

BTO (S) 2016.008 | Juni 2016

BTO rapport

De rol van
deeltjesgebonden en
opgeloste organische
stoffen op de
biologische stabiliteit in
relatie tot
zuiveringsprocessen

BTO

De rol van deeltjesgebonden en opgeloste organische stoffen op de biologische stabiliteit in relatie tot zuiveringsprocessen

BTO 2016.008 | Juni 2016

Opdrachtnummer

400554/010/007

Projectmanager

Luc Hornstra/Michiel Hootsmans

Opdrachtgever

BTO - Thematisch onderzoek - Biologische activiteit

Kwaliteitsborger(s)

Paul van der Wielen

Auteur(s)

Emile Cornelissen

Verzonden aan

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten.
Het rapport is openbaar nadat de resultaten zijn gepubliceerd in een wetenschappelijk artikel.

Jaar van publicatie
2016

Meer informatie
Emile Cornelissen
T 538
E emile.cornelissen@kwrwater.nl

Keywords
membraanfiltratie, biologische stabiliteit, NOM

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

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



Watercycle
Research
Institute

BTO 16 | Januari 2016 © KWR

Alle rechten voorbehouden.

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

BTO Managementsamenvatting

Biologische stabiliteit van (drink)water vooral bepaald door deeltjesgebonden organische stoffen

Auteur Dr.ir. Emile Cornelissen

Eindstandige ultrafiltratie is een robuuste zuiveringsstrategie om de biologische stabiliteit van behandeld water na zuivering te verbeteren. Dat blijkt uit experimenteel onderzoek waarin is aangetoond dat verwijdering van deeltjesgebonden organische stoffen de voornaamste rol spelen in verbetering van de biologische stabiliteit. Gekoppeld aan biologische meetmethoden is op twee locaties – Berenplaat (Evides) en Spannenburg (Vitens) – in relatie tot de betreffende zuiveringsprocessen onderzocht wat het effect is van verwijdering van deeltjesgebonden en opgeloste organische stoffen op de biologische stabiliteit van het afgeleverde water. Naast eindstandige ultrafiltratie blijkt op grond van de resultaten dat de groeipotentie verder kan worden verbeterd met combinaties van adsorptieve, oxidatieve en verwijderingsprocessen, omdat de opgeloste organische stoffen de biologische stabiliteit ook negatief beïnvloeden. Voor een optimale verbetering van de biologische stabiliteit lijkt een vergaande verwijdering van deeltjesgebonden en opgeloste organische stoffen met volstroom hogedruk-membraanfiltratie (nanofiltratie of omgekeerde osmose) een zeer interessante route.



Eindstandige ultrafiltratiemembranen voor verwijdering van deeltjesgebonden organische stoffen in behandeld water

Belang: opheldering rol deeltjesgebonden en opgeloste stoffen op biologische stabiliteit

Zuiveringsprocessen hebben verschillende invloeden op de biologische stabiliteit van water. In Nederland wordt de biologische stabiliteit in de drinkwaterzuivering zoveel mogelijk verbeterd. Van deeltjesgebonden stoffen en opgeloste organische stoffen is onbekend welke van de twee een sterkere invloed heeft op de biologische stabiliteit. Ook is onduidelijk of deze aspecten afhankelijk zijn van het specifieke watertype. In dit project is onderzocht wat de rol is van deeltjesgebonden en opgeloste organische stoffen op de biologische stabiliteit van het afgeleverde water in relatie tot de toegepaste zuiveringsprocessen.

Aanpak: systematisch onderzoek naar zuiveringsprocessen

In de periode 2011-2015 is de rol van deeltjesgebonden en opgeloste organische stoffen op de biologische stabiliteit systematisch bestudeerd voor verschillende zuiveringsprocessen op twee locaties: Berenplaat (Evides) en Spannenburg (Vitens). De bestudeerde zuiveringsprocessen zijn: actieve-koolfiltratie (AKF), zandfiltratie (ZF), ionenwisseling (IEX) en membraanfiltratie (zowel microfiltratie (MF) als ultrafiltratie (UF)). Verandering in de biologische stabiliteit voor en na behandeling van de bestudeerde zuiveringsprocessen werd bepaald aan de hand van verschillende biologische meetmethoden, gericht op de groeipotentie van en de aanwezige biomassa in het water.

Resultaten: deeltjes-gebonden organische stoffen bepalen de biologische stabiliteit

Na MF en vooral na UF vindt een sterke verbetering plaats van de biologische stabiliteit. Dit is gerelateerd

aan een sterke vermindering van deeltjesgebonden organische stoffen en een geringe vermindering van opgeloste organische stoffen. Een mindere, doch significante verbetering van de biologische stabiliteit treedt op na AKF en IEX, gerelateerd aan een vermindering van deeltjesgebonden en opgeloste organische stoffen. ZF lijkt beter in staat om groeibevorderende stoffen te reduceren dan AKF/IEX, wat mogelijk gerelateerd is aan de rol van ijzer(verwijdering) in relatie tot verbetering van de biologische stabiliteit.

Implementatie: eindstandig MF/UF is een robuuste zuiveringsstrategie

Voor verbetering van de biologische stabiliteit door vermindering van deeltjesgebonden organische stoffen is eindstandige UF een robuuste zuiveringsstrategie. De groeipotentie van water kan verder worden verbeterd door combinaties van adsorptieve, oxidatieve en verwijderingsprocessen om deeltjesgebonden en opgeloste organische stoffen in het water te reduceren. De resultaten zullen afhankelijk zijn van de locatie en het seizoen. Vergaande verwijdering van deeltjesgebonden en opgeloste organische stoffen met volstroom hogedruk-membraanfiltratie (NF/RO) lijkt een interessante route om biologisch stabiel drinkwater te produceren.

Rapport

Dit onderzoek is beschreven in rapport *De rol van deeltjesgebonden en opgeloste organische stoffen op de biologische stabiliteit in relatie tot zuiveringsprocessen* (BTO-2016.008)

Jaar van publicatie
2016

Meer informatie

Dr.ir.Emile Cornelissen
T 0031 30 6069 538
E kirsten.baken@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

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

Keywords Biologische Stabiliteit,
Drinkwaterzuivering



BTO 2016.008 | Januari 2016 © KWR

Alle rechten voorbehouden.

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

Voorwoord

Zuiveringsprocessen zijn onder andere ingericht om biologische stabiel drinkwater te produceren, zodat groei van ongewenste organismen zoveel mogelijk wordt beperkt. De onderzoeksvraag van de hier beschreven studie was of de biologische stabiliteit voornamelijk negatief wordt beïnvloed door deeltjes of opgeloste stoffen. Met deze kennis kan gericht worden gezocht naar effectieve (combinaties van) zuiveringsprocessen. In de afgelopen jaren (2011 – 2015) zijn verschillende onderzoeken uitgevoerd binnen de TG Biologische Stabiliteit (2011-2012) en TG Biologische Activiteit (2013-2015) naar de rol van deeltjesgebonden en opgeloste organische stoffen op de biologische stabiliteit van het reinwater met behulp van de diagnostool.

Er zijn drie uitgebreide rapporten geschreven over de uitkomsten van deze onderzoeken over (1) een vergelijking tussen actiefkoolfiltratie, ionenwisseling en ultrafiltratie (BTO 2012.030), (2) de bedrijfsvoering van actiefkoolfiltratie en zandfiltratie (BTO 2014.050) en (3) verschillen tussen micro- en ultrafiltratie (BTO 2015.218). Allen in relatie tot een verbetering van de biologische stabiliteit in functie van deeltjes en opgeloste stoffen verwijdering. In het hier beschreven rapport worden de uitkomsten van de drie rapporten op hoofdlijnen gepresenteerd, en wordt voor gedetailleerde informatie en resultaten verwezen naar de voorgaande rapporten.

Dit onderzoek zou nooit tot stand hebben kunnen komen zonder de hulp en advies van verschillende collega's in de bedrijfstak, hieronder vermeld met naam (en alfabetisch) op bedrijfsnaam.

