosferisch		

(1) Aluminiumhydroxiden kunnen verstopping van onttrekkingsputten veroorzaken wanneer zuur water met hoge aluminiumconcentratie ($pH < 4.5$ mengt met basisch water) (Kaufhold et al., 2016). Er is geen ervaring met verstopping van kunstmatige infiltratiesystemen door Aluminium. Wel zijn bij Brabant Water onttrekkingsputten bekend die verstopten door neerslag van Aluminiumhydroxiden met aluminiumconcentraties boven de 0.1 mg/L (Stuyfzand, 2016).

(2) Er zijn geen richtlijnen voor neerslag van kalk. In theorie kan kalk neerslaan bij een verzadigingsindex groter dan 0 maar in de praktijk gebeurt dit pas bij hogere waarden door inhibitie door o.a. NOM (Inskeep and Bloom, 1986).

(3) (Bonte et al., 2009)

(4) SIKB (2019)

(5) Stuyfzand et al. (2012)

(6). SAR = Sodium Adsorption Ratio = $Na / \sqrt{Ca + Mg}$ in mmol/l. SAR <6 als EGV 40-100 mS/M. SAR <3 and EGV 200-500 mS/m. Stuyfzand et al. (2012)

(7) Heijnen and Van der Kooij (1990)

(8) Stuyfzand et al. (2012)

(9) Er zijn geen richtlijnen voor ATP. In de praktijk hebben onttrekkingsputten van Nederlandse drinkwaterwinningen een ATP < 10 ng/ml. Dergelijke waarden worden daarom veilig geacht om verstopping te voorkomen (Eom et al., 2020; Heijnen and Van der Kooij, 1990; Kaufhold et al., 2016; SIKB, 2019; Stuyfzand et al., 2012; Stuyfzand and Osmá, 2019)

2.3 Stijghoogteverliezen rondom infiltratiedrains

Bij infiltratie via drains ondervindt het water hydraulische weerstand wat resulteert in een stijghoogteverlies tussen het instroompunt (H_{in}) en de bodem tussen de drains (H_{bodem}). Deze weerstanden bestaan, in een situatie zonder verstopping, uit verschillende onderdelen (Figuur 2-3A) (Dierickx, 1980; Ernst, 1962; Hooghoudt, 1940; Stuyt, 1992).

Leidingweerstand

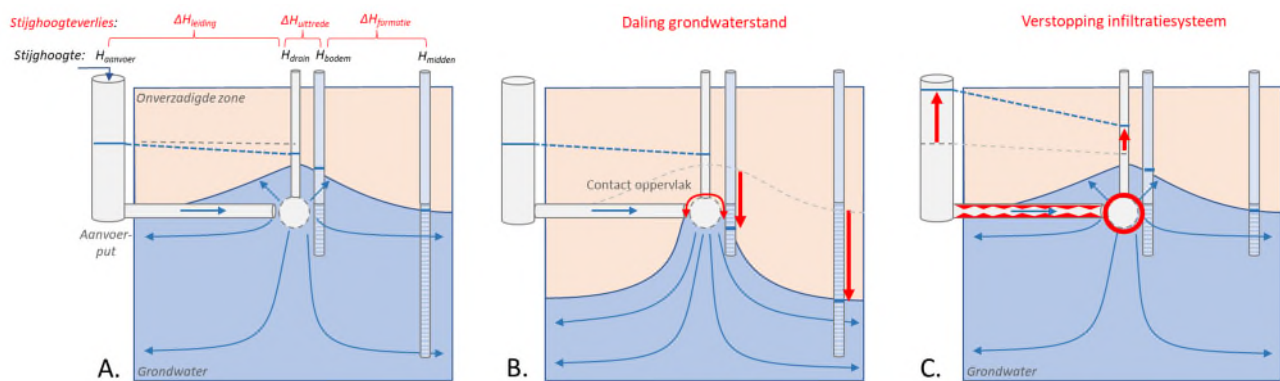
- Hydraulische weerstand van de aanvoerleiding en drainbuizen. Fabrikanten passen vaak geribbelde buizen toe om deformatie en inklappen van de buis te voorkomen.

Uitredeweerstand

- De filterspleten of perforaties waardoor het water uit de drainbuis stroomt. Deze weerstand kan beperkt worden door zoveel mogelijk perforaties aan te brengen in de buis met een zo groot mogelijke diameter of breedte (zolang dat niet leidt tot indringing van bodemmateriaal in de drainbuis).
- Weerstand van het omhullingsmateriaal (kokos, steenwol, zand) rondom de drain. Dit materiaal is o.a. bedoeld om verstopping van de filterspleten te voorkomen door het afvangen van gesuspendeerde deeltjes tijdens drainage. Ze zijn met name belangrijk in bodems die gevoelig zijn voor uitspoeling van bodemmateriaal naar de drain.
- Divergentie van stroombanen direct buiten de perforaties. Deze weerstand is afhankelijk van de afstand tussen de perforaties en de doorlatendheid van het omhullingsmateriaal.

Bodemweerstand

- Weerstand in de oorspronkelijke bodem door radiale, horizontale en verticale stroming. Deze hangt af van de doorlatendheid van het poreuze medium, de laagopbouw en geometrie van het drainagesysteem. Zo is de radiale weerstand groter in een dik pakket met verticale anisotropie. De horizontale weerstand wordt mede bepaald door de afstand tussen de drains.



Figuur 2-3: Illustratie van stijghoogteverliezen in een subirrigatiesysteem (A) en hoe deze verliezen kunnen veranderen door hydrologische veranderingen (B) en verstopping van het infiltratiesysteem (C).

De stijghoogteverliezen zijn afhankelijk van de hydrologische omstandigheden. Zo leidt een daling van de grondwaterstanden tot hogere radiale stromingsweerstand rondom de drain en horizontale stromingsweerstand door afname van de dikte van het watervoerend pakket (Figuur 2-3B). Ook kan bij daling van de grondwaterstanden de drainbuis deels droogvallen, wat leidt tot een afname van het contactoppervlak tussen drain en de verzadigde bodem en al snel kan leiden tot toename van de uitredeweerstand.

Verstopping kan op verschillende plekken in het RDS-systeem optreden (Dierickx (1980); Stuyt (1992)):

- Toename van de hydraulische weerstand in het leidingstelsel *Verstopping leidingstelsel*
- Blokkade van de filterspleten *Verstopping drain en omhulling*
- Afname van de doorlatendheid van het omhullende materiaal
- In sommige gevallen kan door infiltratie ook de doorlatendheid van de omliggende formatie afnemen (bodem verstopping). Bijvoorbeeld het zwellen van klei bij infiltratie van zoet water in een brakke aquifer. *Verstopping bodem*

Bij verstopping van het drainagesysteem zullen de waterniveaus in de aanvoerput in eerste instantie toenemen bij een gelijkblijvende wateraanvoer. Dit zorgt voor een stijging van het waterniveau in de aanvoerput (weergegeven met rode pijl in Figuur 2-3C); een verhoging van de druk kan de afname van de infiltratiecapaciteit compenseren. Dit proces kan enige tijd doorgaan totdat de drain zo ver is verstopt dat het waterniveau in de aanvoerput een maximum bereikt. Verdere verstopping leidt dan tot een afname van het infiltratiedebiet (en dus beperking van de wateraanvoer), daling van de grondwaterstanden en daardoor een verdere toename van de infiltratieweerstand. Een verhoging van de infiltratieweerstand kan dus veroorzaakt worden door zowel hydrologische veranderingen als verstopping.

3 Werkwijze

3.1 Opzet onderzoek

Dit onderzoek is uitgevoerd door monitoring van vier veldproeven (§3.2) en een aanvullende kolomproef in Lieshout (§3.3). Voor alle locaties is via hydrologische monitoring in beeld gebracht of en hoe snel de drains verstopten (§ 3.4) en wat de samenstelling was van het verstoppingsmateriaal (§3.6). Door vergelijking met de samenstelling van het infiltratiewater is vervolgens afgeleid welke processen de verstopping veroorzaakten (§3.5). Uitgebreide beschrijvingen van de proeven, de monitoringsopstellingen en modelanalyses zijn gegeven in De Wit et al. (2021). Dit rapport richt zich specifiek op de ontwikkelingen in de infiltratiecapaciteit van de systemen, die in deze eerdere onderzoeken zijn opgemerkt en waarvoor aanvullende analyses zijn uitgevoerd.

3.2 Veldproeven

3.2.1 Systeemeigenschappen

Het onderzoek is uitgevoerd op vier locaties gelegen op de hoge zandgronden in Nederland, elk met een verschillende wateraanvoerbron. De systeemeigenschappen zijn samengevat in Tabel 3-1 en gedetailleerd beschreven in De Wit et al. (2021).

Tabel 3-1: Karakteristieken van de vier onderzoekslocaties (De Wit et al., 2021).

Perceel eigenschappen	America	Stegeren	Lieshout	Haaksbergen
Geïrrigeerd oppervlak	2.8 ha	2.5 ha	8.5 ha	3.77 ha
Maaiveldhoogte	20.3 -22.2 m+NAP	7.31 m+NAP	15.5 -17.2 m+NAP	30.72 m+NAP
GHG	± 0.25 m-mv	± 0.8 m-mv	± 1.0 m-mv	± 0.9 m-mv
GLG	± 1.0 m-mv	± 1.2 m-mv	± 2.3 m-mv	± 1.8 m-mv
Gewas	Maïs	Gras	Gras	Gras
Bodemopbouw	Zand, leemlaag vanaf 2 á 2.5 m-mv	Zand	Zand, leemlagen vanaf 1 á 1.5 m-mv	Zand, leemlaag vanaf 3 m-mv
Kenmerken RDS-systeem				
Bron wateraanvoer	Grondwater (anaeroob)	Oppervlaktewater	RWZI effluent (industriewater)	RWZI effluent (gemengd)
Aantal drainagebuizen [-]	12	9	?	20 (?)
Afstand tussen drains [m]	6	6	10	5
Totale lengte drainagebuis [m]	4800	3600	8500	8000
Diameter drainagebuis [m]	0.06	0.06	0.06	0.06
Oppervlak drain [m ²]	1357.2	678.6	1602.2	1508.0
Type aansturing	Vlotter systeem	KAD sturing	Vlotter systeem	KAD sturing
Onderzoekperiode	2017 -2022	2018 - 2022	2015 - 2020	2016 – 2022

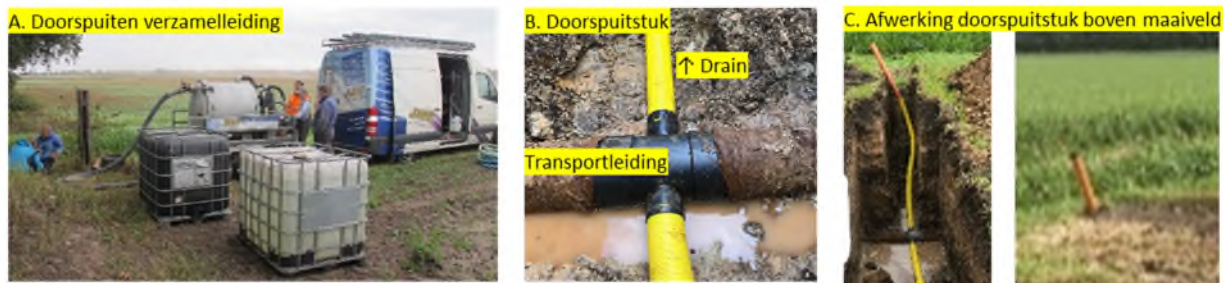
3.2.2 Wateraanvoerregime

Bij alle veldproeven is water aangevoerd in het groeiseizoen (ruwweg tussen mei en oktober). Hierbij is gestuurd op het handhaven van het waterniveau in de aanvoerput binnen vooraf gestelde grenswaarden (De Wit et al., 2021). De waterniveaus zijn in de winter verlaagd omdat er dan geen irrigatie nodig was. In de zomerperiode van 2020 is het water in Lieshout afwisselend 3 weken aangevoerd gevolgd door 1 week zonder wateraanvoer. Dit in een poging de verstopping te beperken.

3.2.3 Onderhoud en inspectie (locatie America)

Uit inspectie van het drainagesysteem (zowel met camera als na opgraven) in America bleek dat de drainagebuizen veel biofilm (verstoppend materiaal) bevatten. Daarom is op 26 augustus 2020 de verzamelleiding tussen de aan- en afvoerput doorgespoten met een HD-reiniger (Figuur 3-1) en is de losgekomen biofilm vervolgens met een

giertank uit de aanvoerput gezogen. Daarnaast zijn op 27 juli 2021 doorspuitstukken op elke drain gemaakt, waarna elke drain afzonderlijk is doorgespoten. De doorspuitstukken zijn afsluitbaar om zand- en luchttoetreding te voorkomen.



Figuur 3-1: Het doorspuiten van de verzamelleiding beginnend bij de afvoerput met een HD-reiniger (A) en de aanleg van doorspuitvoorziening aan de kopse kant van drainbuizen (B en C). Foto's genomen op 26-08-2020 (A) en 27-07-2021 (B en C) te America door Janine de Wit.

3.2.4 Systeemmodificaties (locatie America)

In America plonsde het aangevoerde water de aanvoerput in doordat de aanvoerleiding hoger lag dan het maximale vlotterniveau. Dit zorgde voor beluchting van het anoxische water wat ongewenst was vanwege vorming van ijzerhydroxide-neerslagen. Daarom is op 19 januari 2021 een verlengstuk op de mond van de aanvoerbuus geplaatst tot onder het waterniveau in de aanvoerput.

Op 27 juli 2021 zijn er, zoals al aangegeven, in America doorspuitstukken geplaatst op elke afzonderlijke drain. De doorspuitstukken konden bevestigd worden door een kruisstuk tussen de verzameldrain en drain te plaatsen. De eerste ± 1 meter van de originele drain is verwijderd.

3.3 Kolomproeven (locatie Lieshout)

Om het verstoppingsproces in het subirrigatiesysteem in Lieshout te onderzoeken, zijn in 2015 twee bodemkolomopstellingen gemaakt (Figuur 3-2). Beide bestonden uit een ongeroerd bodemmonster afkomstig van het geïrrigeerde perceel met daarin een drainbuis waarin het subirrigatieregime is nagebootst (Bartholomeus et al., 2018a).

3.3.1 Bodemopbouw

De monsters zijn op enkele meters afstand van elkaar gestoken op een diepte van 0.75 en 1.25 m-mv zodat ze representatief zijn voor de drains in de praktijkproef. Tijdens monsternamen bleek dat de bodem sterk heterogeen is en dat de bodemkolommen verschillen in textuur. Volgens de beschrijving genomen op 2 m afstand van bodemkolom 2, bestaat de kolom 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. Tijdens monsternamen is vastgesteld dat de veenlaag in de bodemkolom minder dik is en dat mogelijk leemlaag in de bodemkolom terecht is gekomen in een deel van de kolom.

3.3.2 Kolomopstelling

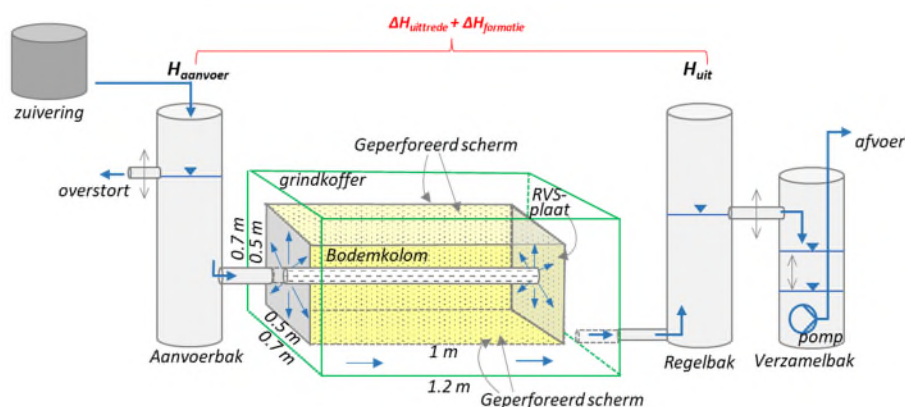
Na afgraven van de bovenliggende grond is eerst een rechthoekige RVS-mantel loodrecht (Figuur 3-2) in de bodem gedrukt. Deze mantel was aan de kopse kanten afgewerkt met een waterdichte wand en aan de zijkanten met geperforeerde platen (42% open oppervlak) (Figuur 3-3B). Vervolgens is een geperforeerde plaat onder- en boven de mantel getrokken. Tevens is in de lengterichting een horizontaal gat geboord van 1 m lengte en 0.1 m diameter welke vervolgens is voorzien van een 0.06 m diameter PVC drainbuis met steenwolomhulling (identiek aan de praktijkproef). De RVS-bak is in een container geplaatst en rondom voorzien van filtergrind (korrelgrootte 1.0 tot 1.6 mm) om de bodem te stabiliseren en draineren (Figuur 3-3C). Het water werd met een vast overstortpeil aangevoerd via een aanvoerbak vanwaar het vervolgens via de bodem en filtergrind naar een drainageput

stroomde met een gereguleerd overstortpeil. Het debiet werd afgeleid uit de stijging van het waterniveau (gemeten met een druksensor) in een verzamelbak. Deze werd geleidigd met een dompelpomp die aan- en uitsloeg bij vooraf ingestelde peilen.

3.3.3 Wateraanvoer regime

In de opstelling is van november 2015 tot november 2016 een infiltratieregime nagebootst door circa 35 m³ gezuiverd effluent van de brouwerij te infiltreren. Gedurende de proef traden onbedoeld enkele onderbrekingen op in de wateraanvoer door o.a. stroomstoringen en verstopping van leidingen. Deze zijn gerapporteerd in §4.1.

De monitoring en analyses zijn toegelicht in navolgende paragrafen.



Figuur 3-2. Schematische weergave van de kolomopstelling



Figuur 3-3. Illustratie van wijze waarop de kolomopstelling is uitgegraven (A, B) en in de grindkoffer is geplaatst (C)

3.4 Hydrologische monitoring veldproeven

3.4.1 Stijghoogten en debietmetingen

De hydrologische monitoring van de veldproeven omvatte continue registratie van inkomende debieten (Q), het waterpeil in de regelput (H_{in}) en stijghoogten in een waarnemingsfilters op circa 25 cm afstand van de drains (H_{naast}) en midden tussen de drains (H_{tussen} ; Figuur 2-3). In de kolomopstelling zijn waterniveaus gemeten bij het instroompunt voor de drain (H_{in}) en uitstroompunt na bodempassage (H_{uit} ; Figuur 3-2) en debieten in de afvoerbak.

3.4.2 Interpretatie hydrologische metingen

Afgelopen decennia zijn verschillende variabelen ontwikkeld die verstopping van drainbuizen wiskundig uitdrukken, waaronder de effectieve drainstraal (Childs and Youngs, 1958) en de dimensieloze intredeweerstand (Dierickx, 1980). Een nadeel van deze variabelen, is dat ze niet alleen afhankelijk zijn van de mate van verstopping, maar ook van de dikte en doorlatendheid van de bodem en drainafstand. Dit maakt vergelijking van verstopping tussen

verschillende locaties lastig. Bovendien is op voorhand niet altijd duidelijk of er alleen toename van de hydraulische weerstand optreedt rond de drainbuizen, of dat ook elders in het systeem de weerstanden toenemen.

Om locaties onderling te kunnen vergelijken, is in dit onderzoek het debiet (Q) eerst gedeeld door het contactoppervlak tussen de drainbuis en de formatie (A_{drain}) tot een flux over de wand van de drainbuis (q).

$$q = \frac{Q}{A_{\text{drain}}} \quad \text{vgl 3-1}$$

Hierbij is het contactoppervlak berekend op basis van de lengte (L_{drain}) en diameter (d_{drain}) van de drainbuizen:

$$A_{\text{drain}} = L_{\text{drain}} d_{\text{drain}} \pi \quad \text{vgl 3-2}$$

Vervolgens is een infiltratieweerstand berekend (Ω) door het stijghoogteverschil tussen de aanvoerput (H_{aanvoer}) en een peilbuis in het perceel (H_{bodem}) te delen door de flux.

$$\Omega = \frac{H_{\text{aanvoer}} - H_{\text{bodem}}}{q_{\text{drain}}} \quad \text{vgl 3-3}$$

Deze infiltratieweerstand is dus een optelsom van leidingweerstand, uittredeweerstand en formatieweerstand. Het wijkt af van de in Nederland veel toegepaste infiltratie- en drainageweerstand (c_{drain}) aangezien het debiet daarbij wordt gedeeld door het perceeloppervlak i.p.v. contactoppervlak.

Voor H_{bodem} is gebruik gemaakt van de peilbuis naast de drain (veldproef) of het waterniveau in de regelput van de kolomopstelling (H_{aanvoer} ; zie Figuur 3-2). Het perceel in Haaksbergen heeft een verschil in maaiveldhoogte. Om over het hele perceel een vergelijkbare grondwaterstand t.o.v. maaiveld in te kunnen stellen, bestaat het drainagesysteem uit 3 in serie geschakelde subpercelen. Deze zijn van elkaar gescheiden door 2 regelputten die er voor zorgen dat het waterpeil altijd 0.3 m lager is ten opzichte van het bovenstroomse subperceel (Bartholomeus et al., 2018b). De metingen van de vlotterput 2 zijn gebruik voor H_{aanvoer} en de grondwatermetingen van locatie MP3 zijn gebruik voor H_{bodem} .

Metingen zijn geaggregeerd naar dagbasis. De infiltratieweerstand is alleen berekend wanneer aan de volgende voorwaarden is voldaan:

- De stijghoogteverschillen tussen aanvoerput en grondwater bedragen minimaal 15 cm.
- Het aanvoerdebiet was hoger dan een minimale waarde. Deze minimale waarde verschilde per locatie (America 10 m³/d; Stegeren 60 m³/d; Lieshout; 60 m³/d; Haaksbergen 75 m³/d).
- Het stijghoogteverschil en de wateraanvoer varieert maximaal 33% t.o.v. de 2 voorafgaande dagen.

De grenswaarden zijn via trial en error gevonden. Bij kleinere stijghoogteverschillen en debieten ontstond teveel ruis door meetartefacten en variatie in andere processen zoals verdamping, capillaire nalevering en wegzijging tussen de drain en de peilbuis. De stabiliteitseis in de dagen voorafgaand aan de meting was nodig omdat variaties in aanvoer en drukverschillen vertraagd doorwerken in de infiltratieweerstand van het RDS-systeem.

3.5 Biochemische analyses op waterfase

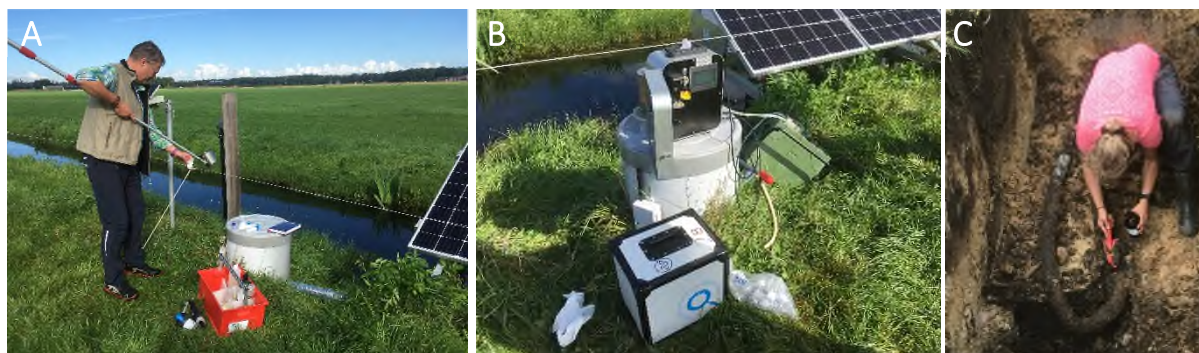
3.5.1 Monsternamen en labanalyse

Om een globaal beeld te krijgen van de verstoppingspotentie is de samenstelling van het infiltratiewater op alle locaties ten minste 1 maal gemeten in september 2020 (Figuur 3-4, Tabel 3-2). Tijdens monsternamen zijn temperatuur, zuurgraad, geleidbaarheid, troebelheid en MFI gemeten. De labanalyses omvatten algemene parameters (temperatuur, zuurgraad), anorganische macroparameters (Cl^- , NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , HCO_3^- en een ICP-MS scan), mechanische parameters (TSS), en biologische parameters (AOC, DOC, TOC, ATP). De AOC bepaling was op Haaksbergen en Stegeren mislukt en daarom in augustus 2021 herhaald. In America is, naast grondwater, een extra monster genomen van nabijgelegen oppervlaktewater om te onderzoeken of dit bruikbaar zou zijn als een alternatieve (minder verstoppingsgevoelige) bron.

Tabel 3-2. Analyses uitgevoerd op het infiltratiewater.

Locatie	Bron	Monsterpunt	Datum	Opmerking
America	Grondwater	Aanvoerput	02-09-2020	-
	Oppervlaktewater	Hoofdwatergang	02-09-2020	-
Haaksbergen	RWZI effluent	24-h effluent vat	01-09-2020	Herhalingsmonster AOC 03-08-2021.
Stegeren	Oppervlaktewater	Sloot	01-09-2020	Herhalingsmonster AOC 11-08-2021.
Lieshout	Gezuiverd effluent	Aanvoerput	02-09-2020	

Het water bij Lieshout en Stegeren is gedetailleerder geanalyseerd. In Lieshout is het infiltratiewater tussen 2014 en 2020 wekelijks bemeaten op pH, Cl^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , TSS, CZV en (tot 2016) BZV. In 2016-2017 is 4 keer een uitgebreidere analyse uitgevoerd op het infiltratiewater (C_{aanv}), effluent uit de kolom (C_{kolom}), een peilbuis direct naast de drain (C_{naast}) en een peilbuis tussen de drains (C_{tussen}). Dit laatste als referentie voor grondwater dat niet door irrigatiewater is beïnvloed. In Stegeren is in 2019 het infiltratiewater, en grondwater in peilbuizen direct naast de drain en tussen de drain bemonsterd. De analysepakketten waren gelijk aan oppervlaktewater m.u.v. AOC (in Lieshout) en m.u.v. AOC, DOC, TOC en ATP (in Stegeren).



