



Het effect van ultrafiltratie, actieve- koolfiltratie en ionenwisseling op de biologische stabiliteit van drinkwater

Metingen met de Diagnosetool bij Spannenburg (Vitens)
en Berenplaat (Evides)

BTO 2012.030
December 2012

Het effect van ultrafiltratie, actieve-koolfiltratie en ionenwisseling op de biologische stabiliteit van drinkwater

Metingen met de Diagnosetool bij Spannenburg (Vitens) en Berenplaat (Evides)

BTO 2012.030
December 2012

© 2012 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.

Colofon

Titel

Het effect van ultrafiltratie, actieve-koolfiltratie en ionenwisseling op de biologische stabiliteit van drinkwater

Opdrachtnummer

B111684

Rapportnummer

BTO 2012.030

Onderzoeksprogramma

Biologische Stabiliteit

Projectmanager

Dirk Vries

Opdrachtgever

CvO

Kwaliteitsborger(s)

Emile Cornelissen, Paul van der Wielen, Jan Post

Auteur(s)

Wolter Siegers

Verzonden aan

Leden PBC Waterbehandeling en Microbiologie

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten en is openbaar

Voorwoord

Het is al langer bekend dat deeltjes en opgelost organisch koolstof (NOM) invloed hebben op de biologische stabiliteit van drinkwater. Om de effecten van deeltjes en NOM beter te kunnen onderzoeken is de Diagnosetool ontwikkeld. Deze tool combineert op relatief kleine schaal waterbehandelingstechnieken met biologische meetmethoden, er kunnen in totaal vijf technieken simultaan worden vergeleken. De tool is in 2011 en 2012 uitgebreid getest bij Vitens (twee maal bij Spannenburg) en Evides (eenmaal bij Berenplaat) en deze bedrijven worden bedankt voor hun medewerking aan het project en het analyseren van aanvullende chemische en microbiologische parameters. Vooral Peter Sjoerdsma, Daan Frederiksz en collega's, Geo Bakker (Vitens), Jan Bahlman en Rinnert Schurer (Evides) worden bedankt voor hun hulp op de locaties en het meedenken bij de uitvoering van de metingen.

Dit onderzoek is experimenteel uitgevoerd door drie stagiaires van de Ecole Nationale Supérieure de Chimie uit Rennes en Mulhouse (Frankrijk). Marion Vincent, Taina Foucher en Chloe Ceccarelli worden bijzonder bedankt voor hun inzet en rapportage van de resultaten. De technische Engelstalige rapporten van de stagiaires vormen de basis voor dit eindrapport.

Lijst met afkortingen

Op alfabetische volgorde:

AKF	Actieve-koolfiltratie
AOC	Meet methode voor gemakkelijk afbreekbaar organisch koolstof
AT	Autopsie van materialen
ATP	Adenosine trifosfaat, maat voor actieve biomassa
BAS	Biomassa accumulatie snelheid
BPP	Biomassa productie potentie
BVS	Biofilm vorming snelheid
CBM	Continu biofilm monitor
DOC	Opgelost organisch koolstof
DT	Deeltjestelling
FIX	Gefluïdiseerde ionenwisseling
IEX	Ionenwisseling
LC-OCD	Vloeistofchromatografie methode om DOC te karakteriseren
NOM	Natuurlijk organisch materiaal in water
PCHC	Deeltjesgebonden koolwaterstof
PFe	Deeltjesgebonden ijzer
PMn	Deeltjesgebonden mangaan
POC	Deeltjesgebonden organisch koolstof
SUVA	Specific UV Absorbance, is de UV absorptie gedeeld door het DOC-gehalte, maat voor aromaticiteit van het DOC
TCC	Totaal aantal dode en levende bacteriecellen, gemeten met flowcytometrie
TOC	Totaal organisch koolstof
UF	Ultrafiltratie
UV	Ultraviolet absorptie bij 254 nm

Samenvatting

Aanleiding

De microbiologische kwaliteit van het drinkwater speelt een belangrijke rol sinds het begin van de openbare drinkwatervoorziening. Belangrijk hierbij is dat het Nederlandse drinkwater wordt gedistribueerd zonder een desinfectieresidu. De zuivering wordt hiervoor zo goed mogelijk ingericht om drinkwater te produceren met zeer lage concentraties aan microbiologisch afbreekbare stoffen en deeltjes, zodat groei van ongewenste organismen wordt beperkt tijdens distributie van het water. Het beperken van groei van micro-organismen in het drinkwater wordt vaak aangeduid met het begrip biologische stabiliteit.

Op een aantal drinkwaterproductielocaties is verbetering van de biologische stabiliteit van het drinkwater echter nodig. Uit onderzoek blijkt dat verwijdering van een deel van het natuurlijk organisch materiaal (NOM) en deeltjes kan leiden tot een verbetering van de biologische stabiliteit van drinkwater. NOM komt van nature voor in het water en kan componenten bevatten waar bacteriën van kunnen leven en zich vermeerderen. Deeltjes komen ook van nature voor of worden gevormd tijdens de zuivering, deze deeltjes kunnen bij introductie in het distributienet dienen als oppervlak voor bacteriën om op te groeien. In de afgelopen jaren is op verschillende manieren getracht de invloed van NOM en deeltjes op de biologische stabiliteit te ontrafelen, wat voor een deel is gelukt.

Methoden van onderzoek

Om de hierboven beschreven rol van deeltjes en NOM nog beter te kunnen onderzoeken is de Diagnosetool ontwikkeld waarmee simultaan 5 waterbehandelingstechnieken in combinatie met biologische meetmethoden kunnen worden vergeleken. De onderzochte technieken zijn ionenwisseling (IEX), actieve koolfiltratie (AKF) en ultrafiltratie (UF) of een combinatie hiervan. De belangrijkste biologische meetmethoden zijn de biomassa-accumulatiesnelheid (BAS) en de biomassaproductiepotentie (BPP). Daarnaast is een veelvoud aan chemische en biologische analyses gebruikt om de gevonden resultaten te kunnen verklaren. De Diagnosetool is drie keer ingezet in 2011 en 2012, bij Spannenburg (Vitens) en Berenplaat (Evides), respectievelijk een grond- en oppervlaktewater productielocatie. 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 laatste stap AKF toegepast maar er zijn nog problemen met de productie van volledig biologisch stabiel drinkwater. De Diagnosetool is bij Berenplaat ingezet tussen de hogedruk pompen en het distributienet.

Het belangrijkste doel van het onderzoek met de Diagnosetool was het identificeren van factoren die de biologische stabiliteit van het water negatief beïnvloeden. De resultaten zijn gebruikt voor een advies over de te volgen zuiveringsstrategie. Daarnaast is onderzocht of met de Diagnosetool voldoende de zuiveringspraktijk wordt nagebootst, zodat de resultaten kunnen worden gebruikt als voorspelling voor de full-scale installatie.

Resultaten Spannenburg

Zowel AKF, IEX als UF verbetert de biologische stabiliteit van het onderzochte snelfiltraat van Spannenburg. 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.

Alleen IEX geeft ook een duidelijke verbetering van de biologische stabiliteit van het water, maar in mindere mate dan UF. De verbetering met IEX wordt veroorzaakt door verwijdering van afbreekbaar organisch materiaal en door een gedeeltelijke verwijdering van deeltjes. Geconcludeerd kan worden dat de bestaande toevoeging van IEX een behoorlijke verbetering oplevert van de biologische stabiliteit, waardoor de mate van nagroei in het distributiesysteem afneemt.

FIX is niet geschikt om de biologische stabiliteit van het water te verbeteren. Hieruit kan geconcludeerd worden dat alleen verwijdering van NOM door FIX of IEX niet voldoende is om de biologische stabiliteit van het water te verbeteren. Deeltjesverwijdering is dus ook belangrijk voor het bereiken van biologisch stabiel water.

Uit de autopsie van de AKF- en IEX-kolommaterialen blijkt dat AKF en IEX biologisch actieve filters zijn. Deze zouden daarom na optimalisatie van de bedrijfsvoering kunnen dienen als polishing filter. In Spannenburg bleek dat cellellingen met de flowcytometer niet geschikt zijn als indicator voor biologische stabiliteit omdat er te weinig verschil is gemeten. Deze methode zou eventueel wel kunnen worden gebruikt om de werking van UF te controleren.

Van een IEX full-scale filter zijn de biomassa- en deeltjesverwijdering bepaald. De deeltjestellingen bij dit IEX filter geven aan dat circa 59 % van de deeltjes (>1 µm) worden verwijderd. Tevens wordt de concentratie POC en PMn verlaagd. Uit eerder uitgevoerd onderzoek is gebleken dat het drinkwater van Spannenburg sinds de toevoeging van IEX biologisch stabiel is.

Een aanbeveling is de verbetering te monitoren van de biologische stabiliteit na IEX met de full-scale installatie en of deze voldoende is om de problemen met nagroei in het distributiesysteem te voorkomen.

Resultaten Berenplaat

De biologische stabiliteit van het drinkwater van Berenplaat wordt het best verbeterd door IEX. Deze verbetering wordt 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 door de chloordioxide (ClO₂) dosering als nadesinfectie, na de AKF.

Een extra 1,5 min contacttijd AKF levert wel een beduidend lagere BAS waarde op maar tevens een hogere BPP waarde. Dit betekent dat AKF geen verbetering oplevert voor de biologische stabiliteit op langere termijn. Het is niet duidelijk of de ClO₂ dosering ook hier een rol speelt.

Er zijn actieve kool deeltjes gevonden op de UF membranen in de Diagnosetool. Deze kooldeeltjes zijn afkomstig uit de AKF praktijkinstallatie. Deze deeltjes komen dus ook terecht in het reinwater en distributiesysteem van productielocatie Berenplaat. Dergelijke deeltjes kunnen sedimenteren en als oppervlakte dienen voor biofilmvorming in het distributienet. UF verbetert de biologische stabiliteit van het drinkwater wel, maar hadden de membranen relatief snel last van vervuiling en liep de BAS-waarde in de tijd langzaam op. UF lijkt daardoor geen goede toevoeging om het water van Berenplaat beter biologisch stabiel te krijgen. Het oplopen van de temperatuur van het water gedurende de looptijd heeft mogelijk invloed gehad op de resultaten. Hierbij viel op dat de BAS-waarde van de UF niet constant was maar toenam en dat de SUVA-waarde (aromaticiteit van het DOC) afnam in de tijd.

Aanbevolen wordt om de introductie van kooldeeltjes in het distributienet te voorkomen door een extra filtratiestap of door optimalisatie van spoelingen van de koolfilters. Tevens wordt aanbevolen de ClO₂ dosering en de aanwezigheid van makkelijk afbreekbare DOC (laagmoleculaire zuren, gemeten met LC-OCD) te onderzoeken en te voorkomen dat de zuren in het distributienet terechtkomen.

Gebruik Diagnosetool en analysemethoden

Het gebruik van de Diagnosetool om een diagnose te kunnen stellen én advies te kunnen geven over een vervolgstategie over zuivering lijkt succesvol te zijn. De resultaten van de Diagnosetool met IEX op de locatie Spannenburg zijn vergelijkbaar met de praktijkinstallatie. Meer vergelijkingen tussen praktijk en Diagnosetool zijn echter nodig om dit beter te kunnen onderbouwen. Daarnaast zouden er in de Diagnosetool beter met de praktijk vergelijkbare omstandigheden kunnen worden gebruikt, bijvoorbeeld langere contacttijden voor de AKF.

De Diagnosetool is gebruikersvriendelijk te noemen en kan succesvol worden gecombineerd met nageschakelde CBM's. Echter dient verstoring van metingen voorkomen te worden bij de uitvoering omdat dit de resultaten kan beïnvloeden.

Om met de Diagnosetool betrouwbare uitspraken te kunnen doen over het effect van de waterbehandeling op de biologische stabiliteit van het water en de microbiologische waterkwaliteit moeten de BAS, BPP en ATP worden bepaald, de BPP-meting dient echter vaker plaats te vinden om betrouwbaardere resultaten te verkrijgen. Daarnaast wordt aanbevolen om ook de ijzer- en mangaanaccumulatie, POC, PCHC, PFe, PMn, DOC, UV en deeltjes te bepalen. NOM karakterisering kan helpen bij het nauwkeurig analyseren van effecten van specifieke NOM fracties bij geconstateerde gebeurtenissen, om meer betrouwbaarheid te verkrijgen zou de analyse echter vaker (minimaal 3 keer) moeten worden uitgevoerd. Autopsie blijkt een goed hulpmiddel voor het vaststellen van biologie op filters, er dient dan wel gelet te worden op de herhaalbaarheid van de uitvoering voor interpretatie van de gegevens.

Inhoud

Voorwoord	1
Lijst met afkortingen	3
Samenvatting	5
Inhoud	7
1 Inleiding	9
1.1 De rol van NOM en deeltjes	9
1.2 Onderzoeksontwikkelingen van de biologische stabiliteit van drinkwater	10
1.3 Methoden om de biologische stabiliteit van water te bepalen	10
1.3.1 Gemakkelijk afbreekbaar organisch koolstof (AOC)	10
1.3.2 Biofilmvormingssnelheid met de traditionele biofilmmonitor	10
1.3.3 De biomassa-accumulatiesnelheid (BAS) met de continue biofilmmonitor	11
1.3.4 De biomassa-productiepotentie (BPP)	11
1.3.5 Deeltjesgebonden organisch koolstof (POC), koolhydraten (PCHC), ijzer (PFe) en mangaan (PMn) met de hemoflowmethode	11
1.4 Ontwikkeling van de Diagnosetool	11
1.5 Inzet van de Diagnosetool bij Spannenburg en Berenplaat	12
1.6 Doelen van het onderzoek	12
2 Materiaal en methoden	13
2.1 Diagnosetool	13
2.2 Watertypen en uitvoering	13
2.2.1 Grondwater van Spannenburg	13
2.2.2 Oppervlaktewater van Berenplaat	15
2.3 Biologische analysemethoden	16
2.3.1 Continuous Biofilm Monitor (CBM)	16
2.3.2 Adenosine Tri Fosfaat (ATP)	17
2.3.3 Biomassa Productie Potentie (BPP)	17
2.3.4 Total Cell Counts (TCC)	17
2.3.5 Biomassa met behulp van Hemoflow	17
2.3.6 Autopsie van materialen (AT)	18
2.4 Overige analysemethoden	18
2.4.1 Deeltjestelling (DT)	18
2.4.2 Opgelost organisch koolstof (DOC, UV, LC-OCD)	19
3 Resultaten	21
3.1 Case studie Spannenburg,	21
3.1.1 Biomassa-accumulatiesnelheid (BAS) in de CBM	21
3.1.2 Biomassa-productiepotentie (BPP)	23
3.1.3 ATP	24

3.1.4	TCC met flowcytometrie	25
3.1.5	Deeltjes	26
3.1.6	TOC/UV/LC-OCD	28
3.1.7	Autopsie kolommaterialen	31
3.1.8	POC, PCHC, PFe en PMn en deeltjesmeting praktijkinstallatie IEX	32
3.1.9	Discussie resultaten productielocatie Spannenburg	33
3.2	Case studie Berenplaat	34
3.2.1	Biomassa-accumulatiesnelheid (BAS) in de CBM	34
3.2.2	Biomassaproductiepotentie	35
3.2.3	ATP	36
3.2.4	Deeltjes	36
3.2.5	DOC/UV/LC-OCD	37
3.2.6	Autopsie kolommaterialen	39
3.2.7	Discussie resultaten Berenplaat	39
3.3	Werking Diagnosetool	40
4	Conclusies en aanbevelingen	41
4.1	Case studie Spannenburg	41
4.2	Case studie Berenplaat	41
4.3	Gebruik van de Diagnosetool en analysemethoden	42
I	Literatuur	43
II	Schema van de Diagnosetool	45
III	Analyseresultaten DOC en UV Spannenburg	47
IV	Analyseresultaten DOC en UV Berenplaat	49

1 Inleiding

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 van oppervlaktewater ingericht om 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 van grond- en oppervlaktewater 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 beperken van groei van micro-organismen in het drinkwater wordt vaak aangeduid met het begrip biologische stabiliteit.

1.1 De rol van NOM en deeltjes

Op een aantal Nederlandse drinkwaterproductielocaties is verbetering van de biologische stabiliteit van het drinkwater nodig om netvervuiling door deeltjes en groei van pathogenen en van dierlijke organismen te voorkomen. Gedeeltelijke verwijdering van natuurlijk organisch materiaal (NOM) met ionenwisseling (IEX) kan leiden tot een verbetering van de biologische stabiliteit van drinkwater. Dit is onder andere gebleken bij toepassing van anionenwisseling voor NOM/kleurverwijdering op productiebedrijf Oldeholtspade (Vitens), waarbij ook deeltjes worden verwijderd [Schippers en Sjoerdsma, 2007]. De rol van NOM en deeltjes op de biologische stabiliteit is onderzocht in een proefinstallatieonderzoek op productiebedrijf Nuland waarbij ultrafiltratie (UF) en IEX naast elkaar zijn toegepast. Hieruit bleek dat zowel deeltjes als NOM een belangrijke rol spelen voor de biologische stabiliteit van drinkwater [Goulier e.a., 2009]. Verder is bij Waternet gebleken in een proefinstallatieonderzoek als onderdeel van het BTO NOM-onderzoek, dat bij toepassing van gefluïdiseerde anionenwisseling (FIX) (vooral NOM verwijdering) voor het bestaande proces in Weesperkarspel (ozon, ontharding, actieve koolfiltratie en langzame zandfiltratie) de AOC significant verlaagd wordt. In tegenstelling tot deze waarnemingen is in het BTO project "NOM-nanofiltratie" geconstateerd dat anionenwisseling ook voor een verslechtering van de biologische stabiliteit kan zorgen. Componenten afkomstig uit het anionenwisselingshars, afgegeven tijdens de uitwisseling, zouden hieraan ten grondslag kunnen liggen. Verder kan ook de ophoping en groei van biomassa in anionenwisselingsharsen een oorzaak zijn voor de verslechtering van de biologische stabiliteit [Cornelissen, Chasseriaud e.a. 2010].