- Rinnert Schurer (Evides)
- Jan Bahlman (Evides)
- Wolter Siegers (KWR)
- Wim Hijnen (KWR)
- Sidney Meijering (KWR)
- Harry van Wegen (KWR)
- Jens Potreck (Pentair)
- Remon Dekker (Pentair)
- Peter Sjoerdsma (Vitens)
- Daan Frederiksz (Vitens)
- Geo Bakker (Vitens)
- Leden TG Biologische Stabiliteit (2011-2012)
- Leden TG Biologische Activiteit (2013-2015)

Het optreden en begrijpen van biologische stabiliteit is een uitdagend en inspirerend onderwerp, dat zeer complex en locatiespecifiek is, waardoor het nog altijd niet volledig wordt begrepen. Wij hopen dat dit rapport een klein steentje kan bijdragen aan het vergroten van de kennis over de rol van deeltjes en opgeloste stoffen op de biologische stabiliteit.

Emile Cornelissen en Paul van der Wielen

7 juni 2016

Samenvatting

De Nederlandse drinkwaterzuivering is ingericht op een vergaande verwijdering van micro-organismen en microbiologisch afbreekbare stoffen zodat biologisch stabiel drinkwater wordt verkregen waardoor de biologische activiteit van het geproduceerd water in het distributiesysteem zoveel mogelijk wordt beperkt. Zuiveringsprocessen kunnen verschillende invloeden hebben op de biologische stabiliteit van het water, naar gelang de gebruikte techniek. Verder is het onduidelijk welk onderdeel, deeltjesgebonden of opgeloste organische stoffen, een sterkere invloed heeft op de biologische stabiliteit van het water en of deze aspecten afhankelijk zijn van het specifieke watertype. In dit project wordt de rol van deeltjesgebonden en opgeloste organische stoffen onderzocht op de biologische stabiliteit van het afgeleverde water op geselecteerde grond- en oppervlaktewaterzuiveringen in relatie tot zuiveringsprocessen.

In de periode 2011-2015 is de rol van deeltjesgebonden en opgeloste stoffen op de biologische stabiliteit systematisch bestudeerd voor verschillende geselecteerde zuiveringsprocessen. De bestudeerde zuiveringsprocessen zijn actieve-koolfiltratie (AKF), zandfiltratie (ZF) ionenwisseling (IEX) en membraanfiltratie, zowel microfiltratie (MF) als ultrafiltratie (UF). De studie heeft plaatsgevonden op twee locaties (Spannenburg en Berenplaat) die verschillende typen voedingswater (grondwater en oppervlaktewater) gebruiken en tijdens verschillende seizoenen in het jaar. De verandering in de biologische stabiliteit voor en na behandeling van de bestudeerde zuiveringsprocessen is bepaald met verschillende meetmethoden: de biomassa-accumulatiesnelheid (BAS), ijzer-accumulatiesnelheid (FeAS), deeltjesgebonden en/of hoogmoleculair organisch koolstof (PHMOC) en deeltjesgebonden en/of hoogmoleculair koolhydraten (PHCMC), biomassaproductiepotentie (BPC14) en adenosine trifosfaat (ATP).

Een sterke verbetering van de biologische stabiliteit door UF wordt gerelateerd aan een sterke vermindering van deeltjesgebonden organische stoffen (> 35 kDa) en in mindere mate een geringe vermindering van opgeloste organische stoffen. MF presteert over het algemeen hetzelfde als UF, maar de verwijdering van deeltjesgebonden organische stoffen is duidelijk minder goed. AKF en IEX laten beiden een mindere doch significante verbetering van de meeste biologische stabiliteitsparameters zien, gerelateerd aan een vermindering van deeltjesgebonden organische stoffen. ZF lijkt beter in staat om groeibevorderende stoffen te reduceren dan AKF/IEX, mogelijk gerelateerd aan de rol van ijzer(verwijdering) in relatie tot biologische stabiliteit verbetering.

Verwijdering van deeltjesgebonden organische stoffen lijkt het belangrijkste onderdeel in het verbeteren van de biologische stabiliteit gevolgd door verwijdering van kleine opgeloste organische stoffen (vermindering groeipotentie). Op grond hiervan is eindstandige UF een robuuste zuiveringsstrategie voor het verminderen van deeltjesgebonden organische stoffen in relatie tot de verbetering van de biologische stabiliteit. De groeipotentie van water kan verder worden verbeterd met combinaties van adsorptieve, oxidatieve en biologische verwijderingsprocessen en lijkt locatie- en seizoensspecifiek te zijn. Gezien het feit dat deeltjesgebonden organische stoffen de biologische stabiliteit van het drinkwater negatief kunnen beïnvloeden zou aanvullend onderzoek naar volstroom membraanfiltratie met lage 'molecular weight cut-off' (MWCO) belangrijk kunnen zijn, omdat met dat proces

verregaande verwijdering van deeltjesgebonden organische stoffen én ook opgeloste kleine organische stoffen optreedt.

Inhoud

Voorwoord	2
Samenvatting	5
Inhoud	7
1 Inleiding	8
1.1 Achtergrond onderzoek	8
1.2 Doel van het onderzoek	10
2 Beschikbare kennis	11
2.1 Ervaringen met diagnosetool bij Pb. Spannenburg (Vitens) (BTO 2012.030)	11
2.2 Ervaringen met diagnosetool bij Pb. Berenplaat (Evides) (BTO 2012.030)	13
3 Geselecteerde processen	15
3.1 Effecten van AKF en ZF op de biologische stabiliteit bij Pb. Berenplaat (Evides) (BTO(s) 2014.050)	15
3.2 Effect van lage druk membraanfiltratie op de biologische stabiliteit van AKF filtraat bij Pb. Berenplaat (Evides) (BTO 2015.218)	16
4 Geschikte zuiveringscombinaties	18
4.1 Verwijdering van deeltjes en opgeloste stoffen voor bestudeerde zuiveringsprocessen	18
4.2 Effecten op de biologische stabiliteit in relatie tot de bestudeerde zuiveringsprocessen	19
4.3 Optimale (combinaties van) zuiveringsprocessen	20
5 Conclusies en aanbevelingen	22
5.1 Conclusies	22
5.2 Aanbevelingen	22
Literatuur	24

1 Inleiding

1.1 Achtergrond onderzoek

De microbiologische kwaliteit van het drinkwater speelt een belangrijke rol sinds het begin van de openbare drinkwatervoorziening in Nederland. Een belangrijk aspect hierbij is dat in Nederland het drinkwater wordt gedistribueerd zonder een desinfectieresidu. Om de microbiologische risico's zo laag mogelijk te houden, is de drinkwaterzuivering ingericht om dusdanige verwijdering van micro-organismen van fecale herkomst te bereiken, zodat wordt voldaan aan het infectierisico dat maximaal 1 op 10.000 mensen per jaar ziek mag worden van drinkwater. Daarnaast is de zuivering ook ingericht om drinkwater te produceren met zeer lage concentraties aan microbiologisch afbreekbare stoffen, zodat groei van ongewenste organismen zoveel mogelijk wordt beperkt tijdens distributie van het water naar de klant.

Het onderzoek naar het effect van de drinkwaterbereiding op de gehalten aan zeer lage concentraties microbiologisch afbreekbare stoffen in het reinwater heeft zich tot nu toe sterk gericht op (i) de effecten van sommige zuiveringsprocessen op de vorming van afbreekbare stoffen en (ii) het effect van biologische filters (bv snelfilters, langzame zandfilters en actieve-koolfilters) op verwijdering van afbreekbare stoffen in de zuivering door aanhechting en/of biologische activiteit. Dit type onderzoek heeft geleid tot het meten van effecten van destijds nieuwe zuiveringsconcepten (bv ozon, UV) op het gehalte gemakkelijk afbreekbaar organisch koolstof (AOC) en de biofilmvormingsnelheid (BVS) en het optimaliseren van biologische filtratieprocessen zoals actiefkoolfiltratie. Tevens heeft het onderzoek geleid tot optimalisatie van de klassieke grondwaterzuivering, waarbij de nadruk voor een groot deel lag bij het fysisch in plaats van microbiologisch verwijderen van methaan. Meer recentelijk zijn in het collectieve deel en in het speerpuntdeel van het BTO ook onderzoeken uitgevoerd naar nitrificatie, biologische ontijzering en ontmanganing. Hoewel deze onderzoeksinspanningen over het algemeen hebben geleid tot de productie van biologisch stabiel drinkwater, leidt de biologische activiteit in drinkwater op sommige locaties tot problemen (groei van opportunistische ziekteverwekkers zoals *Legionella pneumophila*, esthetische klachten en/of technische klachten) (Den Boer et al., 2015). Het optimaliseren en veranderen van de drinkwaterbereiding blijft één van de belangrijkste instrumenten om deze nagroeiproblemen te verbeteren door biologisch stabiel drinkwater te produceren. Een van de nieuwste ontwikkelingen die hierbij kan worden toegepast, is de diagnosetool waarmee op een locatie de invloed van verschillende zuiveringsprocessen op de biologische stabiliteit wordt vergeleken. Vooral de oorzaken van verbetering of verslechtering van (combinaties van) zuiveringsprocessen op de biologische stabiliteit van het behandelde water staan daarbij centraal, specifiek de rol van (de verwijdering van) deeltjesgebonden en opgeloste organische stoffen¹ op de microbiologische activiteit in het (drink)water.