Figuur 3-4: Monsternamen van het infiltratiewater (oppervlaktewater in Stegeren) (A). Veldparameters direct in het veld bepalen (B). Monsternamen verstoppingsmateriaal bij de drain (in America) (C). Foto's genomen door Janine de Wit.

3.5.2 Interpretatie infiltratiewater

Er zijn geen richtlijnen of waterkwaliteits-eisen voor drainagesystemen om verstopping te voorkomen. De waterkwaliteitsanalyses zijn daarom vergeleken met richtlijnen uit de drinkwatersector en bodemenergiesector die aangeven welke samenstelling van te infiltreren water toelaatbaar is om verstopping van diepinfiltratieputten te voorkomen (Tabel 2-1).

3.5.3 Interpretatie grondwatermonsters

Met een chemische massabalans is bepaald welke veranderingen het water in Lieshout en Stegeren onderging tijdens infiltratie in de bodem. Hiervoor zijn de concentraties in de drain (C_{drain}) vergeleken met de concentratie direct na infiltratie in de bodem (C_{bodem}).

$$\Delta C = C_{\text{drain}} - C_{\text{bodem}}$$

vgl 3-4

Een positieve waterkwaliteitsverandering (ΔC) geeft dus aan dat de concentratie van een bepaalde parameter afneemt tijdens infiltratie en mogelijk is neergeslagen als verstoppingsmateriaal rondom de drain. Hierbij is aangenomen dat de waterkwaliteit niet veranderde in de drainbuis waardoor de concentratie in de drain gelijk was aan het infiltratiewater ($C_{\text{drain}} = C_{\text{aanv}}$). Voor de kolomproef is gerekend met de waterkwaliteit in het uitstroompunt ($C_{\text{bodem}} = C_{\text{kolom}}$).

Een complicerende factor voor het bepalen van C_{bodem} is dat de peilbuis direct naast de drain (C_{naast}) een mengsel bevatte van infiltratiewater en geïnfiltreerd hemelwater. Daarom is de waargenomen concentratie gecorrigeerd voor de concentratie gemeten in het oorspronkelijke grondwater tussen de drains (C_{tussen}). Hierbij is gebruik gemaakt van een correctiefactor (f_{mix}) op basis van de chlorideconcentratie ($C = \text{Chloride}$). Chloride is namelijk niet onderhevig aan afbraak of sorptie:

$$\Delta C = f_{\text{mix}} * C_{\text{drain}} + (1 - f_{\text{mix}}) * C_{\text{tussen}} - C_{\text{bodem}}$$

vgl 3-5

$$f_{\text{mix}} = \frac{C_{\text{naast}} - C_{\text{tussen}}}{C_{\text{drain}} - C_{\text{tussen}}}$$

vgl 3-6

Om een indruk te krijgen van de verstoppingspotentie door kalk, is de kalkverzadiging van het water berekend met het programma HydroGeoChemical v2.4 (Stuyfzand, 2017).

3.6 Biochemische analyses op verstoppingsmateriaal

3.6.1 Monsternamen en labanalyse

Om inzicht te krijgen in de samenstelling van het verstoppingsmateriaal, zijn op alle locaties behalve Stegeren monsters genomen van de biofilm in de aanvoerput (zie Tabel 3-3). Bij Stegeren was geen biofilm aanwezig. Daarnaast zijn op America en Haaksbergen bij het opgraven van drainbuizen extra monsters genomen van vaste fase uit de drain ("buis") en de omhulling ("omhulling") (Figuur 3-5). Tot slot zijn op enkele locaties twee sub-monsters genomen van de bodem direct naast de drain en van de oorspronkelijke bodem op gelijke diepte op 4 m afstand van de drain zonder verstoppingsmateriaal. In de kolomopstelling is het tweede submonster genomen aan de rand van de kolomopstelling. De samenstelling van het verstoppingsmateriaal is vervolgens bepaald als het verschil tussen beide submonsters (zie §3.6.2).

Er zijn diverse analyses uitgevoerd om de samenstelling te bepalen van het verstoppingsmateriaal. Het drooggewicht is bepaald om de overige analyses om te rekenen naar gewicht per gram vaste fase. Dit om monsters onderling te kunnen vergelijken.

Chemische =

- analyses:
- XRF = elementsamenstelling middels Röntgenfluorescentie in combinatie met thermografische analyse (LOI550 – Lieshout), (LOI450 – America, Haaksbergen en Stegeren). Uitgevoerd door LMA.
 - ICP = analyse van metalen, S en P middels inductief gekoppeld plasma-massaspectrometrie. Uitgevoerd door Aqualab-zuid. Deze methode is ongeschikt voor het bepalen van Silicaten in vaste stof, zie volgende bullet.
 - ARR = Residu (gewicht) na Aqua Regia Destructie (=voorbewerking voor ICP) en drogen. Uitgevoerd door KWR. Hiermee wordt het materiaal (met name silicaten) bepaald die niet oplossen en daardoor niet meegenomen worden bij ICP.

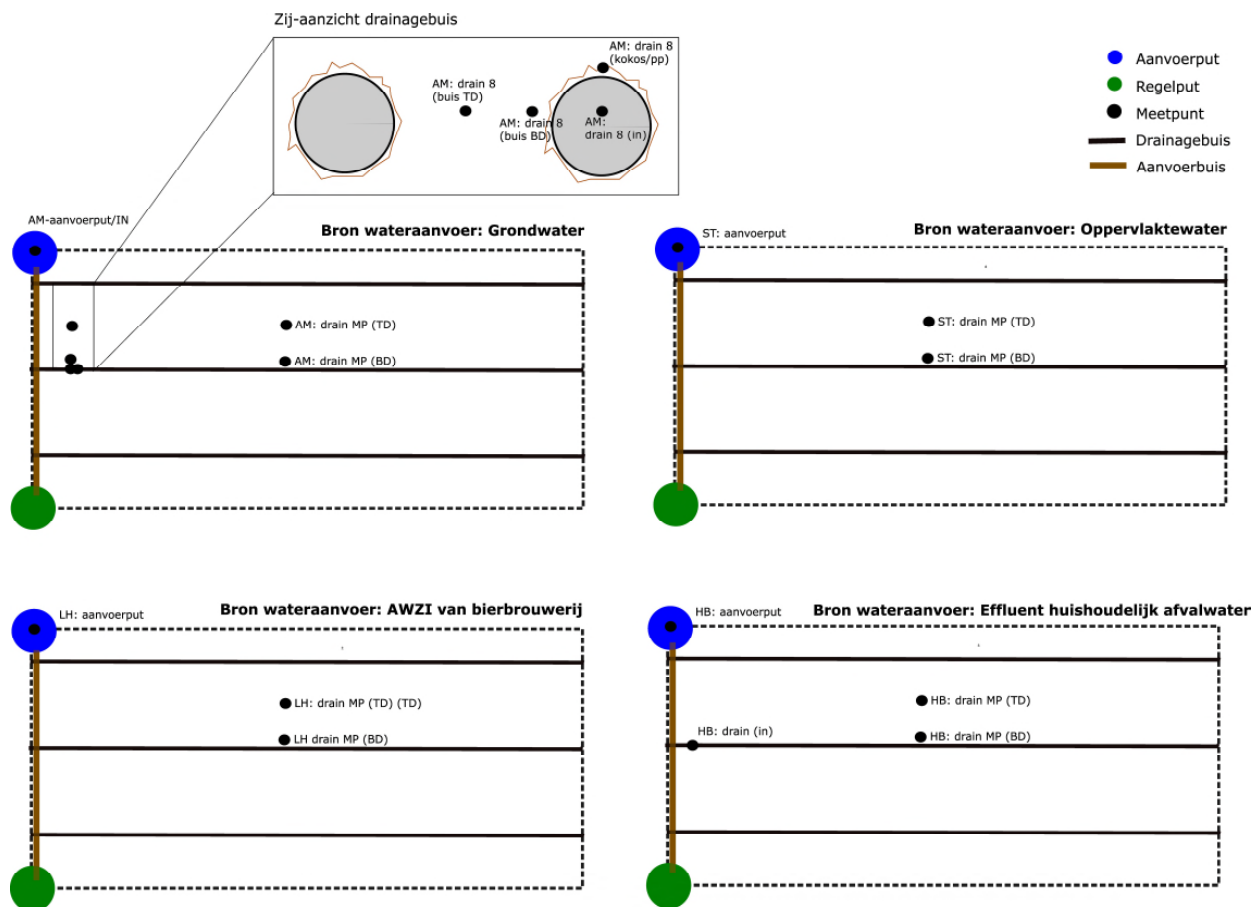
- Analyses op koolstof:
- LECO = analyse van het koolstofelement in vaste fase middels verbranding. Uitgevoerd door LMA.
 - TOC = Totaal organisch koolstof na oplossen in waterfase middels TOC-analyser. Uitgevoerd door KWR.
 - CH = Koolhydraten-D uitgedrukt als glucose na oplossen in waterfase, middels colorimetrische bepaling (Dubois et al., 1956). Uitgevoerd door KWR.
 - LCOCD = screening van organisch koolstof middels "Liquid Chromatography – Organic Carbon Detection". Uitgevoerd door Doc-Labor.
- Moleculair biologische analyses:
- ATP = adenosine triphosphate als luciferase na oplossen in waterfase. Uitgevoerd door KWR.
 - NGS = Next Generation Sequencing, analyse van bacteriepopulatie aan de hand van DNA-materiaal. Uitgevoerd door KWR.

Het aantal en type analyses dat is uitgevoerd verschilde per locatie (zie Tabel 3-3).

Tabel 3-3. Analyses uitgevoerd op verstoppingsmateriaal. Monsters op het perceel zijn zowel tussen twee drains in (TD), als direct bij de drain (BD) en in de drain (PP) genomen. MP= Meetpunt

Locatie	Positie in systeem	Omschrijving	Datum	Analyse	
America	Aanvoerput	AM: aanvoerput	27-07-2021	XRF+LECO + ATP	
	Inhoud drainbuis	AM: drain			
	Omhuiling drain	AM: omhuiling			
	Bodem naast drain	AM: bodem naast (drain 8) *			
	Bodem tussen drain	AM: bodem tussen (drain 8) *			
	Bodem naast drain	AM: bodem naast (MP) *			
	Bodem tussen drain	AM: bodem tussen (MP) *			
Stegeren	Aanvoerput	n.v.t.		Geen vast materiaal aanwezig	
	Bodem naast drain	ST: bodem naast (MP) *	11-08-2021	XRF + LECO + ATP	
	Bodem tussen drain	ST: bodem tussen (MP) *			
Lieshout	Aanvoerput	LH: aanvoerput ~	25-6-2019	XRF + LECO + ATP + NGS	
	Aanvoerput	LH: aanvoerput (ICP) ~			
	Aanvoerput kolom	LH: aanvoerput (kolom)	9-4-2016	XRF + LECO	
	Bodem naast drain	LH: bodem naast (MP) *	25-6-2019	ICP + TOC + ARR + TGA + CH + ATP + LCOCD	
	Bodem tussen drain	LH: bodem tussen (MP) *	25-6-2019		
	Bodem naast drain	LH: bodem naast (A4) *	9-4-2016	ICP	
	Bodem tussen drain	LH: bodem tussen (A4) *	9-4-2016		
	(kolom opstelling)	Bodem naast drain	LH: bodem naast (kolom1) ^		9-4-2016
		Bodem tussen drain	LH: bodem tussen (kolom1) ^		9-4-2016
		Bodem naast drain	LH: bodem naast (kolom2) ^		9-4-2016
		Bodem tussen drain	LH: bodem tussen (kolom2) ^	9-4-2016	
Haaksbergen	Aanvoerput	HB: aanvoerput	03-08-2021	XRF + LECO + ATP	
	Bodem naast drain	HB: bodem naast (MP) *			
	Bodem tussen drain	HB: bodem tussen (MP) ^^ *			

(~) duplo monster; (^) twee submonsters: bodem rond drain en bodem aan rand van kolom (*) twee submonsters: bodem rond drain en bodem op 5 m afstand.



Figuur 3-5: Schematisch bovenaanzicht van de punten van de veldpilots America (AM), Stegeren (ST), Lieshout (LH), en Haaksbergen (HB), waar monsters zijn genomen.

3.6.2 Interpretatie van chemische- en koolstofanalyses

Eerst zijn enkele ontbrekende elementen geschat:

- De ICP analyse was ongeschikt voor het bepalen van Si in vaste fase van het verstoppingsmateriaal en de bodem. De Si is waar mogelijk geschat op basis van het gewicht van de residuen na Aqua Regia destructie (ARD). Hierbij is aangenomen dat het residu volledig uit silicaten bestond, wat een lichte onderschatting oplevert van andere elementen die ook vaak voorkomen in bodemsilicaten zoals Na, K en Mg.
- Voor Organisch koolstof (OC) is bij voorkeur gebruik gemaakt van LECO en anders van TOC of LOI550.

Vervolgens zijn de XRF-analyses teruggerekend naar elementverhoudingen (dus bijvoorbeeld Fe_2O_3 naar Fe). Dit was nodig omdat bij XRF-analyses de hoofdelementsamenstelling standaard gerapporteerd wordt als oxidewaarde. Bij ICP analyses was deze omrekening niet nodig, omdat bij deze methode direct al de elementsamenstelling wordt gerapporteerd.

Tot slot is de samenstelling van het verstoppingsmateriaal in de bodem rondom de drains bepaald door verschillen te berekenen tussen de sub-monsters direct naast de drain en tussen de drains. Helaas konden absolute veranderingen in samenstelling niet worden bepaald door het ontbreken van informatie over de bulkdichtheid. Daarom is gekozen voor een alternatieve benadering door de verschillen tussen de monsters per element te delen door de som van de absolute verschillen van alle elementen. De berekende verschillen geven dus aan welke processen verhoudingsgewijs het belangrijkste zijn. Doordat niet is gewerkt met bulkdichtheid, is het in theorie mogelijk dat verstopping wordt onder- of overschat. Bijvoorbeeld wanneer een toename van het absolute gewicht van een element gepaard gaat met een afname van het relatieve gewicht doordat het gewicht van een ander element sterker toenam.

4 Resultaten

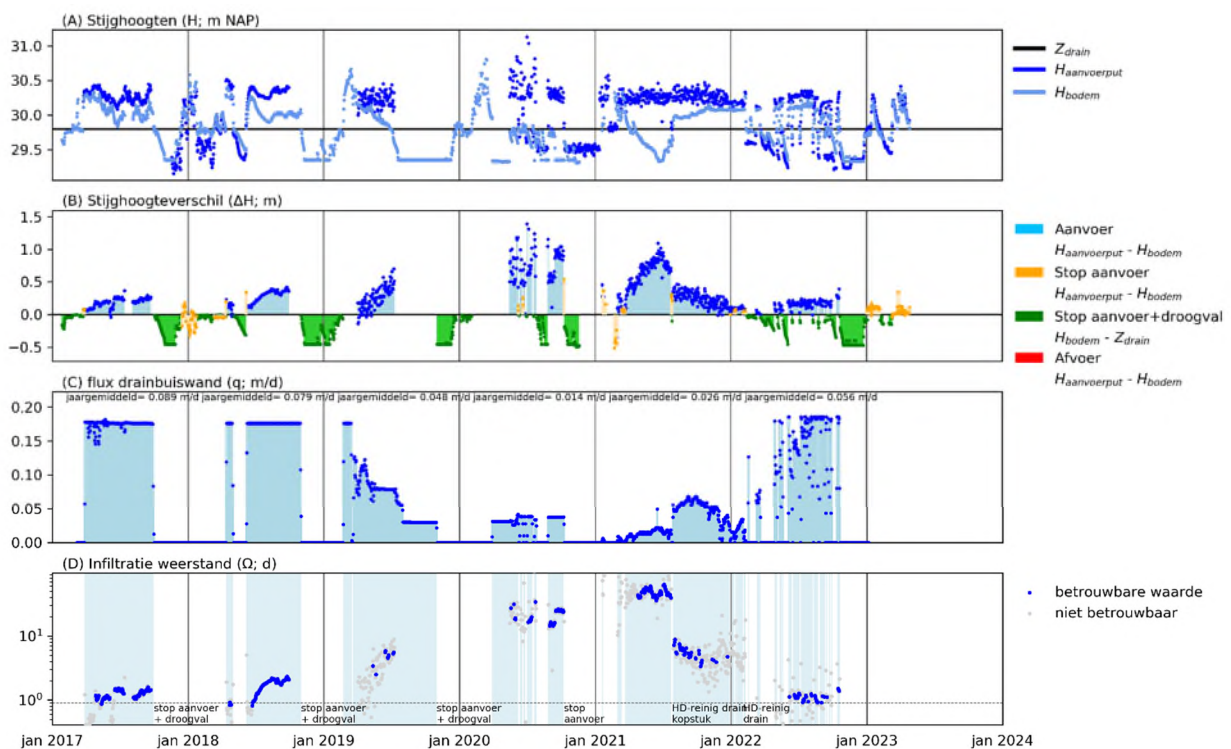
4.1 Verloop van de infiltratieweerstand

4.1.1 Verloop veldproef America

In America liep de infiltratieweerstand tussen 2017 en 2022 op van 0.9 dag naar 40 dagen (Figuur 4-1D). Hierdoor nam het jaargemiddelde infiltratiedebiet (Q) af van 29000 naar 8600 m^3 /jaar; oftewel van 0.089 m/d (q) naar 0.026 m/d na delen door het wand-oppervlak van de drainbuis (Figuur 4-1C). Let op: in dit hoofdstuk is de flux gerapporteerd over het wand-oppervlak van de drainbuis; dit wijkt af van de infiltratiehoeveelheid per eenheid oppervlak die normaal wordt gerapporteerd bij drainage-studies!

In de wintermaanden werd de wateraanvoer onderbroken (=oranje lijn in Figuur 4-1B) waardoor de drainbuizen soms ook droogvielen tijdens aanvoeronderbrekingen (=groene lijn in Figuur 4-1B). Dit had volgens de metingen weinig effect op de infiltratieweerstand. De infiltratieweerstand is in het voorjaar van 2019 weliswaar hoger dan in het najaar van 2018, maar dit komt omdat er van juni tot september 2018 wel aanvoer plaatsvond maar geen waterpeilen zijn geregistreerd waardoor er voor deze periode ook geen infiltratieweerstand kon worden berekend.

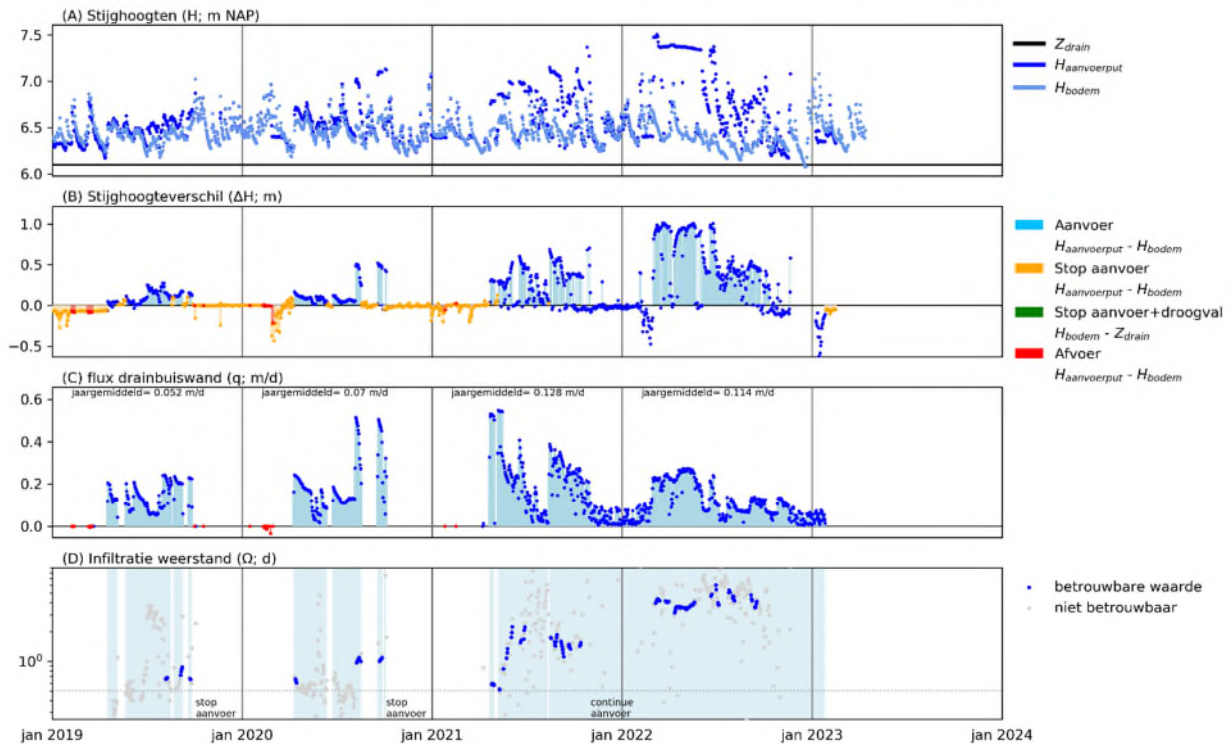
In augustus 2021 zijn de eerste meters van alle drains vanaf de verzamelleiding doorgespoten (tegelijk met het aanbrengen van doorspuitpunten). Dit resulteerde direct in een toename van het infiltratiedebiet en stijging van de grondwaterstanden. HD-reiniging van de drainbuizen in februari 2022 resulteerde in een verdere afname van de infiltratieweerstand naar waarden vergelijkbaar met die bij oplevering. De verstopping in America is dus verholpen door reiniging van de drainbuizen.



Figuur 4-1. Hydrologische verloop van de infiltratieproef in America

4.1.2 Verloop veldproef Stegeren

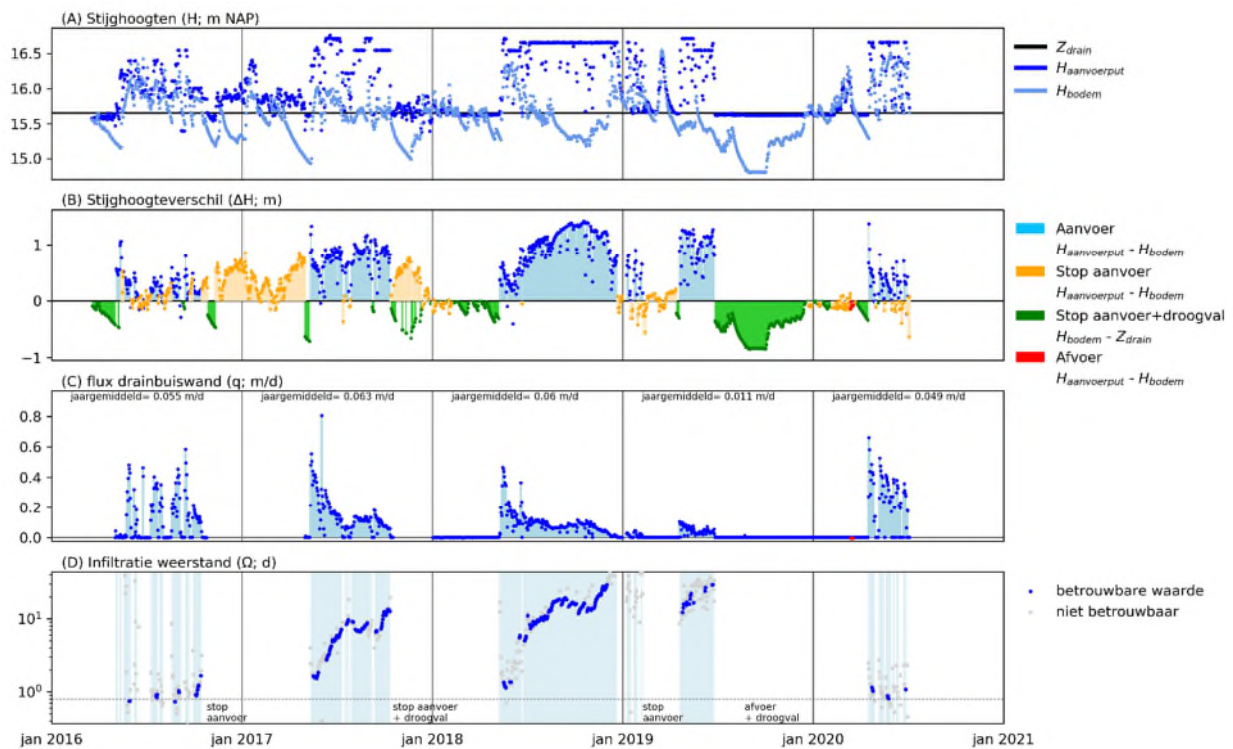
De infiltratieweerstand in Stegeren is tussen 2019 en 2022 geleidelijk toegenomen van 0.5 naar 4 dagen. De toenames traden op gedurende het groeiseizoen en in de winter van 2021-2022 toen de aanvoer niet is onderbroken. De winter van 2019-2020 had weinig invloed aangezien de infiltratieweerstand in het najaar vergelijkbaar was met de referentiewaarde bij oplevering. In de winter van 2020-2021 werd de aanvoer stopgezet en is enkele dagen water afgevoerd.



