



AquaConnect-onderzoekers tijdens een rondleiding bij infiltratievijvers in waterwingebied Epe. Daar infiltreert Vitens jaarlijks maximaal 6 miljoen kubieke meter schoon water uit de Klaarbeek en de Griff, om het na bodempassage weer terug te winnen.

AUTEURS



Thomas Wagner
(WUR)



Ruud Bartholomeus
(KWR, WUR)



Merijn Schriks
(Vitens)



Coert Petri
(Waterschap Vallei en Veluwe)

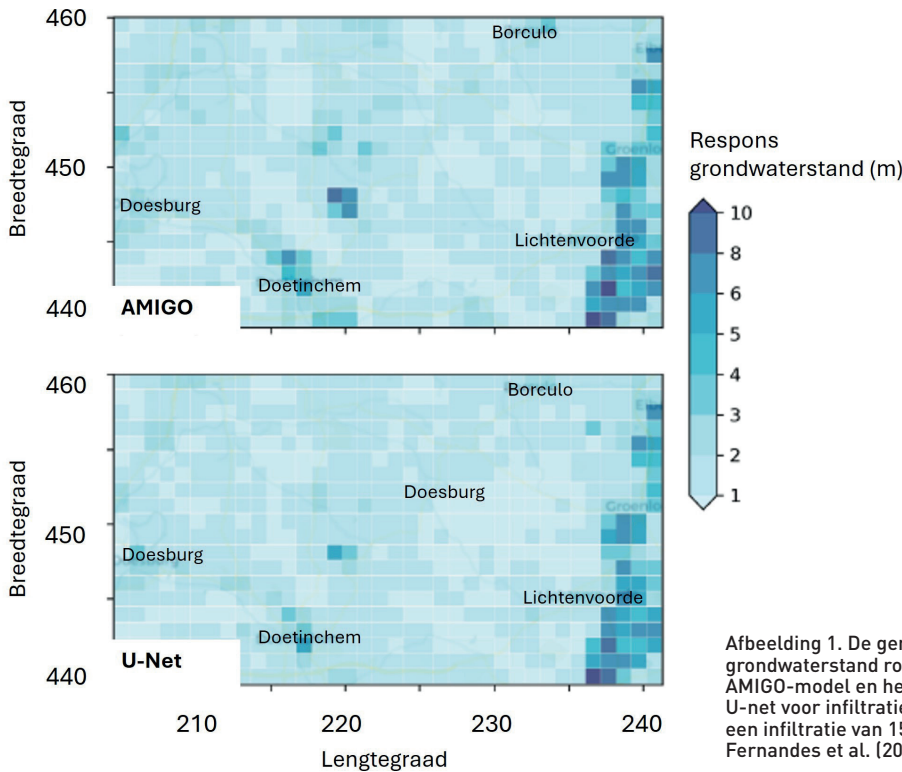


Sjoerd Kerstens
(Haskoning)

AQUACONNECT: NIEUWE INZICHTEN OVER RWZI-EFFLUENT ALS AANVULLING VAN GRONDWATERVOORRADEN OP DE HOGE ZANDGRONDEN

Op de hoge zandgronden waren er in de zeer droge zomers van 2018, 2019 en 2022 grote tekorten aan grondwater voor drinkwaterproductie, natuur en landbouw. Bij drinkwaterbedrijf Vitens en Waterschap Vallei en Veluwe rees de vraag of aanvulling van de grondwatervoorraad met rwzi-effluent een optie is. Binnen het programma AquaConnect is dit vanuit verschillende vakgebieden onderzocht. In dit artikel zetten wij nieuwe inzichten op een rij over het vinden van geschikte infiltratielocaties, aanwezigheid en verwijdering van microverontreinigingen en de perceptie van de consument.

In de zeer droge jaren 2018, 2019 en 2022 waren er tekorten in het hele watersysteem op de hoge zandgronden in zuid-, midden- en oost-Nederland – het bodemvocht, de beekafvoeren en het grondwater. Dit kwam doordat het watersysteem een intensief drainagesysteem heeft om surplus water snel af te voeren [1]. In 2021 is het programma AquaConnect begonnen met onderzoek naar sleuteltechnologieën die bijdragen aan de transitie naar een ander, circulair watersysteem: water langer vasthouden en hergebruik bevorderen om beter bestand te zijn tegen langdurige droogte. AquaConnect wordt gefinancierd door de NWO en 36 eindgebruikers uit de watersector (zie www.aquaconnect.nl), waaronder drinkwaterbedrijf Vitens en waterschap Vallei en Veluwe.