¹ Vaste deeltjes in water worden gedefinieerd als materiaal dat bestaat als vloeistof of vaste stof bij standaard omstandigheden in water (<http://www.encyclo.nl/lokaal/10880>). De grootte en onderlinge interactie bepaalt de deeltjesstabiliteit, die kunnen bestaan uit onder andere nanodeeltjes (1-100 nm), colloïdale deeltjes (1-1000 nm) en gesuspenderde deeltjes (< 100 µm) (Levine, 2001). Opgeloste stoffen zijn gelijkmatig verdeelde substanties in water waarin de deeltjes op moleculaire schaal aanwezig zijn (<http://www.encyclo.nl/lokaal/10491>). In dit onderzoek wordt een verschil gemaakt tussen deeltjesgebonden en opgeloste (organische) stoffen, en de respectievelijke invloed van deze zaken op de biologische stabiliteit. De gebruikte processen en meetmethoden in dit onderzoek zijn echter niet in staat om deeltjes volledig te scheiden van de opgeloste stoffen (en vice versa). Zo worden bijvoorbeeld met ultrafiltratie deeltjes en hoogmoleculaire organische stoffen gescheiden van laagmoleculaire stoffen afhankelijk van de MWCO (molecular weight cut-off) van het membraan. Voor het gemak worden de

Vaste deeltjes in water worden gedefinieerd als materiaal dat bestaat als vloeistof of vaste stof bij standaard omstandigheden in water (<http://www.encyclo.nl/lokaal/10880>). De grootte en onderlinge interactie bepaalt de deeltjesstabiliteit, die kunnen bestaan uit onder andere nanodeeltjes (1-100 nm), colloïdale deeltjes (1-1000 nm) en gesuspenderde deeltjes (< 100 µm) (Levine, 2001). Opgeloste stoffen zijn gelijkmatig verdeelde substanties in water waarin de deeltjes op moleculaire schaal aanwezig zijn (<http://www.encyclo.nl/lokaal/10491>). In dit onderzoek wordt een verschil gemaakt tussen deeltjesgebonden en opgeloste (organische) stoffen, en de respectievelijke invloed van deze zaken op de biologische stabiliteit. De gebruikte processen en meetmethoden in dit onderzoek zijn echter niet in staat om deeltjes volledig te scheiden van de opgeloste stoffen (en vice versa). Zo worden bijvoorbeeld met ultrafiltratie deeltjes en hoogmoleculaire organische stoffen gescheiden van laagmoleculaire stoffen afhankelijk van de MWCO (molecular weight cut-off) van het membraan. Voor het gemak worden de deeltjes en hoogmoleculaire stoffen in de rapportage beschreven met de term deeltjesgebonden organisch stoffen.

Zuiveringsprocessen kunnen verschillende invloeden hebben op de biologische activiteit in het water, naar gelang de gebruikte techniek. Biologische en chemische zuiveringstechnieken verwijderen of zetten opgeloste organische verbindingen (ook wel gerefereerd als natuurlijk organisch materiaal (NOM)) en/of andere afbreekbare stoffen biologisch of chemisch om. Voorbeelden zijn biologische filtratieprocessen waarbij AOC, ammonium en methaan worden omgezet, adsorptieprocessen waarbij organisch materiaal aan een oppervlak (van bijvoorbeeld actieve kool) wordt geadsorbeerd of oxidatieprocessen waarbij verontreinigingen en andere organische stoffen in het water worden omgezet of afgebroken. Bij oxidatieprocessen kan de gedeeltelijke omzetting van NOM leiden tot de vorming van nevenproducten. Daarnaast zijn er fysische zuiveringstechnieken waarbij deeltjesgebonden organische stoffen worden verwijderd uit het voedingswater. Bijvoorbeeld filtratietechnieken waarbij deeltjesgebonden en/of hoogmoleculair organisch koolstof (PHMOC), deeltjesgebonden en/of hoogmoleculair koolhydraten (PHMCHC), deeltjesgebonden ijzer (PFe) en deeltjesgebonden mangaan (PMn). Verder is het onduidelijk welk onderdeel (deeltjesgebonden of opgeloste organische stoffen) een sterkere invloed heeft op de biologische stabiliteit van het water, hoe sterk het effect van interactie (adsorptie en desorptie) tussen deze twee is en of deze aspecten afhankelijk zijn van het specifieke watertype.

In de afgelopen jaren (2011 – 2015) zijn onderzoeken uitgevoerd binnen de TG Biologische Stabiliteit (2011-2012) en TG Biologische Activiteit (2013-2015) naar de rol van deeltjesgebonden en opgeloste organische stoffen op de biologische stabiliteit van het reinwater met behulp van de diagnosetool. Met de diagnosetool kan de invloed van een aantal behandelingsprocessen (actieve-koolfiltratie, zandfiltratie, ionenwisseling, membraanfiltratie) worden onderzocht. Zo zijn bij Pb. Spannenburg (Vitens) en Pb. Berenplaat (Evides) in de periode 2010-2012 metingen uitgevoerd met de diagnosetool waarbij de rol van deeltjesgebonden en opgeloste organische stoffen bij actieve-koolfiltratie, ionenwisseling en ultrafiltratieprocessen op de biologische stabiliteit is bestudeerd (zie Hoofdstuk 2). Er is echter nog ontbrekende informatie over de rol van specifieke (combinaties van) zuiveringsprocessen bij de verwijdering van deeltjesgebonden en opgeloste organische stoffen en het gevolg daarvan op de biologische stabiliteit van het water. De invloed van procescondities van actieve-koolfilters zoals filterspoeling en contacttijd op de biologische stabiliteit van het drinkwater wordt besproken in Hoofdstuk 3.1.

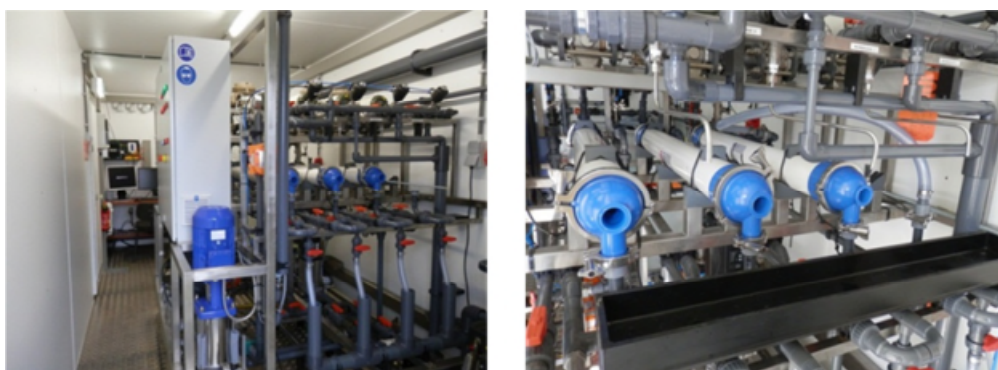
De invloed van deeltjesgebonden en opgeloste organische stoffen op de biologische stabiliteit na lage druk membraanfiltratie wordt besproken in Hoofdstuk 3.2.

1.2 Doel van het onderzoek

In dit project wordt onderzocht wat de rol is van deeltjesgebonden versus opgeloste organische stoffen op de biologische stabiliteit van het afgeleverde water op geselecteerde grond- en oppervlaktewaterzuiveringen in relatie tot zuiveringsprocessen. Dit door metingen op locatie en met de diagnosetool bij specifieke zuiveringsprocessen die een effect hebben op deeltjesgebonden en/of opgeloste organische koolstof, zoals zandfiltratie, beluchting, actieve-koolfiltratie, UV en membraanfiltratie. Ten slotte worden optimale (combinaties van) zuiveringsprocessen in relatie tot de biologische stabiliteit van behandeld water gekoppeld aan de verwijdering van deeltjesgebonden en opgeloste organische stoffen.