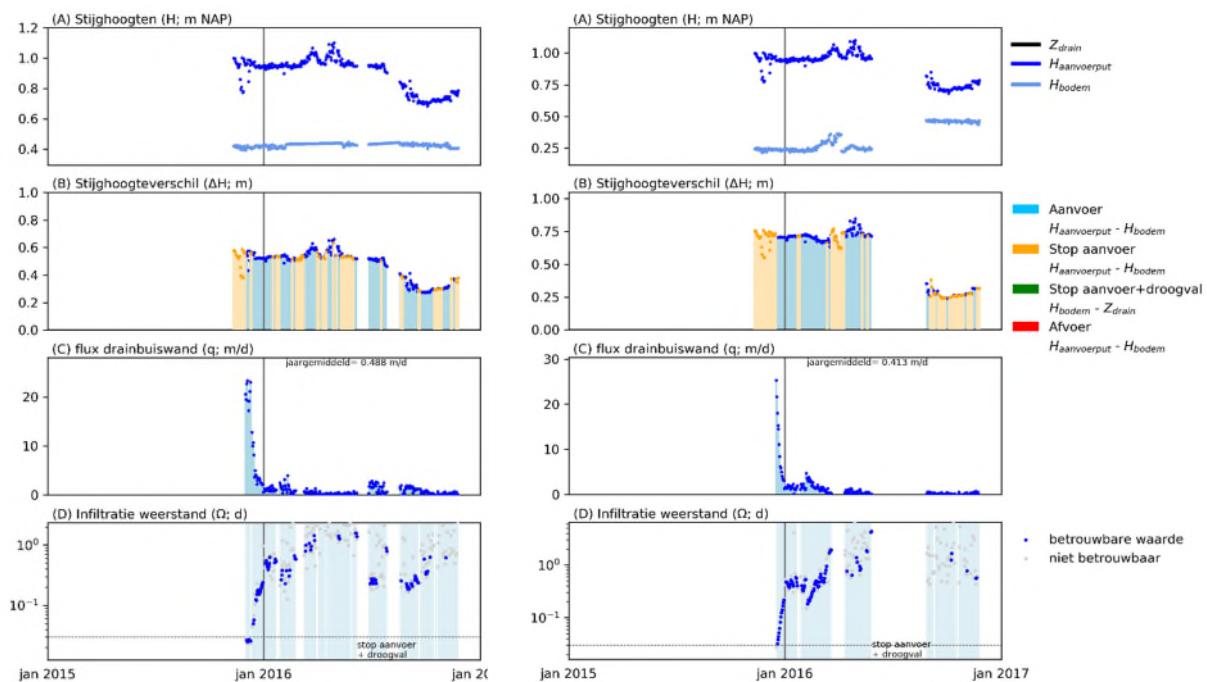
Figuur 4-2. Hydrologische verloop van de infiltratieproef in Stegeren

4.1.3 Verloop veldproef Lieshout

De infiltratieweerstand in Lieshout nam toe van 0.8 dag bij oplevering in 2017 naar 30 dagen in juli 2019 (Figuur 4-3). De wateraanvoer bedroeg 32000 m³/jaar (0.055 m/d) in 2016 en werd in 2017 en 2018 licht overtroffen door het ophogen van de peilen in de aanvoerput. In 2019 waren de drains echter zodanig verstopt dat er onvoldoende water kon worden geïnfiltreerd om het gewas van water te voorzien. De aanvoer is toen een half jaar gestopt waardoor de drains langdurig droog kwamen te liggen. In februari 2020 is de afvoerput tijdelijk opengezet waardoor het systeem gedurende enkele dagen draineerde (= rode vlak in Figuur 4-3B). Dit resulteerde in een afname van de infiltratieweerstand tot waarden die vergelijkbaar waren met de situatie bij oplevering. Hierdoor kon in het voorjaar van 2020 weer voldoende water infiltreren. De wateraanvoer is vanaf 2020 op intermitterende wijze uitgevoerd, door de aanvoer elke 2 tot 3 weken gedurende 2 tot 3 weken uit te schakelen. De infiltratieweerstand bleef in deze periode constant. Ook in 2021 en 2022 kon voldoende water geïnfiltreerd worden (niet weergegeven in de grafiek) door de aanvoer periodiek te pauzeren. Helaas zijn in deze periode geen waterniveaus in de regelput en grondwaterstanden geregistreerd, waardoor niet duidelijk is of de infiltratieweerstand in deze periode gelijk bleef.



Figuur 4-3. Hydrologische verloop van de infiltratieproef in Lieshout



Figuur 4-4. Hydrologische verloop van de infiltratieproef in Lieshout kolomproef 1 (links) en 2 (rechts)

4.1.4 Verloop kolomproeven Lieshout

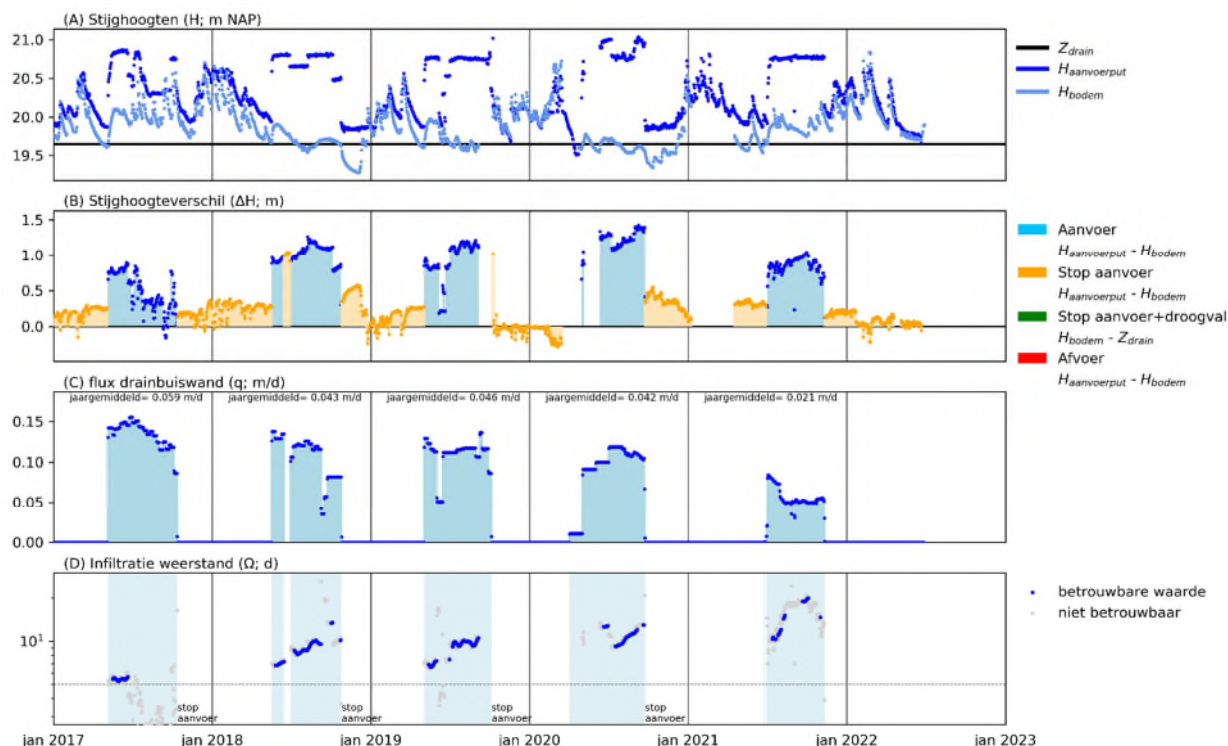
De weerstand in beide kolomproeven was na een halfjaar toegenomen van 0.03 dag naar circa 2 dagen. De geringe weerstand bij start van de kolomproef is mogelijk het gevolg van kortsluitstroming tussen de drain en het omstortingsgrind. Bij opgraven van de kolom achteraf waren namelijk grofzandiger delen zichtbaar die zouden kunnen wijzen op het lokaal wegspoelen van de fijne delen uit de bodem. Deze zouden bijvoorbeeld kunnen zijn ontstaan wanneer er kieren zaten tussen de bodem en de metalen rand van de kolom, of doordat het

stabilisatiemateriaal een vrij grote korrel diameter had in verhouding tot het bodemmateriaal. Bij het aanbrengen van drukverschil tussen drain en bodem kan dan zandtransport optreden. Dit zou betekenen dat de kolomproef de verstopping vermoedelijk onderschat in vergelijking met veldcondities. We komen hierop terug in de discussie (§5.1)

De toename van de verstopping was vooral sterk in de eerste weken na aanleg in een periode dat er veel water door de kolom stroomde (Figuur 4-4). Na een half jaar is de aanvoer in beide kolommen onderbroken en zijn de leidingen gereinigd. Kolom 1 is ook tijdelijk gedraineerd waarna de infiltratieweerstand tijdelijk daalde naar minder dan 1 dag.

4.1.5 Verloop veldproef Haaksbergen

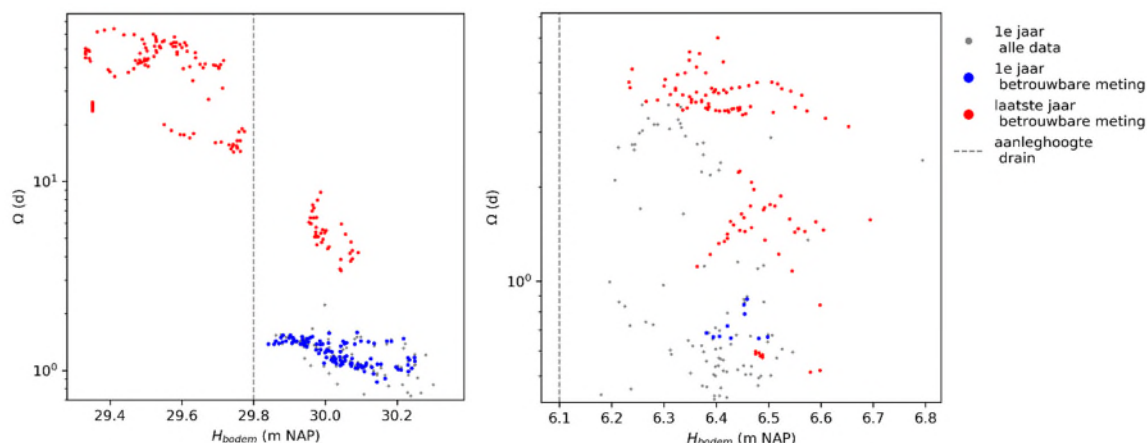
In Haaksbergen is de infiltratieweerstand tussen 2017 en 2021 met een factor 4 toegenomen van 5 dagen bij oplevering naar maximaal 20 dagen. Dit leidde ondanks langduriger handhaven van hoge peilen in de aanvoerput, tot een factor 3 afname van de wateraanvoer van 0.059 m/d (32,000 m³/jaar) naar 0.021 m/d. De onderbrekingen van de wateraanvoer in de wintermaanden hadden weinig invloed op de infiltratieweerstand. Ook in Haaksbergen treedt dus vermoedelijk verstopping op van het drainagesysteem.



Figuur 4-5. Hydrologische verloop van de infiltratieproef in Haaksbergen

4.2 Invloed grondwaterstand op infiltratieweerstand

Een toename van de infiltratieweerstand (Ω) t.o.v. de referentiewaarde bij oplevering (Ω_{ref}) kan zowel het gevolg zijn van verstopping als van veranderingen in de hydrologische situatie binnen het perceel (zie Figuur 2-3). Uit vergelijking van de infiltratieweerstand (y-as in Figuur 4-6) met de grondwaterstand (x-as) blijkt dat de infiltratieweerstand in het eerste meetjaar (blauwe punten) in beperkte mate varieert met de grondwaterstand. Gedurende perioden met hoge infiltratieweerstand (rode punten) waren de grondwaterstanden vergelijkbaar. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de toename van de infiltratieweerstand niet het gevolg is van hydrologische veranderingen, maar hoofdzakelijk veroorzaakt is door verstopping van het drainagesysteem.



Figuur 4-6. Relatie tussen de grondwaterstand (x-as) en infiltratieweerstand (y-as) voor de locaties America (links) en Stegeren (rechts).

4.3 Verstoppingsnelheid

Uit de hydrologische monitoring blijkt dat de drains in de eerste 4 jaar na oplevering het snelste verstopten in Lieshout (Tabel 4-1A). Tussen 2016 – 2021 nam de weerstand (c) toe van 0.8 naar 29.29 dagen. In deze periode is 68 m³ water werd geïnfiltreerd per m² oppervlak drainwand (q_{cum}) verdeeld over 569 dagen met actieve infiltratie. Dit resulteert in een verstoppingsnelheid van 0.05 d/d of ($\Delta\Omega/\Delta t$) of, na normalisatie voor de hoeveelheid geïnfiltreerd water, 0.419 d/m ($\Delta\Omega/q_{cum}$).

De verstoppingsnelheid in de kolommen was lager dan de veldproef in Lieshout. Deels komt dit doordat in de kolommen bij aanvang veel water infiltreerde (per m² drainbuisoppervlak). Maar daarnaast speelt ook een rol dat de kolomproeven al na 1 jaar zijn gestopt terwijl de proef in het veld doorliep. De veldproef in Lieshout had gedurende het eerste jaar een verstoppingsnelheid van 0.008 d/m vergeleken wat qua orde grootte vergelijkbaar is met de kolommen (0.004 en 0.015 d/m). Een eenmaal verstopte drain, gaat in de loop van de tijd steeds sneller verstopten omdat er al verstoppingsmateriaal aanwezig is waarop nieuwe biofilms makkelijker kunnen hechten.

In Stegeren was de verstoppingsnelheid het laagste (0.0013 d/m) gevolgd door Haaksbergen (0.0084 d/m) en America (0.280 d/m).

Tabel 4-1: Waargenomen snelheid waarmee de drains verstopten tijdens de veld- en kolomproeven gedurende de eerste 4 jaar (veldproeven) of tot het eerste onderhoudsmoment (kolomproeven).

Locatie	America	Stegeren	Lieshout	Kolom1	Kolom2	Haaksbergen
periode van tot	2017 - 2020	2019 - 2021	2016 - 2019	2016 - 2016	2016 - 2016	2017 - 2020
initiele weerstand (Ω_{ref}) [d]	0.90	0.50	0.80	0.03	0.03	5.00
weerstand na verstopping (Ω) [d]	24.12	1.55	29.29	1.39	4.36	13.02
aantal dagen infiltratie (Δt) [d]	755	448	569	166	135	1078
hoeveelheid infiltratie (q_{cum}) [m ³ /m ²]	83	84	68	355	289	95
verstoppingsnelheid						
- per dag ($\Omega - \Omega_{ref}/\Delta t$) [d/d]	0.031	0.002	0.050	0.008	0.032	0.007
- per eenheid water ($\Omega - \Omega_{ref}/q_{cum}$) [d/m]	0.280	0.013	0.419	0.004	0.015	0.084

4.4 Biochemische samenstelling waterfase

4.4.1 Vergelijking infiltratiewater met richtlijnen

Binnen de drinkwatersector zijn afgelopen decennia kwaliteitsrichtlijnen opgesteld waaraan het te infiltreren water moet voldoen om verstopping van diepinfiltratieputten te voorkomen. Deze waarden zijn vergeleken met het infiltratiewater (Tabel 4-2) op de verschillende proeflocaties. Hierbij wordt benadrukt dat alleen in Lieshout

meerdere meetronden zijn geweest. Deze hadden qua ordegrootte vergelijkbare waarden en zijn daarom omwille van onderlinge vergelijkbaarheid hier niet separaat gerapporteerd.

De parameters die betrekking hebben op de potentie voor chemische verstopping geven aan dat er een relatief grote potentie is voor kalkneerslag in Lieshout. Het effluent van Lieshout kent namelijk een vrij hoge pH (8.1) door dosering van natronloog in de fabriek in combinatie met HCO₃ (1300 mg/L) en Ca (79 mg/L). Het infiltratiewater in America bevat veel meer gereduceerd ijzer dan de grenswaarde. Dit zal, wanneer het in aanraking komt met zuurstof, leiden tot vorming van ijzerhydroxiden. De gemeten concentratie ijzer (4.68 mg/L) is normaal voor anoxisch grondwater in Nederland (van Beek et al., 2021).

De MembraanFilterIndex (MFI) is een indicator voor mechanische verstopping die is gebaseerd op de Silt Density Index, waarbij wordt gemeten hoe snel een membraanfilter met poriën van 0.45 µm verstopt als er water met constante druk doorheen stroomt. Volgens Van Beek et al. (1998) is infiltratiewater met een MFI van maximaal 3 s/L² wenselijk, Voor bodemenergiesystemen (SIKB, 2019) wordt uitgegaan van een maximaal toelaatbare MFI van 2 s/L². Een hoge TSS (zwevende stof; Engels: total suspended solids) is ook een indicator voor risico op mechanische verstopping door het vastlopen van deeltjes (Capra and Scicolone, 2005). De combinatie van een hoge MFI en TSS in Lieshout (Tabel 4-2) duidt dus op een grote potentie op mechanische verstopping. Er zijn geen analyses uitgevoerd wat voor type deeltjes deze hoge MFI veroorzaakt of wat de herkomst is; maar mogelijk zijn het calcietdeeltjes die al in het effluent gevormd zijn door de kalkoververzadiging.

De AOC (assimileerbaar organisch koolstof) is een bepaling van het aandeel organisch materiaal dat makkelijk is af te breken door micro-organismen. Helaas ontstonden bij een eerste meting te veel kolonies (storende flora) om een betrouwbare analyse uit te voeren voor de monsters Haaksbergen, Stegeren en America (grondwater). Ook bij de herhalingsmeting waren relatief veel stoorflora aanwezig. Voor Lieshout wordt deze stoorflora mogelijk veroorzaakt doordat er in het geïnfiltreerde effluent altijd schimmel aanwezig is (mondeling med. brouwerij). De hoeveelheid schimmel neemt toe bij hogere zomerse temperaturen. Volgens de indicatieve analyses heeft Haaksbergen de hoogste potentie voor biologische groei en Stegeren de minste. De DOC (Eng: dissolved organic carbon) omvat alle opgeloste organisch koolstof en is in alle watermonsters hoger dan de grenswaarde. De hoge ATP in Haaksbergen, Lieshout en Stegeren zijn een indicatie dat de microbiologische activiteit tijdens monsternamen hoog was. De 1.2 µg/L ATP in America is normaal voor door drinkwaterbedrijven onttrokken grondwater.

Er zijn geen metingen gedaan aan de gasverstoppingspotentie van het ingaande water. Bij het ontwerp van de systemen is aangenomen dat dit een beperkte rol zou spelen omdat het water kan ontluften in de regelput en onder atmosferische druk de drains in gaat.

Tabel 4-2: Vergelijking van waargenomen watersamenstelling in Lieshout, Haaksbergen, Stegeren en America met grenswaarden voor preventie van putverstopping gangbaar in de Nederlandse drinkwatersector.

Verstoppingsproces	Parameter	Grens-waarde	Eenheid		America	Stegeren	Lieshout	Haaks-bergen	America (sloot)
Chemisch:	Aluminium Al	<0.1	mg/l	(1)	0.025	0.009	<0.001	0.027	0.011
	Calciet	Si _{ca}	<1	-	(2)	-2.88	0.03	1.22	0.24
	Ijzeroxide	Fe	<0.01	mg/L	(3)	4.68	<0.01	0.2	0.025
Mechanisch	MFI	<2	s2/L	(4)	2 ^	74 ^	174 ^	geen meting	179 ^
	TSS	<0.1	mg/l	(5)	<2	<2	2.6	3.2	7.4
	SAR	<3/<6	-	(6)	1.4	1.8	10	5	
Biologisch	AOC	< 10	ug/l	(7)	270 *	59 **	170 **	1400 **	280 **
	DOC	< 2	mg/l	(8)	5.1	8.8	15	12	3.7
	ATP	<10	ng/l	(9)	1.2 ~	297	326	558	118
Gas	gasdruk	atmosferisch			atmosferische druk				

(^) gemeten waarde is het gemiddelde van 3 metingen op dezelfde dag

(*) meting na beluchting, niet representatief voor onbelucht grondwater

(**) indicatieve waarde, door storende flora tijdens labanalyse

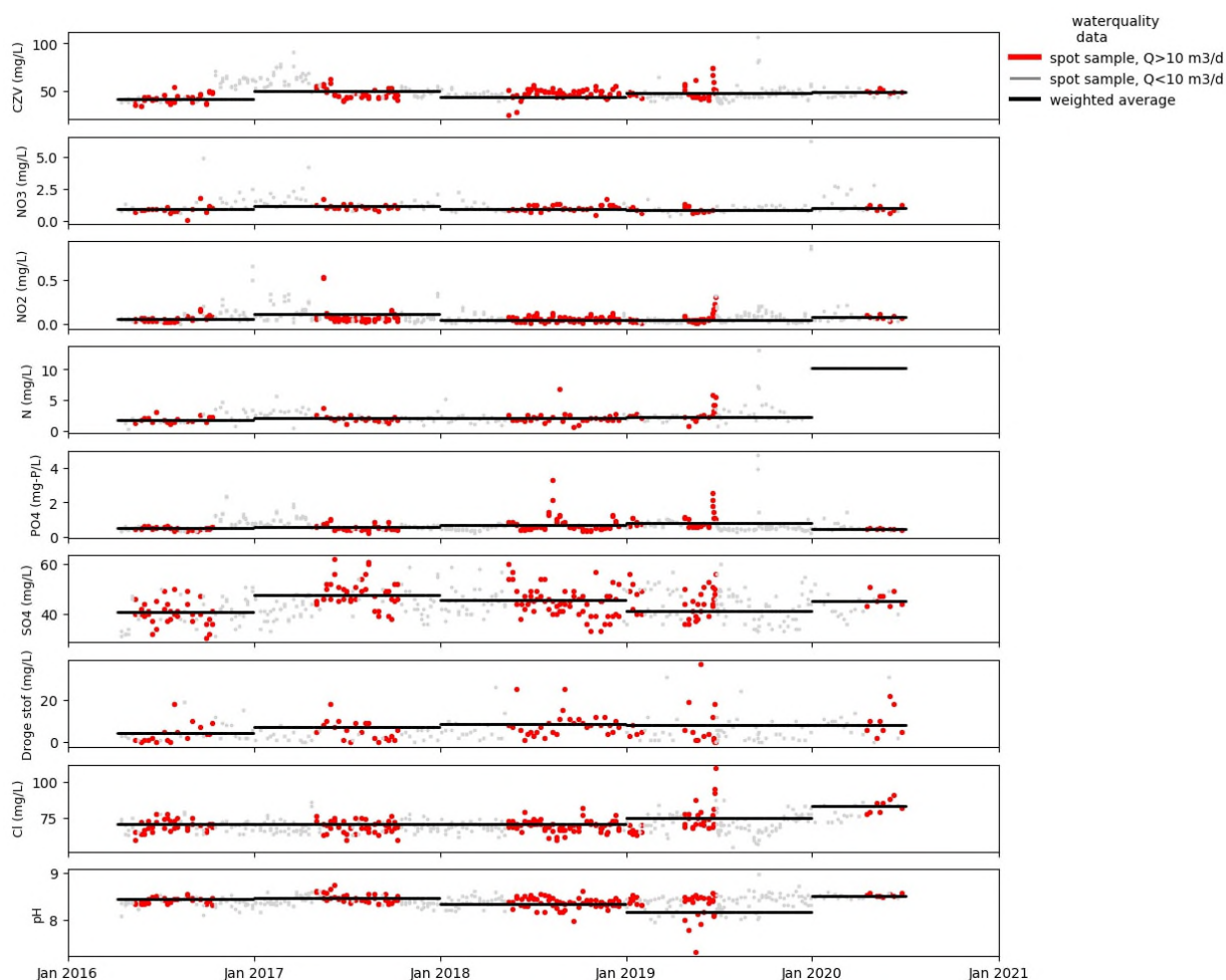
(~) meting rond detectielimiet

4.4.2 Alternatieve oppervlaktewaterbron (America)

In America is een extra watermonster genomen van een nabijgelegen sloot om te onderzoeken of dit een haalbare alternatieve bron zou zijn. Het watermonster heeft vergeleken met Stegeren wat hogere waarden voor MFI, TSS en AOC en wat lagere waarden voor ATP (zie laatste kolom Tabel 4-2). Het verschil gemeten tussen de DOC (3.7 mg/L) en TOC (5.0 mg/L) is een aanwijzing dat de verhoogde TSS en MFI deels veroorzaakt worden door organische stof. Dit aangezien de TOC (totaal organisch koolstof) ook deeltjes organische stof omvat die groter zijn dan het 63 micron filter. Het oppervlaktewater lijkt dus een hogere verstoppingspotentie te hebben dan het gebruikte grondwater; zeker wanneer wordt voorkomen dat het grondwater belucht.

4.4.3 Fluctuatie waterkwaliteit (Lieshout)

Opvallend aan het infiltratiewater in Lieshout, is dat in 2017 de gemiddelde concentratie van het chemisch zuurstofverbruik (COD), nitraat (NO_3^-), nitriet (NO_2^-) en sulfaat (SO_4^{2-}) circa 20% hoger zijn dan in andere jaren (Figuur 4-7). In 2020 was sprake van een verhoogde concentratie chloride (Cl^-) en pH. De hoge concentratie totaal stikstof (N) is gebaseerd op enkele metingen dus wellicht minder significant. Uit de metingen blijkt geen eenduidige relatie tussen de variatie van jaar-op-jaar in de waterkwaliteit en de verstoppingsnelheid.



Figuur 4-7. Ontwikkeling van enkele waterkwaliteitsparameters gedurende de proef bij Lieshout. De jaargemiddelde concentratie (zwarte lijn) is per jaar berekend door weging van de concentratie met het infiltratiedebiet (gewogen gemiddelde = som (dag concentraties * dagdebiet) / totaal infiltratie volume). De rode punten zijn metingen uitgevoerd op momenten dat er actief geïnfilteerd werd. Bij de grijze punten werd er niet of beperkt geïnfilteerd (<10 m³/d).

4.4.4 Verandering waterkwaliteit tijdens infiltratie

Tabel 4-3 geeft een overzicht hoe de samenstelling van het geïnfiltreerde water (“aanvoer”) verandert na infiltratie in de bodem direct naast de drain (“na infiltratie”). Hierbij kon voor de kolom in Lieshout de uitstroom direct bemonsterd worden. Voor de praktijkproeven in Lieshout en Stegeren is de waterkwaliteit in de peilbuis direct naast de drain teruggerekend naar de eindleden: water na infiltratie uit de drain, hemelwater dat lokaal in de bodem is geïnfiltreerd (zie werkwijze §3.5.2). Dit omdat de peilbuis direct naast de drain een mengsel bevatte van geïnfiltreerd drainagewater en bestaand grondwater. In Tabel 4-3 is op de laatste regel per element (i) berekend welk aandeel de concentratieveranderingen hebben t.o.v. de som van de concentratie veranderingen (in absolute waarde) van alle elementen (n).

$$\Delta_i = \frac{(x_{aanvoer,i} - x_{uitstroom,i})}{\sum_1^n (x_{aanvoer,n} - x_{uitstroom,n})}$$

Een hoog percentage betekent dus dat er grote concentratieveranderingen zijn van het betreffende element vergeleken met de veranderingen bij andere elementen.