Deeltjes ontstaan bij de zuivering van grondwater door beluchting en hebben meestal een basis van ijzer- en/of mangaan(hydr)oxiden. Bij oppervlaktewater worden deeltjes met het ruwe water ingenomen en kunnen onder andere deeltjes ontstaan bij de actieve-koolfiltratie stap. Deeltjes worden door snelfiltratie niet volledig verwijderd en komen in het drinkwater door filterspoelingen. De deeltjes worden vervolgens geïntroduceerd in het distributiesysteem. Ook bij vastbed-ionenwisseling (IEX) of AKF wordt een deel van de deeltjes verwijderd door filtratie. Met UF worden alle 'deeltjes' verwijderd die, afhankelijk van het gekozen membraan, groter zijn dan circa 20 nanometer. Dit betekent dat ook levend en dode bacteriën, maar ook polymeren met een molekulgewicht groter dan circa 150 kDa worden verwijderd [Siegers e.a. 2011].

Om de hierboven beschreven rol van deeltjes en NOM beter te kunnen onderzoeken is een tool ontwikkeld waarmee meerdere waterbehandelingstechnieken in combinatie met biologische meetmethoden kunnen worden vergeleken. De te onderzoeken technieken zijn:

- IEX en FIX: verwijdering van NOM en (in vastbed vorm) een gedeelte van deeltjes
- UF: verwijdering van deeltjes
- AKF: kortstondige verwijdering van NOM, gedeeltelijke verwijdering van deeltjes, vorming van een biologisch actief filter waarmee een biologisch afbreekbaar deel van NOM wordt verwijderd.

De ontwikkeling van de toe te passen biologische meetmethoden en de Diagnosetool zijn in de volgende paragrafen beschreven.

1.2 Onderzoekontwikkelingen van de biologische stabiliteit van drinkwater

Al enkele decennia wordt onderzoek uitgevoerd naar de oorzaken en gevolgen van biologische activiteit in drinkwater. Het belangrijkste risico is de mogelijke groei van ziekteverwekkende bacteriën in het distributienet, waarvan *Legionella pneumophila* het meest aansprekende voorbeeld is. In Nederland wordt het drinkwater gedistribueerd zonder een desinfectieresidu. De biologische activiteit in het drinkwater en distributiesysteem wordt beperkt door het distribueren van biologisch stabiel drinkwater.

Over de factoren die de biologische stabiliteit van het drinkwater negatief beïnvloeden, wordt al langer gespeculeerd, maar het is echter nog niet gelukt om in alle situaties deze factoren te achterhalen. Wel is duidelijk geworden dat de zuivering van een productiebedrijf zo moet zijn ingericht dat het uitgaande water voldoende biologisch stabiel is om nagroei van bacteriën in het distributienet te beperken. Het microbiologisch onderzoek naar biologische stabiliteit in het BTO is in de afgelopen decennia onder andere gericht op het ontwikkelen en valideren van meetmethoden. Er is daardoor een reeks methoden beschikbaar waarmee de biologische stabiliteit van het water kan worden gekarakteriseerd. De belangrijkste methoden zijn de traditionele biofilmmonitor (BFM), de snelle continue biofilmmonitor (CBM), assimileerbaar organisch koolstof (AOC), de bepaling van adenosine trifosfaat (ATP) en de potentie tot vorming van biofilm (BPP).

1.3 Methoden om de biologische stabiliteit van water te bepalen

1.3.1 Gemakkelijk afbreekbaar organisch koolstof (AOC)

Er zijn een aantal methoden ontwikkeld die samen de mate van biologische stabiliteit van het water beschrijven. De concentratie gemakkelijk afbreekbaar organisch koolstof (AOC) wordt bepaald door de twee bacteriestammen P17 en NOX toe te voegen aan een gepasteuriseerd watermonster [Van der Kooij en Hijnen, 1984]. *Pseudomonas fluorescens* stam P17 groeit op een groot aantal aminozuren, enkele koolhydraten, aromatische verbindingen en carbozuren, terwijl *Spirillum* sp. stam NOX alleen groeit op carbozuren inclusief oxaal- en mierenzuur, verbindingen die door stam P17 niet worden gemetaboliseerd. Het AOC-gehalte van het drinkwater wordt berekend uit de maximum kolonietallen van beide bacteriestammen, waarbij de groei van P17 en NOX op acetaat wordt gebruikt als referentie. Het AOC-gehalte wordt uiteindelijk uitgedrukt in acetaat-C equivalenten per liter drinkwater.

Onderzoek naar nagroei van heterotrofe bacteriën in drinkwater heeft aangetoond dat bij AOC-concentraties onder de $10 \mu\text{g C l}^{-1}$ de vermeerdering van micro-organismen over het algemeen zeer beperkt is [Van der Kooij, 1992]. Grondwater heeft vrijwel altijd een AOC-concentratie onder deze $10 \mu\text{g C l}^{-1}$. Toch is vermeerdering van *Aeromonas* waargenomen in drinkwater met een AOC-concentratie lager dan $10 \mu\text{g C l}^{-1}$ [Van der Kooij, 1992]. De groei van *Aeromonas* in deze watertypen lijkt gerelateerd aan de vorming van biofilm op oppervlakken die in contact staan met drinkwater.

1.3.2 Biofilmvormingssnelheid met de traditionele biofilmmonitor

De biofilmvorming in drinkwater wordt veroorzaakt door groei van micro-organismen op diverse organische en anorganische stoffen en door sedimentatie en aanhechting van de verschillende organische en/of anorganische stoffen aan oppervlakken. De biofilmvormingpotentie van het water is daardoor ook een parameter die de biologische stabiliteit van het water beschrijft. Er is een methode ontwikkeld waarmee de biofilmvormende eigenschappen van water kan worden bepaald [Van der Kooij e.a. 1993, 1997]. Deze methode maakt gebruik van een biofilmmonitor: een verticaal opgestelde glazen kolom gevuld met op elkaar geplaatste ringen. Het te onderzoeken water wordt met een constante stroom ($0,2 \text{ m s}^{-1}$) door de glazen kolom gevoerd. Tijdens de doorstroming worden op periodieke tijden ringen uit de kolom genomen. De hoeveelheid biomassa op deze ringen wordt bepaald door de hoeveelheid adenosinetrifosfaat (ATP), een maat voor alle actieve biomassa, te bepalen. Uiteindelijk wordt de biofilmvormingssnelheid (BVS, $\text{pg ATP cm}^{-2} \text{ dag}^{-1}$) berekend door de helling van de lineaire toename van het ATP-gehalte als functie van de tijd te berekenen. Naast de BVS kunnen ook de ijzer- en mangaanafzettingssnelheden (FeAS, $\text{mg Fe m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$; MnAS, $\text{mg Mn m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$) worden berekend door naast ATP ook de concentratie ijzer en mangaan aan de ringen te bepalen.

Gebleken is dat de logaritme van de BVS-waarden een lineaire relatie heeft met de logaritme van het 90-percentiel van de aantallen *Aeromonas* in drinkwater bereid uit grondwater [Van der Kooij e.a., 1997]. Uit deze relatie bleek dat er 80% kans was dat het 90-percentiel van 200 kve 100 ml^{-1} *Aeromonas* werd

overschreden in het voorzieningsgebied met een BVS-waarde van boven de 10 pg ATP cm⁻² dag⁻¹. Mede op basis van deze waarnemingen zijn streefwaarden voor het AOC-gehalte (10 µg C l⁻¹) en de BVS-waarde (10 pg ATP cm⁻² dag⁻¹) opgesteld [Van der Kooij e.a., 1997], waaronder het water als biologisch stabiel wordt beschouwd.

1.3.3 De biomassa-accumulatiesnelheid (BAS) met de continue biofilmmonitor

Recent zijn er nieuwe meetmethoden ontwikkeld om de biologische stabiliteit te bepalen. Een vernieuwde snelle continue biofilmmonitor (CBM) is ontwikkeld, waarbij glaspapels in plaats van glazen ringen worden gebruikt voor biofilmvorming. Door de filterwerking van de glaspapels treedt naast biofilmvorming ook accumulatie van biomassa op, waardoor de toename aan ATP in de tijd wordt gedefinieerd als biomassa-accumulatiesnelheid (BAS). Het gebruik van glaspapels leidt tot betere stofoverdracht waardoor binnen een maand tijd de BAS van het water kan worden bepaald. Daarnaast worden de glaspapels tweewekelijks vervangen waardoor elke twee weken een BAS-waarde wordt verkregen (semi-continue metingen). Naast ATP worden ook de ijzer- en mangaanconcentratie van de biofilm bepaald, zodat ook de ijzeraccumulatiesnelheid (FeAS) en mangaanaccumulatiesnelheid (MnAS) kunnen worden bepaald. Verdere details van de CBM zijn weergegeven in van der Kooij & Veenendaal [2012a].

1.3.4 De biomassaproductiepotentie (BPP)

Ook is de biomassaproductiepotentie (BPP) methode voor drinkwater recent verbeterd, zodat het gehalte afbreekbaar organisch materiaal met de BPP-methode kan worden bepaald. De BPP-waarde wordt bepaald door drinkwater te incuberen met een inoculum van rivierwater en/of water na actief koolfiltratie en tijdens een periode van 28 dagen periodiek het ATP-gehalte te bepalen. Het oppervlakte onder de grafiek, wanneer ATP tegen de tijd wordt uitgezet, is vervolgens een maat voor de hoeveelheid afbreekbaar organisch materiaal. Verdere details van deze BPP-methode zijn weergegeven in van der Kooij & Veenendaal [2012b].

1.3.5 Deeltjesgebonden organisch koolstof (POC), koolhydraten (PCHC), ijzer (PFe) en mangaan (PMn) met de hemoflowmethode

Het concentreren van niet-opgeloste componenten (organisch koolstof, koolhydraten, ijzer en mangaan) in drinkwater is de derde methode die recent is ontwikkeld om de mate van biologische stabiliteit van het drinkwater te beschrijven. Deze biomassa-achtige componenten spelen waarschijnlijk ook een rol bij groei van (micro-)organismen in het distributiesysteem. Van nature is de concentratie aan deze niet-opgeloste componenten te laag om te kunnen bepalen, waardoor een concentratiestap nodig is. Deze concentratiestap wordt uitgevoerd door een groot volume water (~ 1000 liter) met behulp van hemoflow te concentreren tot 500 à 800 ml en het gehalte TOC, koolhydraten, ijzer en mangaan in het concentraat te bepalen. Het hemoflowfilter dat hiervoor wordt gebruikt is een holle vezel ultrafiltratiemembraan (1,8 m² effectief oppervlakte) van polysulfon met een cut-off waarde voor het moleculaire gewicht van 20 kDalton. Dit betekent dat deeltjes, inclusief colloïden, met een grootte van 0,01 µm het membraan niet passeren. De concentratie TOC, koolhydraten, ijzer en mangaan die zijn gemeten, worden uiteindelijk uitgedrukt als deeltjesgebonden organisch koolstof (POC), deeltjesgebonden koolhydraten (PCHC), deeltjesgebonden ijzer (PFe) en deeltjesgebonden mangaan (PMn) en concentraties worden teruggerekend naar concentraties die aanwezig waren in het water voor de concentratiestap. Verdere details zijn weergegeven in van der Kooij & Veenendaal (2012c).

1.4 Ontwikkeling van de Diagnosetool

Door de ontwikkeling van de CBM werd het ook mogelijk om een kleinschalige proefinstallatie te maken voor onderzoek naar de effecten van waterbehandelingstechnieken op de biomassa-accumulatiesnelheid (BAS). Met de traditionele biofilmmonitor was dit lastig omdat het hoge debiet van de biofilmmonitor (circa 300 l/h) noodzaakte tot de inzet van relatief grote proefinstallaties. De CBM wordt daarentegen bedreven met een debiet van slechts 40 l/h. Om op proefinstallatieschaal een vergelijking te kunnen maken tussen verschillende zuiveringsstappen, dienen daarnaast meerdere installaties te worden ingezet. Echter vanwege de grootschaligheid van een dergelijke opzet wordt meestal voor een minimaal aantal installaties gekozen. Met de nieuw ontwikkelde CBM kon dus een nieuwe tool worden ontwikkeld waarmee het effect van meerdere filtratie technieken op de BAS van het water tegelijkertijd

onderzocht kon worden. Deze ontwikkeling heeft uiteindelijk geresulteerd in de Diagnosetool. Met deze Diagnosetool is het mogelijk om het effect van vijf verschillende technieken op de biologische stabiliteit van het water simultaan te onderzoeken door CBM's direct achter elke filtratietechniek te plaatsen. Filtratietechnieken die in de Diagnosetool kunnen worden onderzocht zijn: ionenwisseling (IEX), actieve koolfiltratie (AKF), zandfiltratie (LZF, DLF), maar ook ultrafiltratie (UF) en microfiltratie (MF) of combinaties van deze technieken. Deze technieken worden in de Diagnosetool vergeleken met het ingaande onbehandelde water.

1.5 Inzet van de Diagnosetool bij Spannenburg en Berenplaat

Om de Diagnosetool te kunnen testen is onderzoek uitgevoerd bij productielocaties met biologisch instabiel water. Bij Spannenburg wordt grondwater behandeld met als laatste stap anionenwisseling om kleur te verwijderen. Sinds de inzet van IEX is de biologische stabiliteit van het geproduceerde drinkwater toegenomen, voor de IEX is het water biologisch instabiel te noemen. De toename van de biologische stabiliteit kan worden verklaard door een gedeeltelijke verwijdering van NOM en deeltjes door de IEX. De Diagnosetool is ingezet voor de IEX zodat er een vergelijking mogelijk werd met de praktijkinstallatie en is er met UF de rol van deeltjes onderzocht. Tevens zijn IEX en een combinatie van UF en IEX onderzocht om meer inzicht te krijgen in de rollen van NOM en deeltjes.

Bij Berenplaat wordt oppervlaktewater behandeld tot drinkwater, als laatste stap wordt actieve kool gebruikt. Ondanks de AKF is het drinkwater nog niet voldoende biologisch stabiel. Met de Diagnosetool is onderzocht of er hiervoor een verklaring kan worden gevonden en of IEX en UF in vergelijking met AKF tot een verbetering van de biologische stabiliteit zou kunnen leiden.

1.6 Doelen van het onderzoek

Het belangrijkste doel van het onderzoek is te achterhalen of met de meetresultaten van de Diagnosetool factoren kunnen worden geïdentificeerd die de biologische stabiliteit van het water negatief beïnvloeden. Deze resultaten worden gebruikt om een advies te geven over de te volgen zuiveringsstrategie. Daarnaast is de onderzoeksvraag gesteld of de filtratietechnieken die in de Diagnosetool worden toegepast, voldoende de zuiveringspraktijk kunnen nabootsen, zodat resultaten uit de Diagnosetool kunnen worden gebruikt als voorspelling voor de full-scale installatie.

2 Materiaal en methoden

2.1 Diagnosetool

Met de Diagnosetool kan op relatief kleine schaal vijf verschillende technieken simultaan worden vergeleken. Het kolomonderzoek kan zowel up- als downflow worden uitgevoerd zodat ook bijvoorbeeld fluïde ionenwisseling kan worden onderzocht. Aan elke techniek en het ruwe water kan een CBM worden gekoppeld. Daarnaast is er per techniek een monsterkraan aanwezig, zodat monsters kunnen worden genomen voor aanvullende biologische stabiliteitsparameters, microbiologische parameters en chemische parameters, en kan bijvoorbeeld nog een deeltjesteller worden aangesloten. Op deze manier kan in circa 3 maanden een beeld worden verkregen van de effecten van diverse filtratietechnieken op de biologische en chemische waterkwaliteit.

De Diagnosetool, uitgevoerd in een aluminium profiel, RVS en teflon leidingwerk en glazen kolommen, heeft een grootte van circa 2 * 1 * 2 m (l*b*h), is verrijdbaar omdat het is voorzien van wieltjes. De aansluitingen zijn 230 V, water (1,5 bar voordruk) en een afvoer (tot 500 l/h). Een pomp zorgt voor een instelbare voordruk en constante debietregelaars zorgen voor een traploos instelbaar debiet tot 60 l/h per techniek. De kolommen hebben een inwendige diameter van 5 cm maar kunnen ook worden verwisseld voor bijvoorbeeld ultrafiltratie (UF). De tool bevat een vaste spoel/regeneratie unit met snelkoppelingen zodat (handmatige) spoelingen kunnen worden uitgevoerd. In de bijlage is een gedetailleerd schema van de installatie weergegeven, in figuur 1 is een foto van de opstelling te zien.