2 Beschikbare kennis

Om de rol van deeltjesgebonden en opgeloste organische stoffen op de biologische stabiliteit te kunnen onderzoeken is in 2011 een Diagnosetool ontwikkeld waarmee simultaan vijf waterbehandelingstechnieken in combinatie met biologische meetmethoden kunnen worden vergeleken. De onderzochte technieken zijn ionenwisseling (IEX), actieve koolfiltratie (AKF) en dead-end ultrafiltratie (UF) of een combinatie hiervan. De belangrijkste biologische meetmethoden om de biologische stabiliteit van het water te bepalen zijn de biomassa-accumulatiesnelheid (BAS) en de biomassa-productiepotentie (BPP). Daarnaast is ook een veelvoud aan chemische en biologische analyses (deeltjestellingen, TOC, ATP, PHMOC, PHMCHC en PFe) gebruikt om de biologische stabiliteit te bepalen en om gevonden resultaten te kunnen verklaren. De Diagnosetool is drie keer ingezet in 2011 en 2012, tweemaal bij Spannenburg (Vitens) (paragraaf 2.1) en eenmaal bij Berenplaat (Evides) (paragraaf 2.2) (zie Figuur 1), respectievelijk een grond- en oppervlaktewaterproductielocatie (BTO 2012.030). Bij Spannenburg wordt IEX als laatste stap gebruikt voor de productie van ontkleurd en biologisch stabiel drinkwater. De Diagnosetool is bij Spannenburg ingezet voor deze IEX stap. Bij Berenplaat wordt als een-na-laatste stap AKF toegepast en dosering met chloordioxide als laatste stap. De Diagnosetool is bij Berenplaat ingezet aan het einde van de zuivering tussen de hogedruk pompen en het distributienet, een locatie waar geen invloed van chloordioxide op de microbiologische activiteit wordt verwacht. Op beide locaties (Spannenburg en Berenplaat) worden relatief hoge *Aeromonas*-aantallen in het voorzieningsgebied aangetroffen, wat er op duidt dat de biologische stabiliteit van het water onvoldoende is om groei van *Aeromonas* te voorkómen.

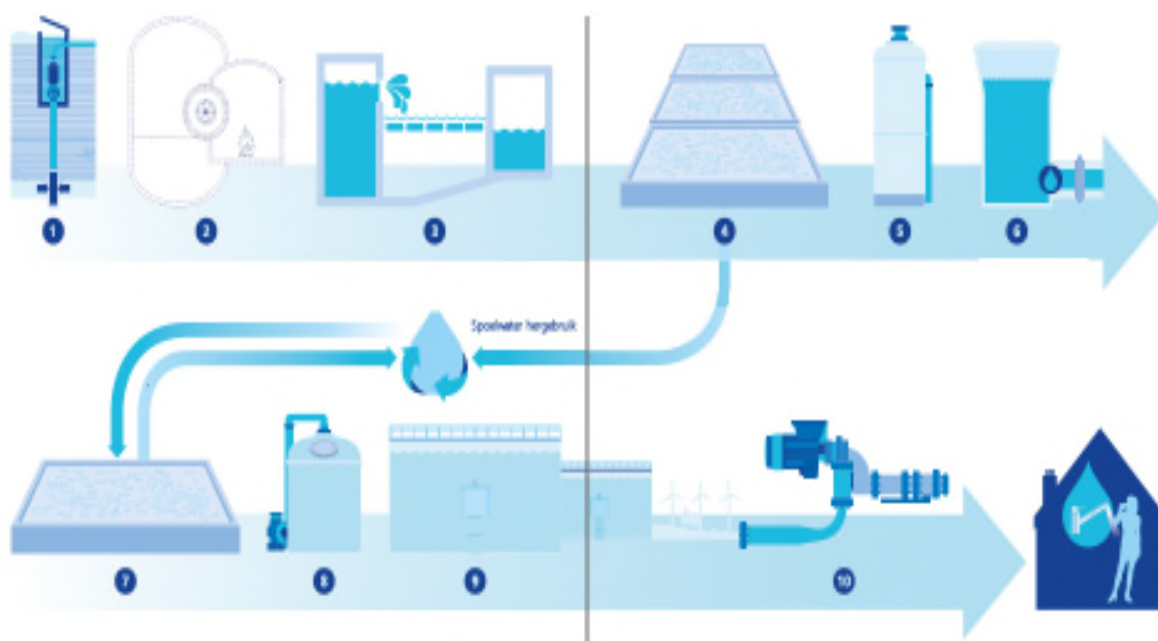


FIGUUR 1: FOTO'S VAN DE QUICKSCAN (CONTAINEROPSTELLING OP DRINKWATERZUIVERING BERENPLAAT)

2.1 Ervaringen met diagnosetool bij Pb. Spannenburg (Vitens) (BTO 2012.030)

De zuivering van Spannenburg is weergegeven in figuur 2. De Diagnosetool is geplaatst na het zandfilter (7) en dus voor de ionenwisseling (8).

Zowel AKF, IEX als UF verbetert de biologische stabiliteit van het onderzochte snelfiltraat van Spannenburg gemeten als Δ BAS, Δ FeAs, Δ ATP en Δ BPP-14 (Tabel 1). UF (alleen of in combinatie met IEX) geeft de beste verbetering van de biologische stabiliteit. Deze verbetering wordt veroorzaakt door de verwijdering van micro-organismen, biomassa en deeltjesgebonden organisch materiaal, ijzer en mangaan. In combinatie met IEX wordt tevens een deel van NOM verwijderd.



FIGUUR 2: PROCESDIAGRAM VAN DE ZUIVERING VAN SPANNENBURG (VITENS)

Verklaring van de getallen in figuur 2:

1. Pompput grondwater inname op 100 m diep
2. Toekomstige methaanwinning voor energiegebruik
3. Beluchting en oxidatie
4. Zandfiltratie
5. Tweede beluchting
6. Ontharding
7. Zandfiltratie
8. Ionenwisseling voor kleurverwijdering
9. Reinwaterkelder
10. Distributie.

Actieve-koolfiltratie laat de minste verbetering van de biologische stabiliteit van het water zien, vermoedelijk ten gevolge van een lage verwijdering van deeltjes en opgeloste stoffen. Alleen IEX geeft ook een duidelijke verbetering van de biologische stabiliteit van het water, maar in mindere mate dan UF (Tabel 1). De verbetering met IEX wordt veroorzaakt door een gedeeltelijke verwijdering van deeltjes en de verwijdering van afbreekbaar organisch materiaal, voornamelijk humuszuren echter ook hydrolysaten van humuszuren en kleine organische stoffen. Geconcludeerd kan worden dat de bestaande toevoeging van UF en/of IEX een behoorlijke verbetering oplevert van de biologische stabiliteit, waardoor wordt verwacht dat de mate van nagroei in het distributiesysteem zal afnemen.