Uit de berekening blijkt dat er in Lieshout tijdens infiltratie een sterke afname optreedt van calcium (Ca) in zowel perceel (-24%; Tabel 4-3) als de kolom (-35%). Gezien de hoge kalkverzadiging (zie Tabel 4-2), wordt dit vermoedelijk veroorzaakt door neerslag van calciumcarbonaat, wat in potentie ook kan bijdragen aan verstopping van de drain. Aangezien calciumcarbonaat ook anorganische koolstof bevat, zou deze neerslag ook de afname van IC (inorganic Carbon) op het perceel (-18%) en in de kolom (-41%) kunnen verklaren. De afname van K tijdens infiltratie is hoog vergeleken met andere nutriënten; mogelijk doordat N en P al efficiënt verwijderd worden in de RWZI en er dus verhoudingsgewijs veel K in het infiltratiewater zit. Eigenlijk is nader onderzoek wenselijk om de metingen te checken (meerdere meetronden) en de oorzaak te kunnen duiden.

Ook op het perceel in Stegeren vindt een sterke afname plaats van calcium (-89%). De toename van natrium duidt mogelijk op kationuitwisseling Ca/Na, maar zou ook te maken kunnen hebben met filtratie van calcietdeeltjes (kalk). Helaas zijn voor Stegeren geen metingen van IC uitgevoerd om oververzadiging van calciumcarbonaat of andere hypothesen te toetsen.

Tabel 4-3. Vergelijking van de concentratie in het effluent en na infiltratie in de bodem (mg/l). Overige macro-parameters en gassen zijn niet gemeten.

Locatie	Al	Ca	Cl	Fe	K	Mg	Mn	N	Na	P	S	Si	IC	TOTAAL *	Datum
Lieshout, perceel															
LH: aanvoer	0.00	78.36	55.50	0.24	93.64	15.56	0.16	0.25	415.43	0.84	11.10	10.59	238.35	920.02	gemiddelde 23/06/2016 & 20/09/2016
LH: peilbuis naast drain (A4)	0.14	41.42	42.00	0.23	50.84	13.07	0.25	4.45	355.93	0.59	12.50	5.21	153.65	680.25	
LH: peilbuis tussen drain (A4)	0.72	45.37	14.50	6.22	21.28	20.30	1.34	5.27	136.11	1.07	15.28	6.31	41.22	314.99	
LH: na infiltratie (A4) **	-0.15	39.47	55.50	-2.72	65.34	9.52	-0.29	4.04	463.84	0.35	11.14	4.67	208.84		
LH: na infiltratie (A4) - aanvoer	-0.15	-38.89	0.00	-2.96	-28.29	-6.04	-0.45	3.80	48.40	-0.49	0.04	-5.92	-29.50	164.93	
	0%	-24%	0%	-2%	-17%	-4%	0%	2%	29%	0%	0%	-4%	-18%		
Lieshout, kolom															
LH: aanvoer	0.00	79.31	56.00	0.26	101.04	15.86	0.11	0.20		1.16	11.30	5.14	263.83	534.21	23/06/2016
LH: na infiltratie (kolom 1)	0.01	46.21	54.00	0.00	90.19	11.15	0.13	0.26		0.45	10.40	8.21	225.85	446.86	
LH: na infiltratie (kolom 1) - aanvoer	0.01	-33.10	-2.00	-0.26	-10.85	-4.71	0.02	0.05		-0.71	-0.90	3.07	-37.98	93.65	
	0%	-35%	-2%	0%	-12%	-5%	0%	0%		-1%	-1%	3%	-41%		
Stegeren, perceel															
ST: aanvoer	0.01	66.24	57.00	0.05	10.78	8.17	0.04		57.00	0.06	19.00	1.00		219.35	05/06/2019
ST: peilbuis naast drain	0.75	29.18	40.00	0.10	7.35	11.73	0.02		42.62	0.16	16.00	2.28		150.19	
ST: peilbuis tussen drain	0.86	33.75	29.00	0.19	3.49	14.24	0.04		27.02	0.06	14.00	2.12		124.77	
ST: na infiltratie **	0.59	22.12	57.00	-0.05	13.32	7.85	-0.01		66.73	0.32	19.09	2.52			
ST: na infiltratie - aanvoer	0.58	-44.12	0.00	-0.10	2.54	-0.32	-0.05		9.73	0.26	0.09	1.52		59.31	
	1%	-74%	0%	0%	4%	-1%	0%		16%	0%	0%	3%			

(*) som van de absolute waarde (**) berekende waarde (unmix)
= gemeten, rood = berekend

4.5 Biochemische samenstelling verstoppingsmateriaal

4.5.1 Chemische samenstelling

Tabel 4-4 toont de samenstelling van biofilmmonsters genomen uit de aanvoerput en drain ("biofilm"). Daarnaast zijn inschattingen gemaakt van neerslagen in de bodem rondom de drain door gehalten in de bodem rondom de drain te vergelijken met de oorspronkelijke bodem midden tussen de drain ("bodem"). Tot slot zijn voor Lieshout en Stegeren ook de concentratieverschillen tussen het infiltratiewater en grondwater direct naast de drain in beeld gebracht. Hierbij zijn negatieve waarden uit Tabel 4-3 als positieve waarden weergegeven omdat een concentratieafname kan duiden op vorming van verstoppingsmateriaal. Een kanttekening bij deze tabel is dat het analysepakket soms incompleet is waardoor Si, IC en OC deels ontbreken. Daarnaast is Si in de biofilm- en bodemmonsters die zijn gemeten met ICP-MS geschat op basis van de residuen (niet-opgeloste materialen) na destructie met Aqua Regia.

De hoge ijzer (Fe) gehalten in biofilmmonsters in de aanvoerput en drain van **America** duiden op oxidatie van de in het aangevoerde grondwater aanwezige ijzer. Aangezien dit proces deels via microbiologische processen kan verlopen (bij pH 6.5), is het logisch dat er ook organisch koolstof (OC) aanwezig is in de biofilm. De hoge silica (Si) concentratie in het monster in de "omhulling" bestaat waarschijnlijk vooral uit het steenwol omhullingsmateriaal en is dus mogelijk een meetartefact. Maar het is ook niet uit te sluiten dat de steenwol bij ingebruikname nat wordt en stoffen afgeeft die de waterkwaliteit beïnvloeden (=vergt nader onderzoek). Volgens de metingen in de bodem is er rondom de drain verlies van aluminium (kleideeltjes?) en kalium en in één van de twee monsters ook ijzer. Dit laatste komt mogelijk door de vorming van gereduceerde condities in het infiltratiewater. De waargenomen Fe en OC in de biofilm zijn in lijn met de hoge concentraties Fe en AOC in het aanvoerwater (Tabel 4-5).

De biofilm in de aanvoerput en drainbuis van **Haaksbergen** bestaan hoofdzakelijk uit organische stof. Dit is in lijn met de hoge AOC en ATP in het aanvoerwater.

De samples van biofilm in de aanvoerput van **Lieshout** bestaan overwegend uit silicaten (NB: geen duidelijke verklaring voor herkomst), organische koolstof en beperkte hoeveelheden ijzer en calcium. Het organische stofgehalte in de aanvoerput is twee keer bemonsterd, waarbij de natchemische analyse m.b.v. TOC-analyser een veel lager percentage OC is gevonden dan in de bepaling d.m.v. LECO. Aangezien deze laatste methode meer is toegespitst op totaalanalyse van vaste stoffen, kunnen we aannemen dat de biofilm in de aanvoerput vermoedelijk veel organische stof bevat. De samples in de bodem en grondwater van Lieshout bevatten veel calcium en anorganisch koolstof (vermoedelijk calciumcarbonaat). Fe lijkt juist af te nemen rondom de drain, mogelijk lossen deze op door reductie van het geïnfilterde water. Helaas zijn hier geen Si, IC en OC gemeten. Volgens de grondwatermonsters blijft er veel K achter rondom de drain, maar dit is niet teruggevonden in de bodemmonsters, waarschijnlijk omdat het wegvalt tegen de relatief grote hoeveelheid van nature aanwezige kalium. Resumerend is de waargenomen samenstelling van het verstoppingsmateriaal (hoge gehalten Si, OC, Fe en Ca) in overeenstemming met de observaties in het aanvoerwater (hoge MFI, AOC/ATP, ijzer, verzadigingsgraad Ca).

In **Stegeren** zijn geen biofilmmonsters genomen in de aanvoerput omdat er geen visueel waarneembare biofilm aanwezig was. Uit de analyse van het bodemmonster (Fe, K, OC) komen andere stoffen naar voren dan het grondwatermonster (Ca). Uit nadere inspectie, blijkt dat de monsters in de bodem naast en midden tussen de drain in absolute zin weinig van elkaar verschillen; de gerapporteerde procentuele verschillen houden namelijk geen rekening met de absolute verschillen. De meest logische verklaring voor de verstopping is de hoge biologische activiteit in het aanvoerwater (AOC, DOC, ATP).

Tabel 4-4: massapercentage van kationen, zwavel, silica en koolstof in biofilm (uit de aanvoerput en drain), bodemmonsters en grondwater.

Monsterpunt			Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	P	S	Si	IC	OC	TOTAAL
AM: aanvoerput	biofilm	*	0%	0%	86%	0%	0%	0%	1%	2%	2%	1%	7%	100%
AM: buis (drain 8)	biofilm	*	1%	0%	84%	0%	0%	0%	1%	4%	1%	0%	9%	100%
AM: omhulling (drain 8)	biofilm	*	2%	0%	2%	1%	0%	0%	0%	0%	94%	0%	2%	100%
AM: bodem naast (drain 8)	bodem	**	-31%	1%	-7%	-13%	-2%	1%	1%	1%	-1%	1%	41%	-9%
AM: bodem naast (MP)	bodem	**	-17%	-5%	25%	-9%	-1%	0%	0%	2%	19%	-1%	-20%	-8%
ST: bodem naast (MP)	bodem	**	-23%	-9%	8%	19%	7%	0%	11%	0%	-9%	1%	12%	18%
ST: infiltratie	grondwater	***	-1%	74%	0%	-4%	1%	0%	0%	0%	-3%	#	#	67%
LH: aanvoerput	biofilm	*	1%	11%	8%	1%	1%	3%	4%	1%	28%	3%	39%	100%
LH: aanvoerput kolom	biofilm	*	2%	6%	34%	1%	0%	7%	6%	1%	25%	2%	16%	100%
LH: aanvoerput	biofilm	*	1%	15%	11%	1%	1%	4%	5%	2%	59%	#	2%	100%
LH: bodem (MP)	bodem	**	2%	0%	-28%	-6%	0%	-2%	-13%	7%	41%	#	-1%	1%
LH: bodem (A4)	bodem	**	14%	18%	-43%	7%	-5%	0%	12%	1%	#	#	#	5%
LH: bodem (kolom1)	bodem	**	-19%	43%	-20%	-5%	-4%	0%	6%	3%	#	#	#	5%
LH: bodem (kolom2)	bodem	**	-1%	34%	-32%	-7%	-6%	0%	12%	8%	#	#	#	8%
LH: infiltratie (drain A4)	grondwater	***	0%	24%	2%	17%	4%	0%	0%	0%	4%	18%	#	68%
LH: infiltratie (kolom1)	grondwater	***	0%	35%	0%	12%	5%	0%	1%	1%	-3%	41%	#	91%
HB: aanvoerput	biofilm	*	1%	8%	1%	1%	0%	0%	2%	4%	9%	1%	73%	100%
HB: buis (MP)	biofilm	*	1%	3%	5%	1%	1%	5%	4%	2%	13%	10%	56%	100%
HB: bodem naast (MP)	bodem	**	26%	6%	-6%	7%	2%	1%	0%	0%	-31%	7%	-13%	-1%

(*) directe meting van samenstelling biofilm

(**) samenstelling berekend uit het verschil in gehalte in bodemmonster tussen drains en op 0.1 m afstand van drain

(***) samenstelling berekend uit het concentratie verschil tussen het aangevoerde water en water in een peilbuis direct naast de drain

(#) niet gemeten

Tabel 4-5: Vergelijking van de verstoppingspotentie van het infiltratiewater uit Tabel 4-3 (links) met de gemiddelde samenstelling van het verstoppingsmateriaal gebaseerd op Tabel 4-4 (rechts). Bij de samenstelling van het verstoppingsmateriaal is de meting "AM: omhulling" buiten beschouwing gelaten vanwege de aanwezigheid van steenwol in het monster.

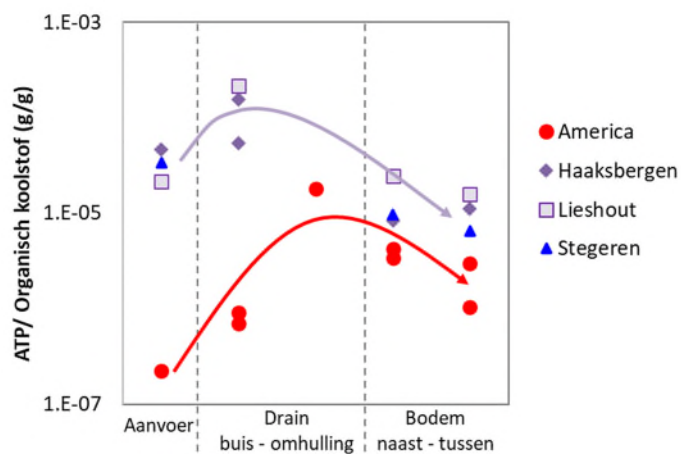
Verstoppingsproces	Parameter	Grens-waarde	Eenheid	America	Stegeren	Lieshout	Haaks-bergen	Locatie	AM	ST	LH	HB	
Chemisch: Aluminium	Al	<0.1	mg/l	(1)	0.025	0.009	<0.001	0.027	Al	-12%	-12%	0%	9%
Calciet	Si _{ca}	<1	-	(2)	-2.88	0.03	1.22	0.24	Ca	-1%	40%	22%	6%
Ijzeroxide	Fe	<0.01	mg/L	(3)	4.68	<0.01	0.2	0.025	Fe	47%	4%	-7%	0%
Mechanisch	MFI	<2	s2/L	(4)	2 [~]	74 [^]	174 [^]	geen meting	K	-6%	7%	3%	3%
	TSS	<0.1	mg/l	(5)	<2	<2	2.6	3.2	Mg	-1%	4%	0%	1%
	SAR	<3/<6	-	(6)	1.4	1.8	10	5	Mn	0%	0%	1%	2%
Biologisch	AOC	<10	ug/l	(7)	270 [*]	59 ^{**}	170 ^{**}	1400 ^{**}	P	1%	5%	4%	2%
	DOC	<2	mg/l	(8)	5.1	8.8	15	12	S	2%	0%	3%	2%
	ATP	<10	ng/l	(9)	1.2 [~]	297	326	558	Si	5%	-6%	26%	-3%
Gas	gasdruk	atmosferisch			atmosferische druk			IC	0%	1%	18%	6%	
								OC	9%	12%	14%	38%	
								TOTAAL	46%	55%	82%	66%	

4.5.2 ATP/ organisch koolstof ratio

ATP is een indicator voor de mate van biologische activiteit. Om meer inzicht te krijgen in de herkomst van het organische koolstof is de verhouding van ATP t.o.v. organisch koolstof in beeld gebracht in het aanvoerwater (in Figuur 4-8 aangeduid als "aanvoer"), de regelput en drain ("drain") en de bodem direct naast en midden tussen de drains ("bodem"). De ATP en TOC zijn gemeten na extractie in water.

In America, Haaksbergen en Lieshout waren de concentratie TOC en de ATP/TOC-ratio in de aanvoerput en drain hoger dan in het aangevoerde water. Dit duidt op hogere mate van biologische activiteit in het verstoppingsmateriaal t.o.v. het aanvoerwater. Het in de drain aangetroffen organisch stof wordt dus in ieder geval deels in-situ gevormd en is niet (uitsluitend) veroorzaakt door invanging van organische deeltjes. Deze hypothese wordt ondersteund doordat het organisch koolstof in de regelput-biofilm van Bavaria een hogere fractie biopolymeren bevat (6.9%) vergeleken met het aanvoerwater (1.8%).

De ATP/TOC ratio is lager in de bodem. Vermoedelijk door afsterving van micro-organismen en verwijdering van nutriënten uit het aanvoerwater tijdens bodempassage. De lage ATP-concentraties in America hangen samen met de redoxcondities. In afwezigheid van zuurstof (en methaan) is er vaak weinig microbiologische activiteit.



Figuur 4-8. Vergelijking tussen de fractie organisch koolstof (x-as) en de verhouding ATP/organisch koolstof (y-as, let op: Log schaal!)

5 Discussie

In dit hoofdstuk worden een aantal vragen besproken aan de hand van de in hoofdstuk 4 gepresenteerde resultaten:

- Verstoppingen de drains al bij aanleg, en waarom? (§5.1)
- Wat zijn de oorzaken van verstopping in de gebruiksfase? (§5.2)
- Hoe effectief zijn de beheer- en onderhoudsmaatregelen? (§5.3)
- Zijn er verbeteringen mogelijk in het ontwerp? (§5.4)
- Zijn er verbeteringen mogelijk in het beheer en onderhoud? (§5.5)
- Hoe kwetsbaar zijn RDS systemen voor verstopping, in vergelijking met andere MAR-systemen? (§5.6)

5.1 Verstopping van de drains bij aanleg

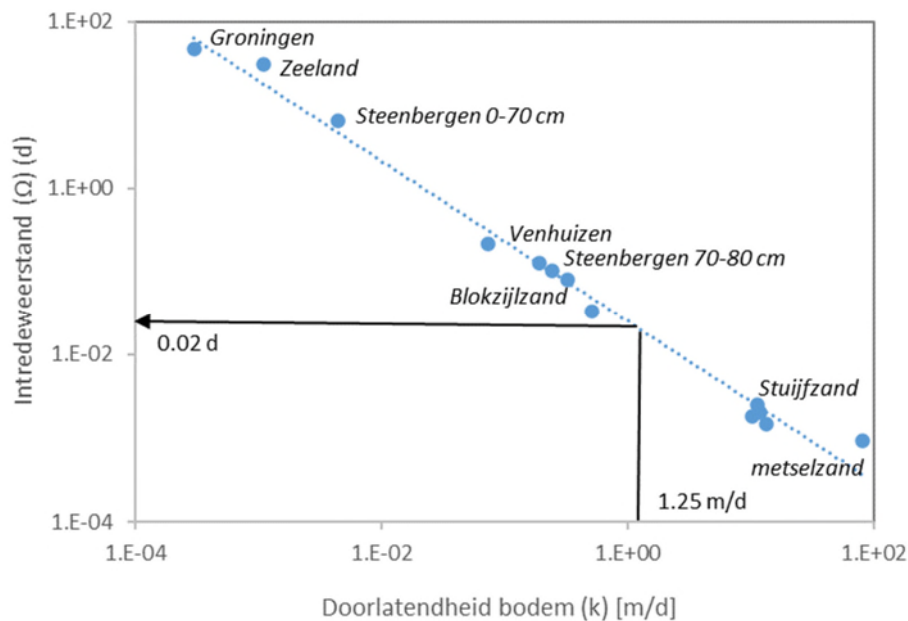
Uit het onderzoek bleek dat de drains gedurende de gebruiksfase verstopten. Maar om te beschouwen in hoeverre ze bij aanleg al verstopt waren, is de infiltratieweerstand vergeleken met een voorbeeldberekening van hoeveel weerstand je theoretische zou verwachten op basis van de doorlatendheid van de bodem. De theoretische infiltratieweerstand die water ondervindt tussen de drain en de naastgelegen peilbuis is hiertoe berekend met de formule van Theis (1935), aannemende dat er alleen radiale stroming plaatsvindt. Hierbij is gerekend met een debiet (Q) van $1 \text{ m}^3/\text{d}$, een straal van de drainbuis (r) van 0.05 m , een afstand tot de peilbuis of rand van de kolomopstelling (R) van 0.25 m en lengte van de drain (L) 1 m . Verder is aangenomen dat de doorlatendheid van het dekzand 1.25 m/d bedraagt wat volgens (Massop et al., 2005) een gemiddelde waarde is voor hoge zandgronden waarop de subirrigatiesystemen zijn aangelegd:

$$\Delta H = \frac{Q}{2\pi kL} \ln \left(\frac{r}{R} \right) \quad \text{vgl 5-1}$$

Het resulterende stijghoogteverschil (ΔH) bedraagt 0.20 m . Toepassen van vergelijking vgl 3-3 resulteert in een theoretische infiltratieweerstand van Q_{theorie} van 0.06 d voor de kolomopstelling. Tijdens het bepalen van de initiële weerstanden waren de grondwaterstanden enkele decimeters hoger dan de drain. De stroming is dan overwegend in horizontale richting waardoor de weerstand mogelijk ook tot factor 2 hoger kan zijn, dus orde grootte 0.1 d .

Daarnaast is door ICW 1967 onderzoek gedaan naar de intredeweerstand van drains. Dit is gedaan voor een worst case situatie waarbij de drain direct in de grond ligt zonder omhulling. Volgens deze metingen zou de intredeweerstand van de drain zelf (door contractie van de stroombanen naar de filterspleten) bij een geschatte doorlatendheid van 1.25 m/d circa 0.02 d bedragen (Figuur 5-1). Dit komt dus nog bovenop de radiale stijghoogteverliezen zoals beschreven hiervoor berekend met de Theis formule.

Bovenstaande theoretische waarden komen qua orde grootte goed overeen met de initiële weerstanden (Q_{ref}) in de kolomopstelling (0.03 d). Vanuit deze optiek is het dus niet waarschijnlijk dat eventuele erosie een grote invloed heeft gehad op het verloop van de proeven. In de veldproeven zijn echter beduidend hogere waarden gevonden, oplopend van 0.5 d (Stegeren), 0.8 d (Lieshout), 0.9 d (America) tot 5 d (Haaksbergen). Mogelijk is de bodem bij aanleg van de drains al versmeerd geraakt. Wat daarbij nog opvalt is dat de initiële infiltratieweerstand hoger was op de locatie waar de drains zijn aangelegd met een kettingsgraver (Haaksbergen) vergeleken met de andere locaties die sleufloos zijn aangelegd. Uit ervaring met grondwaterputten is bekend dat een dergelijke initiële verstopping kan bijdragen aan het versnellen van de verstopping tijdens de gebruiksfase (De Zwart, 2007).



Figuur 5-1: Intredeweerstand van drains (y-as) als functie van de doorlatendheid van de bodem (x-as). De waarden zijn overgenomen van www.grondwaterformules.nl en oorspronkelijk afkomstig uit ICW 1967. De intredeweerstand zijn omgerend van een weerstand per m drain, naar een weerstand per m² oppervlak drainwand voor een buis met diameter van 6 cm zonder kokos omhulling.

5.2 Oorzaken verstopping in gebruiksfase

5.2.1 America

De verstopping in America is veroorzaakt door oxidatie (beluchting) van ijzerrijk grondwater. In de aanvoerput plonsde het water aanvankelijk bijna een meter omlaag. Dit leidde tot een sterke beluchting waardoor het opgeloste ijzer uitvlokt als ijzerhydroxiden. Deze slaan deels neer als rode aanslag op de wand van de put (zie Figuur 5-2A). De vorming van colloïdale deeltjes verloopt gezien de lichtzure pH (6.5) in het infiltratiewater relatief langzaam waardoor de meeste colloïdale deeltjes pas ontstaan of aangroeien in de verzamelleiding, drain en mogelijk zelfs omliggende bodem vormen.

Uit visuele inspectie bleek dat de verzamelleiding in beperkte mate verstopt was (zie Figuur 5-2B). Bij HD-reiniging van de verzamelleiding in september 2020 kwam weliswaar veel slurry vrij, maar dit leidde niet tot een noemenswaardige afname van de infiltratieweerstand.

De drainbuis was sterk verstopt bij de instroomzijde (zie Figuur 5-2C). HD-reinigen van de instroomzijde van de drains in sept 2021 leidde bovendien tot een sterke afname van de infiltratieweerstand. De verstopping zat dus deels geconcentreerd aan de instroomzijde van de drains. Vermoedelijk werd deze verstopping veroorzaakt door een afname van de stroomsnelheid zodra water uit de verzamelleiding de drains in stroomde waardoor reeds gevormde colloïdale deeltjes kunnen sedimenteren of hechten aan de buiswand.

Het HD-reinigen van de rest van de drainbuizen in februari leidde tot een verdere afname van de infiltratieweerstand tot het niveau bij oplevering. De drainbuizen zelf bevatten hier minder neerslagen (Figuur 5-2D). Dit doet vermoeden dat met name de filterspleten en omhullingsmateriaal verstopt waren.

Conclusie: er trad een combinatie op van “leidingverstopping” en “drainverstopping” door beluchting van ijzerrijk grondwater. Dit is verholpen door de drainbuizen schoon te spuiten en als preventieve maatregel is de aanvoerleiding aangepast om beluchting van het water te voorkomen.



Figuur 5-2: Biofilm in de aanvoerput (A) verzamelleiding (B), instroomzijde drain (C) en drain halverwege het systeem (D) van America.

5.2.2 Stegeren

Het drainagesysteem in Stegeren raakt vermoedelijk met name verstoppt door hoge biologische activiteit en voedingsstoffen in het aanvoerwater. Er zijn geen inspecties of reinigingsmaatregelen uitgevoerd die duidelijk maken of de verstopping met name optrad in de aanvoerleiding of rond de drainbuiswand.

5.2.3 Lieshout

Uit de chemische analyses blijkt dat er sprake is van een combinatie van mechanische, chemische en biologische verstoppingsprocessen welke samenhangen met de hoge verstoppingspotentie van het infiltratiewater:

- Accumulatie van minerale deeltjes >> door hoge concentratie gesuspendeerde stoffen in het aanvoerwater.
- Neerslag van kalk >> Oververzadiging van kalk (HCO_3 , Ca).
- Vorming van biofilm >> door hoge groeipotentie van het infiltratiewater (DOC, AOC, N, P, K).
- Neerslag van ijzersulfiden >> Het hoge chemisch- en biologisch zuurstofverbruik van het infiltratiewater kan leiden tot sterk gereduceerde redoxcondities waarbij ijzersulfiden kunnen vormen.