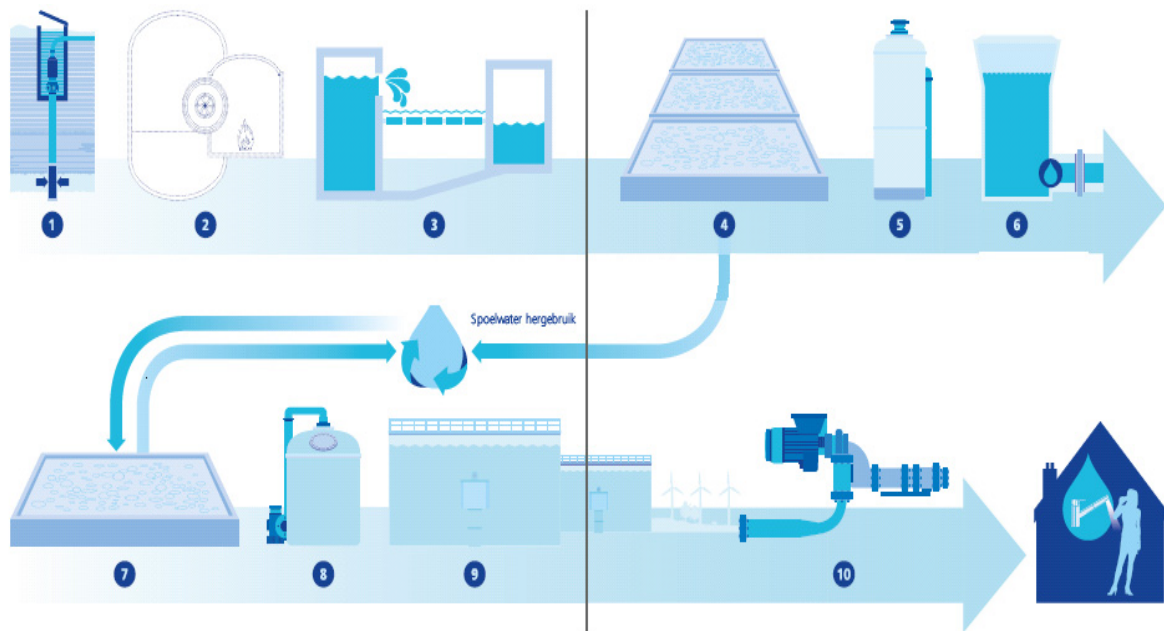


Figuur 1: Foto van de Diagnosetool met CBM's in Spannenburg

2.2 Watertypen en uitvoering

2.2.1 Grondwater van Spannenburg

De zuivering van Spannenburg is weergegeven in figuur 2. De Diagnosetool is geplaatst na het zandfilter (7) en dus voor de ionenwisseling (8). In tabel 1 zijn de gegevens vermeld van de gemiddelde waterkwaliteit in 2011.



Figuur 2: Schematische weergave van de zuivering van Spannenburg

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.

Tabel 1: Gemiddelde waterkwaliteitgegevens van Spannenburg van het water dat is gebruikt voor de Diagnosetool

Parameters	Influent water voor de Diagnosetool
NH ₄ ⁺ (mg/l)	0
Ca ²⁺ (mg/l)	36 ± 4,4
Cl ⁻ (mg/l)	28 ± 1,6
PO ₄ ³⁻ (mg/l)	0
EGV (mS/cm)	50 ± 1
Fe (mg/l)	0
Mg ²⁺ (mg/l)	10 ± 0,5
Mn (mg/l)	0
NO ₃ ⁻ (mg/l)	12 ± 0,5
NO ₂ ⁻ (mg/l)	0
Si (mg/l)	15
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	0,6
TOC (mg C/l)	7,4 ± 0,2
Hardheid (mmol/l)	1,3 ± 2
UV abs (m-1)	20
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	299 ± 9
pH (-)	7,9 ± 0,1

Tabel 2: Samenvatting van de onderzochte behandelingen met de Diagnosetool en analyses bij Spannenburg (voor de uitleg zie tekst)

Meetperiode	AKF	IEX	UF	FIX	UF-IEX	Analyses
Apr 2011 – Juli 2011	1	2	1	1	-	CBM, ATP, FCM, DT, UV, TOC Anorganisch pakket, LC-OCD, AT
Nov 2011 – Feb 2012	1	1	1	-	1	CBM, ATP, BPP, DT, UV, TOC LC-OCD, AT

In tabel 2 zijn de onderzochte filtratietechnieken vermeld, met de uitgevoerde analyses voor beide meetperiodes. De gebruikte actieve kool (Norit GAC 830 P) bestond uit nieuwe kooldeeltjes met een gemiddelde diameter van 1.0 mm. Het specifieke oppervlak bedraagt 1150 m²/g, de dichtheid is 500 kg/m³. Elke 2 weken is de kool gespoeld met een opwaartse flow om gesuspendeerd materiaal op de kolom te verwijderen.

Het door Vitens gebruikte IEX hars (Purolite A860S FL) bestaat uit witte monodisperse korrels met een diameter van 0.5-0.7 mm. Het type is sterk basisch (anion exchange resin (type I)). Het materiaal bestaat uit een matrix van macroporeus polyacryl gecrosslinked met divinylbenzeen heeft quaternair ammonium als functionele groepen. De capaciteit is 0.8 eq/L en de dichtheid bedraagt 1.08 g/ml. De IEX is elke 2 weken geregenereerd met 5 l zoutoplossing (10% NaCl) in tegenovergestelde richting. Het tweede type hars (Lewatit VPOC 1072) is een geltype met heterodisperse korrels (diameter 0,55 mm), heeft een capaciteit van 1,25 eq/l en een dichtheid van 1,09 g/ml. Het is een gecrosslinked polyacrylamide hars met quaternair ammonium als functionele groep. Dit hars is in het onderzoek betrokken vanwege de geschiktheid voor fluïde ionenwisseling (FIX), maar is ook in vastbed vorm onderzocht. Vanwege de iets hogere dichtheid wordt dit type minder geëxpandeerd tijdens het FIX proces [Cornelissen, Chasseriaud e.a. 2010].

Twee in serie geschakelde Hemoflow HF 80S ultrafiltratie membranen zijn gebruikt bij elk experiment, deze zijn halverwege het experiment vervangen vanwege oplopende druk. Het membraanmateriaal bestaat uit een polysulfon structuur en de specifieke MWCO is 20 kDa. De ultrafiltratie modules zijn elke 2 weken gedurende 10 min gespoeld (forward flow) met influent water om de membranen schoon te spoelen. In tabel 3 zijn de omstandigheden van het eerste en tweede experiment weergegeven.

Tabel 3: Omstandigheden van de uitgevoerde experimenten bij Spannenburg

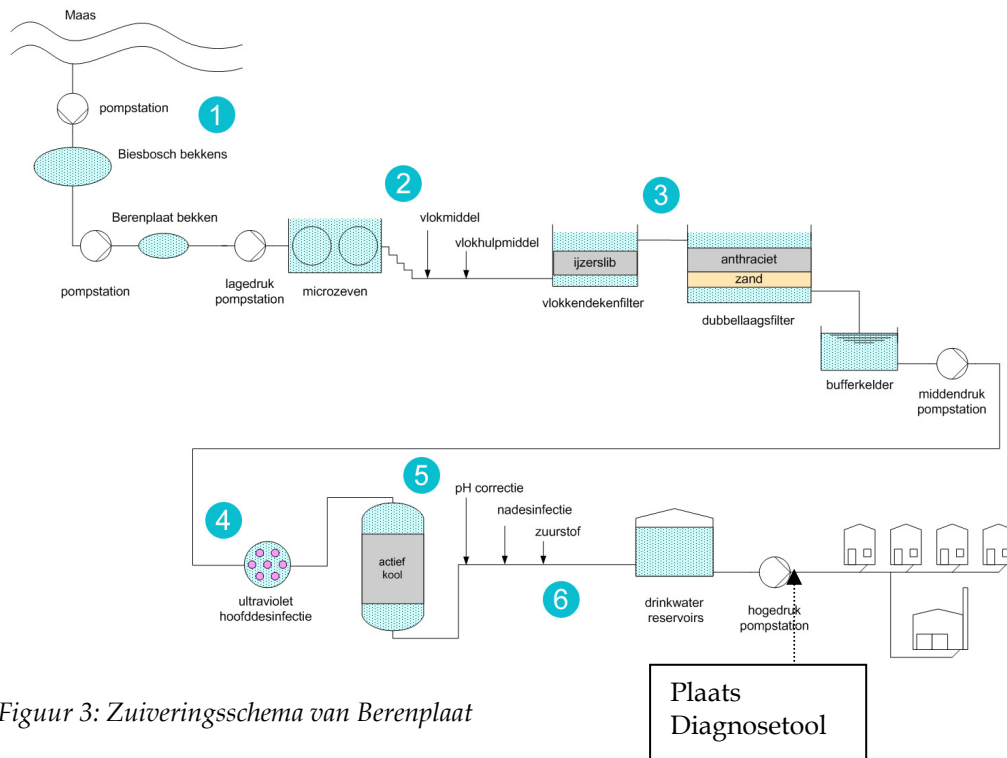
Kolom	Type	Hoogte (cm)	Contacttijd (min)	Regeneratie of spoeling
AKF	Norit	54	1,5	Met influent in reverse flow
IEX-1	Purolite A860	54	1,5	Met 5 BV 10% NaCl oplossing in reverse flow
FIX	Lewatit VPOC 1072	54 (zonder fluïdisatie)	1,5	Met 5 BV 10% NaCl oplossing in reverse flow
IEX-2	Lewatit VPOC 1072	54	1,5	Met 5 BV 10% NaCl oplossing in reverse flow
UF	Hemoflow	-	-	Met influent in reverse flow
UF-IEX	Hemoflow /Purolite	54	1,5	Met influent in reverse flow en 5 BV 10% NaCl oplossing in reverse flow

Ook zijn deeltjestellingen en een biomassameting na concentrering met de hemoflow uitgevoerd na een praktisch IEX-filter in Spannenburg om een reëel beeld te krijgen van het voorkomen van biomassa en deeltjes voor en na IEX.

2.2.2 Oppervlaktewater van Berenplaat

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. Tijdens de meetperiode werd 70 mg/l ClO₂ gedoseerd voor de reinwaterkelder. In tabel 4 is vermeld welke

filtratietechnieken bij productielocatie Berenplaat zijn onderzocht, in tabel 5 zijn de omstandigheden vermeld.



Figuur 3: Zuiveringsschema van Berenplaat

Tabel 4: Samenvatting van de onderzochte behandelingen met de Diagnosetool en analyses bij Berenplaat (voor de uitleg zie tekst)

Meetperiode	AKF	IEX	UF	FIX	UF-IEX	Meetmethoden
Apr 2012 – Juli 2012	1	1	1	-	-	CBM, ATP, BPP (2 maal), DT, UV, TOC LC-OCD, AT

Tabel 5: Omstandigheden van de uitgevoerde experimenten bij Berenplaat

Kolom	Type	Hoogte (cm)	Contacttijd (min)	Regeneratie of spoeling
AKF	Norit	54	1,5	Met influent in reverse flow
IEX	Purolite A860	54	1,5	Met 5 BV 10% NaCl oplossing in reverse flow
UF	Hemoflow	-	-	Met influent in reverse flow

De omstandigheden en karakteristieken van de AKF, IEX en UF zijn verder toegelicht bij Spannenburg, paragraaf 2.2.1.

2.3 Biologische analysemethoden

2.3.1 Continuous Biofilm Monitor (CBM)

De biomassa-accumulatiesnelheid (BAS) werd semicontinu bepaald van water na elke filtratietechniek in de Diagnosetool. Glasparelmonitor (figuur 4) zijn geïnstalleerd en gedurende de drie meetperioden werden tweewekelijks twee van de vier cuvetten met glasparels vervangen. De uitgehaald cuvetten met

glasparels werden in glazen buizen met 10 ml steriel drinkwater geplaatst en vervolgens op het laboratorium gedurende 2 minuten ultrasoon behandeld. Deze ultrasone behandeling werd vervolgens nog twee keer herhaald met 10 ml vers steriel drinkwater. De 3 keer 10 ml per glasparelcuvet werden bij elkaar gevoegd en daarna werd van de gepoolde suspensie het ATP-gehalte, de temperatuur en de ijzer- en mangaanconcentraties bepaald. Met behulp van deze gegevens werden de BAS-waarde en de ijzer- en mangaanaccumulatiesnelheden berekend zoals beschreven in paragraaf 1.3.3.



Figuur 4: CBM met debietmeters en buisjes met glazen parels

2.3.2 Adenosine Tri Fosfaat (ATP)

Het ATP-gehalte werd bepaald als maat voor de hoeveelheid actieve biomassa in het water. De ATP-bepaling werd uitgevoerd met Celsis reagentia conform Kiwa Water Research huisvoorschrift LMB-002. Naast de watermonsters werden ook de suspensies van de biofilmringen met dezelfde methode onderzocht op de hoeveelheid ATP.

2.3.3 Biomassa Productie Potentie (BPP)

De biomassaproductiepotentie werd bepaald door een erlenmeyer te vullen met 600 ml van het te onderzoeken drinkwater, vervolgens een inoculum (rivierent) aan toe te voegen en te incuberen bij 25°C voor 14 dagen. Tijdens de incubatieperiode werd regelmatig het ATP-gehalte (als maat voor actieve biomassa bepaald). De cumulatieve groeiopbrengst in 14 dagen en 28 dagen werd berekend als maat voor de groeibevorderendheid van het drinkwater.

2.3.4 Total Cell Counts (TCC)

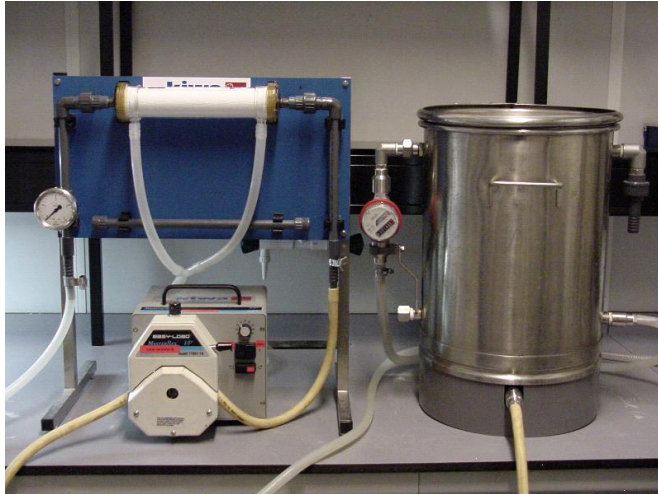
Het totale aantal cellen is bepaald met de flowcytometer, waarbij tevens onderscheid werd gemaakt tussen dode en levende cellen.

2.3.5 Biomassa met behulp van Hemoflow

Met behulp van de hemoflow (ultrafiltratiemembraan van polysulfon; cut-off 20 kDa) werd ongeveer 1000 liter water geconcentreerd tot 500 tot 800 ml (concentratiefactor: 1200 tot 2000 keer) (figuur 5). Aan het concentraat werden de volgende analyses uitgevoerd:

- Niet-opgeloste organisch koolstof (POC)
- Koolhydraten (PCHC)
- IJzer (PFe)
- Mangaan (PMn)

De concentratie van deze stoffen in het water werd vervolgens berekend met de concentratiefactor.



Figuur 5: Foto van de Hemoflow opstelling

2.3.6 Autopsie van materialen (AT)

Voor het bepalen van de werking van een techniek in de Diagnosetool, kan informatie over het 'totale' aantal micro-organismen in filtermateriaal gewenst zijn. Tevens kan een koloniegetal van bepaalde micro-organismen (bijvoorbeeld *Aeromonas*) of het ATP-gehalte belangrijke informatie opleveren over het effect van waterbehandeling processen op groepen van micro-organismen die zich onder de heersende omstandigheden kunnen handhaven en eventueel vermeerderen. Nadat ca. 5 gram van het materiaal in 100 ml steriel Milli-Q water is gebracht wordt de biomassa losgemaakt door middel van ultrasonische trillingen. Vervolgens kan het aantal micro-organismen bepaald worden door 0,05 ml, in drievoud, uit te spatelen over een gewenste voedingsbodem, waarna een incubatie volgt. Tevens kan het ATP-gehalte bepaald worden. Door een bekende hoeveelheid materiaal te suspenderen in een bekende hoeveelheid water, kan, na droging en bepaling van het gewicht en volume van het in bewerking genomen materiaal, het droogvolume bepaald worden. Het aantal kolonievormende eenheden (kve) of het ATP-gehalte worden dan uitgedrukt per ml filtermateriaal.