Tabel 1 Verwijdering deeltjes en TOC in relatie tot verandering biologische parameters gedurende de diagnosetooltest bij Pb. Spannenburg (Vitens) in 2011-2012

Parameter	AKF	IEX	UF-IEX	UF
Δ Deeltjes (%)	49%	65%	93%	94%
Δ TOC (%)	5%	65%	68%	0%
Δ BAS (%)	71%	96%	99%	100%
Δ FeAS (%)	80%	85%	94%	98%

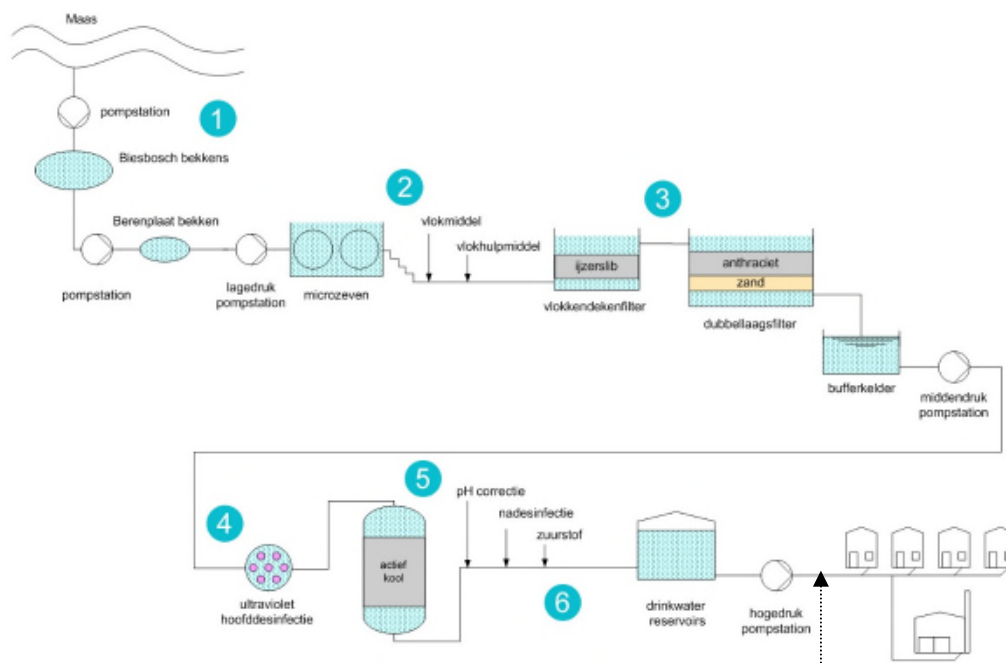
Δ ATP (%)	28%	28%	78%	89%
Δ BPP-14 (%)	1%	26%	88%	61%

Uit de autopsie van de AKF- en IEX-kolommaterialen na afloop van de experimenten blijkt dat AKF en IEX biologisch actieve filters zijn geworden, ook werd tijdens de metingen sporadisch biomassa uitspoeling waargenomen voor beide filters (gemeten als ATP). Deze filters zouden daarom na optimalisatie van de bedrijfsvoering kunnen dienen als effectievere polishing filter. Uit eerder uitgevoerd onderzoek is gebleken dat het drinkwater van Spannenburg sinds de toevoeging van IEX voldoet aan de richtwaarden voor biologisch stabiel drinkwater ($\text{AOC} < 10 \mu\text{g C l}^{-1}$; $\text{BVS} < 10 \mu\text{g ATP cm}^{-2} \text{dag}^{-1}$).

Een aanbeveling is om de diagnosetool in te zetten bij grondwaterlocaties waar de biologische stabiliteit niet voldoet aan de richtwaarden zodat kan worden achterhaald of een aanvullend UF of IEX proces de biologische stabiliteit van het water zal verlagen. Dergelijk onderzoek geeft tevens inzicht in hoeverre resultaten op één grondwaterlocatie (Spannenburg) ook gelden voor andere grondwaterlocaties.

2.2 Ervaringen met diagnosetool bij Pb. Berenplaat (Evides) (BTO 2012.030)

In figuur 3 is het schema van de zuivering van het zuiveringsstation van Berenplaat weergegeven. De Diagnosetool is geplaatst op het hogedruk pompstation na de reinwaterkelder en pompen (zie pijl in figuur 3). Tijdens de meetperiode werd 70 mg/l ClO_2 gedoseerd voor de reinwaterkelder.



FIGUUR 3: PROCESDIAGRAM VAN DE ZUIVERING VAN BERENPLAAT (EVIDES). DE PIJL GEEFT DE LOCATIE AAN VAN DE DIAGNOSETOOL

De biologische stabiliteit van het drinkwater van Berenplaat wordt het best verbeterd door IEX of UF (MWCO: 20 kDa) (Tabel 2). IEX verlaagt de BAS het meest en dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de verwijdering van een deel van het NOM (afbreekbare stoffen, humuszuren, laag moleculaire zuren en hydrofoob materiaal) en een beperkte hoeveelheid

deeltjes. Het water van Berenplaat bevat nog een kleine hoeveelheid kleine organische zuren, mogelijk ontstaan deze zuren tijdens de chloordioxide (ClO_2) dosering die als nadesinfectie, na de AKF, wordt toegepast.

Tabel 2 Verwijdering deeltjes en TOC in relatie tot verandering biologische parameters gedurende de diagnosetooltest bij Pb. Berenplaat (Evides) in 2012

Parameter	AKF	IEX	UF
Δ Deeltjes (%)	39%	36%	99%
Δ TOC (%)	7%	40%	3%
Δ BAS (%)	79%	84%	58%
Δ FeAS (%)	<0	<0	71%
Δ ATP (%)	<0	<0	35%
Δ BPP-14 (%)	<0	7%	54%

UF verbetert een aantal biologische stabiliteitsparameters van het drinkwater, maar de membranen hadden relatief snel last van vervuiling². Er werd een oplopende BAS-waarde in de tijd waargenomen voor UF, die uiteindelijk de BAS-waarde van IEX overschrijdt, mogelijk ten gevolge van het optreden van membraanvervuiling. Dead-end UF (zonder terugspoeling) lijkt daardoor mogelijk een minder goede toevoeging om het water van Berenplaat biologisch stabiel te krijgen. Overigens kan het oplopen van de temperatuur van het water gedurende de looptijd ook een invloed hebben gehad op de resultaten. Hierbij viel op dat de BAS-waarde van de UF niet constant was maar toenam.

Aanbevolen wordt om effect van de ClO_2 dosering op de aanwezigheid van makkelijk afbreekbare DOC (laagmoleculaire zuren, gemeten met LC-OCD) te onderzoeken en te voorkómen dat deze zuren in het distributienet terechtkomen. In vergelijking met het hier onderzochte dead-end UF proces, wordt geadviseerd om een realistische bedrijfsvoering van MF/UF membranen te onderzoeken. Tenslotte dient te worden onderzocht hoe de hier gevonden effecten van UF en IEX op de biologische stabiliteit gelden wanneer het onderzoek wordt uitgevoerd op andere oppervlaktewaterlocaties.

² De ultrafiltratie modules zijn elke 2 weken gedurende 10 min gespoeld (forward flow) met influent water om de membranen schoon te spoelen. Er was geen (chemische) terugspoeling mogelijk

3 Geselecteerde processen

Op basis van de ervaringen met de diagnosetool bij Pb. Spannenburg (Vitens) en bij Pb. Berenplaat (Evides) is gekozen voor uitgebreider onderzoek naar geselecteerde processen, te weten actiefkoolfiltratie en zandfiltratie (3.1) en lage druk membraanfiltratie (3.2).

3.1 Effecten van AKF en ZF op de biologische stabiliteit bij Pb. Berenplaat (Evides) (BTO(s) 2014.050)

Om de invloed van procescondities van actiefkoolfilters zoals filterspoeling en contacttijd op de biologische stabiliteit van het drinkwater te onderzoeken zijn experimenten met de Diagnosetool uitgevoerd in de periode mei-september 2014. Hierbij is naast een actiefkoolfilter ook een zandfilter meegenomen in de Diagnosetool om een vergelijking te kunnen maken wat betreft biologische stabiliteit na filtratie over verschillende media. De doelstelling van dit project was om de invloed van de contacttijd en filterspoeling van actieve-koolfiltratie, in vergelijking met zandfiltratie zonder filterspoeling, te achterhalen op de PHMOC-, PHMCHC- en PFe-concentratie, de groeipotentie (BPP) en de biomassa-accumulatiesnelheid (BAS) van voorbehandeld³ oppervlaktewater van Berenplaat (Evides). Dit is uitgevoerd met een kleinschalige proefopstelling op locatie onder goed geconditioneerde omstandigheden.

Uit het onderzoek blijkt dat verhoging van de contacttijd van actieve-koolfiltratie van 5 naar 20 minuten een duidelijke verbetering geeft van de biologische stabiliteit van het water door een grotere verwijdering van afbreekbare verbindingen en deeltjesgebonden organische koolstof. Wel moet worden opgemerkt dat het totaal aantal deeltjes juist het meeste toenam in het water na 20 min contacttijd in AKF. Er is daarom niet altijd een directe relatie tussen deeltjes en biologische stabiliteit en deeltjes en PHMOC/PHMCHC. Op basis van de BAS en BPP verbetering lijkt een aanpassing van de contacttijd van actiefkoolfilters een goede beheersmaatregel te zijn om de biologische stabiliteit van het water te verbeteren. Daarnaast lijkt spoeling van een actiefkoolfilter niet te leiden tot een lagere biomassa-uitspoeling of verbetering van de meeste biologische stabiliteitsparameters van het filtraat van de testopstelling, maar wel tot een verlaging van het ijzergehalte in het filtraat.