De zeer snelle toename van de intredeweerstand doet daarnaast vermoeden dat ook sprake is van verstopping met gasbellen. Uit bijvoorbeeld (Olsthoorn, 1982) is bekend dat verstopping met gasbellen zeer snel kunnen verlopen vergeleken met andere vormen van verstopping. Dergelijke type verstoppingen treden zeer snel op en zijn ook relatief makkelijk te verhelpen door het terugspoelen van systemen, zoals plaatsvond in de winter 2019-2020. Vorming van methaan is gezien het redoxmilieu (gezien de beperkte diepe onder maaiveld) niet voor de hand liggend, dus vermoedelijk is er eerder sprake van vorming van stikstofgas in de drains en omliggende bodem.

5.2.4 Haaksbergen

In Haaksbergen trad overwegend biologische verstopping op. Dit gezien de hoge concentratie organisch stof in het bemonsterde verstoppingsmateriaal en de hoge ATP en AOC van het aanvoerwater.

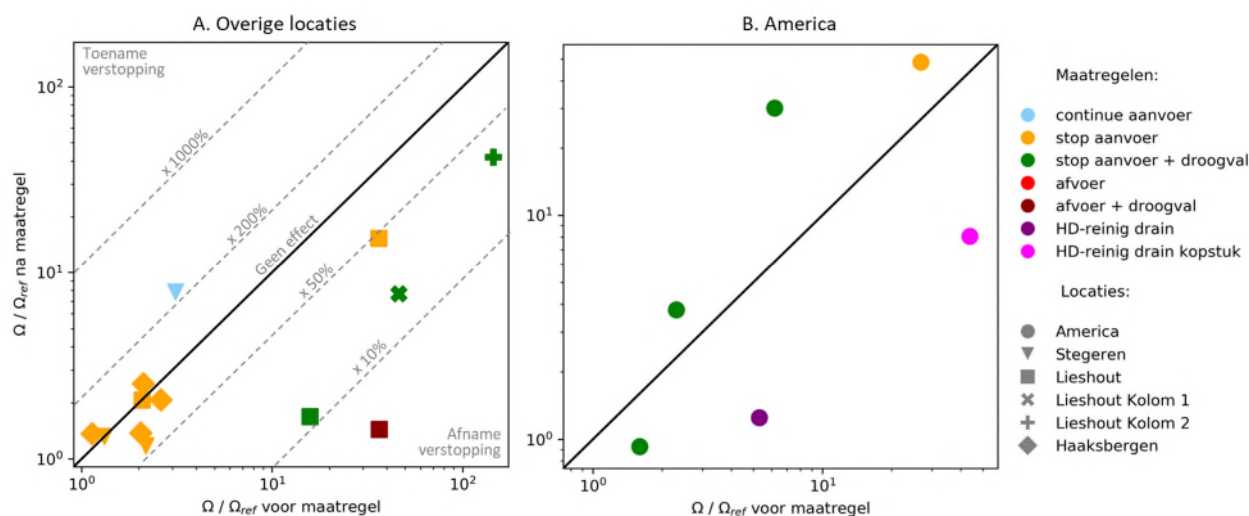
5.3 Evaluatie van beheer- en onderhoudsmaatregelen

5.3.1 Aanvoerregime buiten het groeiseizoen (najaar/ winter)

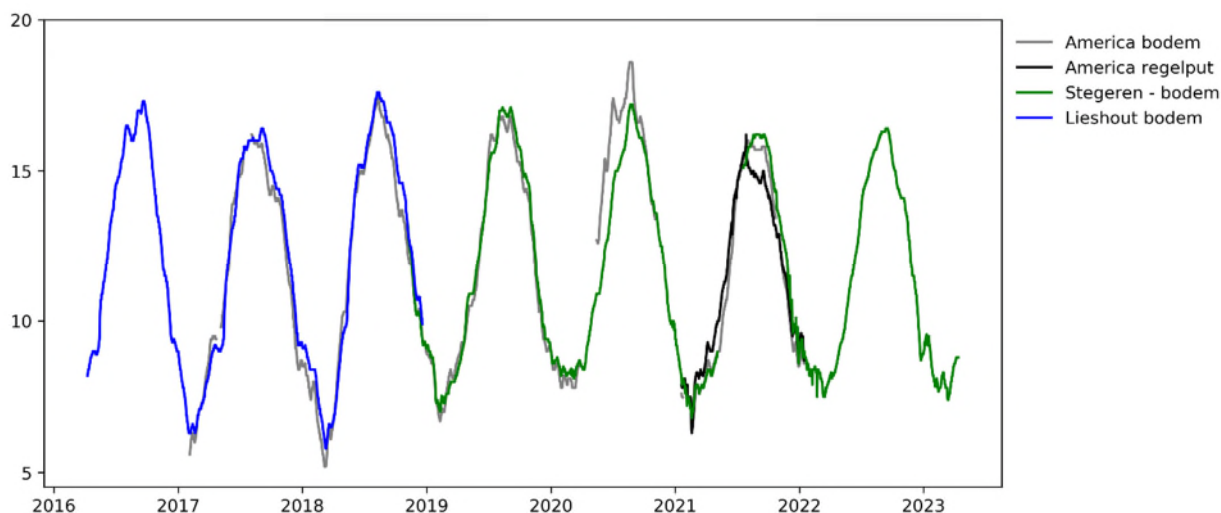
Buiten het groeiseizoen is de aanvoer in de meeste locaties stopgezet. Dit leidde in de meeste gevallen tot een beperkte afname van de infiltratieweerstand (oranje punten in Figuur 5-3A). Stopzetting van aanvoer leidde tot een afname van de beschikbare nutriënten en dus beperking van de groei. Daarnaast was de waargenomen temperatuur in het drainagesysteem (regelput) en direct rondom de drains in de wintermaanden beduidend kouder ($7 - 10\text{ }^\circ\text{C}$) vergeleken met de zomermaanden ($13 - 17\text{ }^\circ\text{C}$; zie Figuur 5-4). Deze lagere temperatuur kan bijdragen tot een tijdelijke reductie van de biologische activiteit en biofilmvorming en dus geen toename van de verstopping door biofilm. Hier staat tegenover dat de viscositeit bij $10\text{ }^\circ\text{C}$ ($1.30\text{ mPa}\cdot\text{s}$) circa 15% hoger is dan bij $15\text{ }^\circ\text{C}$ ($1.14\text{ mPa}\cdot\text{s}$) (TheEngineeringToolBox) wat bijdraagt tot een navenante (tijdelijke/ volledig reversibele) toename van de infiltratieweerstand.

Het droog laten vallen van de drains (groene punten in Figuur 5-3A) heeft veel meer effect op de verstoppingsweerstand. Het verstoppingsmateriaal komt droog te liggen waardoor het kan uitdrogen en oxideren. Mogelijk ontstaan hierbij scheuren die de doorlatendheid vergroten (Stuyt, 2013). Dit zou ook in lijn zijn met de ervaring bij verstopte bodems van infiltratiebassins die ook worden drooggezet om scheurvorming en afbraak van organisch materiaal te bevorderen. Afvoeren van water via de drains had in Lieshout een nog groter effect (bruine punt in Figuur 5-3A) omdat er dan ook verstoppingsmateriaal kan worden meegevoerd dat is opgehoopt in de drain- en transportleidingen.

De metingen in America (Figuur 5-3B) laten zien dat onderbreking van de aanvoer en droogval niet bijdragen aan het opheffen van verstopping bij infiltratie van ijzerrijk grondwater.



Figuur 5-3: Evaluatie van de effectiviteit van beheer- en onderhoudsmaatregelen door vergelijking van de infiltratieweerstand voorafgaand aan de maatregel (x-as) en na afloop (y-as). De infiltratieweerstanden zijn genormaliseerd naar de waarde bij oplevering (Ω_{ref}).



Figuur 5-4: Verloop van de temperatuur in peilbuizen direct naast de drain ("bodem") en in de regelput.

5.3.2 Aanvoerregime tijdens het groeiseizoen (voorjaar/ zomer)

In Lieshout is in de zomermaanden van 2020 en 2021 de wateraanvoer om de 2 tot 3 weken enkele dagen gestopt. Uit de stijghoogtemetingen komt naar voren dat de infiltratieweerstand hierdoor minder toename dan in zomers waarin permanent water wordt aangevoerd. Mogelijk hangt dit samen met een tijdelijk afname van de biofilm groei door het stopzetten van de aanvoer van nutriënten.

5.3.3 Reinigen drains

Het doorspuiten van de drains en kopstukken van de drains in America (roze/ paarse punten in Figuur 5-3) leidde tot een forse afname van de verstopping.

5.4 Evaluatie van het ontwerp

5.4.1 Aanlegniveau drain

Uit de evaluatie van het beheer en onderhoud (§5.3) is gebleken dat het wenselijk is om RDS-systemen die oxisch water infiltreren periodiek te laten droogvallen. Ook periodiek water afvoeren (draineren) is gunstig. Dit is alleen mogelijk indien de drains tussen de gemiddeld hoogste- en laagste grondwaterstand liggen.

RDS-systemen die anoxisch water infiltreren dienen dieper te liggen, beneden de gemiddeld laagste grondwaterstand. De kans op verstopping is in dergelijke systemen namelijk kleiner wanneer er geen zuurstof in de drains kan doordringen.

5.4.2 Doorspuitmogelijkheden

De drains in America zijn in 2020 allemaal afzonderlijk voorzien van doorspuitstukken. Aangezien alle drainagesystemen het risico lopen om op termijn te verstopten, is het wenselijk om direct bij aanleg al doorspuitvoorzieningen aan te leggen.

5.4.3 Regelput

In de aanvoerput van het RDS-systeem in America plonsde het anoxische water aanvankelijk naar beneden in de regelput waardoor het onnodig veel belucht werd. Door het verlengen van de aanvoerleiding, monde deze uit beneden de waterspiegel van de regelput en werd beluchting beperkt. Door de aanvoerput goed af te dichten kan beluchting nog verder voorkomen worden.

5.5 Evaluatie van de monitoring

Uit dit onderzoek is gebleken dat het monitoren van alleen de aanvoerdebieten onvoldoende is om verstoppingen tijdig te signaleren. De verstopping komt dan pas aan het licht als de drain zodanig verstopt is dat deze het aangevoerde water niet meer kan opnemen en het gewas onvoldoende water ontvangt. Uitbreiding van de monitoring met het aanvoerniveau biedt in veel gevallen al meer inzicht, aangezien stijgingen van de waterniveaus in de regelput dan in ieder geval gesignaleerd kunnen worden. De in dit onderzoek toegepaste aanpak, waarbij ook rekening is gehouden met grondwaterstanden in het perceel heeft als voordeel dat verstoppingen in een nog eerdere fase kunnen worden gesignaleerd, wat beheerders van RDS-systemen in staat stelt om het beheer aan te passen en preventief onderhoud te plegen. Wanneer een perceel uit verschillende aanvoervakken bestaat, dient eigenlijk per aanvoergebied een aparte debietmeter en stijghoogtemeting plaats te vinden. Afvoermetingen zijn een handig hulpmiddel om een waterbalans op te stellen van het perceel. Maar ze zijn niet cruciaal gebleken zolang er allen in de wintermaanden water wordt afgevoerd.

De monitoring van verstopping bleek vrij complex. Ten eerste moeten de waterniveaus nauwkeurig gemeten worden. Dit vergt regelmatige handmatige validatie. Daarnaast is het lang niet altijd mogelijk om de infiltratieweerstand te bepalen aangezien de berekening aan bepaalde voorwaarden moet voldoen (minimaal stijghoogteverschil, debiet, en geen grote fluctuaties in stijghoogte en debiet in de voorgaande dagen).

Er zit over het algemeen weinig verschil in de grondwaterstand van peilbuizen midden tussen de drain versus peilbuizen naast de drain (zie bijlage II). De opbolling / uitholling is vrij gering als gevolg van de beperkte afstand tussen de drain.

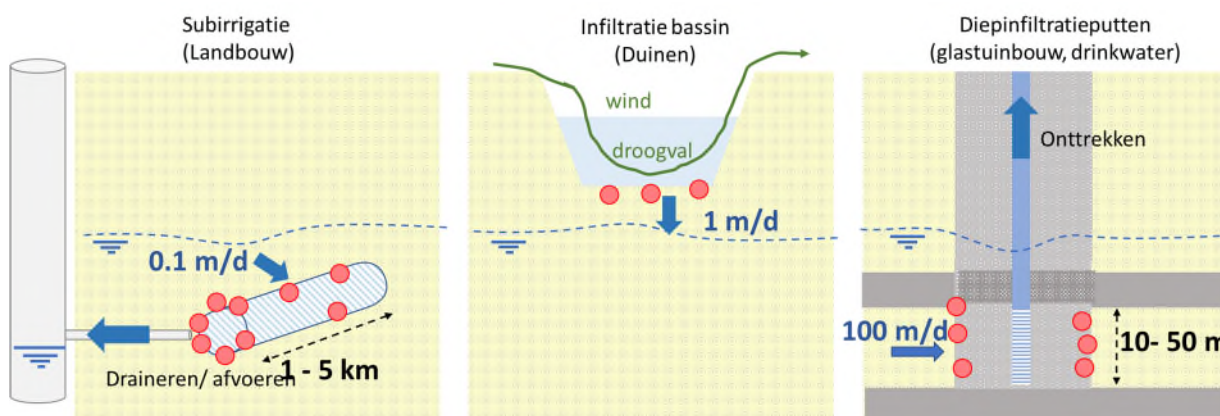
Vanuit kostenoverwegingen zijn bij de waterkwaliteitsmetingen soms niet alle macro-ionen gemeten. Dit maakte het lastig om bijvoorbeeld de ionenbalans te controleren of kationuitwisseling vast te stellen. In §6.3 is een advies opgesteld welke parameters te meten om de oorzaken van verstopping goed te kunnen duiden.

5.6 Vergelijking RDS met andere type MAR-systemen

5.6.1 Kwetsbaarheid voor verstopping

Drains lijken verhoudingsgewijs intrinsiek kwetsbaar voor verstopping vergeleken met andere systemen voor kunstmatige infiltratie (MAR) zoals infiltratiebassins (BAR) en diepinfiltratieputten (ASR/ ASTR-systemen). Gasbellen kunnen niet naar boven ontsnappen en dus makkelijker ophopen. Tijdens infiltreren in landbouwgronden is er vaak al sprake van een verhoogde concentratie nutriënten door uitspoeling van mest. Daarnaast treedt bij verstopping slechts een beperkte toename op van de stijghoogte gradiënten doordat het water met een lage darcy'snelheid de bodem betreedt. Dit maakt het lastiger om een verstopping tijdig te detecteren.

Ook het reinigen is complex: In infiltratiebassins kan de verstopping (sliblaag) worden verwijderd door het afschrapen van de sliblaag. Wanneer de mogelijkheid bestaat om ze droog te laten vallen, kan een biofilmlaag onder invloed van de wind relatief snel drogen en oxideren. Diepinfiltratieputten hebben als voordeel dat er een relatief hoge stroomsnelheid optreedt bij reiniging door omkering van de stromingsrichting wat helpt om slib (en luchtballen) af te voeren. In drains is de stroomsnelheid op de overgang naar de formatie gering. Dit maakt het lastig om verstoppingsmateriaal (biofilm, luchtballen) af te voeren. Bovendien kunnen luchtballen ophopen in de buizen wanneer deze niet langzaam naar boven oplopen.



Figuur 5-5: Illustratie van de verstoppingsgevoeligheid van verschillende systemen voor kunstmatige infiltratie

5.6.2 Mate van verstopping

Verstopping van grondwaterputten wordt vaak gemeten aan de hand van de Specifieke Volumestroom (SV). De SV wordt berekend door het infiltratiedebiet (Q) te delen gedeeld door de verhoging van het waterpeil in de put door infiltratie (H_{bedrijf}) t.o.v. het waterpeil als de put is uitgeschakeld (H_{rust}):

$$SV = \frac{Q}{H_{\text{bedrijf}} - H_{\text{rust}}} \quad \text{vgl 5-2}$$

Handboeken (Houben and Treskatis, 2007) en praktijkrichtlijnen (van der Schans et al., 2022) adviseren om putten te regenereren (reinen) bij een afname van de SV tot 50% - 70% van de nieuwwaarde. Dit omdat het vaak lastig is om putten die heel sterk verstopt zijn succesvol te regenereren. Voor een watervoerend pakket met een doorlatendheid van circa 10 m/d komt dit omgerekend neer op een weerstand (Ω) van orde grootte 1 dag. De in dit onderzoek waargenomen toenames van de infiltratieweerstand tot bijna 50 dag zijn dus extreem groot in verhouding tot acceptabele verstoppingsniveaus bij infiltratieputten. Het is dan ook opmerkelijk dat de intredeweerstand in Lieshout en America weer zijn teruggebracht tot de oorspronkelijke waarden. Mogelijk komt

dit doordat de verstopping deels in de drainleiding zat waar deze makkelijk te verwijderen was. Daarnaast zijn de overdruk en stroomsnelheid veel lager dan bij diepinfiltratieputten, waardoor verstoppend materiaal dicht bij de perforaties van de drain bleef en veel minder ver de formatie (bodem) in drong dan bij diepinfiltratieputten.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusie

In dit onderzoek is door evaluatie van hydrologische monitoring, waterkwaliteitsgegevens en chemische analyses op verstoppingsmateriaal van 4 praktijkproeven in beeld gebracht welke factoren van invloed zijn op verstopping van RDS. De drainage in Stegeren en Haaksbergen verstopten in beperkte mate. De systemen in America en Lieshout waren 4 jaar na inbedrijfstelling zodanig sterkt verstopt dat de infiltratieweerstand meer dan factor 25 was toegenomen en, ondanks verhogen van de druk in het aanvoersysteem, de infiltratiehoeveelheid met 80% afnam.

De verstopping in Stegeren, Haaksbergen en Lieshout bestond uit biofilms veroorzaakt door hoge biologische activiteit en voedingsstoffen in het aanvoerwater. De verstopping in Lieshout werd verergerd door kalkneerslag en vermoedelijk ook door vorming van gasbellen als bijproduct van de hoge biologische activiteit. In America ontstonden ijzerneslagen door beluchting van het anoxische (ijzerrijke) grondwater in de regelput.

De verstopping in America en Lieshout zijn succesvol verwijderden door respectievelijk het HD-reinigen van de drains en het draineren (backflushen) en laten droogvallen van de drains. Ook zijn op beide locaties preventieve maatregelen genomen die de verstopping afremmen. In America is beluchting van het aanvoerwater beperkt door aanpassingen in de aanvoerput. In Lieshout wordt wateraanvoer periodiek stopgezet waardoor minder voedingsstoffen het systeem instromen (en de gewassen minder bodemvocht krijgen), worden de drains jaarlijks gedraineerd en wordt de aanvoer stopgezet in het najaar en winter zodat de drains droogvallen.

In zowel het veld als in de kolom leidde het laten droogvallen van de drains, tot een afname van de infiltratieweerstand. We kunnen hieruit concluderen dat de kolomproeven een geschikt instrument zijn om de verstopping in het perceel te simuleren.

6.2 Aanbevelingen voor ontwerp, aanleg en beheer van RDS-systemen

RDS-systemen zijn waarschijnlijk altijd onderhevig aan verstopping bij toepassing van water met vergelijkbare waterkwaliteit als de in dit onderzoek beschouwde systemen. De verstopping lijkt echter beheersbaar bij toepassing van de volgende preventieve maatregelen:

Ontwerp/ aanleg:

- Zoek waterbronnen met een lage groeipotentie.
- Meet in de ontwerpfase ten minste 3x (april, juni, aug) de waterkwaliteit en vergelijk deze met de waterkwaliteit van de in dit onderzoek beschouwde systemen om een eerste indruk te krijgen van het verstoppingsrisico en de noodzaak tot extra voorzuivering. Zie lijst met parameters in Kader 6.1.
- Kies een aanleghoogte voor de drains halverwege de gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG) en gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG). Dit zodat de drains periodiek water kunnen afvoeren (backflushen om verstoppingsmateriaal en gasbellen te verwijderen) en ook periodiek kunnen droogvallen (om scheurvorming door oxidatie van biofilms te bevorderen). NB: Controleer ook of er bij deze draindiepte voldoende ontwatering en capillaire nalevering kan plaatsvinden.
- Zorg voor ontluchting van de drains aan het uiteinde tegenover de aanvoer om verstopping door luchtinsluiting te voorkomen.
- Voorzie alle individuele drains van doorspuitpunten.

Beheer en onderhoud:

- Laat de drains in het najaar droogvallen en voer regelmatig water af om verstopping tegen te gaan.
- Reinig de drains met een HD-reiniger als de infiltratieweerstand oploopt

Monitoring:

- Registreer de wateraanvoer, waterniveau in de aanvoerput en grondwaterstand in het perceel om het verloop van de intredeweerstand te monitoren. Deze metingen dienen per peilvak te worden uitgevoerd indien een RDS-systeem uit meerdere deelsystemen bestaat.

Bij irrigatie met ijzerhoudend anoxisch grondwater moet beluchting van het water ten allen tijde vermeden worden. De drains kunnen in dat geval het beste permanent onder water blijven door een aanleghoogte te hanteren beneden de GLG. Het laten droogvallen is ook niet wenselijk.

Kader 6.1: Voorstel welke waterkwaliteitsparameters te bepalen bij vooronderzoek

Waterkwaliteit: veldparameters(O₂, EGV, pH, temperatuur) macro-ionen (totaal hoeveelheid: Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, Si), anionen (Cl⁻, HCO₃⁻, PO₄³⁺, SO₄²⁺) sporenmatalen (totaal hoeveelheid: Al, Br) nutriënten (NO₂⁻, NO₃⁻, NH₄⁺, TKN, DOC), en verstoppingsparameters (MFI, AOC, TSS).

6.3 Aanbevelingen voor onderzoek en het ontwikkelen van praktijkrichtlijnen

In Nederland lopen momenteel diverse initiatieven voor kleinschalige ondergrondse waterberging (ASR). Hierbij wordt gebruik gemaakt van water uit verschillende bronnen met verschillende kwaliteit zoals stedelijke runoff, oppervlaktewater, gezuiverd effluent van RWZI's en proceswater, daken van glastuinbouw, RO-concentraat en drinkwater. Probleem is dat er geen bruikbare ontwerprichtlijnen zijn voor het voorkomen van verstopping bij kleinschalige ASR-systemen met variabele belasting. Bestaande richtlijnen voor de waterkwaliteit zijn namelijk gebaseerd op ervaring in de drinkwatersector met permanente injectie bij een hoog debiet. Deze waarden zijn heel streng en daardoor te kostbaar voor het gros van de beoogde toepassingen. Bovendien is het de vraag of een minder uitgebreidere voorzuivering ook volstaat bij tijdelijke injecties of geringe debieten.

Om goede praktijkrichtlijnen voor waterkwaliteit en voorzuivering te ontwikkelen, is het wenselijk om langjarige verstoppingsmonitoring en waterkwaliteitsanalyses uit te voeren op de bestaande en nog aan te leggen systemen, bij voorkeur aangevuld met kolomproeven. Betrek hierbij bijvoorbeeld ook de drainagesystemen van het Spaarwater onderzoek. Door monitoringgegevens over verstopping en beheersmaatregelen van RDS-systemen periodiek te evalueren, kunnen op termijn meer "evidence based" praktijkrichtlijnen worden ontwikkeld. Aandachtspunt hierbij is om een nauwsluitender fysisch, chemisch en microbiologische karakterisatie van de daadwerkelijk bepalende processen uit te voeren via een uitgebreider meetnet. Het onderhavige rapport biedt daarvoor een basis.

Tot slot is meer wetenschappelijk inzicht wenselijk naar de risico's op extreem snelle verstopping door de vorming van gasbellen bij aanvoer van nutriëntenrijk water. Dit vergt deels herhaling van de metingen in Lieshout, aangevuld met respiratieproeven (metingen van gasvorming) met een micro-oxymax (zie onderstaand tekstkader). De in dit tekstkader genoemde parameters zijn (m.u.v. de gaspotentiëmetingen) ook wenselijk voor het vaststellen van risico of oorzaken van op verstopping.

Kader 6.2: Voorstel onderzoek t.b.v. risico op extreem snelle verstopping door vorming gasbellen

Waterkwaliteit: veldparameters(O₂, EGV, pH, temperatuur) macro-ionen (totaal hoeveelheid: Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, Si), anionen (Cl⁻, HCO₃⁻, PO₄³⁺, SO₄²⁺) sporenmetalen (totaal hoeveelheid: Al, Br) nutriënten (NO₂⁻, NO₃⁻, NH₄⁺, TKN, DOC), en verstoppingsparameters (MFI, AOC, TSS).