2.4 Overige analysemethoden

Bij het eerste experiment bij productielocatie Spannenburg zijn het ingaande water en alle effluentstromen geanalyseerd op verschillende anorganische componenten (zie tabel 1), UV en DOC door het laboratorium van Vitens. Bij de twee vervollexperimenten op dezelfde locatie is het onderzoek vooral gericht op UV en DOC, omdat de overige parameters weinig meerwaarde boden tijdens het eerste onderzoek bij Spannenburg. Overigens zijn alle analysegegevens wel verwerkt in de eerste Spannenburg rapportage [Vincent, 2011].

2.4.1 Deeltjestelling (DT)

Deeltjestelling wordt uitgevoerd met zogenaamde deeltjestellers. De meeste deeltjestellers kunnen tegenwoordig vanaf 1 μm tellen, waarbij de weergave van de deeltjesgrootteverdeling afhangt van het aantal kanalen dat beschikbaar is (bijvoorbeeld 1-2, 2-5, 5-10 μm). Dit aantal kanalen varieert tussen 6 tot 312, afhankelijk van de fabrikant. Bij de meeste deeltjestellers wordt laser diffractie toegepast wat tevens de ondergrens bepaalt van de te tellen deeltjes (1 μm), nog niet zolang geleden lag deze op 2 μm of hoger. In de loop der tijd is de ondergrens verlaagd door de ontwikkeling van de toegepaste laserstralen met andere golflengtes [Siegers, Raffin, 2007].

Het type deeltjesteller dat in deze studie is gebruikt, is de Waterviewer van het merk Pamas. Water stroomt door een buis en deeltjes worden gescand door een laserstraal. De laserstraal valt op een detectorplaatje dat de straal registreert. De grootte van het deeltje bepaalt de tijd van onderbreking van de laserstraal. De deeltjesteller heeft een meetbereik van 1 tot 100 μm en beschikt over acht kanalen. Het aantal kanalen geeft het aantal grootteklassen van de gemeten deeltjes weer. Voor de metingen is gekozen voor indeling in de volgende klassen: 1-2 μm , 2-3 μm , 3-4 μm , 4-5 μm , 5-7 μm , 7-10 μm , 10-15 μm en > 15 μm .

2.4.2 Opgelost organisch koolstof (DOC, UV, LC-OCD)

DOC (Dissolved Organic Carbon) wordt bepaald door het organisch koolstof te mineraliseren tot koolzuurgas, waarna het met Infrarood de concentratie wordt bepaald. Het voorschrift dat meestal wordt toegepast is NEN-EN 1484. Vooraf wordt het vluchtige OC er uitgeblazen en wordt de DOC ook wel NPOC (Non Purgeable OC) genoemd.

De **UV-absorptie** (UltraViolet) is bepaald bij 254 nm, ten opzichte van de absorptie van Milli-Q water (ultrazuiver water). De absorptie geeft het verzadigd deel aan van het organisch koolstof, bij een hoge waarde bevat het DOC veel dubbele bindingen. Overigens vertoont de UV-absorptie vaak een lineaire relatie met het DOC-gehalte. Het voorschrift dat meestal wordt toegepast is **NEN-ISO 13964**.

LC-OCD: Vloeistofchromatografie (LC) is een fysische scheidingstechniek waarbij een vloeistof (mobiele fase) door een kolom wordt geleid. Deze kolom is gepakt met poreus materiaal (stationaire fase) waarin kleine moleculen makkelijk diffunderen. De snelheid waarmee de componenten met de mobiele fase de kolom zullen verlaten hangt af van de affiniteit voor de stationaire fase. Kleine moleculen diffunderen gemakkelijk in de stationaire fase, hierdoor zullen grotere moleculen sneller doorheen de kolom bewegen dan kleine. De affiniteit van een component voor de stationaire fase is echter niet alleen afhankelijk van de molecuulgrootte, maar ook van fysische interacties en hydrofobe interacties met de stationaire fase. Deze drie interacties maken de interpretatie van de resultaten complex, maar door vele studies is men erin geslaagd om de fracties te benoemen.

Organic Carbon Detection (OCD): Nadat de componenten gescheiden op grootte en affiniteit uit de kolom stromen, wordt de hoeveelheid van elke fractie bepaald met een OCD. Hiervoor wordt een Graentzel thin film reactor gebruikt. In deze reactor worden de koolstofatomen van de verschillende organische stoffen omgezet naar CO₂. Deze omzetting gebeurt onder invloed van zuurstofradicalen. Dit wordt aangemaakt met behulp van een sterke 185 nm lage druk kwiklamp. Het vrijgekomen CO₂ wordt gemeten met behulp van infrarood spectroscopie. Combinatie van de kwalitatieve waarden van LC en de kwantitatieve waarden van OCD geeft een chromatogram waarbij de OCD grafisch wordt uitgezet ten opzichte van de tijd [Siegers e.a. 2004].

De volgende fracties zijn te onderscheiden:

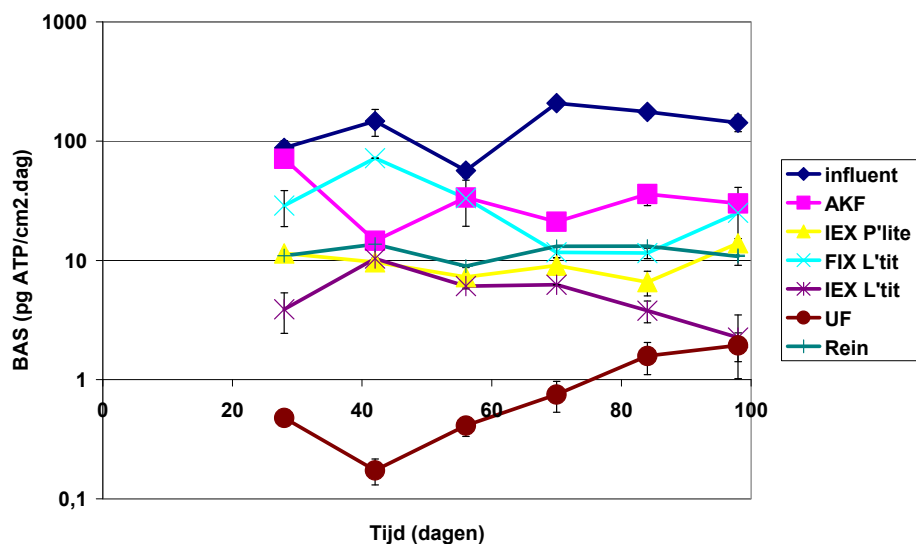
- Biopolymeren zoals polysacchariden en eiwitten, over het algemeen grote en ongeladen verbindingen;
- Humuszuren (HS), humus- en fulvinezuren, geladen grote tot middelgrote organische zuren, ca 60% van het totale DOC-gehalte in onbehandeld water;
- Building blocks (bouwstenen), deels geladen, hydrolyseringsproducten van humuszuren;
- Laag-moleculaire organische zuren (LMW Acids), kleine geladen organische zuren zoals azijnzuur en mierenzuur;
- LMW Neutrals and Amphiphilics (laag hydrofoob), de overige kleine ongeladen verbindingen (bijvoorbeeld alcoholen, aldehyden, ketonen and amino zuren)
- Hydrofoob organisch koolstof (HOC), OC met een hydrofoob karakter, met een retentietijd > 200 min.

3 Resultaten

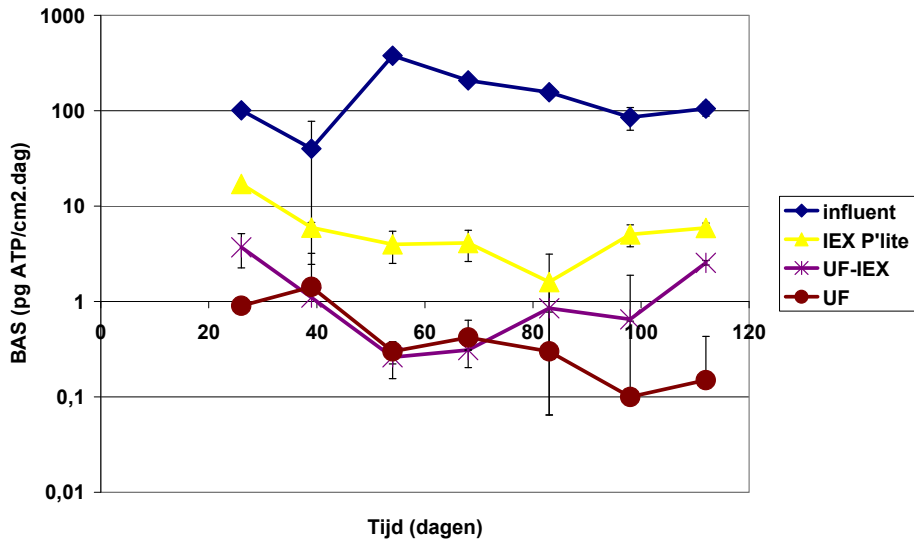
3.1 Case studie Spannenburg,

3.1.1 Biomassa-accumulatiesnelheid (BAS) in de CBM

In figuren 6 en 7 zijn de effecten van de verschillende filtratietechnieken in de Diagnosetool op de BAS in de CBM weergegeven. Op de Y-as is de BAS weergegeven in pg/cm².dag. In figuur 6 zijn ook de BAS-waarden van het reinwater weergegeven, die op hetzelfde tijdstip met een CBM zijn bepaald. Uit beide figuren blijkt dat het influent BAS-waarden vertoont die meestal hoger zijn dan 100 pg ATP/cm².dag. Bij het toepassen van UF of de combinatie UF-vastbed IEX worden de BAS-waarden het sterkst verlaagd tot ongeveer 0,1 - 1,0 pg ATP/cm².dag. De toepassing van vastbed IEX (Purolite en Lewatit) verlaagt de BAS-waarde van het behandelde water tot circa 10 pg ATP/cm².dag en AKF en FIX zorgen voor een verlaagde BAS-waarde in het water tot circa 50 pg ATP/cm².dag. De BAS-waarden van het reinwater zijn vergelijkbaar met de BAS-waarden van het effluent van de IEX Purolite in de Diagnosetool, waardoor mag worden verondersteld dat effecten van de IEX in de Diagnosetool op de BAS te vergelijken zijn met effecten die in de praktijkfilters worden waargenomen.



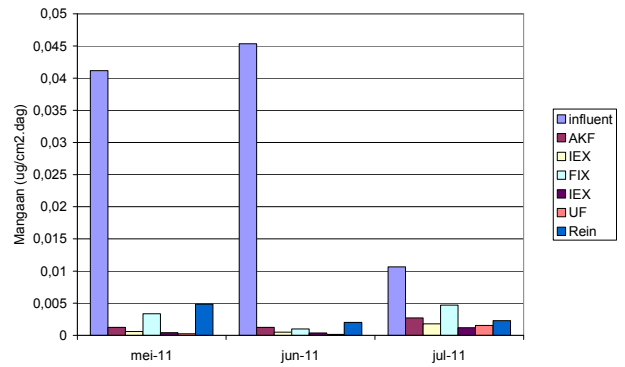
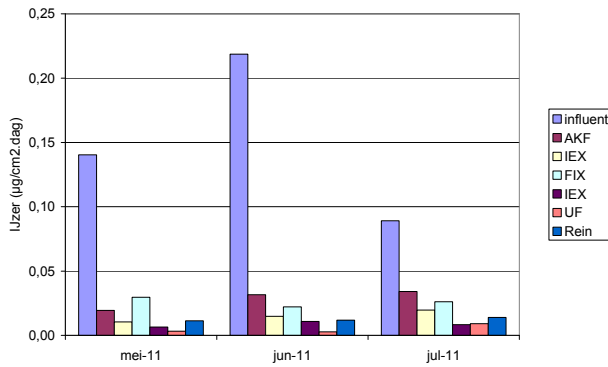
Figuur 6: Verloop van de BAS in de CBM's die zijn geplaatst na de verschillende filtratiekolommen in de Diagnosetool tijdens het 1^e experiment te Spannenburg



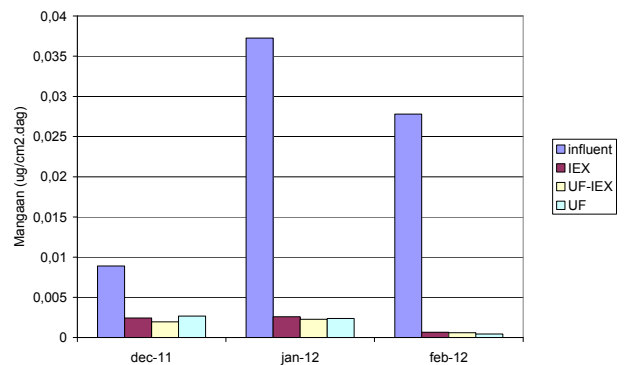
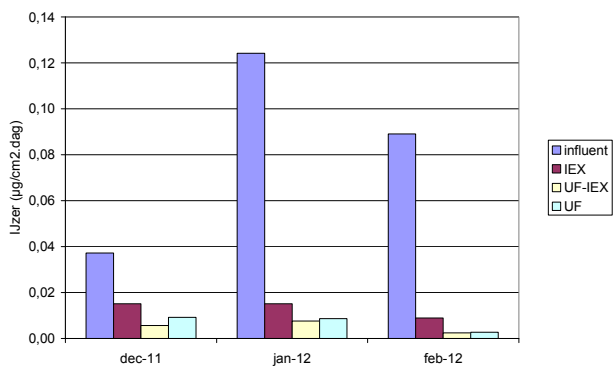
Figuur 7: Verloop van de BAS in de CBM's die zijn geplaatst na de verschillende filtratiekolommen in de Diagnosetool tijdens het 2^e experiment te Spannenburg

IJzer en Mangaan aangroei

In de figuren 8 en 9 worden de resultaten getoond van de ijzer- en mangaanaccumulatiesnelheid op de glaspapels van drie metingen tijdens de 1^e periode. Idem in de figuren 10 en 11 voor de 2^e periode. Uit deze figuren blijkt dat zowel voor ijzer als mangaan de accumulatie bij het influent relatief hoog is en dat alle toegepaste filtratietechnieken zorgen voor een forse verlaging. Ook bij de meting van het reine water is de accumulatie fors verlaagd. AKF en FIX vertonen in een vergelijking de hoogste ijzer- en mangaanaccumulatie, terwijl dit voor UF en UF-IEX het laagst is. IJzer- en mangaancolloïden zijn blijkbaar gemakkelijk filtreerbaar, dat ook wordt bevestigd door de deeltjestellingen. Wat verder nog opvalt, is dat ijzer en mangaan in een constante verhouding aanwezig zijn en dat de influentwaarde een factor vijf kan verschillen. Ook valt op dat IEX en reinwater nagenoeg gelijk zijn wat nogmaals aangeeft dat de tool representatief is voor de praktijkinstallatie.



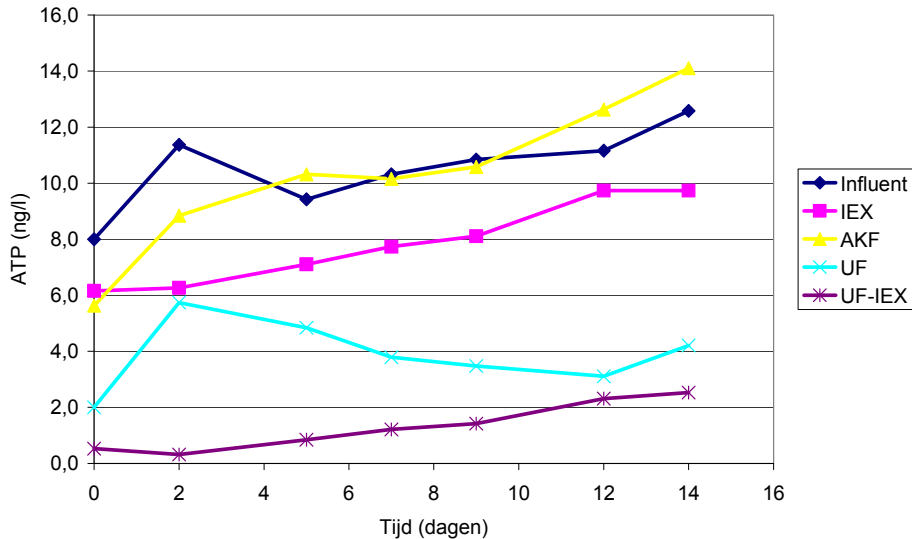
Figuren 8 en 9: Respectievelijk de ijzer- en mangaanaccumulatie op de CBM glasporels op dag 42, 70 en 98 tijdens het 1^e experiment (in de legenda van boven naar beneden: IEX is van Purolite; FIX en IEX is van Lewatit)



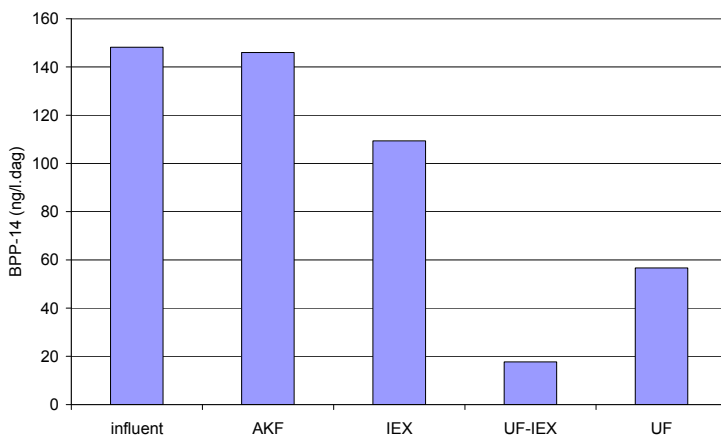
Figuren 10 en 11: Respectievelijk de ijzer- en mangaanaccumulatie op de CBM glasporels op dag 39, 68 en 98 tijdens het 2^e experiment (de IEX is van Purolite)

3.1.2 Biomassaproductiepotentie (BPP)

In figuur 12 is de BPP van het behandelde water weergegeven op dag 83 tijdens het 2^e experiment; bij het 1^e experiment is BPP niet gemeten. In figuur 13 is de cumulatieve BPP-14 waarde weergegeven op de 14e dag na de start van de BPP meting. Gedurende de eerste twee dagen neemt de biomassa toe in het water na AKF en in het influent. In het water na UF en IEX neemt de biomassa toe na dag 2. Deze resultaten laten zien dat in alle gevallen gemakkelijk en moeilijk afbreekbaar materiaal aanwezig is in het water.