Afbeelding 1. De gemodelleerde respons van de grondwaterstand rondom Doetinchem door het AMIGO-model en het machine learning model U-net voor infiltratiegebieden van 1 km2 met een infiltratie van 15 mm/dag. Aangepast vanuit Fernandes et al. (2025) [2].

Bij extreme droogte en lage grondwaterstanden ontstaan operationele problemen. Vitens levert drinkwater aan consumenten en bedrijven in oost- en midden-Nederland. Meer dan 95% daarvan wordt geproduceerd uit grondwater. Waterschap Vallei en Veluwe is verantwoordelijk voor de waterhuishouding en afvalwaterzuivering op de zandgronden van de Veluwe en Gelderse Vallei. In het verleden was er voldoende schoon grondwater om aan de vraag te kunnen voldoen, nu zien beide organisaties verschillende uitdagingen op zich afkomen:

- een veranderend neerslagpatroon met meer extremen, meer neerslag in de winter en minder in de zomer, wanneer dit het meest nodig is. Bovendien neemt de intensiteit van de regenval toe, waardoor water vasthouden moeilijker wordt;
- een groeiende watervraag door consumenten, landbouw en industrie;
- toenemende (gemeten) vervuiling van grondwater door (organische) microverontreinigingen;
- strengere lozingsseisen voor rwzi-effluent door nieuwe wetgeving.

Binnen AquaConnect is aanvulling van grondwatervoorraden met rwzi-effluent als een oplossingsconcept geïdentificeerd om het watersysteem op de hoge zandgronden beter bestand te maken tegen droogte. Effluent wordt continu geproduceerd en op veel plaatsen wordt het nu geloosd op de grote waterlopen, terwijl dit water goed van pas kan komen om grondwatervoorraden

bij te vullen. De Veluwe bijvoorbeeld leent zich potentieel voor de actieve infiltratie en opslag van grote hoeveelheden zoet water. In AquaConnect zijn belangrijke nieuwe wetenschappelijke inzichten opgedaan over actieve infiltratie van rwzi-effluent (o.a. het vinden van geschikte infiltratielocaties), microverontreinigingen en de perceptie van de consument.

Geschikte infiltratielocaties

Valdrich Fernandes (WUR) heeft drie *machine learning* modellen (U-net, Attention U-net en encoder-decoder) getraind om snel en accuraat het effect van actieve infiltratie op het grondwaterniveau te voorspellen [2]. Dit deed hij door deze modellen te vergelijken met het grondwatermodel AMIGO van het Baakse Beek stroomgebied. AMIGO ofwel *Actueel Model Instrument Gelderland Oost* (v3.1) is in gebruik bij Waterschap Rijn en IJssel, Vitens en de provincie Gelderland. De machine learning modellen zijn getraind op basis van zes verschillende input-parameters: grondwaterdiepte (m), infiltratievolume (mm/dag), diepte onder de rivierbedding (m), drainageweerstand, weerstand van de aquitard (slecht doorlaatbare laag) en doorlaatbaarheid van de aquifer. Uiteindelijk leveren de modellen drie belangrijke inzichten m.b.t. de infiltratie: de respons van de grondwaterstand (m) (afbeelding 1), de ruimtelijke respons (km2), en de volumetrische respons (m3). De ruimtelijke respons betreft het gebied waarvoor een hogere grondwaterstand wordt voorspeld, de volumetrische respons betreft het totaal volume aan geïnfiltreerd water.

Microverontreiniging		Transformatieproduct	
Carbamazepine	37/39	Salicylzuur	6/9
Diclofenac	29/31	Carbamazepine 10,11-epoxide	9/9
Naproxen	22/29	Cotinine	6/9
Caffeine	26/28	4-acetamidoantipyrine	8/8
Sulfamethoxazole	26/28	4-(Formylamino)Antipyrine	8/8
Ibuprofen	22/25	Norcitalopram	7/8
Atenolol	23/25	Chloroform	5/7
Trimethoprim	25/25	Dichlorobromomethane	5/7
Gemfibrozil	22/24	Bromofom	6/7
Triclosan	17/22	N-Nitrosodimethylamine	7/7

Tabel 1. Links de Top 10 van meest gedetecteerde microverontreinigingen en rechts die van transformatieproducten in hergebruikt rwzi-effluent. Bij elke stof staat het aantal studies waarin de stof is aangetroffen/gemeten (totaal = 48) [3].