- Infiltratiewater
- Spuiwater (op moment dat drain afvoert)

Samenstelling verstoppingsmateriaal: XRF + LECO (CNS: organic + inorganic) + LOI (droogrest, 105 Celsius, 550 Celsius, 1100 Celsius) + NGS

- Verstoppingsmateriaal (schraapsel uit drain, aanvoerput)
- Gesuspendeerde stof die vrijkomt tijdens HD-reinigen (afvangen met planktonnet)
- Bodem rond drain
- Oorspronkelijke bodem

Gas-potentie vorming: micro-oxymax experimenten (gas: O₂, N₂, CO₂, CH₄, waterfase: ICP-MS, DOC):

- Leidingwater (referentie)
- infiltratiewater
- oorspronkelijke bodem + leidingwater
- oorspronkelijke bodem + infiltratiewater
- bodem rond drain + leidingwater
- bodem rond drain + infiltratiewater
- verstoppingsmateriaal + leidingwater
- verstoppingsmateriaal + infiltratiewater

7 Referenties

- Bartholomeus R., van den Eertwegh G., Simons G. (2015) Naar online en optimale sturing van Klimaat Adaptieve Drainage, *Stromingen* : vakblad voor hydrologen 24 (4): 27 - 42, 2015.
- Bartholomeus R.P., van Loon A., Huijgevoort M.H.J. (2018a) Hergebruik van industrieel restwater voor de watervoorziening van de landbouw: Praktijkproef subirrigatie met gezuiverd restwater van Bavaria, KWR, Nieuwegein.
- Bartholomeus R.P., van Loon A.H., van Huijgevoort M.H.J. (2018b) Hergebruik van industrieel restwater voor de watervoorziening van de landbouw - Praktijkproef subirrigatie met gezuiverd restwater van Bavaria. KWR 2018.089, KWR, Nieuwegein.
- Bonte M., Raat K.J., Dammers P., Stuyfzand P.J. (2009) Verstopping en regeneratie van infiltratieputten bij Waalsdorp. *H2O* 7:40-43.
- Boogaard F., Wentink R. (2011) (Inter) nationale ervaringen met ondergrondse infiltratievoorzieningen: een overzicht van 20 jaar monitoring in Nederland en een aanzet tot richtlijnen. *WT-afvalwater* 11(5):99-113.
- Capra A., Scicolone B. (2005) Assessing dripper clogging and filtering performance using municipal wastewater. *Irrigation and Drainage: The journal of the International Commission on Irrigation and Drainage* 54:S71-S79.
- Childs E., Youngs E. (1958) The nature of the drain channel as a factor in the design of a land-drainage system. *Journal of Soil Science* 9:316-331. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1958.tb01923.x>.
- De Wit J.A., Ritsema C.J., van Dam J.C., van den Eertwegh G.A.P.H., Bartholomeus R.P. (2022) Development of subsurface drainage systems: Discharge – retention – recharge. *Agricultural Water Management* 269:107677. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107677>.
- De Wit J.A., Van Huijgevoort M.H.J., Van Dam J.C., Van den Eertwegh G.A.P.H., Van Deijl D., Ritsema C.J., Bartholomeus R.P. (2024) Hydrological consequences of controlled drainage with subirrigation. *Journal of Hydrology* 628:130432. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130432>.
- De Wit J.A., Van Huijgevoort M.H.J., Van Deijl D., Van den Eertwegh G.A.P.H., Bartholomeus R.P. (2021) Regelbare drainage met subirrigatie en slimme stuwen - Veldproeven en modelanalyses in het zandgebied van Nederland voor een robuustere waterhuishouding op lokale en regionale schaal. KWR 2021.028, KWR, Nieuwegein.
- De Zwart A.H. (2007) Investigation of clogging processes in unconsolidated aquifers near water supply wells. PhD thesis, Ponaen & Looyen BV, Delft, Delft.
- Dierickx W. (1980) Electrolytic analogue study of the effect of openings and surrounds of various permeabilities on the performance of field drainage pipes, PhD thesis, Rijksinstituut voor Landbouwtechniek, Merelbeke (Belgium). pp. 230.
- Dubois M., Gilles K.A., Hamilton J.K., Rebers P.A., Smith F. (1956) Colorimetric Method for the Determination of Sugars and Related Substances *Analytical Chemistry* 28:350-356. DOI: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ac60111a017>.
- Eom H., Flimban S., Gurung A., Suk H., Kim Y., Kim Y.S., Jung S.P., Oh S.-E. (2020) Impact of carbon and nitrogen on bioclogging in a sand grain managed aquifer recharge (MAR). *Environmental Engineering Research* 25:841-846.
- Ernst L.F. (1962) Grondwaterstromingen in de verzadigde zone en hun berekening bij aanwezigheid van horizontale evenwijdige open leidingen, PUDOC Centrum voor Landbouwpublicaties en Landbouwdocumentatie, Wageningen, The Netherlands.
- Heijnen W.A.M., Van der Kooij D. (1990) Verstopping van infiltratieputten door bacteriegroei onder invloed van het AOC-gehalte van het water, *H2O*. pp. 142-149.
- Hellings A. (1965) Het onderzoek op het proefbedrijf Vredepeel, Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding.
- Hooghoudt S. (1940) Bijdragen tot de kennis van eenige natuurkundige grootheden van den grond: Algemeene beschouwing van het probleem van de detailontwatering en de infiltratie door middel van parallel loopende drains, greppels, slooten en kanalen, Algemeene Landsdrukkerij, 's Gravenhage, The Netherlands. pp. 515-707.
- Houben G., Treskatis C. (2007) *Water well rehabilitation and reconstruction* McGraw-Hill Education, New York.

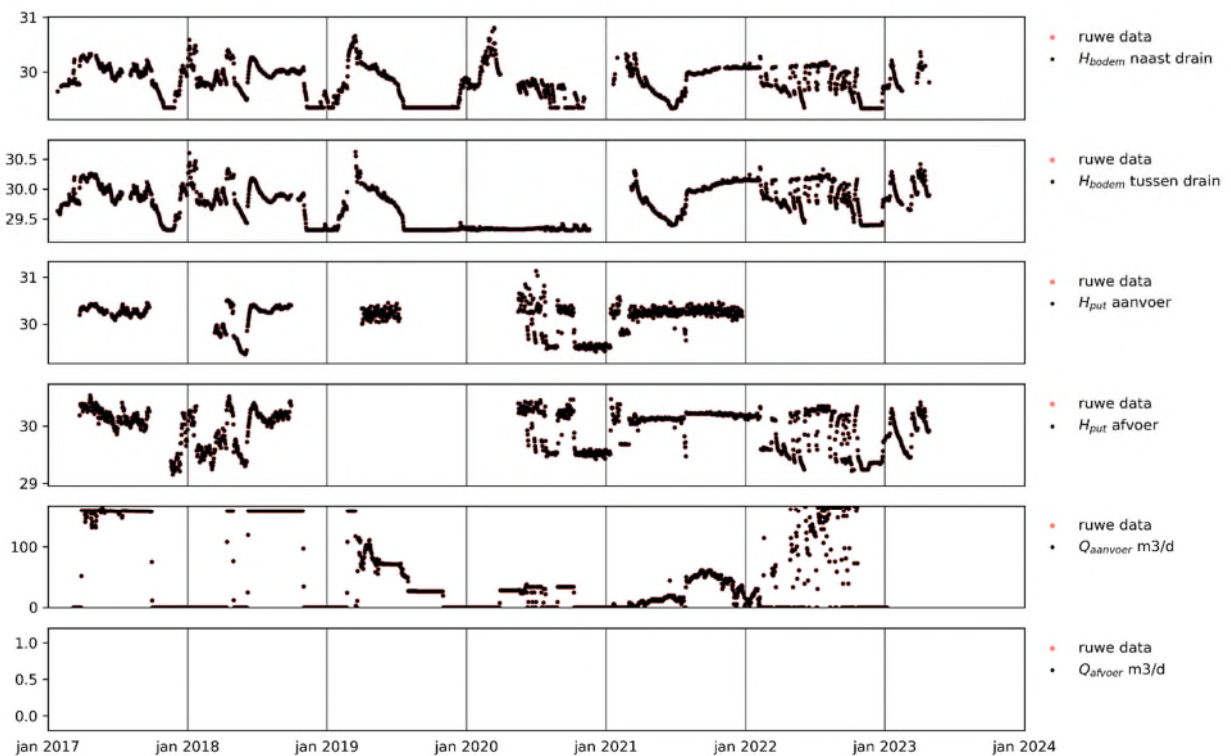
- Inskeep W.P., Bloom P.R. (1986) Kinetics of calcite precipitation in the presence of water-soluble organic ligands. *Soil Science Society of America Journal* 50:1167-1172.
- Jeong H.Y., Jun S.C., Cheon J.Y., Park M. (2018) A review on clogging mechanisms and managements in aquifer storage and recovery (ASR) applications. *Geosciences Journal* 22 (4):667-679. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12303-017-0073-x>.
- Kalisvaart C. (1958) Subirrigation in the Zuiderzee polders. , International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen.
- Kaufhold S., Houben G., Diemel J., Bertmer M., Dohrmann R. (2016) Characterization of aluminum phosphate nanoparticles formed in a water well. *Journal of Nanoparticle Research* 18:1-11.
- Lemmen G., Boogaard F., Schipper P., Wentink R. (2008) Maintenance of SUDS. , Proceedings of the 11th ICUD, Edinburgh, Scotland, UK.
- Martin R. (2013) Clogging issues associated with managed aquifer recharge methods, IAH Commission on Managing Aquifer Recharge, Australia. pp. 4-10.
- Massey F., Skaggs R., Sneed R. (1983) Energy and water requirements for subirrigation vs. sprinkler irrigation. *Transactions of the ASAE* 26:126-0133. DOI: 10.13031/2013.33888.
- Massop H., van der Gaast J., Kiestra E. (2005) De doorlatendheid van de bodem voor infiltratiedoeleinden; een gebiedsdekkende inventarisatie voor het Waterschap Peel en Maasvallei, Alterra.
- Olsthoorn T.N. (1982) Verstopping van persputten Keuringsinstituut voor Waterleiding artikelen. KIWA n.v., Nieuwegein.
- SIKB. (2019) Ontwerp, realisatie, beheer en onderhoud van het ondergrondse deel van installaties voor bodemenergie., Stichting Infrastructuur Kwaliteitsborging Bodembeheer, Gouda.
- Singh N., Kogan C., Chaudhary S., Rajagopalan K., LaHue G.T. (2022) Controlled drainage and subirrigation suitability in the United States: A meta-analysis of crop yield and soil moisture effects. *Vadose Zone Journal*:e20219.
- Smith M.C., Skaggs R.W., Parsons J.E. (1985) Subirrigation system control for water use efficiency. *Transactions of the ASAE* 28:489-0496.
- Stuyfzand P.J. (2017) Hydrogeochemical (HGC 2.4), for storage, management, control, correction and interpretation of water quality data in Excel® spread sheet, updated june 2017, KWR, Nieuwegein.
- Stuyfzand P.J., Nienhuis P., Antoniou A., Zuurbier K. (2012) Haalbaarheid van ondergrondse berging via A(S/T)R in Holland's kustduinen. KWR 2012.082, KWR, Nieuwegein.
- Stuyfzand P.J., Osma J. (2019) Clogging issues with aquifer storage and recovery of reclaimed water in the brackish werribee aquifer, Melbourne, Australia. *Water* 11:1807.
- Stuyfzand P.J.e.a. (2016) Vertrouwelijik document met nummer KWR 2016.102., KWR Water Research Institute, Nieuwegein.
- Stuyt L.C.P.M. (1992) The water acceptance of wrapped subsurface drains. PhD thesis, Wageningen University and Research, Wageningen, The Netherlands.
- Stuyt L.C.P.M. (1998) Schade aan onderlopende buisdrainage, DLO-Staring Centrum, Wageningen.
- Stuyt L.C.P.M. (2013) Regelbare drainage als schakel in toekomstbestendig waterbeheer: bundeling van resultaten van onderzoek, ervaringen en indrukken, opgedaan in binnen-en buitenland. Alterra-rapport 2370, Alterra Wageningen UR, Wageningen.
- TheEngineeringToolBox. (n.d.) <https://www.engineeringtoolbox.com>, accessed on 19 July 2023.
- Theis C.V. (1935) The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 16:519-524.
- Van Bakel J., Stuyt L.C.P.M. (2022) Gecontroleerde buisdrainage in regionale modellen: theorie, modellering en de kloof met de veldsituatie, Stromingen. pp. 73-89.
- van Bakel P.J.T., van den Eertwegh G.A.P.H., Massop H., Brandsma J. (2013) Klimaatadaptieve drainage - Landelijke geschiktheid van conventionele, samengestelde peilgestuurde, peilgestuurde drainage en KAD. Eindrapportage Werkpakket 3: Landelijke geschiktheid., Future Water, Wageningen.
- van Beek C., Cirkel D., de Jonge M., Hartog N. (2021) Concentration of iron (II) in fresh groundwater controlled by siderite, field evidence. *Aquatic Geochemistry* 27:49-61.
- van Beek C.G.E.M., Hofman-Caris C.H.M., Zweere G.J. (2020) Drinking water treatment and chemical well clogging by iron (II) oxidation and hydrous ferric oxide (HFO) precipitation. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA* 69:427-437.
- Van Beek C.G.E.M., Vasak L., Nieuwaal A., Stefess G.D., Bakker L.M.M. (1998) NOBIS 96-3-06 Ontwerp en onderhoud van infiltratie- en ontrekkingsmiddelen, CUR/NOBIS, Gouda.

- van den Eertwegh G.A.P.H., van Bakel P.J.T., Stuyt L., van Iersel A., Kuipers L., Talsma M., Droogers P. (2013) KlimaatAdaptieve Drainage - Een innovatieve methode om piekafvoeren en watertekorten te verminderen - Samenvatting resultaten Fase 2 'Onderzoek en Ontwikkeling', FutureWater, Wageningen.
- van der Schans M.L., van Lopik J.H., Meerkerk M.A., Wiggers de Vries D.F., Broers H.J.M. (2022) Putten en puttenvelden ten behoeve van drinkwater. Deel 4 Exploitatie. KWR PCD 13-4, KWR Water Research Institute, Nieuwegein.

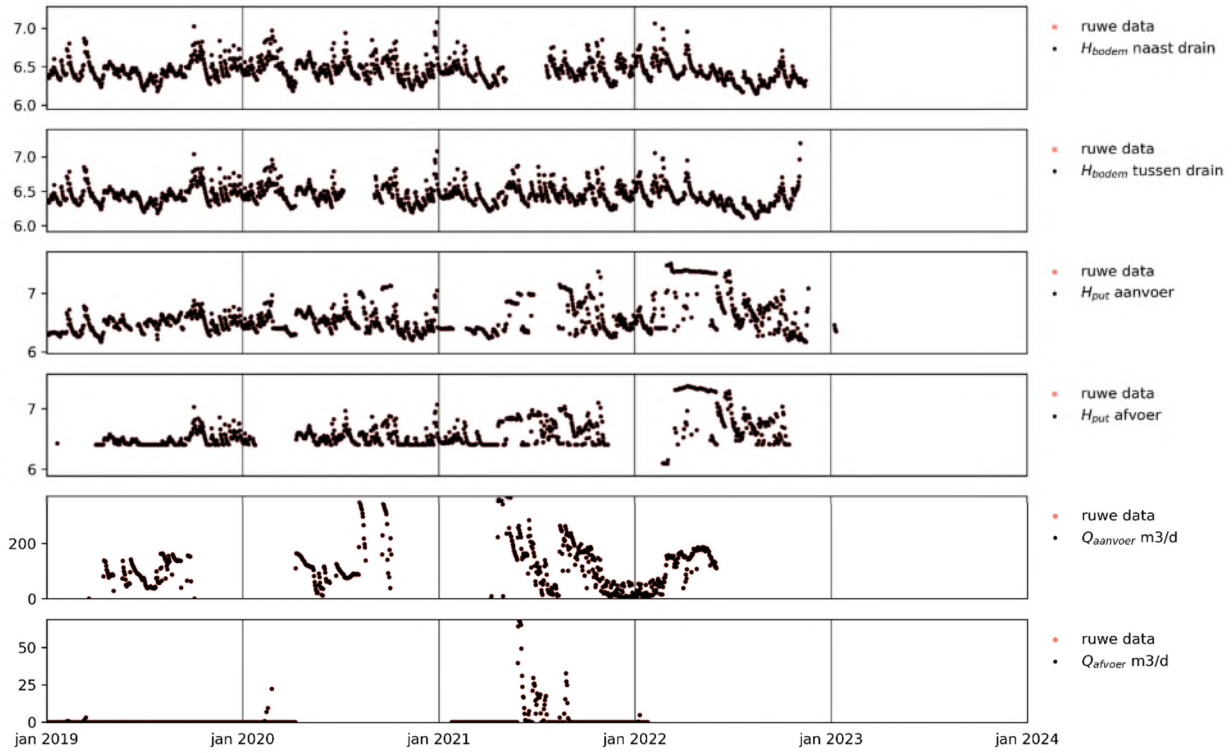
I Controle hydrologische gegevens

Deze bijlage bevat de grafieken waarin is weergegeven welke ruwe hydrologische gegevens (rode lijnen) plausibel zijn geacht voor toepassing in dit onderzoek (zwarte lijnen).

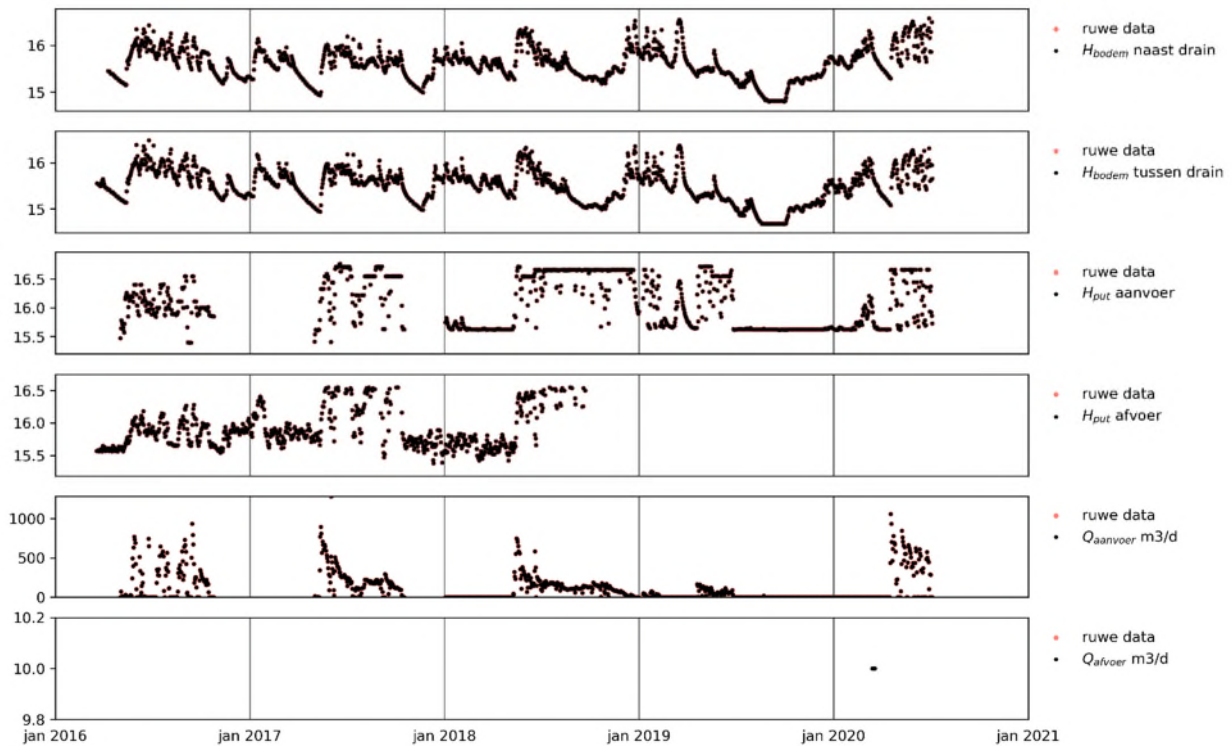
I.1 America



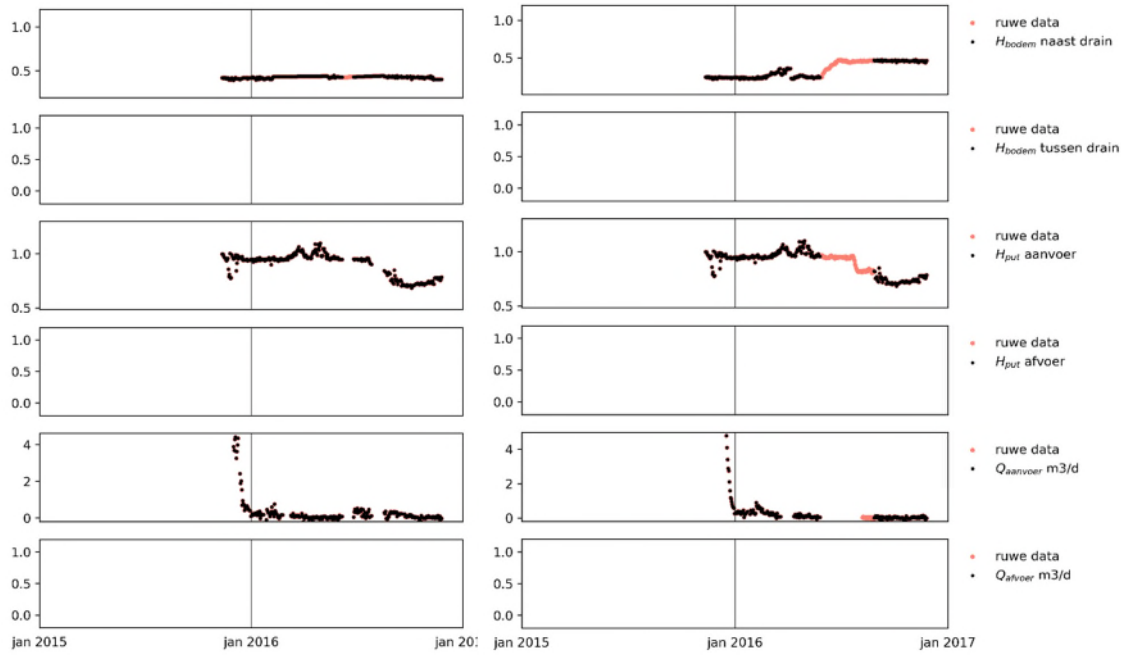
I.II Stegeren



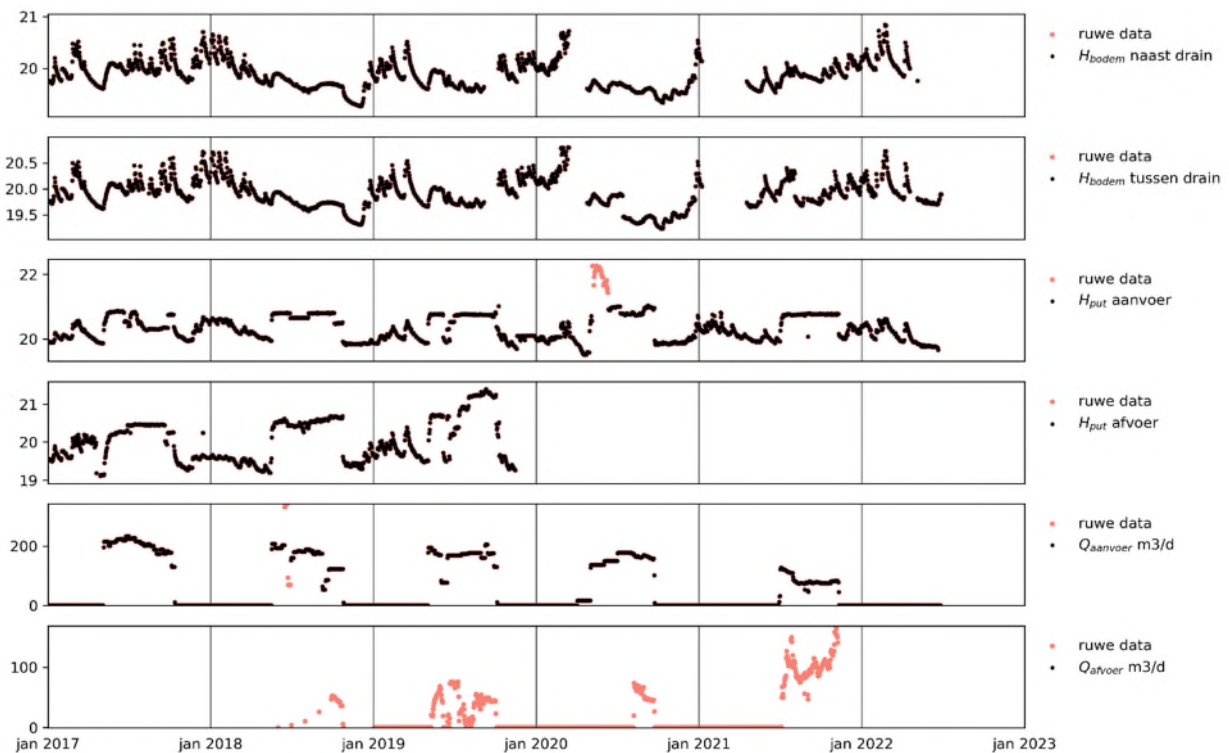
I.III Lieshout



I.IV Lieshout kolom 1 & 2



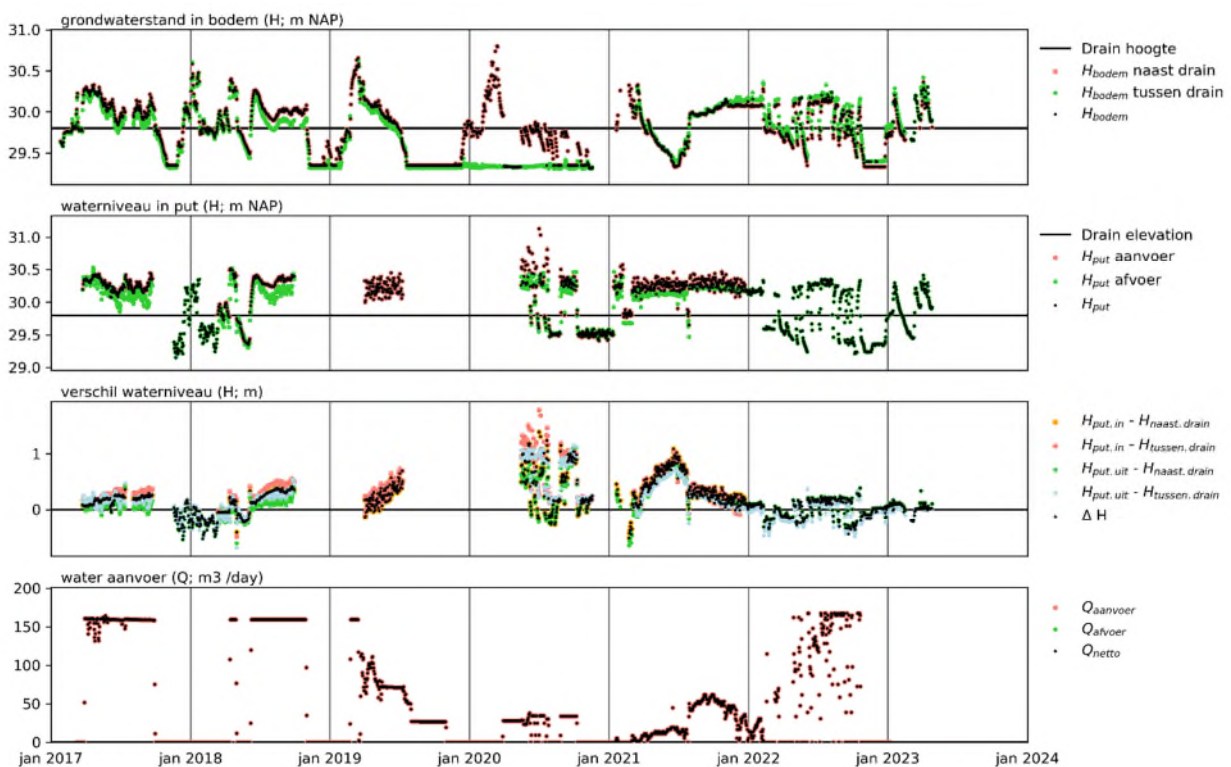
I.V Haaksbergen



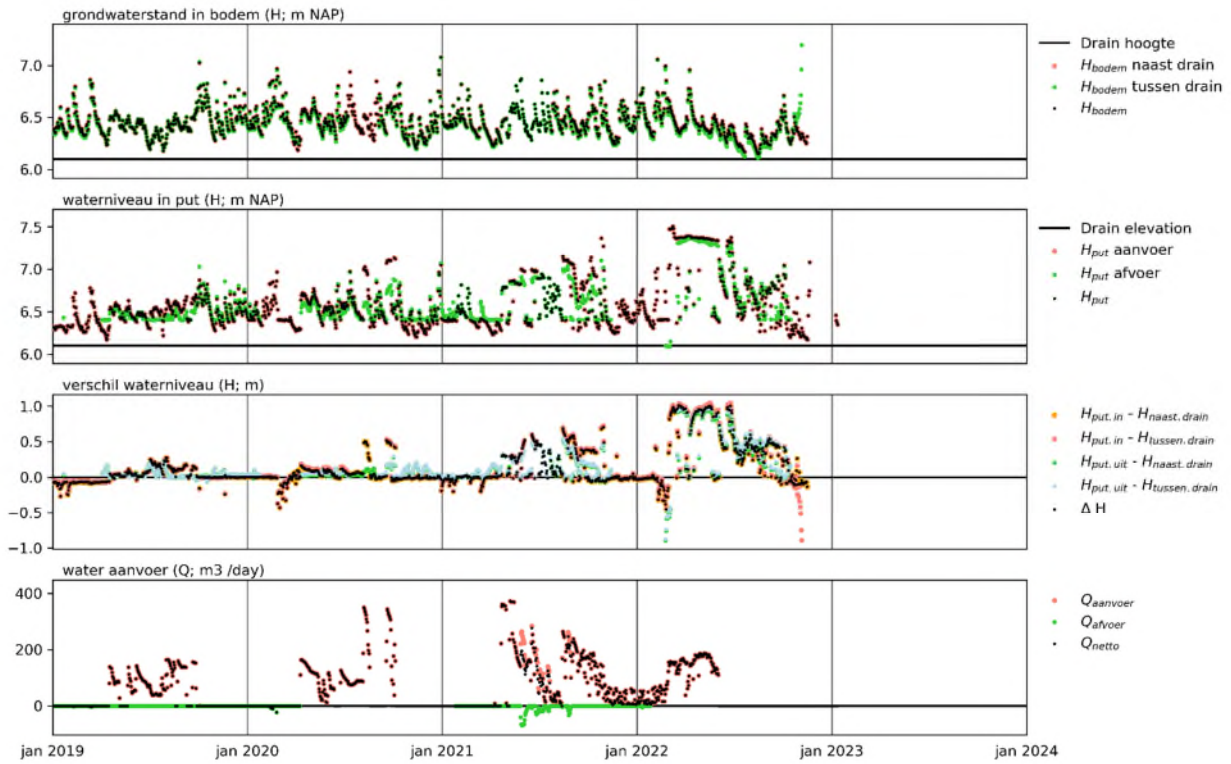
II Vergelijking stijghoogte- en debietmetingen

Deze bijlage toont voor elke veldproef een vergelijking van de metingen in aan- en afvoerput, peilbuis naast en tussen de drain.