Tabel 3 Verwijdering deeltjes en TOC in relatie tot verandering biologische parameters gedurende de diagnosetooltest bij Pb. Berenplaat (Evides) in 2014

Parameter	AKF 5sp	AKF 20sp	AKF 20nsp	ZF 20 nsp
Δ Deeltjes (%)	-77%	-426%	-94%	29%
Δ TOC (%)	9%	17%	23%	8%
Δ BAS (%)	5%	25%	24%	75%
Δ FeAS (%)	49%	80%	29%	90%
Δ ATP (%)	19%	42%	49%	41%
Δ BPP-14 (%)	10%	41%	49%	59%
Δ PHMOC (%)	26%	38%	57%	53%
Δ PHMCHC (%)	25%	43%	62%	61%
Δ PFe (%)	50%	50%	67%	92%

³ Microzeven - vlokmiddeldosering (niet van mei-september) – vlokkendekenfiltratie - dubbellaagsfiltratie-UV

Sp = spoeling, nsp = niet spoeling, 5 of 20 = 5 of 20 minuten contacttijd

Een niet gespoeld zandfilter met vers zand (0,63-1,0 mm) resulteerde in vergelijkbare of een verbetering van de biologische stabiliteitsparameters (behalve PHMOC en PHMCHC) van het water vergeleken met een niet gespoeld actiefkoolfilter met gebruikte actiefkool van 20.000 BV. De resultaten laten tevens zien dat het aantal deeltjes in het filtraat bij een niet gespoeld zandfilter lager is dan bij een niet gespoeld actiefkoolfilter. Zandfiltratie met vers zand in combinatie met actieve-koolfiltratie zou, op basis van de gevonden resultaten op deze locatie, dus een geschikt proces kunnen zijn voor de verbetering van de biologische stabiliteit en deeltjesconcentratie in het drinkwater.

Aanvullend onderzoek zou zich kunnen richten op optimale contacttijd. AKF met een contacttijd van 5 minuten geeft een slechtere biologische stabiliteit, wellicht geeft AKF met een contacttijd van bijvoorbeeld 10 minuten vergelijkbare goede resultaten als AKF met een contacttijd van 20 minuten met betrekking tot de biologische stabiliteit.

3.2 Effect van lage druk membraanfiltratie op de biologische stabiliteit van AKF filtraat bij Pb. Berenplaat (Evides) (BTO 2015.218)

Om inzicht te verkrijgen over de invloed van deeltjesgebonden en opgeloste organische stoffen op de biologische stabiliteit na lage druk membraanfiltratie, is er onderzoek uitgevoerd met AKF filtraat voor de ClO_2 dosering van de productielocatie Berenplaat van Evides (in 2015). Hiervoor is een proefinstallatie (Quickscan) van KWR geplaatst waarmee drie membraantypen tegelijkertijd zijn onderzocht. Het betrof Pentair membranen met een MWCO van 10 kDa (HFS10), 150 kDa (UF150) en 0,2 μm (MF0.2). Verschillende biologische en (fysisch) chemische meetmethoden zijn toegepast om de biologische stabiliteit van het water te bepalen (Tabel 4). De prestaties van de membranen zijn continu gemonitord. Door het toepassen van chemische reiniging en terugspoeling is de pilot zo stabiel mogelijk bedreven.

Tijdens de looptijd is er geen verschil in verwijdering van (i) deeltjes $> 1 \mu\text{m}$ (bepaald met deeltjestellingen) en (ii) laag moleculair materiaal (bepaald met LC-OCD) gemeten tussen de drie onderzocht membranen. Met de deeltjesmetingen is hiermee ook de integriteit van de membranen aangetoond. Bij het MF membraan nam de verwijdering van de biopolymeren fractie (bepaald met LC-OCD) gedurende de looptijd toe, waarschijnlijk veroorzaakt door het afname van de MWCO ten gevolge van irreversibele porieverstopping. Uiteindelijk bleek de bacteriële biomassa (ATP) en makkelijk afbreekbare verbindingen (BP7 en BPC-14) door alle membranen even goed te worden verwijderd, er was hierbij geen effect van poriegrootte. Ook de deeltjesgebonden en hoogmoleculair ($>35 \text{ kDa}$) (an)organische stoffen gemeten met de Hemoflow methode, AOC-A3 concentratie en LC-OCD (biopolymeren) worden door alle membranen verwijderd, maar voor deze stoffen is er wel een volgorde in verwijdering die overeenkomt met de poriegrootte.

Geconcludeerd wordt dat verwijdering van deeltjesgebonden ($> 0,2 \mu\text{m}$ nominaal) en hoogmoleculair organische stoffen ($> 150 \text{ kDa}$) voldoende lijkt te zijn om de biologische stabiliteit van het AKF filtraat van Berenplaat substantieel te verlagen. Verondersteld wordt dat dit komt door de verwijdering van complex (organisch) hoogmoleculair materiaal in het voedingswater naast de hoge verwijdering van deeltjesgebonden organische stoffen. Aanvullend onderzoek bij andere locaties kan helpen om te achterhalen hoe algemeen of locatiespecifiek deze resultaten zijn.

Tabel 4 Verwijdering deeltjes en TOC in relatie tot verandering biologische parameters gedurende de Quickscantest bij Pb. Berenplaat (Evides) in 2015

Parameter	HFS10	UF150	MF0.2
Δ Deeltjes (%)	92%	96%	90%
Δ TOC (%)	4%	7%	3%
Δ ATP (%)	87%	88%	87%
Δ AOC-A3 (%)	91%	91%	80%
Δ BPC-14 (%)	70%	78%	71%
Δ BP7 (%)	65%	70%	68%
Δ PHMOC (%)	84%	76%	16%
Δ PHMCHC (%)	87%	79%	24%
Δ PFe (%)	69%	52%	3%

4 Geschikte zuiveringscombinaties

4.1 Verwijdering van deeltjes en opgeloste stoffen voor bestudeerde zuiveringsprocessen

In de periode 2011-2015 is de rol van deeltjesgebonden en opgeloste stoffen op de biologische activiteit systematisch bestudeerd voor verschillende geselecteerde zuiveringsprocessen. De bestudeerde zuiveringsprocessen zijn actieve-koolfiltratie (AKF), zandfiltratie (ZF) ionenwisseling (IEX) en membraanfiltratie, zowel microfiltratie (MF) als ultrafiltratie (UF). De studie heeft plaatsgevonden op verschillende locaties (Spannenburg en Berenplaat) met verschillende typen voedingswater (drinkwater bereid uit grondwater- of oppervlaktewaterlocaties) en tijdens verschillende perioden in het seizoen. Ook verschillen de gebruikte materialen en bedrijfsvoering tijdens sommige experimenten. Zo zijn bijvoorbeeld tijdens de eerste experimenten in 2011 en 2012 andere typen membranen gebruikt dan tijdens het laatste experiment in 2015, en zijn er verschillende typen IEX harsen gebruikt tijdens verschillende experimenten. Ondanks deze onderlinge verschillen is de verwijdering van deeltjes en opgeloste stoffen geïnventariseerd en gemiddeld weergegeven in Tabel 5. Hierbij is de deeltjesverwijdering bepaald met deeltjestellingen en PHMOC en PHMCHC bepalingen (vanaf 2012); de verwijdering van organische stoffen is bepaald met TOC metingen.