Van de drie machine-learning modellen bleek U-net het best in staat om de voorspelling van AMIGO te benaderen, maar wel 3000 maal sneller dan AMIGO (0.24 s tegen 1290 s) [2]. Met U-net kunnen hydrologen daardoor veel sneller infiltratiescenario's evalueren en geschikte locaties voor actieve infiltratie identificeren.

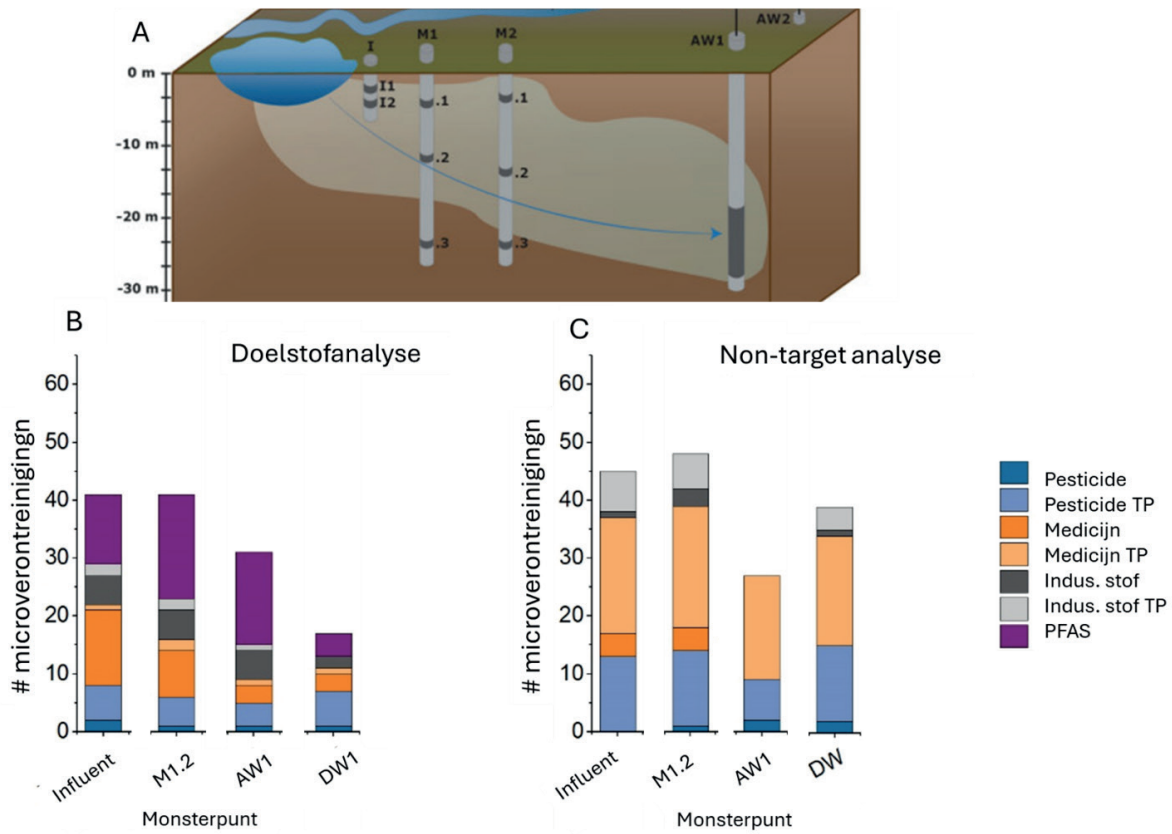
Microverontreinigingen

Bij actieve infiltratie is ook de waterkwaliteit belangrijk. Jan Specker (UvA) heeft een literatuurstudie uitgevoerd naar de risico's van microverontreinigingen bij verschillende types van hergebruik van rwzi-effluent (waaronder actieve infiltratie) [3]. Hij vond 48 publicaties uit de hele wereld over hergebruik van rwzi-effluent op veldschaal waarbij de aanwezigheid en verwijdering van microverontreinigingen is geanalyseerd. In deze 48 studies zijn 1051 verschillende microverontreinigingen gemeten. De top 10 van meest aangetroffen microverontreinigingen en transformatieproducten staat in tabel 1. Aan de hand van de concentraties van deze stoffen en de 'predicted no effect concentrations' (PNECs) uit de NORMAN database was het mogelijk om een risicoquotiënt te berekenen voor ecologische en humane risico's bij hergebruik van rwzi-effluent. Het resultaat was een lijst van microverontreinigingen met ecologische (PFOS,