Figuur12: Verloop van het ATP-gehalte tijdens de BPP test van het 2^e experiment (monsters genomen op dag 83), de IEX is van Purolite



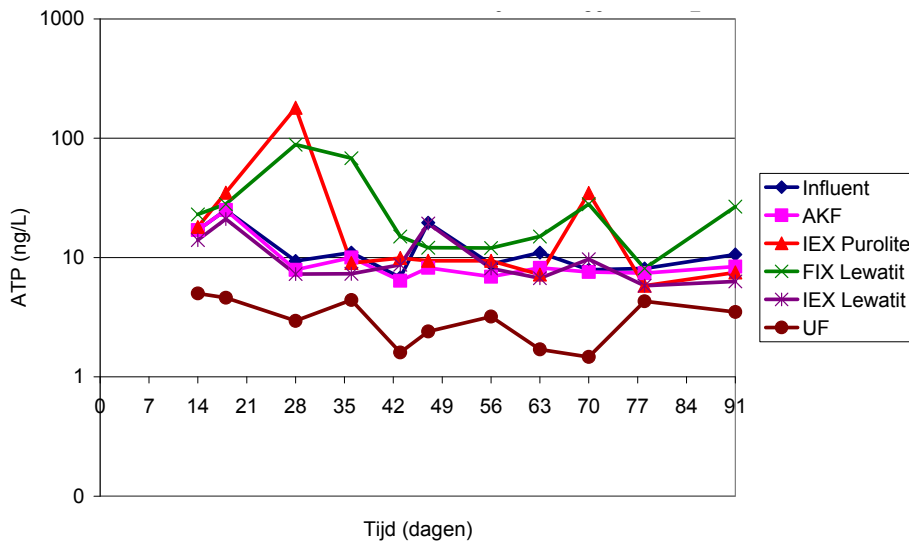
Figuur 13: Cumulatieve BPP waarden op de 14^e dag na inzetten, de IEX is van Purolite

De cumulatieve BPP-waarden na 14 dagen (BPP-14) is een maat voor de hoeveelheid biomassa die in het water kan worden gevormd door de aanwezige afbreekbare stoffen. Deze BPP-14 is weergegeven in figuur 13. Uit figuur 13 blijkt dat het UF-IEX effluent de laagste biomassaproductie vertoont. Opvallend genoeg lijkt de biomassaproductie in het AKF-effluent (let wel, met 1,5 min contacttijd) vergelijkbaar met die in het influent is gemeten. AKF met 1,5 min contacttijd verlaagt de BPP van het water dus niet. Mogelijk dat een langere meer realistischere contacttijd wel een lagere BPP waarde oplevert. UF en in mindere mate IEX zorgen wel voor een verlaging van de BPP.

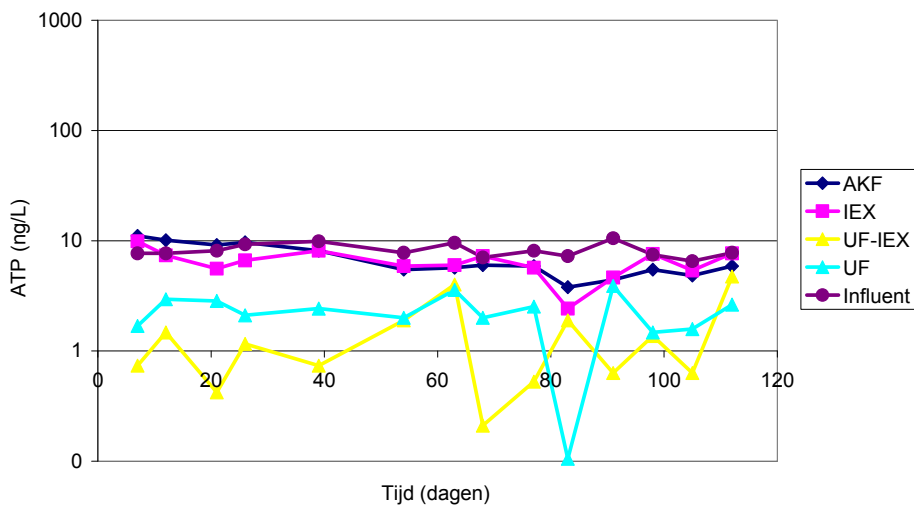
3.1.3 ATP

In figuur 14 en 15 zijn de ATP resultaten weergegeven. In de figuren is het ATP-gehalte van het influent en de verschillende effluentstromen uitgezet tegen de tijd. Uit figuur 14 kan worden opgemaakt dat de effluentstromen van AKF en IEX soms de influentwaarde kunnen overschrijden. Dit is waarschijnlijk veroorzaakt bij de monsterneming en door verstoringen tijdens het experiment. De vastbed IEX waarden zijn vergelijkbaar met de influentwaarden. Het ATP-gehalte bleek gemakkelijk beïnvloedbaar te zijn door debietveranderingen tijdens de monsterneming bij de kolommen met adsorptiemateriaal, waarschijnlijk doordat er op relatief kleine schaal experimenten worden uitgevoerd. De UF-waarden liggen constant laag, bij deze behandeling kan dan ook bij de monsterneming of tijdens het experiment weinig fout gaan vanwege de moeilijk te verstoren barrière. De overige waarden liggen, wanneer de uitschieters worden genegeerd, vrij dicht bij elkaar. Uit figuur 15 (2^e experiment) blijkt dat, wanneer bij

de monsterneming het debiet niet verandert, er meer constante ATP-waarden worden verkregen. Hier vertonen UF en de combinatie UF-IEX de laagste ATP-waarden ten opzichte van het influent. De AKF vertoont een afname na circa 60 dagen wat duidt op een verbetering van de effluentkwaliteit in de tijd. Dit wordt mogelijk veroorzaakt doordat de AKF een biologisch filter begint te worden, ook wel BAKF genoemd. Dit lijkt in mindere mate ook bij de IEX plaats te vinden.



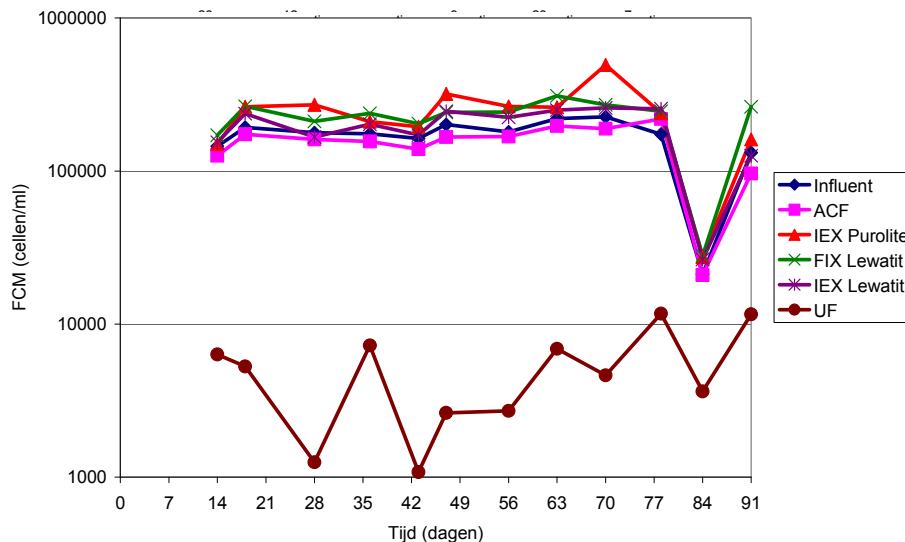
Figuur14: Het ATP-gehalte in de tijd gedurende het 1^e experiment bij Spannenburg



Figuur 15: Het ATP-gehalte in de tijd gedurende het 2^e experiment bij Spannenburg, de IEX is van Purolite

3.1.4 TCC met flowcytometrie

In figuur 16 zijn de TCC metingen met behulp van flowcytometrie (levende en dode bacteriën) gedurende het 1^e experiment weergegeven, bij het 2^e experiment is deze meting niet uitgevoerd.

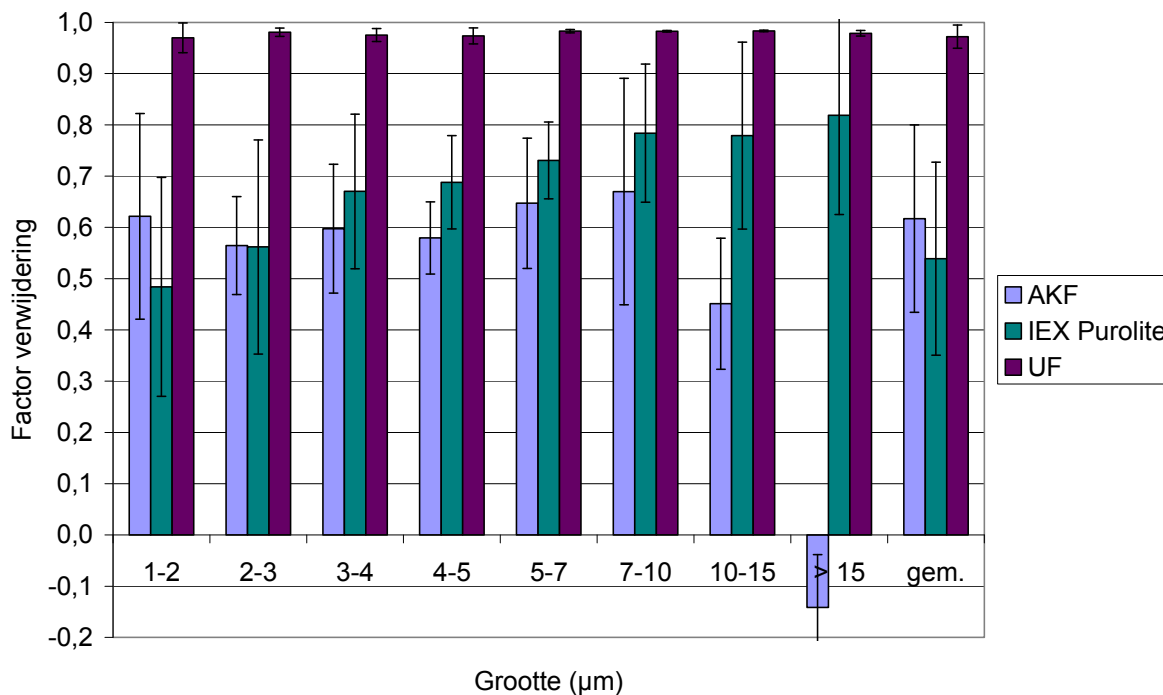


Figuur 16: Het verloop van het totaal aantal cellen gemeten met flowcytometrie in de tijd, tijdens het 1^e experiment in Spannenburg

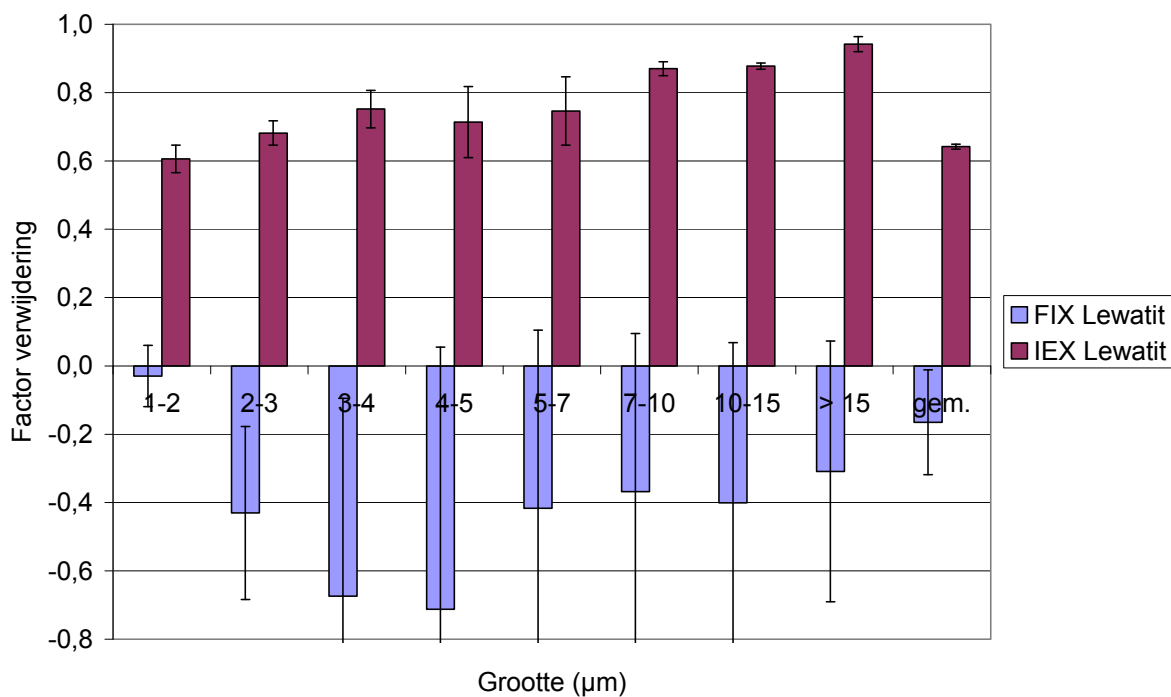
Uit figuur 16 valt UF op door de beduidend lagere FCM-waarden, dit was echter ook verwacht omdat UF in staat is om zowel levende als dode bacteriën te verwijderen. De overige waarden liggen erg dicht bij elkaar en geven hierdoor weinig extra informatie. TCC zou een goede controle kunnen zijn voor de werking van UF of andere filtratieprocessen maar biedt verder weinig meerwaarde om de verschillen tussen de biologische stabiliteit van verschillende effluentstromen van de Diagnosetool te verklaren. Er is daarom besloten om in het vervolg geen gebruik meer te maken van celtellingen bij onderzoek met de Diagnosetool.

3.1.5 Deeltjes

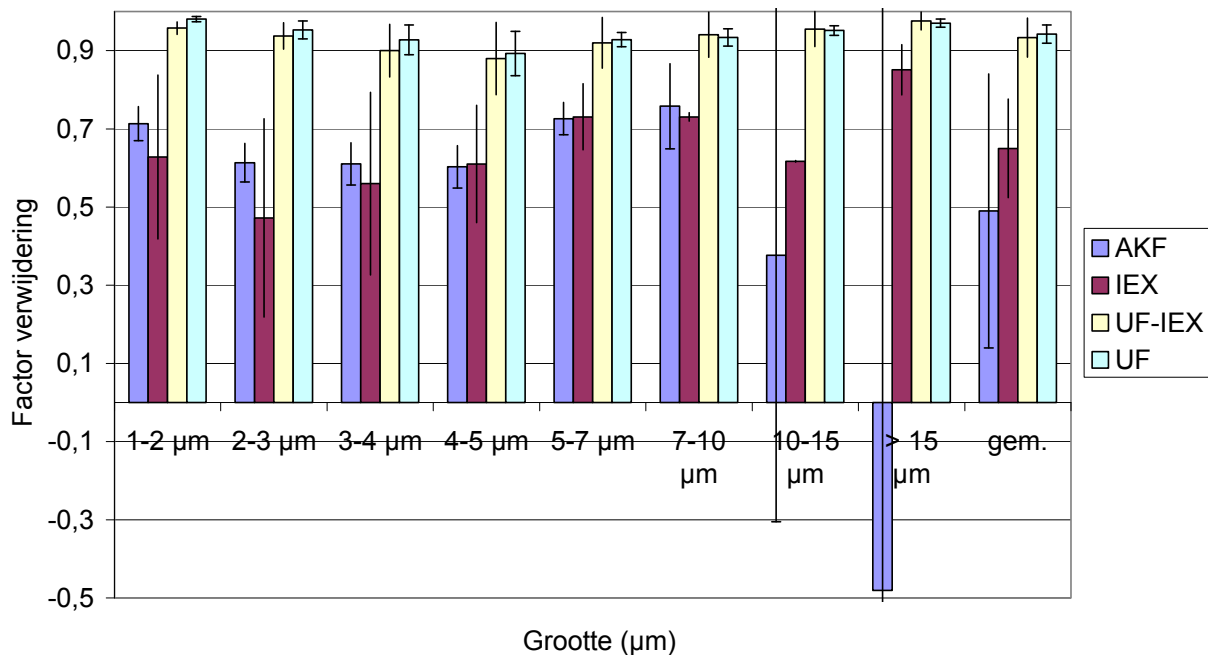
In figuur 17 en 18 is de gemiddelde deeltjesverwijdering weergegeven van het 1^e experiment, er zijn alleen de metingen van de metingen op de dagen 56 en 91 getoond omdat de meting van dag 14 voor AKF en IEX erg afwijkende waarden opleverde in vergelijking met de laatste 2 metingen. Dit is mogelijk veroorzaakt door inloopeffecten van de kolommaterialen. UF vertoonde wel een vergelijkbare verwijdering tijdens de meting op dag 14.