Tabel 5a Verwijdering deeltjes en TOC voor geselecteerde zuiveringsprocessen op grondwater (Spannenburg)

Proces	TOC (%)	Deeltjes (%)
UF	< 10%	> 95%
AKF	< 10%	~ 50%
IEX	~ 60%	~ 60%

Tabel 5b Verwijdering deeltjes en TOC voor geselecteerde zuiveringsprocessen op oppervlaktewater (Berenplaat)

Proces	TOC (%)	Deeltjes (%)	PHMOC/PHMCMC (%)
MF	< 10%	> 95%	~ 20%
UF	< 10%	> 95%	~ 80%
AKF	< 10%	~ 40% ⁴ / > -75% ⁵	~ 55%
IEX	~ 40%	~ 40%	-
ZF	<10%	~ 30%	~ 55%

De meeste organische stoffen worden verwijderd met anionenwisseling, waarbij met name geladen humuszuren en organische zuren worden verwijderd door elektrostatische interactie met het IEX harsmateriaal. Ongeladen organische stoffen in het voedingswater worden echter niet of nauwelijks door IEX verwijderd. Verwijdering van organische stoffen met AKF is gering en betreft vooral apolaire interacties met het actieve-koolmateriaal. Ook kan organisch materiaal in de vorm van biomassa vrijkomen als AKF biologisch actief worden bedreven. Verwijdering van organische stoffen door MF/UF is gering. MF/UF werkt op basis van zeefwerking, en de meeste opgeloste stoffen zijn veel kleiner dan de poriën van de membranen.

⁴ Deeltjesverwijdering

⁵ Uitspoeling van deeltjes (toename van deeltjes)

Deeltjes worden het best verwijderd met MF/UF vanwege een absolute zeefwerking door het membraanoppervlak. Met deeltjestellers ($>1 \mu\text{m}$) wordt een zeer grote verwijdering gemeten ($>95\%$), met deeltjesgebonden organische stoffen (PHMOC/PHMCHC) ($>0,01 \mu\text{m}$) wordt een significante verwijdering gemeten, maar is de verwijdering met UF membranen duidelijk hoger dan met MF membranen. Verwijdering van deeltjes met gepakte kolommen (AKF, ZF en IEX) is veel lager in vergelijking met UF. Verwijdering hangt onder andere af van het filtermateriaal, pakkingsdichtheid en filtratiesnelheid. Er is weinig verschil in deeltjesverwijdering tussen AKF, IEX en ZF. Het is mogelijk bij gepakte kolommen dat er meer deeltjesgebonden organische stoffen in het behandelde water zitten vanwege uitspoeling van filtermateriaal of biomassa als de filters biologisch actief zijn. Dit laatste is waargenomen bij het AKF tijdens het experiment in 2014.

4.2 Effecten op de biologische stabiliteit in relatie tot de bestudeerde zuiveringsprocessen

De verandering in de biologische stabiliteit voor en na behandeling van de bestudeerde zuiveringsprocessen is gemeten met verschillende meetmethoden. Gebruikte meetmethoden zijn de biomassa-accumulatiesnelheid (BAS), ijzer-accumulatiesnelheid (FeAS), deeltjesgebonden organisch koolstof (PHMOC) en deeltjesgebonden koolhydraten (PHMCMC), biomassaproductiepotentie (BPC14) en adenosine trifosfaat (ATP). Aangezien sommige meetmethoden een ontwikkeling hebben doorgemaakt gedurende de onderzoeksperiode, waren ze niet voor alle bestudeerde zuiveringsprocessen beschikbaar. Zo zijn de PHMOC en PHMCMC meetmethoden pas ontwikkeld na 2012 en waren dus niet beschikbaar voor de experimenten met IEX. Een verbetering in de biologische stabiliteit zal onder andere afhangen van een vermindering van de groeipotentie van het behandelde water en/of een vermindering van aanwezige biomassa in het water. Een combinatie van beide effecten wordt gemeten met de ΔBAS , ΔFeAS en $\Delta\text{PHMOC/PHMCMC}$. Een verandering in de groeipotentie wordt waargenomen met ΔBPC14 en een verandering in de biomassa met ΔATP . De veranderingen in de biologische stabiliteitsparameters zijn voor de verschillende zuiveringsprocessen weergegeven in Tabel 6.

Tabel 6 Verbetering van de biologische stabiliteit na geselecteerde zuiveringsprocessen gemeten met verschillende meetmethoden (+++ > 80%, 80% > ++ > 50% en + < 50%)

Proces	ΔBAS	ΔFeAS	$\Delta\text{PHMOC/PHMCMC}$	ΔBPC14	ΔATP
MF	N.B. ¹	N.B.	+	++	+++
UF	+++	+++	+++	++	+++
AKF	++	+ / ++	++	+	+
IEX	+++	+ / ++	N.B.	+	+
ZF	++	+++	++	++	+

¹ N.B.: niet bepaald

Er wordt een sterke verbetering van de meeste biologische stabiliteitsparameters waargenomen na UF, ten gevolge van zowel een vermindering van de groeipotentie van het water (ΔBAS , ΔFeAS , ΔBPC14) en een vermindering van de biomassa (ΔBAS , ΔFeAS , ΔATP). Er is alleen wel een verschil waargenomen in $\Delta\text{PHMOC/PHMCMC}$ tussen MF (gering) en UF (zeer goed), waarschijnlijk ten gevolge van een verschil in zeefwerking (zie 4.2).

AKF en IEX laten beiden een verbetering van de verschillende biologische stabiliteitsparameters zien. De ΔBPC14 en ΔATP zijn matig verbeterd voor beide processen, terwijl ΔFeAS en $\Delta\text{PHMOC/PHMCMC}$ goed tot matig zijn verbeterd (geen $\Delta\text{PHMOC/PHMCMC}$ gegevens beschikbaar van IEX). De ΔBAS is voor IEX beter dan voor AKF, wellicht ten gevolge

van een betere biomassaverwijdering en/of betere verwijdering van (geladen) groeibevorderende stoffen. Bij stabiel werkende IEX/AKF kunnen goede resultaten gehaald worden, maar perioden waarin de kolommen biomassa afgeven, wat een negatief effect heeft op de biologische stabiliteit, zijn ook waargenomen.

ZF laat een verbetering van de biologische stabiliteit zien, waarbij een betere ΔBPC14 wordt gevonden dan voor AKF/IEX. Het lijkt erop dat ZF beter in staat is om groeibevorderende stoffen te reduceren in vergelijking met AKF/IEX. Ook wordt een betere ΔFeAS gevonden bij ZF, waaruit een belangrijke rol van ijzer(verwijdering) naar voren komt in relatie tot de verbetering van de biologische stabiliteit. De overige biologische meetmethoden (ΔBAS , $\Delta\text{PHMOC/PHMCMC}$, ΔATP) bij ZF laten een vergelijkbaar beeld zien als voor AKF/IEX.

De beste biologische stabiliteitsverbetering is behaald met UF, waarmee vrijwel alle deeltjesgebonden organische stoffen en biomassa worden verwijderd en bijna geen opgeloste organische stoffen. MF presteert over het algemeen vergelijkbaar met UF, behalve voor de verwijdering van PHMOC/PHMCHC, die beduidend lager is bij MF dan UF. Een mindere, doch significante verbetering van de biologische stabiliteit is behaald met AKF/IEX/ZF, die matig deeltjes verwijderen (30-50%). Deeltjesgebonden organische stoffen kunnen echter ook worden geleverd aan het behandelde water bij instabiele bedrijfsvoering. De verwijdering van organische stoffen bij AKF/ZF is zeer gering, met uitzondering van IEX. Op grond van deze analyse volgt dat deeltjesverwijdering het belangrijkste lijkt in het verbeteren van de biologische stabiliteit gevolgd door verwijdering van organische stoffen. De concentratie en de type aanwezige opgeloste organische stoffen zullen echter ook een rol spelen bij de biologische stabiliteit van het behandelde water. Aangezien het onderzoek is uitgevoerd op twee locaties (Spannenburg en Berenplaat), blijft het onduidelijk of deze bevindingen locatiespecifiek of algemeen gelden. Daarom wordt aanbevolen om het onderzoek ook op andere locaties uit te voeren.

4.3 Optimale (combinaties van) zuiveringsprocessen

Verbetering van de biologische stabiliteit komt tot stand door een verwijdering van deeltjes en opgeloste stoffen met geschikte zuiveringsprocessen. Aangezien de verwijdering van deeltjesgebonden organische stoffen de belangrijkste bijdrage lijkt te leveren aan het verbeteren van de biologische activiteit, zijn zuiveringsprocessen gericht op absolute verwijdering van deeltjesgebonden organische stoffen essentieel. Membraanfiltratieprocessen lijken daarom de meest aangewezen processen hiervoor, waarbij de optimale positie aan het einde van de zuivering is om herintroductie van deeltjes te voorkomen. Uit deze studie kwam eerder naar voren dat een verwijdering van deeltjes > 150 kDa voldoende lijkt te zijn om de biologische stabiliteit van het AKF filtraat van Berenplaat te verlagen. Hiervoor kunnen UF membranen dienen. Concluderend zou eindstandige UF een optimale zuiveringsstrategie voor het verbeteren van de biologische activiteit door verwijdering van deeltjesgebonden organische stoffen kunnen zijn. De precieze invloed van UF zou echter ook onder fullscale condities bepaald moeten worden.