chlorpyrifos, triclocarban, ethinylestradiol) en humane (PFOS, PFOA) risico's [3]. De studie van Jan laat zien dat het belangrijk is om voor hergebruik bepaalde microverontreinigingen te monitoren en/of te verwijderen. In de geanalyseerde 48 studies zijn verschillende technieken toegepast, variërend van natuurlijke nabehandeling (bodempassage) tot een dubbele omgekeerde osmosebarrière. Deze laatste heeft de hoogste verwijderingsefficiëntie [3]. Binnen AquaConnect is ook onderzoek gedaan naar technologische en natuurlijke verwijderingsmethodes, respectievelijk nanofiltratie en bodempassage.

Verwijdering bij bodempassage

Alessia Ore en Jill Soedarso (WUR) hebben de sorptie en biologische transformatie van microverontreinigingen tijdens bodempassage beter in beeld gebracht. In een nat (2017) en een droog (2019) jaar hebben ze met non-target screening het effluent van rwzi Haaksbergen voor en na ondergrondse irrigatie gemonitord op 89 microverontreinigingen en bijbehorende transformatieproducten. Anders dan bij doelstofanalyse ('target screening') worden bij *non-target screening* bekende en tot-dan-toe onbekende stoffen gemeten [4]. Uit deze screening bleek dat een groot deel van de gedetecteerde stoffen transfor-



Afbeelding 2. Gedetecteerde aantal microverontreinigingen en transformatieproducten (TP) over een bodempassage-traject (A) aan de hand van doelstofanalyse en non-target screening. B = doelstofanalyse; C = non-target screening. I = Infiltratiebuis; M = monitoringsbuis; A = Onttrekkingsbuis; DW = drinkwater. PFAS is alleen gemeten d.m.v. doelstofanalyse. Aangepast vanuit Ore et al. [2025b] [5].

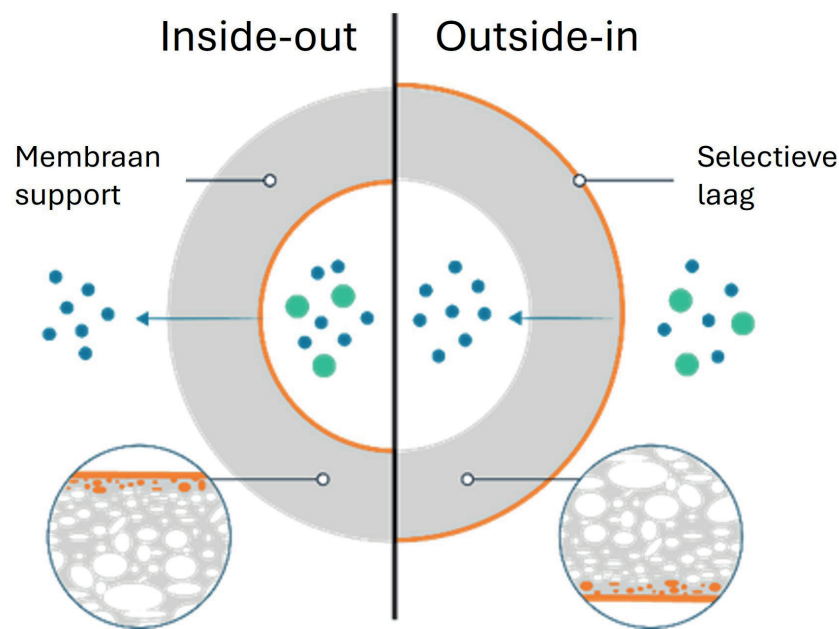
matieproducten waren (2017: 43 van de 56; 2019: 72 van de 90) [5]. Aanvullend is onderzoek gedaan naar de verwijdering en transformatie van microverontreinigingen bij bodempassage van oppervlaktewater (voor drinkwaterproductie, afbeelding 2a) [6]. Bijna twee derde van de microverontreinigingen in het infiltratiewater werd grotendeels (>90%) verwijderd. Echter, zeer persistente stoffen zoals kunstmatige zoetstoffen bereikten de onttrekkingspunten van grondwater. Ook bleek de non-target screening nieuwe stoffen aan te tonen (afbeelding 2c) die met doelstofanalyse buiten beeld waren gebleven. Daaronder waren ook in het watervoerend pakket gevormde transformatieproducten, wat aantoont dat de waargenomen verwijdering deels het gevolg is van biologische transformatie [6].