Figuur 17: Gemiddelde verwijdering van deeltjes door AKF, Purolite IEX en UF op de dagen 56 en 91 tijdens het 1^e experiment bij Spannenburg



Figuur 18: Verwijdering van deeltjes door Lewatit IEX en FIX op de dagen 56 en 91 tijdens het 1^e experiment te Spannenburg

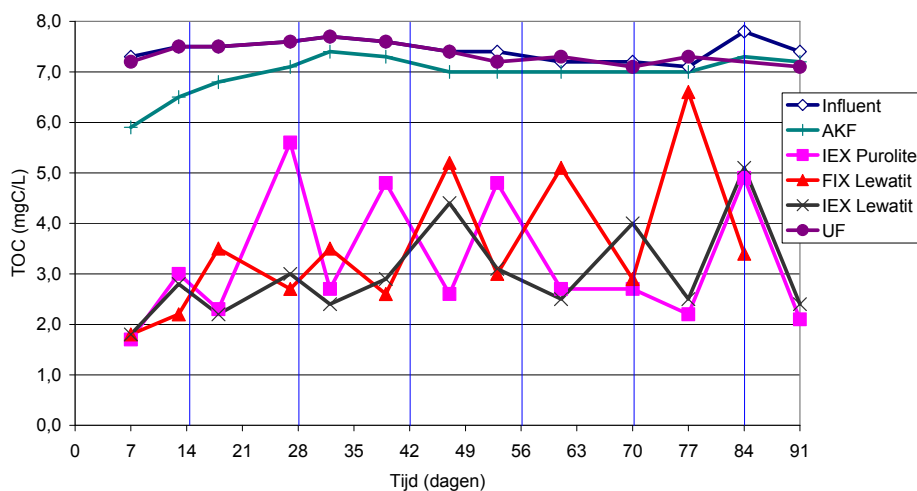


Figuur 19: Verwijdering van deeltjes door AKF, IEX, UF-IEX en UF op de dagen 56 en 98 tijdens het 2^e experiment te Spannenburg, de IEX is van Purolite

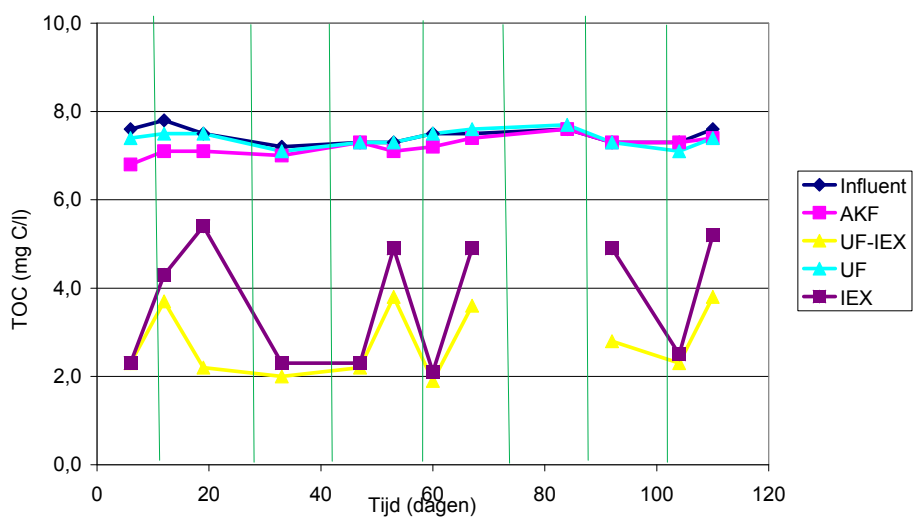
In figuur 19 is de gemiddelde deeltjesverwijdering weergegeven, gemeten op dag 56 en 98 tijdens het 2^e experiment, ook hier is ervoor gekozen de metingen van dag 14 niet te tonen in verband met een te groot verschil met de metingen van de 2^e en 3^e maand. Hieruit kan worden opgemaakt dat deeltjesmetingen niet te snel na opstart van een experiment zouden moeten plaatsvinden, maar bijvoorbeeld pas na 1 maand looptijd. AKF valt op door afgifte van deeltjes > 15 µm, in beide periodes. Waarschijnlijk zijn het kooldeeltjes uit het filter, die in de praktijk uitspoelen als gevolg van slijtage door bijvoorbeeld spoelingen. Bij de IEX vindt dit niet plaats. De IEX geeft over de gehele grootterange deeltjes af, IEX is ook niet bedoeld als deeltjesafvanger. Deze afgifte van deeltjes kan niet worden verklaard zonder verdergaand onderzoek naar de herkomst en samenstelling. De UF verwijdert volgens verwachting de meeste deeltjes (gemiddeld > 90% deeltjes). Bij het 1^e experiment lijkt de UF iets beter te werken dan bij het 2^e experiment, hiervoor is geen directe verklaring gevonden. Een defect rietje in het membraan zou een oorzaak kunnen zijn voor een mindere werking van de UF, maar omdat de membranen halverwege het experiment zijn vervangen zou dit zichtbaar moeten zijn bij de deeltjesmetingen op dag 98.

3.1.6 TOC/UV/LC-OCD

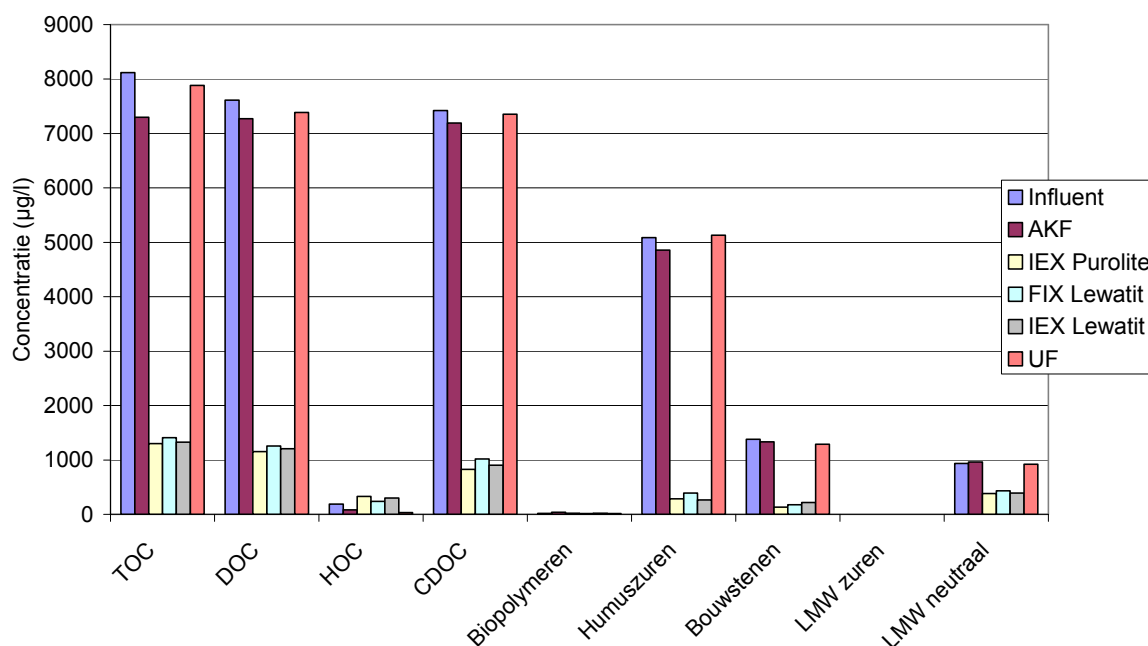
In figuren 20 en 21 is het verloop van de TOC-concentratie weergegeven gedurende de experimenten in Spannenburg. Naar verwachting verwijderen de twee IEX typen TOC gedeeltelijk, en neemt deze verwijdering weer toe na een regeneratie. Ook volgens verwachting verwijdert UF geen TOC en doet AKF dit beperkt, vooral in de beginfase totdat de AKF is verzadigd met TOC. Omdat de UV-extinctie een vergelijkbaar patroon laat zien als de TOC-concentratie, is deze hier niet weergegeven (wel gerapporteerd in Vincent [2011]). In figuur 21 missen een aantal TOC-metingen waardoor de lijnen zijn onderbroken.



Figuur 20: Verloop van TOC tijdens het 1^e experiment in Spannenburg, de verticale lijnen geven het regeneratietijdstip aan

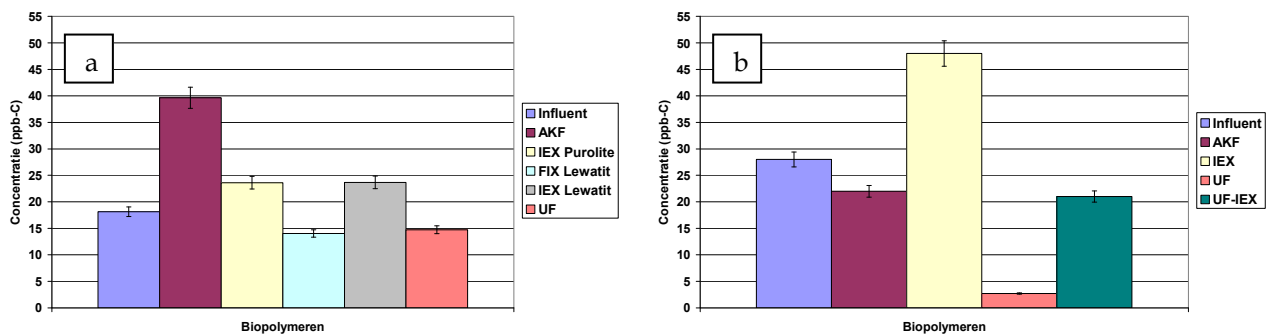


Figuur 21: Verloop van TOC tijdens het 2^e experiment in Spannenburg, de verticale lijnen geven het regeneratietijdstip aan, de IEX is van Purolite

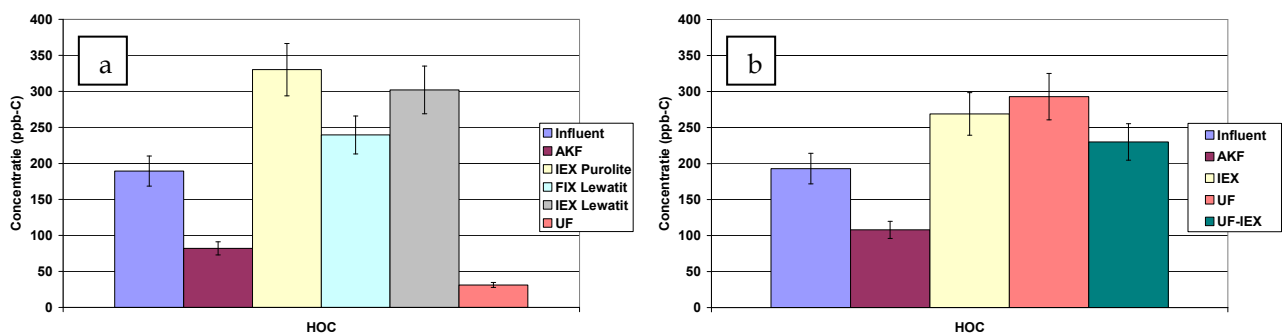


Figuur 22: NOM karakterisering van het Spannenburg water en effluenten gedurende het 1^e experiment op dag 56 vlak na de regeneratie

In figuur 22 is de TOC-karakterisering met LC-OCD weergegeven, gemeten tijdens het 1^e experiment vlak na de regeneratie op dag 56. Zoals te verwachten zorgt de IEX voor een duidelijke verlaging van negatief geladen stoffen zoals de humuszuren en afbraakproducten van humuszuren (bouwstenen) door ionenwisseling. Ook de laagmoleculaire verbindingen worden deels verwijderd, waarschijnlijk door elektrostatische interacties. UF laat al het opgeloste TOC door, terwijl de AKF nog een klein deel verwijdert. Wat in figuur 22 niet duidelijk te zien is maar wel opvalt is de meting van biopolymeren bij AKF en IEX. Alhoewel de rapportagegrens op 100 µg/l ligt zijn er wel verschillen waar te nemen. Dit is in figuur 23 uitvergroot weergegeven, voor beide experimenten. IEX en AKF lijken biopolymeren af te kunnen geven, dit duidt op biologische activiteit op het filtermateriaal. De uitvergroting is ook gemaakt voor HOC (Hydrofoob Organisch Koolstof), weergegeven in figuur 24. Waar de AKF in beide gevallen het HOC nog circa 50% verwijdert, geeft de IEX HOC af. Dit is eerder geconstateerd, onder andere bij het onderzoek op productielocatie Nuland [Goulier e.a. 2009]. Waar deze HOC fractie uit bestaat is nog onbekend, al zijn er aanwijzingen dat het gaat om grote, niet-ionogene humusachtige moleculen [DOC-Labor, mondelinge mededeling]. De lichte toename van HOC bij UF tijdens het 2^e experiment is onverwacht, maar kan mogelijk worden verklaard door de spreiding bij de analyse en de berekening van het HOC-gehalte. Het risico van LC-OCD analyses is dat, vanwege de kosten, het meestal eenmalige metingen betreffen. Om betrouwbare uitspraken te kunnen doen over de NOM-fracties, zouden LC-OCD analyses vaker moeten worden uitgevoerd.



Figuur 23: Uitvergroting van de Biopolymeren fractie met behulp van LC-OCD, respectievelijk vlak na (a, op dag 56) en voor (b, op dag 99) een regeneratie (IEX) en spoeling (AKF en UF), respectievelijk experiment 1 en 2



Figuur 24: Uitvergroting van de HOC fractie met behulp van LC-OCD, respectievelijk vlak na (a, op dag 56) en voor (b, op dag 99) een regeneratie (IEX) en spoeling (AKF en UF), respectievelijk experiment 1 en 2, de IEX van experiment 2 is van Puro-lite

3.1.7 Autopsie kolommaterialen

In tabel 6 zijn de resultaten vermeld van de autopsie van de kolommaterialen na beëindiging van het 1^e en 2^e experiment. Tussen het 1^e en 2^e experiment zijn er duidelijke verschillen waar te nemen, die mogelijk verklaard kunnen worden door het toepassen van 2 verschillende bewerkingsmethoden. Er is ondanks de methodeverschillen tussen beide experimenten wel een trend waargenomen. Bij de vastbed kolommen (AKF en IEX) bevat de 1^e 10 cm een hoger gehalte aan ATP en koolhydraten, met uitzondering van de IEX bij het 2^e experiment. Omdat het eventuele aanbod van voedsel het hoogst zal zijn in het eerste deel van het bed is daar de hoogste activiteit van bacteriën te verwachten. Bij de FIX is de hoogste waarde voor ATP juist verderop in het bed te vinden, mogelijk doordat er geen filtratiewerking optreedt zoals bij een vastbed. Er zijn geen significante verschillen gevonden in de meetwaarden tussen AKF en IEX, alleen liggen de meetwaarden van UF-IEX lager vanwege de voorafgaande ultrafiltratie waarbij bacteriën worden afgevangen. De waarden tonen in ieder geval aan dat er biologische activiteit plaatsvindt op zowel AKF als IEX en het water dus ook voldoende nutriënten bevat. Een vergelijking met AKF of IEX data uit de praktijk is niet mogelijk vanwege te weinig meetdata.