Na deeltjesgebonden organische stoffen spelen opgeloste organische stoffen een rol in de biologische activiteit van rein water, met name in de groeipotentie van het behandelde water. Een vermindering van opgeloste stoffen kan leiden tot een verbetering van de biologische activiteit, zo verbetert de ΔBAS iets beter met IEX (~55% TOC verwijdering) dan met AKF (<10% TOC verwijdering) (zie tabel 5 en 6). De groeipotentie van het behandelende water zal afhangen van het type en de concentratie van de opgeloste organische stoffen, wat sterk locatie en seizoen specifiek is. Opgeloste organische stoffen kunnen worden geadsorbeerd (AKF, IEX), biologisch of chemisch worden omgezet (biologisch actieve AKF, biologisch actieve ZF, oxidatieve processen) of verwijderd (nanofiltratie, omgekeerde osmose – zie

hieronder). Welk proces specifieke organische stoffen verwijderd die van belang zijn voor de verbetering van de biologische stabiliteit is afhankelijk van de locatie en het seizoen. Eén algemene optimale combinatie van zuiveringsprocessen voor alle locaties is daarom onmogelijk te geven, echter verschillende slimme combinaties tussen processen voor verbetering van de groeipotentie, zoals IEX, (biologisch actieve) AKF, (biologisch actieve) ZF, UV-peroxide en AKF, ozon en AKF gevolgd door eindstandige UF lijken veelbelovend. Aanvullend onderzoek bij andere locaties kan hier uitsluitsel over geven, liefst bij locaties waar de biologische stabiliteit van het water leidt tot problemen met nagroei.

Uit het bovenstaande blijkt dat (eindstandige) UF een goed zuiveringsproces is om de biologische stabiliteit van het geproduceerde drinkwater te verbeteren. Afhankelijk van de poriegrootte van de membranen worden opgeloste (organische) stoffen grotendeels doorgelaten en vormen mogelijk een rol in nagroei processen in het distributienet. Een dichtere barrière wordt gevormd door hoge druk membraanprocessen zoals nanofiltratie (NF) en omgekeerde osmose (reverse osmose of RO). Deze membranen werken niet op basis van zeefwerking, maar op basis van oplos-diffusie processen. Dit komt neer op het oplossen van (organische) stoffen in het membraanmateriaal gevolgd door diffusie naar de productwaterzijde. Theoretisch gezien zouden deze membranen dus een optimale barrière vormen voor zowel deeltjesgebonden en opgeloste organische stoffen, en mag een zeer sterke verbetering van de biologische stabiliteit worden verwacht. Het probleem van NF/RO membranen is de modulevorm, die vatbaar is voor integriteitsproblemen. Te denken valt aan zwakke lijmnaden en lekkende O-ringen, waarvan bekend is dat deze resulteren in integriteitsproblemen. Het effect hiervan op de biologische stabiliteit is niet bekend en zou een onderwerp kunnen vormen voor verder onderzoek.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

- Zowel deeltjesgebonden als opgeloste stoffen beïnvloeden de biologische stabiliteit van het drinkwater;
- Verwijdering van deeltjesgebonden organische stoffen lijkt daarbij het belangrijkst om de biologische stabiliteit te verbeteren, gevolgd door verwijdering van opgeloste organische stoffen;
- Eindstandige ultrafiltratie is waarschijnlijk een robuuste zuiveringsstrategie voor het verminderen van deeltjesgebonden en hoogmoleculaire organische stoffen in relatie tot de verbetering van de biologische stabiliteit;
- Vermindering van opgeloste organische stoffen speelt een rol in de verbetering van de biologische stabiliteit (door vermindering groeipotentie). De groeipotentie van water kan worden verbeterd met combinaties van adsorptieve, oxidatieve en verwijderingsprocessen en zal zeer locatie en seizoen specifiek zijn;
- Afhankelijk van de MWCO zal een sterke verbetering van de biologische stabiliteit na UF wordt gerelateerd aan een sterke vermindering van deeltjesgebonden organische stoffen en geringe vermindering van opgeloste organische stoffen;
- AKF en IEX laten beiden een verbetering van de biologische stabiliteit zien gerelateerd aan een vermindering van met name opgeloste organische stoffen;
- Een optimale zuivering bevat proces(sen) effectief in verwijdering van deeltjesgebonden organisch koolstof (UF) en proces(sen) effectief in verwijdering van opgeloste organische stoffen (zoals AKF, IEX, ZF).

5.2 Aanbevelingen

- Deeltjesgebonden en opgeloste organische stoffen dragen allebei bij aan een vermindering van de biologische stabiliteit van het water. Het is daarom aanbevelingswaardig om processen in de zuivering te hebben die deeltjesgebonden organische stoffen en/of opgeloste organische stoffen verwijderen.
- De diagnosetool inzetten bij grondwaterlocaties waar de biologische stabiliteit niet voldoet aan de richtwaarden zodat kan worden achterhaald of een aanvullende UF of IEX proces de biologische stabiliteit van het water zal verlagen. Dergelijk onderzoek geeft tevens inzicht in hoeverre resultaten op één grondwaterlocatie (Spannenburg) ook gelden voor andere grondwaterlocaties.
- Onderzoeken of de gevonden effecten van UF en IEX op de biologische stabiliteit bij Berenplaat (Evides) gelden wanneer het onderzoek wordt uitgevoerd op andere oppervlaktewaterlocaties.
- Aanvullend onderzoek naar AKF zou zich kunnen richten op de optimale contacttijd. AKF met een contacttijd van 5 minuten geeft een slechtere biologische stabiliteit, wellicht geeft AKF met een contacttijd van bijvoorbeeld 10 minuten vergelijkbare goede resultaten als AKF met een contacttijd van 20 min.
- Het effect van eindstandige UF onderzoeken op de verbetering van de biologische stabiliteit in een continu werkende praktijkinstallatie om de resultaten van het proefinstallatieonderzoek beschreven in dit rapport te kunnen valideren.
- Het proefinstallatieonderzoek zoals uitgevoerd binnen het project herhalen op andere locaties, zodat duidelijk wordt hoe algemeen de bevindingen gelden voor zuiveringen waar watertypen worden behandeld die leiden tot minder biologisch stabiel drinkwater.

- Vergaande verwijdering van deeltjesgebonden en opgeloste organische stoffen met volstroom hoge druk membraanfiltratie (NF/RO) en de relatie op de biologische stabiliteit. Tevens de impact van integriteitsproblemen met hoge druk NF/RO membranen in relatie tot de biologische activiteit.
- De rol van de verwijdering van opgeloste organische stoffen (concentratie en type) voor de verbetering van de biologische stabiliteit en de relatie met geschikte zuiveringsprocessen gericht op verwijdering van opgeloste organische stoffen.

Literatuur

- BTO 2012.030, Siegers, W., *Het effect van ultrafiltratie, actieve-koolfiltratie en ionenwisseling op de biologische stabiliteit van drinkwater*, December 2012.
- BTO(s) 2014.050, Siegers, W., W. Hijnen en J. Bahlman, *Effecten van actiefkoolfiltratie en zandfiltratie op de biologische stabiliteit van het (drink)water van Berenplaat (Evides)*, April 2015.
- BTO(s) 2015.218, Siegers, W., W. Hijnen, R. Schurer en L. de Pooter, *Het effect van lage druk membraanfiltratie op de biologische stabiliteit van het AKF filtraat van Berenplaat (Evides)*, November 2015.
- Den Boer, J.W., Euser, S.M., Brandsema, P., Reijnen, L. and Bruin, J.P. (2015) Results from the National Legionella Outbreak Detection Program, the Netherlands, 2002-2012. *Emerging Infectious Diseases* 21(7), 1167-1173.
- Levine, Ira N. (2001). *Physical Chemistry* (5th ed.). Boston: McGraw-Hill. [ISBN 0-07-231808-2](#), p. 955.