Jill bestudeerde de sorptie van 54 microverontreinigingen aan vijf zandige bodems; deze waren representatief voor natuurlijke zuiveringssystemen in Nederland. Doel was om stoffeigenschappen te identificeren die de sorptie van microverontreinigingen aan zandige bodems beïnvloeden, waarmee vervolgens een betere voorspelling van de uitspoeling naar het grondwater mogelijk wordt. Uit recente lab-experimenten blijkt dat 32 van de

54 geteste microverontreinigingen niet tot nauwelijks adsorberen aan de zandige bodems. Bij de 22 microverontreinigingen die wel goed adsorbeerden is bekeken of er een verband was met eigenschappen van die stoffen en karakteristieken van het bodemmateriaal zoals i) het organisch stofgehalte en ii) de capaciteit om positief geladen ionen te binden. Dat bleek niet het geval. Het verdere onderzoek van Jill richt zich op het vinden van de eigenschappen van bodem en microverontreinigingen die de sorptie wel kunnen verklaren om zo uitspoelingsrisico's modelmatig te kunnen voorspellen. Uit het onderzoek van Alessia en Jill blijkt dat biologische afbraak en sorptie niet alle microverontreinigingen verwijderen. Het combineren van bodempassage met membraaninfiltratie (bijvoorbeeld nanofiltratie) kan ervoor zorgen dat microverontreinigingen grondwaterbronnen niet verontreinigen.

Nanofiltratie

Tjerk Watt (UTwente) onderzocht nieuwe configuraties voor gecoate holle vezel nanofiltratie-membranen. Met deze nanofiltratie-membranen is het mogelijk om microverontreinigingen tegen te houden die niet worden verwijderd tijdens bodempassage. Daarnaast houden deze membranen divalente ionen tegen maar laten mo-



Afbeelding 3. Schematische weergave van een 'inside-out' en 'outside-in' nanofiltratie membraan

novalente ionen door, waardoor een minder zout concentraat wordt geproduceerd. Cruciaal daarbij is het aanbrengen van verschillende lagen van geladen coatings op een support-membraan. Normaliter wordt zo'n coating aan de binnenkant van de support-membraan aangebracht ('inside-out') (afbeelding 3). Tjerk heeft onderzocht of deze coating ook aan de buitenkant kan worden aangebracht ('outside-in'). Dit leidt tot een verhoogd actief oppervlak, waardoor smalere en sterkere vezels geproduceerd kunnen worden die in een kleinere module passen. Door zo de poreuze structuur van de support-membraan om te draaien is het gelukt om een holle vezel nanofiltratie-membraan te ontwikkelen met een vergelijkbare retentie als hetzelfde membraan met de coating aan de binnenkant [7]. Het actieve oppervlak van de membraan met de coating aan de buitenkant is echter 3,8 maal groter, waardoor een kleinere module nodig is om een bepaalde hoeveelheid water te behandelen.

De rol van consumenten

Als hergebruik van rwzi-effluent ter sprake komt, wordt de perceptie van de consument vaak aangehaald als een belangrijke barrière voor een transitie naar een circulair watersysteem. Uit een recent H2O-vakartikel blijkt

dat medewerkers van Vitens overwegend positief staan tegenover waterhergebruik [8], maar geldt dit ook voor de consument? Uit onderzoek van Noëlle Lasseur (WUR) onder 2000 respondenten is gebleken dat de meeste mensen niet principieel tegen hergebruik van behandeld afvalwater zijn, maar zelden actief betrokken worden bij ontwikkelingen. Dit gebrek aan betrokkenheid leidt tot verkeerde aannames over publieke perceptie. In haar onderzoek interviewde Noëlle ook waterprofessionals over de uitdagingen bij de transitie naar een circulaire watereconomie met decentrale waterzuivering en lokaal waterhergebruik. Twee belangrijke uitdagingen kwamen naar voren:

- 1. het concept waterzuivering bevindt zich in een systematische *lock-in*. Dit houdt in dat besluiten uit het verleden, grote investeringen in bestaande infrastructuur en institutionele structuren de transitie naar een nieuw (beleid)systeem in de weg staan. Het centrale waterzuiveringssysteem in Nederland ontmoedigt een transitie naar een circulair zuiveringssysteem waarin water lokaal of regionaal wordt opgeslagen en/of hergebruikt;
- 2. een gebrek aan juridische afdwingbaarheid. De ambitie van Nederland om in 2050 volledig circulair te zijn is juridisch niet bindend. Dit levert conflicten op

met juridisch bindende regelgeving als de Kaderrichtlijn Water. Noëlle concludeert dat een betere economische beoordeling van de positieve bijwerkingen van een circulair watersysteem, zoals een verbeterde lokale waterhuishouding, het transitieproces naar een circulair watersysteem kan versnellen.