Tabel 6: Autopsieresultaten van de kolommaterialen bij Spannenburg na het 1^e en 2^e experiment

Kolommateriaal	Positie materiaal	ATP (µg/g materiaal)	Koolhydraten (µg C/g materiaal)
AKF 1 ^e experiment	1 ^e 10 cm	9,6	5,0
	Overige 44 cm	3,0	3,0
IEX Puro-lite 1 ^e experiment	1 ^e 10 cm	9,0	19,5
	Overige 44 cm	4,4	9,8
FIX Lewatit	1 ^e 10 cm (onder)	1,0	3,6

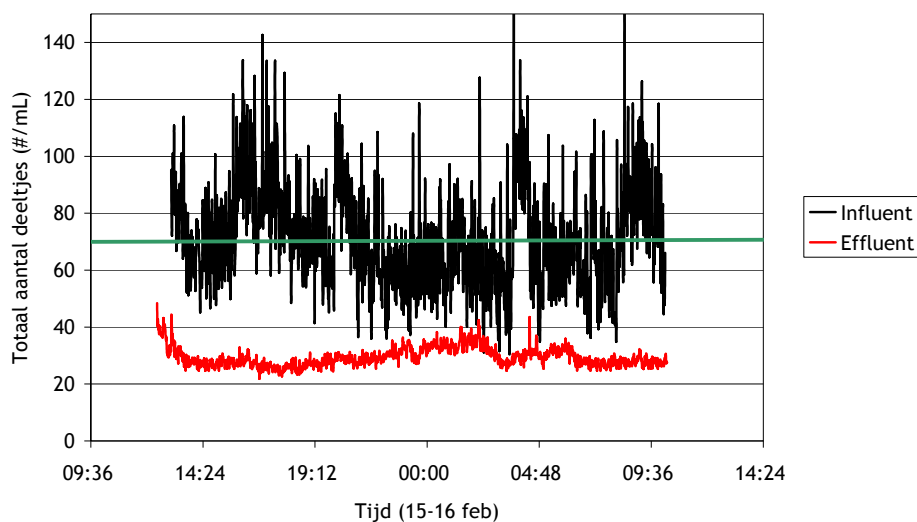
Kolommateriaal	Positie materiaal	ATP ($\mu\text{g/g}$ materiaal)	Koolhydraten ($\mu\text{g C/g}$ materiaal)
1 ^e experiment	Overige 44 cm	2,8	6,9
IEX Lewatit	1 ^e 10 cm	5,4	14,3
1 ^e experiment	Overige 44 cm	3,2	8,3
AKF	1 ^e 10 cm	27	38,8
2 ^e experiment	Overige 44 cm	22	19,7
IEX Purolite	1 ^e 10 cm	26	< 10,7
2 ^e experiment	Overige 44 cm	28	17,6
UF-IEX Purolite	1 ^e 10 cm	8,5	10,7
2 ^e experiment	Overige 44 cm	7,8	< 8,5

3.1.8 POC, PCHC, PFe en PMn en deeltjesmeting praktijkinstallatie IEX

In de praktijkinstallatie zijn metingen uitgevoerd voor en na een IEX-ketel. De metingen betreffen de bepaling van deeltjesgebonden organisch koolstof (POC), deeltjesgebonden koolhydraten (PCHC), deeltjesgebonden ijzer (PFe) en deeltjesgebonden mangaan (PMn) na concentreren met de hemoflow en deeltjestelling. In tabel 9 zijn de resultaten vermeld van POC, PCHC, PFe en PMn in het water voor en na IEX. De resultaten van de deeltjestelling zijn weergegeven in figuur 25. Uit tabel 9 en figuur 25 blijkt dat de chemische parameters redelijk aan de verwachting voldoen. Het water voor IEX bevat meer deeltjes, POC en PMn dan het water na IEX, terwijl PCH gelijk blijft. De PFe concentratie neemt wel toe in het water na IEX. De IEX verwijdert dus ook deeltjesgebonden organisch koolstof en mangaan. De toename in deeltjesgebonden ijzer in het water na IEX kan niet worden verklaard. Om meer betrouwbare uitspraken te kunnen doen zouden deze parameters vaker moeten worden bepaald in het water voor en na IEX.

Tabel 9: POC, PCHC, PFe en PMn in het water voor en na IEX

Parameter	Voor IEX (Purolite)	Na IEX (Purolite)
POC (mg C/l)	0,013	0,006
PCHC ($\mu\text{g C/l}$)	6,7	5,8
PFe ($\mu\text{g/l}$)	0,5	1,0
PMn ($\mu\text{g/l}$)	0,37	0,01



Figuur 25: Deeltjestellingen bij een praktijk IEX filter (met Purolite) in Spannenburg, de groene lijn geeft de gemiddelde waarde aan bij het influent

3.1.9 Discussie resultaten productielocatie Spannenburg

Tabel 7: Samenvatting van de belangrijkste resultaten van het 1^e experiment in Spannenburg

Parameter	Influent	AKF	IEX Purolite	IEX Lewatit	FIX Lewatit	UF	Opmerkingen
BAS (pg ATP/cm ² .dag)	119	34	9,0	5,6	32	0,8	Gemiddelde waarden
IJzerafzetting (µg/cm ² .dag)	0,15	0,03	0,02	0,01	0,03	0,01	Gemiddelde waarden
Mangaanafzetting (µg/cm ² .dag)	0,032	0,002	0,001	0,003	0,003	0,001	Gemiddelde waarden
BPP (ng/l.dag)	-	-	-	-	-	-	Niet gemeten
ATP in water (ng/l)	12	10	28*	10	28	3,0	Gemiddelde waarden
TCC (cellen/ml)	1,73.10 ⁵	1,60 .10 ⁵	2,49.10 ⁵	2,06.10 ⁵	1,43.10 ⁵	4,54 .10 ³	Gemiddelde totaal levende en dode cellen
Deeltjes (% verwijdering)	n.v.t.	62	54	65	-16	97	Gemiddelde waarden
TOC (% verwijdering)	n.v.t.	6,7	57	60	53	0	Gemiddelde waarden
Autopsie kolom (µg ATP/g materiaal)	n.v.t.	6,3	6,7	4,3	1,9	n.v.t	Gemiddelde waarden

*: waarde hoog vanwege enkele uitschieters door monsterneming

Tabel 8: Samenvatting van de belangrijkste resultaten van het 2^e experiment in Spannenburg

Parameter	Influent	AKF	IEX Purolite	UF-IEX Purolite	UF	Opmerkingen
BAS (pg ATP/cm ² .dag)	153	-	6,5	1,4	0,5	Gemiddelde waarden, AKF niet gemeten
IJzerafzetting (µg/cm ² .dag)	0,084	-	0,013	0,005	0,002	Gemiddelde waarden, AKF niet gemeten
Mangaanafzetting (µg/cm ² .dag)	0,025	-	0,002	0,002	0,002	Gemiddelde waarden, AKF niet gemeten
BPP-14 (ng/l.dag)	148	146	109	18	57	Cumulatieve waarde na 14 dagen
ATP in water (ng/l)	9,0	6,5	6,5	2,0	1,0	Gemiddelde waarden
TCC (cellen/ml)	-	-	-	-	-	Niet gemeten
Deeltjes (% verwijdering)	n.v.t.	49	65	93	94	Gemiddelde waarden
TOC (% verwijdering)	n.v.t.	5,0	65	68	0	Gemiddelde waarden
Autopsie kolom (µg ATP/g materiaal)	n.v.t.	24,5	27,0	8,1	n.v.t	Gemiddelde waarden, methode anders dan bij 1 ^e experiment

De waarnemingen van de Diagnosetool op productielocatie Spannenburg zijn samengevat in tabel 7 en 8. Op basis van de resultaten kan worden geconcludeerd dat alle filtratietechnieken de biologische stabiliteit van het water verbeteren. Het effect van UF en UF-IEX was het grootst op de biologische stabiliteit van het water, gevolgd door IEX. FIX en AKF verlaagde de biologische stabiliteit van het water minder goed. De UF zorgt voor verwijdering van deeltjes die eventueel later in het distributienet kunnen

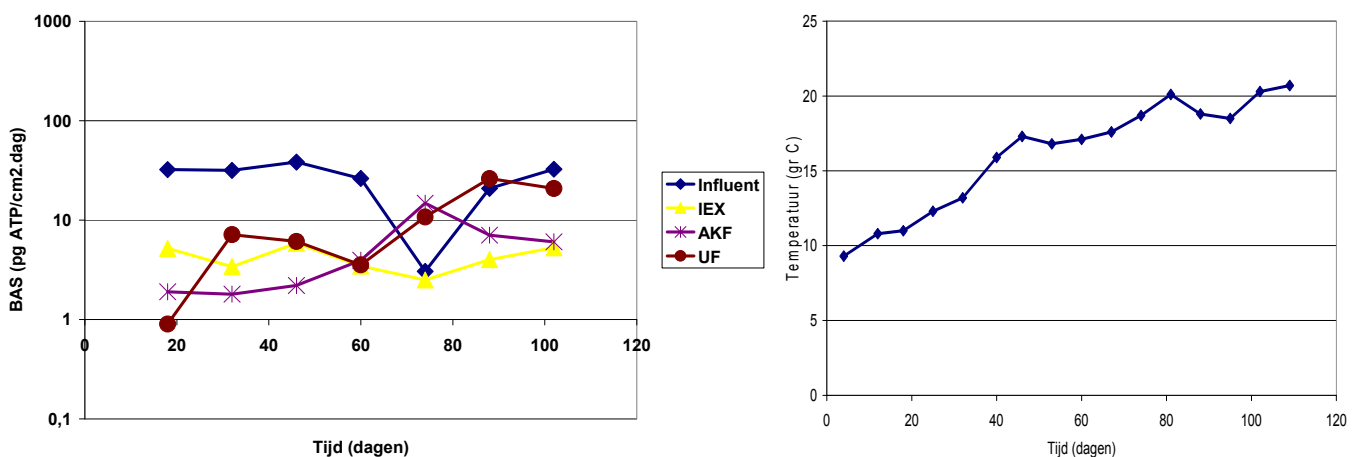
bezinken en daar oppervlakte vormen voor de aangroei van biomassa. De IEX verwijdert DOC en zorgt er voor dat het water minder voedingsstoffen bevat waar bacteriën op kunnen groeien. IEX werkt tevens deels als filter voor (ijzer/mangaan-)deeltjes. De BPP waarde van IEX verbetert alleen ten opzichte van het influent maar minder dan UF-IEX en UF. Door toepassing van UF zou de biologische stabiliteit van het drinkwater van Spannenburg dus nog verder verbeteren.

Met de bestaande toevoeging van IEX vindt er een behoorlijke verbetering plaats van de biologische stabiliteit, waardoor de verwachting is dat de mate van nagroei in het distributiesysteem zal afnemen.

3.2 Case studie Berenplaat

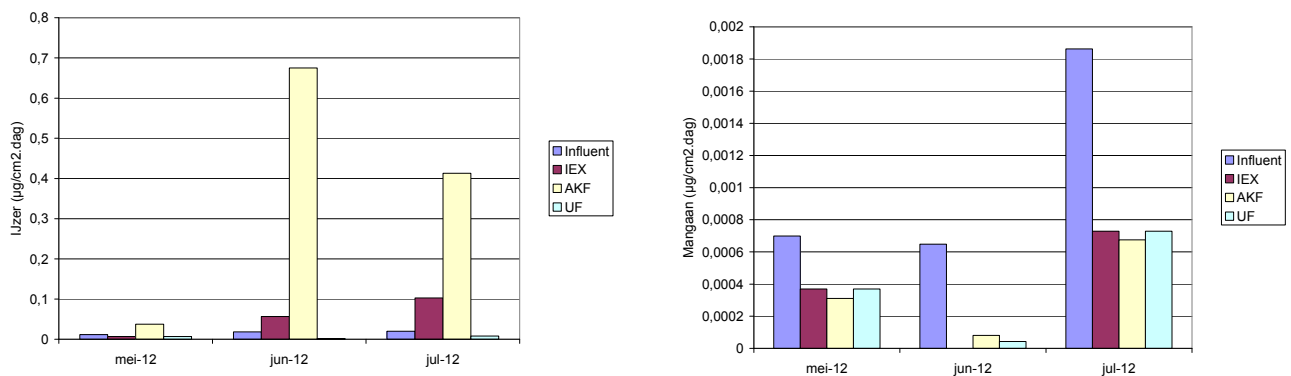
3.2.1 Biomassa-accumulatiesnelheid (BAS) in de CBM

In figuur 26 zijn de BAS-waarden weergegeven die met de CBM zijn gemeten in het water na de verschillende filtratietechnieken in de Diagnosetool bij productielocatie Berenplaat. Tevens is het temperatuurverloop van het influent water weergegeven, omdat de watertemperatuur bij oppervlaktewater niet constant is.



Figuur 26: Verloop van de BAS in de CBM's die zijn geplaatst na de verschillende filtratietechnieken in de Diagnosetool op productielocatie Berenplaat, tevens is in de 2^e figuur de temperatuur van het influent weergegeven tijdens het experiment te Berenplaat

Afgezien van de waarde op dag 74 is de gemiddelde BAS waarde van het influent vrij stabiel op 26 ± 11 pg ATP/cm².dag. Ook de BAS-waarden in het water na IEX zijn vrij stabiel ($4,2 \pm 1,2$ pg ATP/cm².dag), duidelijk lager dan de BAS waarden van het influent. De BAS-waarden in het water na UF geven een onverwacht beeld, aangezien de BAS toeneemt gedurende de looptijd van de Diagnosetool en vanaf dag 60 vergelijkbaar is met de BAS in het influent. Hiermee lijkt op de locatie Berenplaat UF geen effect te hebben op de BAS. De UF membranen zijn op 2 momenten vervangen vanwege een oplopende druk op de dagen 42 en 70, de iets lagere BAS waarde op dagen 46 en 60 kunnen hiermee worden verklaard. Echter na de 2^e vervanging loopt de BAS-waarde verder op, hiervoor is geen verklaring. Uit inspectie van de UF membranen bleek dat de filters vervuild waren met zwart materiaal, dat waarschijnlijk afkomstig is van de actief koolfilters die bij Berenplaat worden toegepast. In de praktijksituaties worden deze kooldeeltjes dus ook in het distributienet geïntroduceerd, waar het als oppervlakte kan dienen voor hechting van biomassa, organisch materiaal en ijzer. De BAS-waarden in het water na AKF (let wel, 1,5 min contacttijd) zijn in de eerste periode laag maar nemen toe in de tijd. Er lijkt een verband te bestaan tussen de toenemende temperatuur van het water en de BAS waarden van het effluent van de UF en AKF. Een dergelijk verband is echter niet waargenomen in het water na IEX, mogelijk omdat IEX een deel van het afbreekbaar organisch materiaal heeft verwijderd. Mogelijk spelen de kleine organische zuren hierbij een rol.

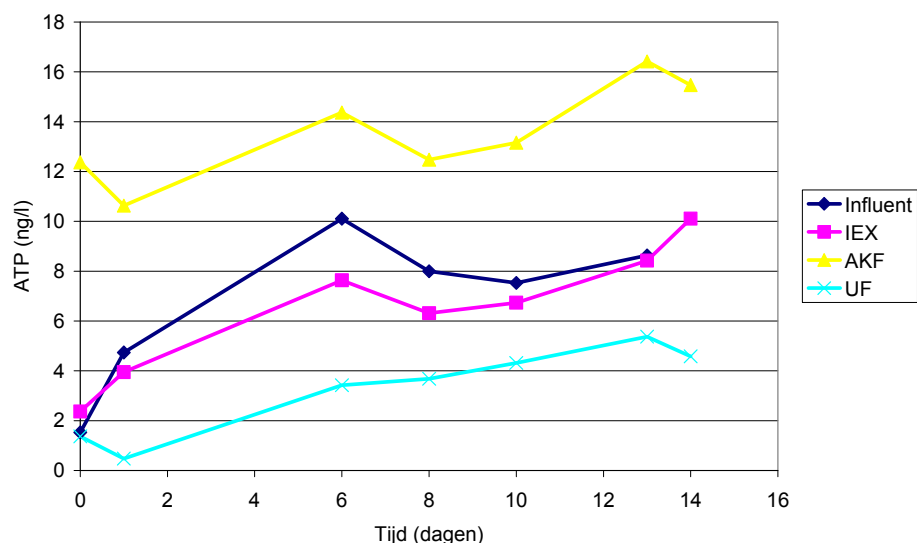


Figuren 27 en 28: Respectievelijk ijzer en mangaanafzetting op de glasparels tijdens het experiment bij Berenplaat, gemeten op dag 32 (mei), 60 (juni) en 88 (juli)

In de figuren 27 en 28 is de ijzer- en mangaanafzetting op de glasparels weergegeven. Omdat bij productielocatie Berenplaat oppervlaktewater wordt gebruikt is de verwachting dat de ijzer- of mangaanaccumulatie laag is in tegenstelling tot de verwachting bij locatie Spannenburg. De resultaten bevestigen dit beeld. Opvallend is de toename van ijzer in het water na AKF in juni en juli, waarvoor geen directe verklaring kan worden gegeven, visueel was de afzetting (geelkleuring) ook waarneembaar. Bij IEX lijkt de ijzerafzetting in de tijd toe te nemen. Waarschijnlijk is het ijzer in het influent water niet aanwezig als deeltjes en vindt op de AKF en IEX mogelijk deels ontijzering plaats. Het gebonden ijzer zou vervolgens weer als deeltjes vrij kunnen komen en hechten op de glasparels in de CBM. Mangaan is al laag in het influent en wordt bij alle processen nog wat verlaagd, waarschijnlijk wordt dit mangaan deels geadsorbeerd door alle filters.