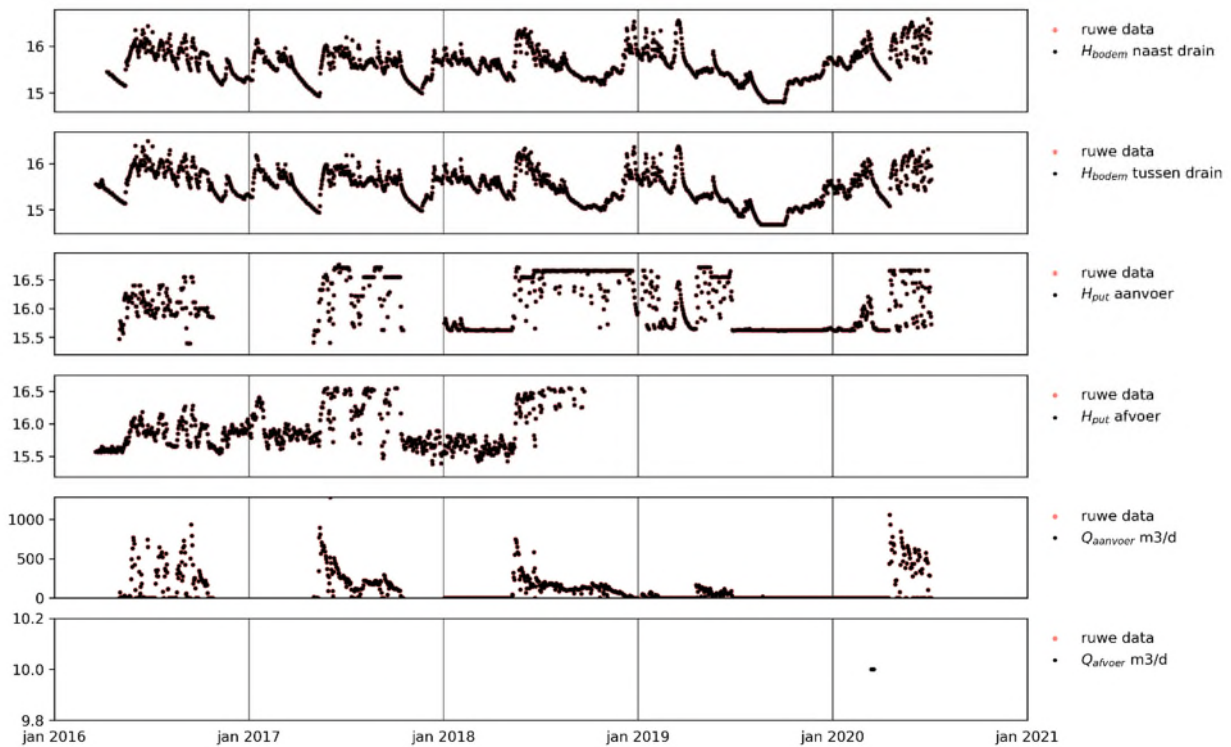
II.1 America



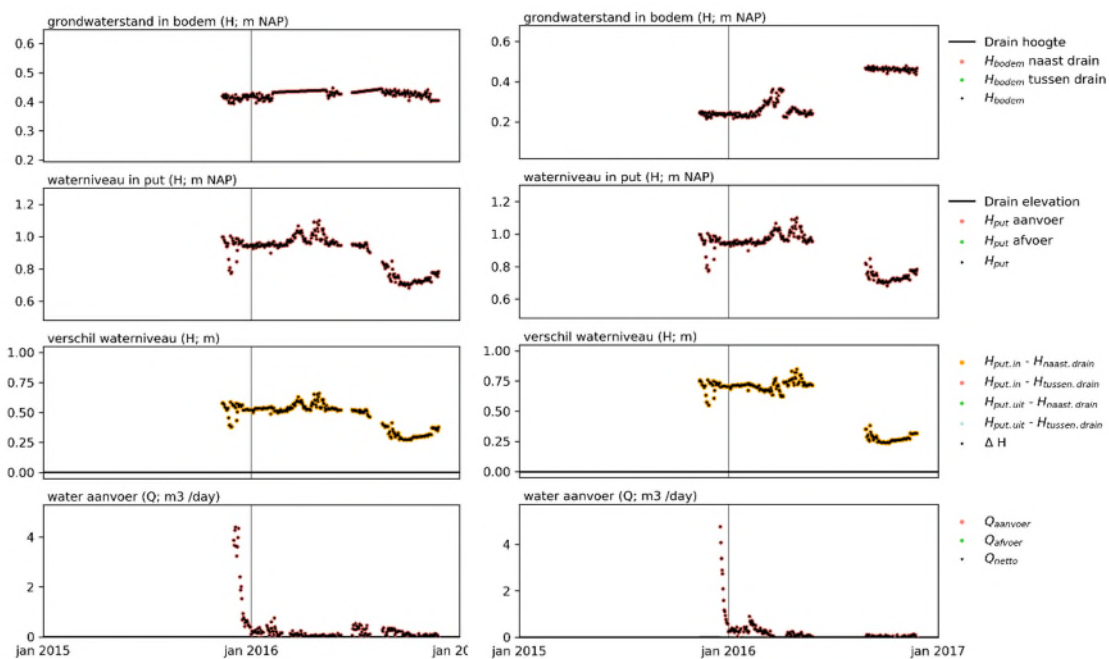
II.II Stegeren



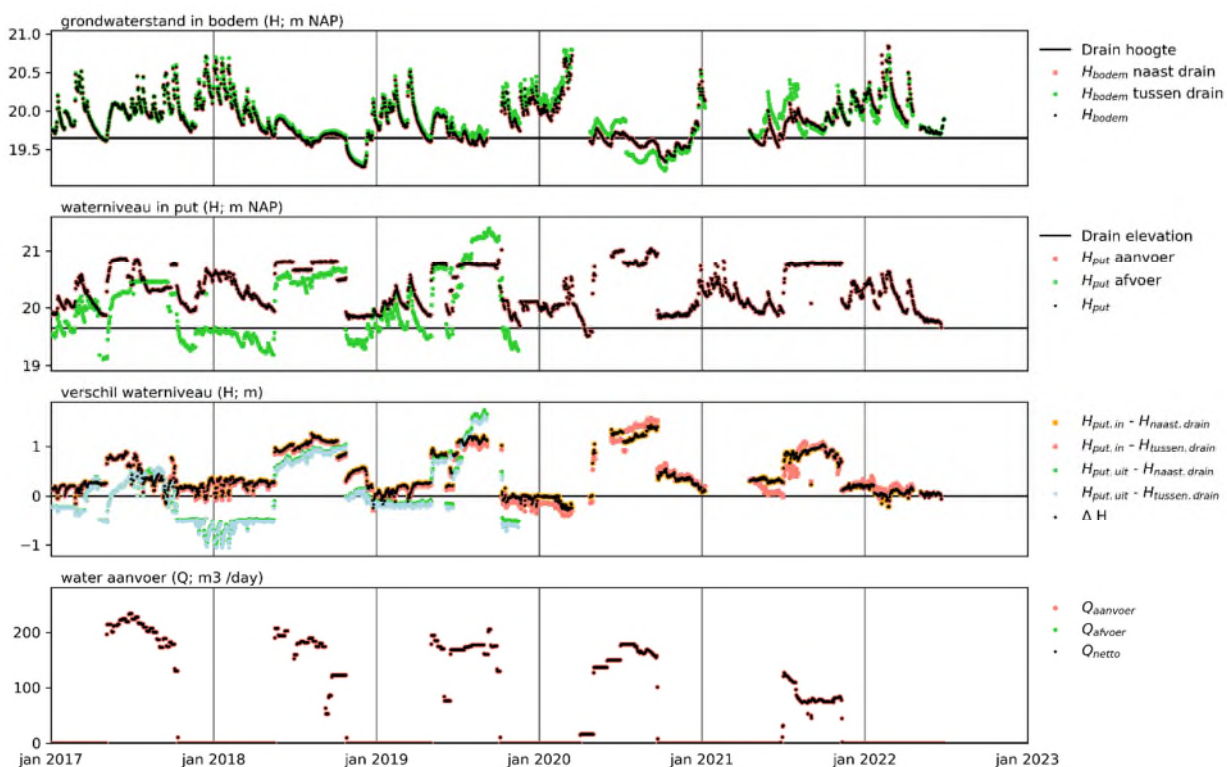
II.III Lieshout



II.IV Lieshout kolom 1 & 2



II.V Haaksbergen



III Veldmetingen en labanalyses waterkwaliteit

III.I Waterkwaliteit Effluent RWZI Lieshout

Concentratie in mg/l

Location	SamplingDate	pHfield	Cl	SO4	PO4	NO3	NO2	Nkjel	TSS	COD	BOD	Carbo- hydrates	ATP	AOC
EFF	02-01-14	8.48	124	60	1.12	0.79	0.041	1.9	18	31	3.2			
EFF	10-01-14	8.47	85	53	1.56	0.62	0.041	2.7	0	33	4.6			
EFF	19-01-14	8.36	69	39	1.67	0.71	0.035	2.6	0	30	3			
EFF	27-01-14	8.5	68	52	1.51	0.94	0.074	2.5	2	28	3.3			
EFF	04-02-14	8.42	63	58	1.72	0.88	0.051	1.9	0	32	3.4			
EFF	12-02-14	8.44	75	48	1.7	0.74	0.047	2.2	4	35	5			
EFF	17-02-14	8.36	92	44	1.95	0.85	0.068	2.2	6	34	7.6			
EFF	26-02-14	8.44	63	43	2	0.87	0.04	1.5	3	35	3.2			
EFF	06-03-14	8.37	71	34	1.65	0.77	0.042	2	3	33	7.3			
EFF	14-03-14	8.3	60	41	1.74	0.82	0.059	2.7	1	37	4.2			
EFF	28-03-14	8.4	105	51	1.76	1.28	0.07	2.8	1	38	4			
EFF	03-04-14	8.5	106	50	2.41	1.1	0.073	3.4	2	55	6.2			
EFF	09-04-14	8.39	104	79	1.96	0.84	0.082	2.6	6	32	7.3			
EFF	14-04-14	8.48	70	54	2.32	0.8	0.076	3.4	2	37	9.2			
EFF	22-04-14	8.47	75	50	2.29	0.92	0.063	2.9	0	33	4.1			
EFF	28-04-14	8.46	74	51	2.36	0.78	0.059	3.5	1	41	4.4			
EFF	01-05-14	8.46	93	41	1.43	1.18	0.071	1.7	1	33	4.4			
EFF	06-05-14	8.39	99	34	2.69	1.08	0.083	3.7	2	44	9			
EFF	14-05-14	8.58	93	40	0.89	1.82	0.255	3.3	1	38	8.9			
EFF	22-05-14	8.46	72	67	1.54	2.3	0.48	1.2	2	38	4.5			
EFF	10-06-14	8.56	100	49	1.97	1.5	0.145	2.1	19	38	4.5			
EFF	18-06-14	8.5	101	56	1.75	1.09	0.102	2.1	2	36	4.8			
EFF	26-06-14	8.5	96	55	1.51	0.79	0.045	1.8	4	35	9.7			
EFF	04-07-14	8.45	78	57	2.19	0.65	0.054	1.6	1	37	2.9			
EFF	13-07-14	8.43	68	41	1.79	0.65	0.04	2.2	8	37	2.6			
EFF	22-07-14	8.36	83	44	2.6	0.61	0.044	2	16	40	4.7			
EFF	30-07-14	8.52	85	38	1.81	0.46	0.028	1.3	1	38	5.2			
EFF	07-08-14	8.52	66	45	1.52	0.47	0.039	1.7	10	38	3.3			
EFF	15-08-14	8.53	80	38	1.68	0.64	0.038	1.7	12	35	2.7			
EFF	28-08-14	8.39	62	54	3.23	0.55	0.047	1.5	1	32	6.9			
EFF	03-09-14	8.05	58	41	2.08	0.8	0.118	1.6	9	39	5.3			
EFF	09-09-14	8.48	84	43	2	1.05	0.134	2.3	8	39	4.2			
EFF	15-09-14	8.42	55	61	1.61	0.71	0.049	1.5	2	41	6.7			
EFF	23-09-14	8.53	124	47	1.88	0.87	0.041	1.8	8	35	3.6			
EFF	01-10-14	8.41	86	56	1.9	0.78	0.049	1.6	1	45	4.6			
EFF	09-10-14	8.52	71	44	1.38	0.8	0.042	2	2	33	4.8			
EFF	17-10-14	8.59	59	42	1.7	0.87	0.046	0.9	3	36	2.9			
EFF	26-10-14	8.62	76	49	1.38	0.81	0.054	1.9	0	34	2.9			
EFF	04-11-14	8.33	62	42	1.62	0.82	0.07	2.7	4	46	6.4			
EFF	11-11-14	8.25	48	50	1.23	0.82	0.061	3.6	7	40	5.9			
EFF	19-11-14	8.23	60	43	1.86	0.98	0.084	0.8	1	44	3.8			
EFF	27-11-14	8.45	85	52	1.46	0.77	0.0583	1.6	5	38	6.5			
EFF	05-12-14	8.4	67	49	1.2	0.67	0.039	1.8	7	39	5.9			
EFF	11-12-14	8.34	64	42	1.17	0.84	0.057	1.7	18	45	6.6			
EFF	17-12-14	8.35	66	37	1.18	1.37	0.119	1.7	2	58	4.6			
EFF	23-12-14	8.38	63	41	0.93	1.63	0.129	2.1	1	51	5.4			
EFF	29-12-14	8.34	70	56	1.14	0.36	0.14	2.1	0	49	3.8			
EFF	26-06-19											5.6	0.43	0.13

III.II Waterkwaliteit RDS-systeem Lieshout

Concentratie in mg/L

Location	SamplingDate	pHfield	Cl	S	HCO3	P	NO3	NO2	NH4	Na	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Al	Br	SiO2	DOC
EFF	23-06-16		55.00	10.90	1082.05	0.53	0.71	0.23	0.08	390.15	86.23	77.41	15.26	0.23	0.22	0.01	0.97	16.04	16.20
EFF	20-09-16		56.00	11.30	1341.13	1.16	0.27	0.26	0.08	434.19	101.04	79.31	15.86	0.26	0.11	0.00	0.95	17.53	16.00
EFF	25-09-17		63.00	12.50	1148.09	0.62	5.73	0.18	0.06	421.96	75.52	78.96	13.78	0.35	0.06	0.01	1.56	16.28	15.30
K-uit	23-06-16		34.00	5.06	731.53	0.26	0.22	0.07	0.02	264.76	63.20	43.99	8.64	0.10	0.71	0.42	0.77	8.82	32.40
K-uit	20-09-16		54.00	10.40	1148.09	0.45	0.88	0.11	0.03	431.72	90.19	46.21	11.15	0.00	0.13	0.01	1.16	8.21	15.10
A4-D	23-06-16		33.00	13.00	429.26	0.33	35.71	1.20	0.39	186.72	23.17	36.37	14.46	0.19	0.10	0.18	0.74	5.97	44.00
A4-D	20-09-16		51.00	12.00	1132.85	0.85	0.10	0.26	0.08	413.36	78.50	46.46	11.68	0.27	0.40	0.09	1.06	4.45	33.50
A4-D	10-04-17		22.00	14.00	574.05	0.74	66.36	0.03	0.01	226.28	43.45	39.88	8.53	0.03	0.00	0.04	0.33	4.18	31.30
A4-D	25-09-17		70.00	11.90	1270.01	2.10	0.00	0.00	0.00	467.70	69.88	73.43	13.27	0.11	0.55	0.02	1.33	7.79	15.20
A4-T	23-06-16		4.00	8.85	109.73	0.75	43.87	0.10	0.03	46.09	9.25	23.73	10.19	1.59	0.23	1.40	0.13	7.77	46.90
A4-T	20-09-16		25.00	21.70	309.38	1.40	2.26	0.13	0.04	37.11	33.31	67.01	30.41	10.86	2.45	0.04	0.32	4.84	48.70
A4-T	10-04-17		3.00	1.22	151.89	2.08	0.00	0.03	0.01	5.27	13.10	21.22	11.27	8.00	0.76	0.06	0.09	3.37	15.70
A4-T	25-09-17		65.00	13.70	939.81	3.02	-0.12	0.06	0.02	325.12	20.31	47.68	17.61	14.07	0.87	0.09	1.68	5.49	83.40
A5-1	23-06-16	5.33	12.00	20.30	41.66	0.03	78.61	0.14	0.05	15.18	66.00	18.78	6.90	0.11	0.35	0.39	0.17	5.15	36.50
A5-1	20-09-16		24.00	16.00	57.40	0.03	84.06	0.04	0.01	15.00	105.09	8.69	3.47	0.12	0.36	0.22	0.36	4.01	27.70
A5-1	10-04-17		33.00	24.40	263.65	0.04	61.49	0.03	0.01	57.21	143.49	10.11	3.26	0.05	0.39	0.10	0.60	2.62	61.80
A5-1	25-09-17		59.00	15.90	955.05	0.13	0.28	0.02	0.01	394.64	99.24	10.41	2.91	0.12	0.22	0.06	1.30	1.42	51.50
A5-2	23-06-16	5.59	11.00	16.20	33.02	0.03	77.43	0.03	0.01	14.57	28.91	24.66	9.71	0.08	0.24	0.29	0.10	6.04	20.80
A5-2	20-09-16		22.00	20.00	120.91	0.06	69.91	0.03	0.01	16.22	75.18	17.90	7.27	0.01	0.38	0.12	0.32	6.13	22.90
A5-2	10-04-17		36.00	21.40	331.73	0.06	40.50	0.03	0.01	74.25	95.11	19.23	6.69	0.03	0.31	0.08	0.68	4.10	55.30
A5-2	25-09-17		58.00	16.60	807.73	0.15	2.76	0.02	0.01	282.45	85.39	17.84	5.35	0.05	0.26	0.03	1.35	2.65	47.00
A5-3	23-06-16	7.09	28.00	35.20	428.76	0.00	5.34	0.11	0.04	27.86	7.59	164.22	26.25	0.00	0.61	0.01	0.08	5.14	4.90
A5-3	20-09-16		31.00	33.50	475.49	0.03	3.22	0.07	0.02	27.43	7.68	163.99	26.52	0.47	0.85	0.00	0.09	4.88	5.50
A5-3	10-04-17		35.00	38.40	496.32	0.02	1.06	0.03	0.01	26.88	9.31	160.38	26.71	0.17	0.57	0.00	0.08	5.62	5.60
A5-3	25-09-17		41.00	36.50	473.46	0.00	0.54	0.02	0.01	28.04	6.75	160.44	25.64	0.37	0.66	0.00	0.11	5.69	5.30
B1	23-06-16	6.04	12.00	23.20	33.53	0.04	82.74	0.03	0.01	19.28	21.92	35.23	13.19	0.03	0.04	0.12	0.08	5.36	11.60
B1	20-09-16		9.00	24.60	23.37	0.08	78.75	0.04	0.01	17.52	20.64	31.79	11.06	0.34	0.31	0.17	0.10	6.35	12.60
B1	10-04-17		5.00	17.30	55.37	0.03	44.22	0.03	0.01	11.47	13.00	21.77	7.76	0.00	0.01	0.02	0.10	5.22	10.70

III.III Waterkwaliteit RDS-systemen

Meetresultaten veldparameters, algemene parameters, en anorganische macroparameters bij de monsters BAV (Bavaria, Effluent), HB (Haaksbergen, 24-uurs effluent monster), ST (Stegeren, oppervlaktewater), AM_in (America, aanvoerput, grondwater), AM_sloot (America, oppervlakte water). n.a. betekent niet geanalyseerd. * De parameter zuurstof ontbreekt i.v.m. een defecte zuurstofelectrode. ** Het gemiddelde van 3 metingen met bijbehorende standaard deviatie.