Conclusies

Het AquaConnect onderzoeksprogramma levert belangrijke nieuwe inzichten op over actieve infiltratie van rwzi-effluent in het grondwatersysteem:

- lokaal gebruik van effluent kan rekenen op een positieve perceptie van consumenten, mits ze betrokken worden en het water aan de kwaliteitseisen voldoet.

BRONNEN

1. Van den Eertwegh et al. (2021). Droogte in zandgebieden van Zuid-, Midden- en Oost-Nederland: het verhaal – analyse van droogte 2018 en 2019 en bevindingen, <https://publications.deltares.nl/Wel2855.pdf>

2. Fernandes, V.J. et al. (2024). Machine learning for faster estimates of groundwater response to artificial aquifer recharge, *Journal of Hydrology* 637, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131418>

3. Specker, J.C. et al. (2025). Risk characterisation of chemical of emerging concern in real-life water reuse applications, *Environment International* 195, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.109226>

4. Mekel, N. et al. (2023). Suspect en non-target screening; wat is het verschil?, *H2O Vakartikelen*, <https://www.h2owaternetwerk.nl/h2o-podium/uitgelicht/suspect-en-non-target-screening-wat-is-het-verschil>

5. Ore, A. et al. (2025a). Presence of micropollutants and transformation products during subsurface irrigation with treated wastewater assessed by non-target screening analysis, *ES&T Water* 2, <https://doi.org/10.1021/acsestwater.4c00930>

6. Ore, A. et al. (2025b). Removal, transport and transformation of organic micropollutants in managed aquifer recharge: Insights from target and non-target analyses, *Water Research* 287, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.124409>

7. Watt, T.R. et al. (2024). Going from inner-skinned to outer-skinned polyelectrolyte multilayer based hollow-fiber nanofiltration membranes, *Advanced Materials Technologies*, <https://doi.org/10.1002/admt.202401832>

8. Barendse, K. et al. (2025). De acceptatie van waterhergebruik: een verkenning naar de betekenis voor medewerkers van een drinkwaterbedrijf, *H2O Vakartikelen*, <https://www.h2owaternetwerk.nl/vakartikelen/de-acceptatie-van-waterhergebruik-een-verkenning-naar-de-betekenis-voor-medewerkers-van-een-drinkwaterbedrijf>

Zowel Vitens als waterschap Vallei en Veluwe staan welwillend tegenover het verder onderzoeken van deze mogelijkheid;

- nieuwe machine-learning modellen zijn in staat om het effect van actieve infiltratie op het grondwater 3000 keer sneller te voorspellen dan de momenteel gebruikte grondwatermodellen;
- natuurlijke systemen kunnen worden ingezet voor verdere zuivering van rwzi-effluent, maar niet alle microverontreinigingen worden tijdens bodempassage verwijderd. Technologische behandeling (ozon, actief kool, nanofiltratie) is nodig om te voorkomen dat specifieke microverontreinigingen zich door het watersysteem verspreiden;
- gebruik van innovatieve screeningsmethoden (non-target screening, ook bioassays zijn een optie) op strategische locaties geeft extra inzicht in de waterkwaliteit en de vorming en aanwezigheid van transformatieproducten die nu buiten de gangbare monitoring vallen.

Actieve infiltratie van rwzi-effluent na verwijdering van microverontreinigingen met natuurlijke én technologische zuivering, gecombineerd met innovatieve monitoring geeft een nuttige toepassing aan het effluent. Het kan bijdragen aan de waterzekerheid op de hoge zandgronden in Nederland, maar ook daarbuiten.

SAMENVATTING

In de recente droge zomers daalde op de hoge zandgronden de grondwaterstand zodanig dat drinkwaterproductie, natuur en landbouw in de knel kwamen. Bij drinkwaterbedrijf Vitens en waterschap Vallei en Veluwe rees de vraag of infiltreren van rwzi-effluent een optie is. Binnen het programma AquaConnect is dit vanuit verschillende vakgebieden onderzocht. In dit artikel zetten wij nieuwe inzichten op een rij, over het vinden van geschikte infiltratielocaties, aanwezigheid en verwijdering van microverontreinigingen en de perceptie van de consument.