Meting		BAV	HB	ST	AM_in	AM_in	AM_diep	AM_out	AM_out	AM_sloot
Type water		Industrieel effluent	RWZI effluent	Oppervlakte water	Grondwater	Grondwater	Grondwater	Grondwater	Grondwater	Oppervlakte water
Veldparameter*										
Tijdstip monstername		08:45 uur, 02-09-2020	13:00 uur, 01-09-2020	09:30 uur, 01-09-2020	11:00 uur, 02-09-2020	13:40 uur, 26-08-2020	14:10 uur, 26-08-2020	14:30 uur, 26-08-2020	12:00 uur, 02-09-2020	12:30 uur, 02-09-2020
Temperatuur	[°C]	22.3	6.8	18.5	14.7				n.a.	17.2
Zuurgraad	pH	8.1	8.9	8.5	6.5				n.a.	8.9
Geleidbaarheid	[µS/cm]	2000	860	640	585				n.a.	726
Troebelheid	[NTU]	2.8	2.4	2.1	1.8				n.a.	2.3
MFI (s/L2)**		173.7 ± 39.4	n.a.	74.6 ± 16.7	2.0 ± 0.8				n.a.	178.8 ± 27.3
SDI+**		n.a.	n.a.	5.67 ± 0.03	3.38 ± 0.5				n.a.	n.a.
SDIv		n.a.	n.a.	n.a.	n.a.				n.a.	n.a.
SDI 5**		n.a.	n.a.	15.6 ± 0.8	6.45 ± 2.23				n.a.	n.a.
SDI 10**		n.a.	n.a.	8.19 ± 0.0	4.85				n.a.	n.a.
SDI 15**		n.a.	n.a.	5.66 ± 0.0	3.73				n.a.	n.a.
Algemene parameters (tijdens labmeting)										
Zuurgraad	pH	8.01	8.01	7.60	5.70				3.61	8.27
Temperatuur	T [°C]	17.7	19.1	17.9	18.2				17.3	18.3
Anorganische macroparameters										
Ammonium	NH ₄ [mg/l]	1.8	0.35	<0.05	3.1				n.a.	<0.05
Chloride	CL [mg/l]	75	120	79	53				n.a.	80
Nitraat	NO ₃ [mg/l]	<0.2	20	2.8	<0.2				n.a.	6.6
Nitriet	NO ₂ [mg/l]	0.14	0.70	0.042	<0.01				n.a.	0.024
Orthofosfaat (gefiltreerd)	P [mg/l]	0.15	0.75	<0.02	0.067				n.a.	0.10
Sulfaat	SO ₄ [mg/l]	37	67	57	180				n.a.	68
Waterstofcarbonaat	HCO ₃ [mg/l]	1300	200	190	34				<5	230
Parameters										

Ag [µg/L]	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Al [µg/L]	<1	27	9	25	27	663	234	36	11	
As [µg/L]	1	1.5	1	<0.5	0.5	1.2	0.8	<0.5	1.7	
Au [µg/L]	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
B [µg/L]	122	79	67	6	7	61	44	6	45	
Ba [µg/L]	16.65	9.78	46.77	82.19	84.05	82.19	70.87	85.42	25.16	
Be [µg/L]	<0.05	<0.05	<0.05	0.56	0.44	0.52	0.11	0.6	<0.05	
Bi [µg/L]	<0.05	0.17	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Br [µg/L]	950	102	122	69	74	105	89	79	238	
Ca [mg/l]	78.63	39.6	63.51	28.07	27.24	50.08	216.52	28.51	81.94	
Cd [µg/L]	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.41	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Ce [µg/L]	<0.01	0.02	0.04	0.81	0.45	34.81	0.74	0.89	<0.01	
Cl [mg/l]	56	94	61	39	40	39	43	43	64	
Co [µg/L]	<0.02	0.28	0.23	2.5	2.65	4.95	0.56	2.64	0.14	
Cr [µg/L]	44.7	1.4	<0.5	1.1	1.4	3.2	2.8	1	3.3	
Cs [µg/L]	0.12	0.11	<0.01	0.02	0.02	<0.01	0.11	0.02	0.4	
Cu [µg/L]	0.5	5.6	1.2	0.4	0.6	28.2	4.1	0.7	1.4	
Dy [µg/L]	<0.01	<0.01	<0.01	0.19	0.11	2.78	0.14	0.19	<0.01	
Er [µg/L]	0.01	<0.01	<0.01	0.16	0.11	1.39	0.15	0.14	<0.01	
Eu [µg/L]	<0.01	<0.01	<0.01	0.04	0.02	0.67	0.03	0.04	<0.01	
Fe [µg/L]	201	25	<10	4682	62070	269	5894	24840	<10	
Ga [µg/L]	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.1	0.05	<0.05	0.06	
Gd [µg/L]	<0.01	0.17	0.13	0.18	0.11	3.08	0.12	0.17	0.06	
Ge [µg/L]	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Hf [µg/L]	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.08	0.03	<0.02	<0.02	<0.02
Hg [µg/L]	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Ho [µg/L]	<0.01	<0.01	<0.01	0.05	0.03	0.51	0.04	0.05	<0.01	
In [µg/L]	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
K [mg/l]	124.32	17.18	8.58	3.65	3.68	15.93	7.8	3.59	5.97	
La [µg/L]	<0.01	0.01	0.03	0.4	0.25	16.73	0.36	0.46	<0.01	
Li [µg/L]	34.6	5	7.9	10.5	10.6	2.1	22.2	10.7	10	
Lu [µg/L]	<0.01	<0.01	<0.01	0.03	0.02	0.13	0.03	0.03	<0.01	
Mg [mg/l]	14.65	6.86	8.34	9.57	9.07	18.13	9.4	9.18	12.25	

Mn [µg/L]	125.58	34.82	47.37	853.84	852.87	210.19	455.51	902.71	1.25
Mo [µg/L]	1	8.6	1.8	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	3.2
Na [mg/l]	380.99	132.51	61.66	34.96	32.61	28.39	32.49	33.98	70.44
Nb [µg/L]	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.06	0.07	<0.01	<0.01
Nd [µg/L]	<0.01	0.02	0.02	0.48	0.27	15.63	0.41	0.5	<0.01
Ni [µg/L]	<0.2	1.7	1.3	1.6	1.9	15.6	0.3	2	0.8
P [µg/L]	689	1083	39	<10	28	130	159	<10	144
Pb [µg/L]	<0.2	4.5	<0.2	<0.2	<0.2	3	1.6	<0.2	<0.2
Pd [µg/L]	0.15	0.14	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.02
Pr [µg/L]	<0.01	<0.01	<0.01	0.1	0.05	4.19	0.09	0.1	<0.01
Pt [µg/L]	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Rb [µg/L]	36.14	14.27	5.69	5.41	5.52	18.46	22.04	5.47	7.23
Re [µg/L]	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.02
Rh [µg/L]	0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01
Ru [µg/L]	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
S [mg/l]	12	24	19	58	63	59	141	60	23
Sb [µg/L]	0.27	0.94	0.23	<0.05	<0.05	2.99	1.89	<0.05	0.46
Sc [µg/L]	<1	<1	<1	<1	<1	1	<1	<1	<1
Se [µg/L]	3.9	0.6	0.7	<0.5	<0.5	1.1	0.7	<0.5	1.5
Si [µg/L]	17798	5141	2245	8461	8089	4065	4357	8856	567
Sm [µg/L]	<0.02	<0.02	<0.02	0.07	0.02	2.53	0.05	0.09	<0.02
Sn [µg/L]	<0.05	0.29	<0.05	<0.05	<0.05	0.54	0.08	<0.05	<0.05
Sr [µg/L]	434.59	219.97	385.44	146.73	152.93	131.8	567.32	151.26	217.25
Ta [µg/L]	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
Tb [µg/L]	<0.01	<0.01	<0.01	0.03	0.02	0.48	0.02	0.03	<0.01
Te [µg/L]	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Th [µg/L]	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.28	0.07	<0.05	<0.05
Ti [µg/L]	<10	<10	<10	<10	<10	<10	11	<10	<10
Tl [µg/L]	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.06	<0.01	<0.01	0.02
Tm [µg/L]	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	0.02	0.17	0.02	0.03	<0.01
U [µg/L]	<0.02	<0.02	0.33	<0.02	<0.02	0.84	0.22	<0.02	0.57
V [µg/L]	3.4	1.2	1.2	0.2	0.8	7.7	3.1	<0.2	1.9
W [µg/L]	<0.02	0.09	0.02	<0.02	<0.02	0.02	0.05	<0.02	0.89

Y [$\mu\text{g/L}$]	0.05	0.03	0.05	1.74	1.08	20.02	1.02	1.69	0.02
Yb [$\mu\text{g/L}$]	0.02	<0.01	0.01	0.17	0.13	1	0.15	0.17	<0.01
Zn [$\mu\text{g/L}$]	2.8	34.7	1.2	1.9	2.3	69.3	21.7	1.9	3.2
Zr [$\mu\text{g/L}$]	0.37	0.07	0.04	0.12	0.28	3.25	1.61	0.05	<0.02

Opmerkingen bij de monsternamen en labanalyses

AOC analyse is ingezet, maar het water is te vervuild om een correcte analyse uit te voeren (na contact met Ank, 07/09/2020). Het monster van Bavaria en van America wordt voor een tweede keer ingezet. Als AOC niet gemeten kan bij Jeroen is dit vreemd, omdat het grondwater is dat schoon zou moeten zijn. Dus als de meting niet lukt, lijkt het erop dat bijvoorbeeld het maaiveld toch in verbinding staat met de put, waardoor er spul de put in komt. Daarnaast is het ook vreemd dat het monster bij Bavaria niet lukt, omdat dit vorige keer wel lukte. Misschien dat er voorafgaand aan de bemonstering een lozing is geweest, waardoor er meer bacteriën in het water zitten. Ruud gaat naar Bavaria bellen of er iets veranderd is bij de zuivering.

III.IV Waterkwaliteit Stegeren

Tabel 7-1: Samenstelling water in de Vecht, bij de aanvoerput van het proefperceel, direct bij de drain, tussen twee drains, bij de afvoerput en op het referentieperceel ondiep en diep.

Meting	KR_VECHT	KR_IN		KR_BD		KR_TD		KR_OUT	KR_REF_ONDIEP		KR_REF_DIEP
Type water	Oppervlakte water	Oppervlakte water		Grondwater		Grondwater		Grondwater	Grondwater		Grondwater
Veldparameter*											
Tijdstip monsternaam	17:00 uur, 05-06-2019	09:00 uur, 05-06-2019	09:30 uur, 01-09-2020	10:00 uur, 05-06-2019	11:00 uur, 01-09-2020	10:20 uur, 05-06-2019	11:30 uur, 01-09-2020	11:45 uur, 05-06-2019	11:00 uur, 05-06-2019	12:30 uur, 01-09-2020	13:00 uur, 01-09-2020
Parameters											
Ag [µg/L]	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Al [µg/L]	3	6	9	753	503	861	1852	29	13	60	21
As [µg/L]	1.5	0.9	1	1.2	0.9	1.2	1.4	6.5	11.5	12.2	4.2
Au [µg/L]	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
B [µg/L]	61	63	67	36	50	23	30	64	34	52	40
Ba [µg/L]	72.74	52.58	46.77	28.33	7.61	10.95	6.03	50.59	76.28	63.1	88.98
Be [µg/L]	<0.05	<0.05	<0.05	0.06	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.06	<0.05
Bi [µg/L]	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Br [µg/L]	115	128	122	105	108	90	137	141	106	76	81
Ca [mg/l]	68.58	66.24	63.51	29.18	30.03	33.75	18.69	66.39	43.97	36.71	85.04
Cd [µg/L]	<0.05	<0.05	<0.05	0.07	<0.05	0.06	0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Ce [µg/L]	0.02	0.02	0.04	1.56	0.98	1.79	3.46	0.18	1.42	1.6	0.48
Cl [mg/l]	51	57	61	40	48	29	18	52	45	36	15
Co [µg/L]	0.62	0.46	0.23	0.64	0.42	1.05	0.89	0.6	1.76	0.23	0.48
Cr [µg/L]	<0.5	0.8	<0.5	2.3	1.4	2.9	4.2	0.7	1.2	1.7	1.3
Cs [µg/L]	0.01	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Cu [µg/L]	1.3	2.4	1.2	11.3	5.7	21.8	29.4	0.6	1.6	2.3	1.2

Dy [µg/L]	<0.01	<0.01	<0.01	0.29	0.09	0.21	0.32	0.03	0.25	0.47	0.11
Er [µg/L]	<0.01	<0.01	<0.01	0.16	0.05	0.1	0.13	0.03	0.22	0.36	0.1
Eu [µg/L]	<0.01	<0.01	<0.01	0.06	0.04	0.06	0.11	<0.01	0.04	0.1	0.03
Fe [µg/L]	898	51	<10	96	67	190	277	1840	1156	1944	2638
Ga [µg/L]	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Gd [µg/L]	0.05	0.06	0.13	0.37	0.13	0.28	0.36	0.1	0.29	0.46	0.11
Ge [µg/L]	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Hf [µg/L]	<0.02	<0.02	<0.02	0.03	<0.02	0.08	0.07	<0.02	<0.02	0.02	<0.02
Hg [µg/L]	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Ho [µg/L]	<0.01	<0.01	<0.01	0.05	0.02	0.03	0.06	<0.01	0.05	0.11	0.02
In [µg/L]	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
K [mg/l]	10.12	10.78	8.58	7.35	7.54	3.49	2.73	8.16	10.55	10.68	7.9
La [µg/L]	<0.01	<0.01	0.03	0.77	0.47	0.84	1.6	0.08	0.59	0.59	0.23
Li [µg/L]	6.3	7.7	7.9	0.3	<0.1	0.2	<0.1	7.4	3	1.4	2.7
Lu [µg/L]	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	0.04	0.06	0.02
Mg [mg/l]	8.11	8.17	8.34	11.73	9.67	14.24	6.71	8.42	11.27	11.79	11.99
Mn [µg/L]	540.38	35.11	47.37	19.29	19.64	41.38	20.26	782.85	98.87	61.74	368.25
Mo [µg/L]	1.2	1.3	1.8	0.8	1.2	0.7	0.8	1.1	0.2	0.6	0.1
Na [mg/l]	52.85	57	61.66	42.62	55.1	27.02	41.73	50.76	42.15	33.04	18.43
Nb [µg/L]	<0.01	<0.01	<0.01	0.11	0.08	0.16	0.28	0.02	0.01	0.05	0.02
Nd [µg/L]	<0.01	0.01	0.02	1.11	0.45	1.04	1.57	0.11	0.93	1.14	0.34
Ni [µg/L]	1.8	2.9	1.3	3.2	0.8	2.3	5.1	1.3	16.6	5.9	5.1
P [µg/L]	108	62	39	162	38	61	97	301	40	1142	18
Pb [µg/L]	<0.2	<0.2	<0.2	0.4	0.5	1.8	2.7	<0.2	0.8	1	<0.2
Pd [µg/L]	0.02	0.01	<0.01	0.02	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	<0.01
Pr [µg/L]	<0.01	<0.01	<0.01	0.21	0.12	0.22	0.4	0.02	0.19	0.23	0.07
Pt [µg/L]	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Rb [µg/L]	5.42	6.64	5.69	3.27	6.32	1.53	1.25	5.07	1.46	6.04	0.76

Re [µg/L]	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Rh [µg/L]	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	0.01
Ru [µg/L]	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
S [mg/l]	17	19	19	16	17	14	10	12	11	10	10
Sb [µg/L]	0.18	0.31	0.23	1.49	0.86	1.56	1.77	0.19	0.67	0.19	0.19
Sc [µg/L]	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Se [µg/L]	0.5	0.6	0.7	1.1	0.9	4.2	1.8	0.9	0.7	0.7	0.7
Si [µg/L]	3270	1002	2245	2277	1603	2117	2552	3325	3711	2696	3757
Sm [µg/L]	<0.02	<0.02	<0.02	0.29	0.05	0.22	0.26	<0.02	0.22	0.25	0.04
Sn [µg/L]	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Sr [µg/L]	366.49	399.38	385.44	66.3	86.37	73.55	38.92	355.98	132.25	126.17	292.98
Ta [µg/L]	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
Tb [µg/L]	<0.01	<0.01	<0.01	0.04	0.02	0.02	0.06	<0.01	0.02	0.06	0.02
Te [µg/L]	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Th [µg/L]	<0.05	<0.05	<0.05	0.16	0.12	0.46	0.34	<0.05	<0.05	0.06	<0.05
Ti [µg/L]	<10	<10	<10	<10	<10	<10	15	<10	<10	<10	<10
Tl [µg/L]	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Tm [µg/L]	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	0.02	0.05	0.01
U [µg/L]	0.15	0.21	0.33	0.07	0.03	0.13	0.14	0.22	0.05	0.08	0.06
V [µg/L]	0.3	0.6	1.2	13.9	20.6	28	42	1.9	3	17.2	1.5
W [µg/L]	<0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.05	0.11	<0.02	0.06	0.03
Y [µg/L]	0.05	0.03	0.05	1.98	0.47	1.08	1.47	0.17	2	3.09	0.85
Yb [µg/L]	<0.01	<0.01	0.01	0.13	0.03	0.08	0.11	0.03	0.25	0.38	0.11
Zn [µg/L]	1.1	3.6	1.2	21.9	3.8	7.1	8.8	1.1	153	19.7	3
Zr [µg/L]	0.11	0.1	0.04	1.08	0.66	2.27	2.55	0.44	0.41	1.47	0.46

IV Metingen verstoppingsmateriaal

IV.I XRF analyses op verstoppingsmateriaal

(g/g)

Location	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Mn ₃ O ₄	P ₂ O ₅	PbO	SO ₃	SiO ₂	WO ₃	IC	OC	LOI450	LOI1025	LOI550	TC
AM_IN_avp	0.24	0.11	72.82	<0.02	0.04	<0.02	1.5	<0.02	3.25	2.68	<0.02	0.3	4.39	17.51	22.71		
AM_BD_MP	2	0.09	0.52	0.69	0.1	0.02	0.02	<0.02	0.02	94.79	0.24	0.018	0.24	0.71	0.95		
AM_TD_MP	2.14	0.12	0.36	0.74	0.11	0.02	0.02	<0.02	<0.02	94.52	0.18	0.024	0.33	0.82	1.12		
AM_IN_drain8	0.92	0.13	68	0.02	0.07	0.02	0.67	<0.02	5.22	1.44	0.03	0.2	4.96	22.1	25.58		
AM_PP_drain8	1.7	0.09	1.03	0.59	0.08	0.02	0.04	<0.02	0.07	93.2	0.48	0.033	0.71	1.76	2.19		
AM_BD_drain8	2.06	0.1	0.38	0.66	0.11	0.02	0.04	<0.02	0.02	94.27	0.18	0.024	0.54	1.26	1.59		
AM_TD_drain8	2.64	0.09	0.48	0.82	0.14	<0.02	0.02	<0.02	<0.02	94.08	0.06	0.015	0.13	0.6	1.06		
HB_IN_avp	0.43	3.94	0.75	0.31	0.19	0.13	1.28	<0.02	3.79	6.72	0.09	0.36	25.5	83.86	86.22		
HB_IN_drain	1.09	2.03	3.26	0.61	0.7	3.39	4.3	0.05	2.11	13.21	0.08	4.96	27.2	69.55	74.17		
HB_BD_MP	3.16	0.21	0.59	1.06	0.14	0.02	0.03	<0.02	<0.02	93.22	0.05	0.1	0.09	0.37	0.74		
HB_TD_MP	2.58	0.12	0.69	0.96	0.1	<0.02	0.03	<0.02	<0.02	93.69	0.26	0.016	0.24	0.65	0.96		
ST_BD_MP	2.41	0.14	0.34	0.87	0.1	0.02	0.02	<0.02	<0.02	94.75	0.02	0.013	0.15	0.42	0.71		
ST_TD_MP	2.44	0.15	0.33	0.85	0.09	0.02	<0.02	<0.02	<0.02	94.58	<0.02	0.012	0.14	0.41	0.88		
BAV_RP_xrf	1.39	7.5	5.94	0.48	0.43	1.85	4	<0.02	1.61	29.98	<0.02					45.3	20.6
BAV_Kolom	1.49	4.27	22.68	0.38	0.25	4.66	6.94	0	0.81	25.33	0.02					31.6	

IV.II Natchemische analyses op verstoppingsmateriaal

ICP (g/g) + other parameters (g/g)

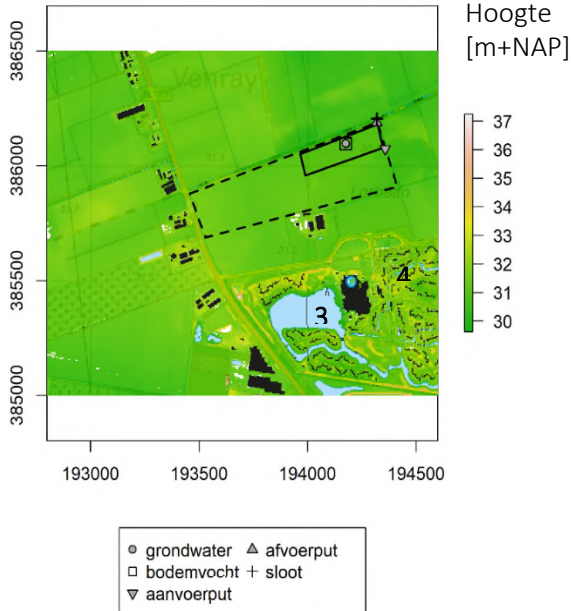
Location	Al	Ba	Ca	Co	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Mo	Na	Nb	Ni	P
RP_icp	5.5E-03		1.0E-01	2.5E-06	6.5E-05	5.5E-05	7.4E-02	4.4E-03	3.5E-03	2.6E-02	3.4E-06	1.0E-02		1.9E-05	3.1E-02
Bodem-D	5.6E-02		1.9E-02	1.3E-05	1.0E-04	1.3E-04	5.3E-02	5.8E-03	5.4E-03	5.3E-04	1.4E-06	1.0E-03		2.9E-05	4.9E-03
Bodem-T	5.2E-02		1.8E-02	2.0E-05	8.9E-05	1.6E-04	5.9E-02	7.5E-03	5.2E-03	1.3E-03	2.0E-06	1.2E-03		2.4E-05	8.9E-03
B1-Ref	4.4E-03		2.8E-04		1.7E-04	4.0E-06	3.4E-03	2.5E-04	2.8E-04		2.2E-04	2.9E-05		8.7E-06	2.9E-04
A4-D	3.2E-03		6.3E-04		6.4E-05	3.0E-06	3.1E-03	3.5E-04	2.8E-04		1.2E-04	1.4E-04		3.8E-06	4.2E-04
C1-Ref	3.0E-03		3.5E-04		2.2E-04	2.0E-06	3.2E-03	2.7E-04	2.9E-04		2.7E-05	3.2E-05		8.5E-06	8.5E-05
A3-D	2.5E-03		3.6E-04		1.5E-04	5.0E-06	3.8E-03	2.1E-04	2.0E-04		1.3E-04	1.4E-04		6.0E-06	4.5E-04
A4-T	1.8E-03		1.9E-04		1.5E-04	2.0E-06	2.4E-03	1.4E-04	2.3E-04		7.5E-05	3.1E-05		5.4E-06	1.2E-04
A1-D	2.7E-03		7.6E-04		9.9E-05	5.0E-06	3.6E-03	2.7E-04	2.9E-04		8.2E-05	1.4E-04		4.6E-06	4.0E-04
A6-D	2.4E-03		1.8E-04		3.6E-05	5.0E-06	4.5E-03	1.4E-04	2.0E-04		6.1E-05	1.7E-04		2.5E-06	4.1E-04
Kolom1-D	4.5E-03		1.1E-03		9.9E-06	1.0E-06	1.0E-03	4.0E-04	3.0E-04		1.9E-05	5.2E-05		1.4E-06	1.4E-04
Kolom1-T	4.2E-03		7.2E-04		7.2E-06	1.0E-06	1.1E-03	4.0E-04	2.9E-04		1.2E-05	8.7E-05		1.5E-06	8.0E-05
Kolom2-D	4.0E-03		7.1E-04		7.7E-06	1.0E-06	1.4E-03	3.9E-04	3.3E-04		1.5E-05	3.2E-05		2.1E-06	1.3E-04
Kolom2-T	3.8E-03		5.4E-04		6.2E-06	1.0E-06	1.4E-03	3.9E-04	3.3E-04		1.3E-05	6.3E-05		2.1E-06	8.1E-05
Location	Pb	S	Si	Sn	Sr	Ta	Ti	V	W	Zn	Zr	TOC	Carbo- hydrates	ATP	Aqua- Regia- Residue
RP_icp		1.2E-02						3.2E-05		6.0E-04		9.8E-03	1.3E-02	1.3E-03	3.8E-01
Bodem-D		3.7E-03						1.0E-04		4.0E-04		6.3E-03	1.1E-02	1.5E-04	7.0E-01
Bodem-T		1.2E-03						1.2E-04		3.0E-04		6.1E-03	1.2E-02	9.1E-05	6.5E-01
B1-Ref		7.6E-05								1.6E-05					
A4-D		4.3E-05								9.0E-06					
C1-Ref		4.4E-05								5.0E-06					
A3-D		6.5E-05								7.0E-06					
A4-T		1.2E-05								6.0E-06					
A1-D		4.0E-05								1.2E-05					
A6-D		7.1E-05								5.0E-06					
Kolom1-D		6.2E-05								3.0E-06					
Kolom1-T		3.5E-05								2.0E-06					
Kolom2-D		6.4E-05								5.0E-06					
Kolom2-T		2.9E-05								3.0E-06					

IV.III ATP en TOC analysis op verstoppingsmateriaal

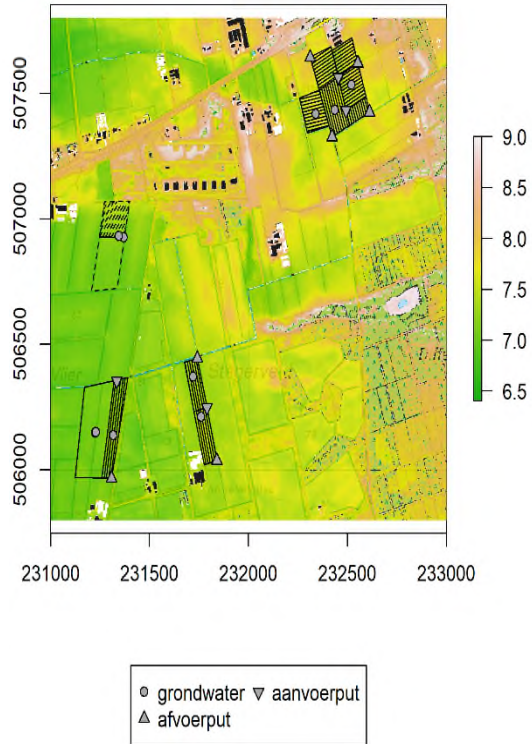
Bron van water	Monster omschrijving	ATP op korrelvormig nat materiaal [pg/gr mat.]	ATP op korrelvormig droog materiaal [pg/gr mat.]	TOC na salpeterzuurdestructie [g C/kg]
Grondwater (America) 28-07-2021	AM_IN_aanvoerput	9,19E+03	2,10E+04	10
	AM_TD_meetpunt	5,72E+03	6,76E+03	1.9
	AM_BD_meetpunt	4,48E+03	5,48E+03	1.3
	AM_BD_drain8	1,03E+04	1,26E+04	2.4
	AM_IN_drain8	5,28E+03	1,37E+04	7.5
	AM_TD_drain8	465	553	0.45
	AM_PP_drain8	4,88E+04	5,86E+04	2.7
RWZI effluent (Haaksbergen) 03-08-2021	HB_IN_drainbijvlotterput2	7,59E+05	2,62E+07	4.9
	HB_TD_meetpunt	7,85E+03	9,65E+03	0.70
	HB_BD_meetpunt	3,29E+03	4,03E+03	0.39
	HB_IN_aanvoerput	9,18E+05	1,04E+07	17
Oppervlaktewater (Stegeren) 11-08-2021	ST_TD_Meetpunt	3,95E+03	4,90E+03	0.60
	ST_BD_Meetpunt	6,36E+03	8,02E+03	0.66
		ATP [pg/ml]	ATP SD [pg/ml]	
	ST_Afvoerput	380	12	
	ST_Aanvoerput	230	0,59	

V Meetlocaties

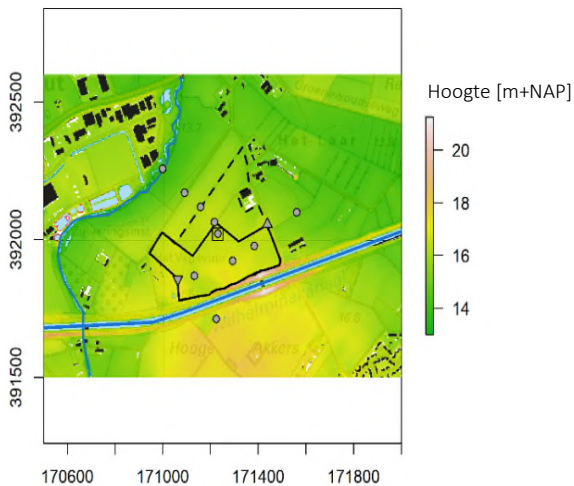
America



Stegeren



Lieshout



Haaksbergen