3.2.2 Biomassaproductiepotentie

Bij Berenplaat is de BPP twee maal gemeten, één maal in juni (dag 61) en één maal eind juli 2012 (dag 102). De metingen in juli 2012 lieten echter onbetrouwbare resultaten zien en zijn daarom niet meegenomen in de analyse van de data. In figuren 29 is het verloop van het ATP-gehalte in de BPP bepaling weergegeven. In figuur 30 is de cumulatieve biomassa productie na 14 dagen weergegeven (BPC-14).



Figuur 29: Verloop van het ATP-gehalte tijdens de BPP test in juni

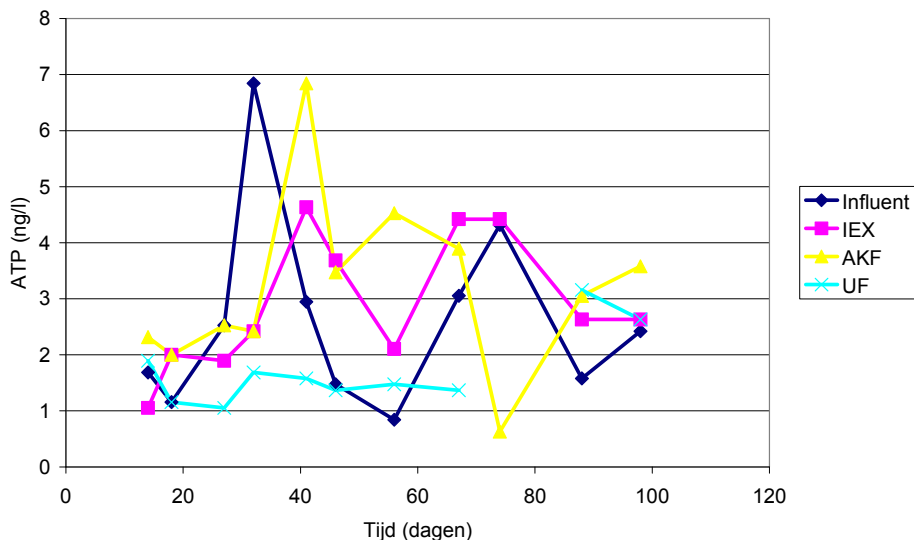


Figuur 30: Cumulatieve BPP waarden van juni op de 14^e dag na inzetten

Uit het verloop van de biomassaproductie in de tijd volgt dat in alle vier de monsters biomassaproductie plaatsvindt. In het water van alle drie behandelingen zijn dus afbreekbare stoffen aanwezig, die tot groei van micro-organismen kan leiden. UF verlaagt de BPC het meest, terwijl AKF de BPC verhoogt. Een verhoging van de groeipotentie na AKF laat zich moeilijk verklaren, want het betekent dat AKF afbreekbare stoffen aan het water heeft toegevoegd.

3.2.3 ATP

In figuur 31 is de ATP concentratie in de effluënten weergegeven.

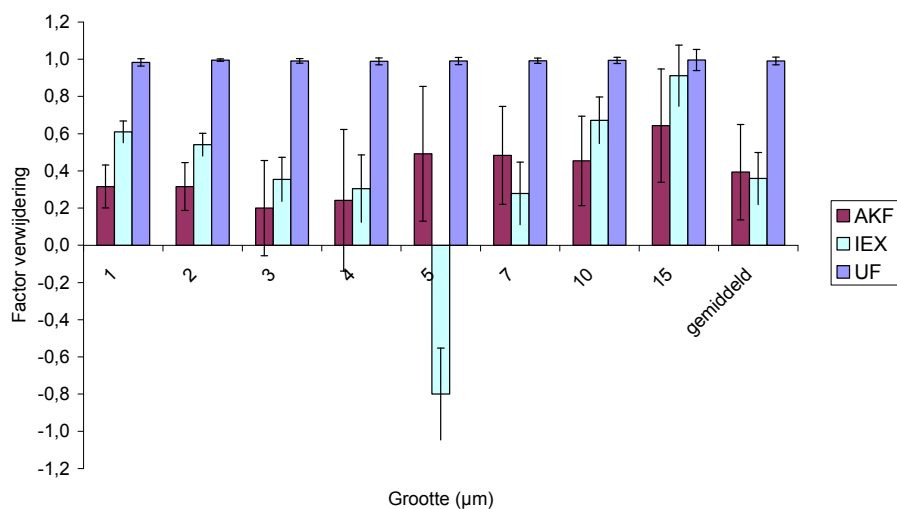


Figuur 32: Verloop van het ATP-gehalte tijdens het experiment bij Berenplaat

Uit figuur 31 blijkt dat het ATP-gehalte in het onderzochte water bij het influent al relatief laag is. De waarden van Spannenburg zijn in vergelijking met Berenplaat beduidend hoger, echter is bij Spannenburg niet het reinwater onderzocht dus werd dat ook verwacht. De drie behandelingsmethoden geven tevens een laag ATP-gehalte te zien. UF mist een meting op dag 72 omdat er geen monster genomen is. De gemiddelde waarden zijn te vinden in de samenvattingstabel in paragraaf 3.2.7.

3.2.4 Deeltjes

In figuur 32 is de deeltjesverwijdering weergegeven, de deeltjes zijn gemeten op drie momenten tijdens het experiment (meetdagen 20, 69 en 100).

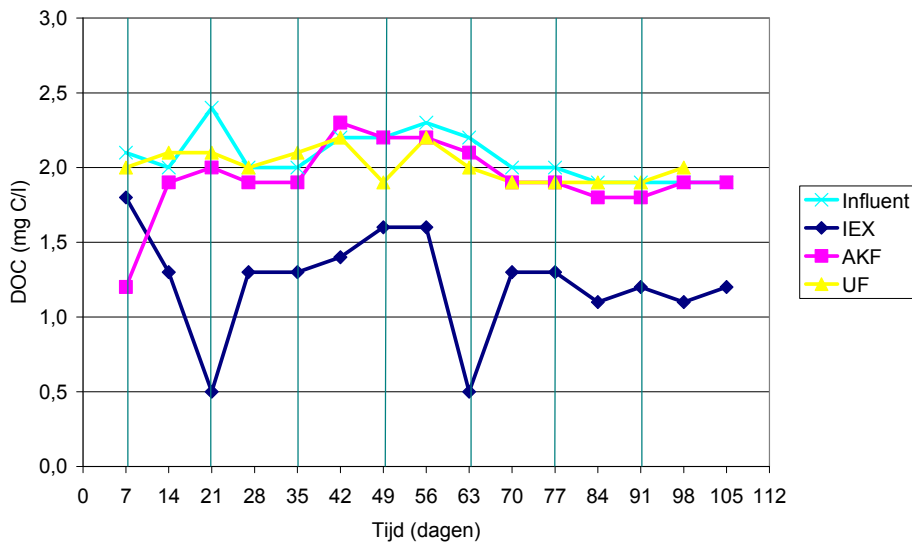


Figuur 32: Gemiddelde deeltjesverwijdering ten opzichte van het influent op meetdagen 20, 69 en 100

Uit figuur 32 blijkt dat UF in staat is om bijna 100 % van de deeltjes te verwijderen. Voor IEX en AKF is dit anders, bij de meting op dag 20 voor AKF worden vooral deeltjes afgegeven, bij IEX wordt op de dagen 69 en 100 specifiek afgifte van 3-5 µm deeltjes gemeten. Bij AKF is eerder aangetoond dat in eerste instantie een lage deeltjesverwijdering (dus nu zelfs afgifte) wordt gemeten, later worden er wel deeltjes verwijderd. Wanneer deze resultaten vergeleken worden met Spannenburg dan verwijderen AKF alsook IEX minder deeltjes uit het water van Berenplaat dan uit het water van Spannenburg. Omdat het twee verschillende watertypen betreft is deze vergelijking mogelijk niet terecht. In de tabel in paragraaf 3.2.7 zijn de gemiddelde waarden vermeld.

3.2.5 DOC/UV/LC-OCD

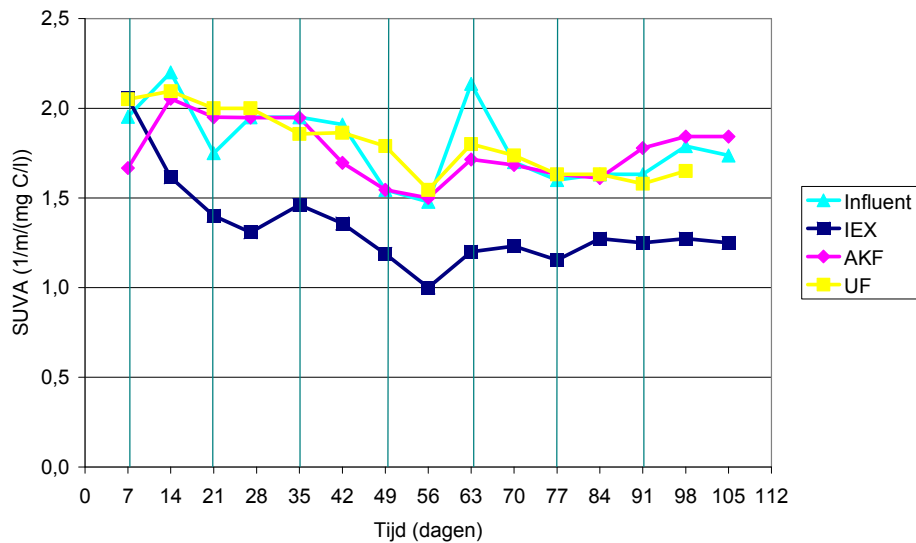
In figuur 33 is het verloop van de DOC concentratie weergegeven. De verticale lijnen geven het moment van regeneratie en spoelen aan.



Figuur 33: Verloop van het DOC-gehalte tijdens het experiment bij Berenplaat

Uit figuur 33 blijkt dat het DOC-gehalte relatief constant blijft gedurende de meetperiode met een lichte daling naar het einde (zomer 2012). IEX verwijdert gemiddeld 40 %, AKF verwijdert vooral vlak na de start en loopt daarna op (gemiddeld 7 %) terwijl UF gemiddeld slechts 2,5 % van het DOC verwijdert. De UV-extinctie vertoont een vergelijkbaar beeld en is daarom niet weergegeven. Figuur 34 toont het verloop van de SUVA (UV gedeeld door DOC) wat de aromaticiteit van het DOC getalsmatig aanduidt.

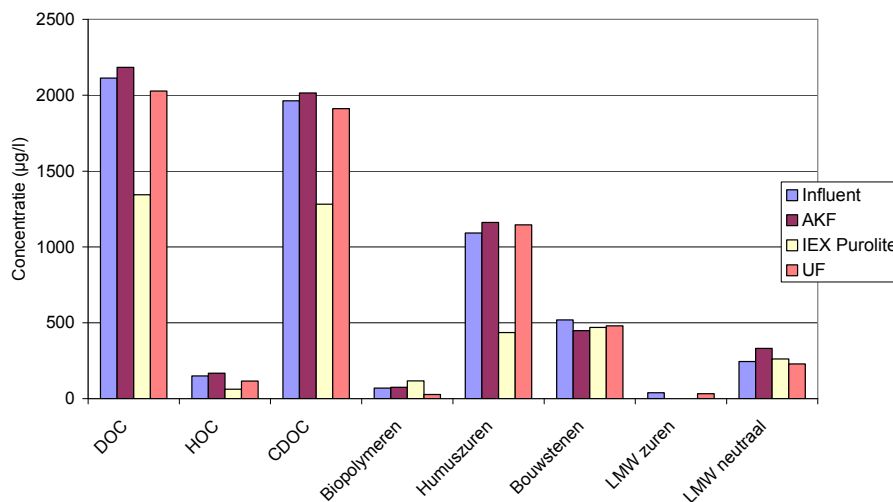
Uit de figuur blijkt dat de aromaticiteit van het DOC langzaam afneemt in de tijd (seizoenseffect) en dat IEX een voorkeur heeft voor aromatische verbindingen uit het DOC.



Figuur 34: Verloop van de SUVA tijdens het experiment bij Berenplaat

DOC karakterisering

In figuur 35 is de DOC karakterisering weergegeven. De analyse is bij DOC-labor (Karlsruhe, Duitsland) uitgevoerd, bij Spannenburg heeft HWL (Haarlem, Nederland) de analyses verzorgd. Het verschil tussen beide laboratoria is het niet meer (standaard) meten van het TOC- en POC-gehalte bij DOC-Labor.



Figuur 35: DOC-karakterisering van het influent en de effluents tijdens het experiment bij Berenplaat

Het DOC-gehalte in het water bij Berenplaat is lager dan in het water van Spannenburg (respectievelijk 2,1 mg C/l en 7,6 mg C/l). Voor bijna alle fracties geeft het AKF-effluent licht hogere waarden dan het influent wat opmerkelijk te noemen is, terwijl er gemiddeld circa 7 % DOC verwijdering is gemeten bij de reguliere metingen. Voor dit verschil is geen verklaring voorhanden. De IEX verwijdert vooral humuszuren, LMW zuren en HOC, maar (opvallend genoeg) geen neutrale verbindingen en bouwstenen. Dit werd bij Spannenburg wel waargenomen. Deze resultaten komen overeen met de relatief lage gemiddelde verwijdering van DOC (ca 40 %) in vergelijking met Spannenburg (ca 60-65 %). De laagmoleculaire zuren, die mogelijk worden gevormd bij de ClO₂ dosering (70 mg/l), worden bij zowel AKF als IEX verwijderd. Bij AKF komt dit waarschijnlijk door microbiologische afbraak terwijl dit

bij IEX waarschijnlijk door adsorptie komt. De fractie laagmoleculaire zuren is overigens niet per definitie hetzelfde als de makkelijk afbreekbare organische zuren zoals die met AOC worden gemeten. Bij IEX lijken biopolymeren te ontstaan, mogelijk door biologische activiteit.

3.2.6 Autopsie kolommaterialen

In tabel 10 zijn de resultaten vermeld na autopsie van de kolommaterialen van IEX en AKF.

Tabel 10: Autopsieresultaten van de kolommaterialen bij Berenplaat na het experiment

Kolommateriaal	Positie materiaal	ATP ($\mu\text{g/g}$ materiaal)	Koolhydraten ($\mu\text{g C/g}$ materiaal)
AKF	1 ^e 10 cm	12,9	32,9
	Overige 44 cm	2,0	7,6
IEX Purolite	1 ^e 10 cm	10,7	75,4
	Overige 44 cm	8,6	9,6

Uit de autopsie blijkt dat er ongeveer evenveel bacteriën aanwezig zijn op beide materialen, al is de hoeveelheid koolhydraten bij IEX beduidend hoger. IEX bindt dus mogelijk koolhydraten of de bacteriën in de biofilm vormen meer extracellulaire polysacchariden (EPS) dan bacteriën in de biofilm op actief kool. De eerste 10 cm bevat hogere ATP-waarden wat duidt op een hogere microbiologische activiteit in dit deel van de kolom.

3.2.7 Discussie resultaten Berenplaat

Tabel 11: Samenvatting van de belangrijkste resultaten van het experiment bij Berenplaat

Parameter	Influent	AKF	IEX Purolite	UF	Opmerkingen
BAS ($\mu\text{g ATP/cm}^2\cdot\text{dag}$)	26	5,4	4,2	10,8	Gemiddelde waarden
IJzerafzetting ($\mu\text{g/cm}^2\cdot\text{dag}$)	0,017	0,38	0,055	0,005	Gemiddelde waarden
Mangaanafzetting ($\mu\text{g/cm}^2\cdot\text{dag}$)	0,001	$3,7\cdot 10^{-4}$	$3,6\cdot 10^{-4}$	$3,8\cdot 10^{-4}$	Gemiddelde waarden
BPP-14 (ng/l.dag)	98	187	91	45	Cumulatieve waarde na 14 dagen
ATP in water (ng/l)	2,6	3,2	2,9	1,7	Gemiddelde waarden
TCC (cellen/ml)	-	-	-	-	Niet gemeten
Deeltjes (% verwijdering)	n.v.t.	39	36	99	Gemiddelde waarden
TOC (% verwijdering)	n.v.t.	6,8	40,3	2,5	Gemiddelde waarden
Autopsie kolom ($\mu\text{g ATP/g}$ materiaal)	n.v.t.	7,4	8,6	n.v.t.	Gemiddelde waarden

De resultaten die met de Diagnosetool zijn bepaald op de locatie Berenplaat zijn samengevat in Tabel 11. Op basis van de gegevens uit tabel 11 kan voor het onderzochte water (reinwater) van Berenplaat worden gesteld dat de toepassing van IEX, UF en AKF zorgen voor een verbetering van de BAS, waarbij UF slechter presteert dan AKF en IEX. De BPP wordt het sterkst verlaagd door UF, terwijl AKF voor een toename zorgt. Over het geheel lijkt IEX de biologische stabiliteit van het water het meest te verbeteren, UF heeft in dit geval een minder goede werking. De UF membranen vervuilen gedurende de standtijd relatief snel. In de praktijk zou dit betekenen dat er chemicaliën nodig zijn om de UF schoon te maken en in productie te houden. Opvallend is dat 1,5 min extra AKF wel leidt tot een lagere BAS-waarde maar ook tot een hoge BPP-waarde. De hoge ijzeraccumulatie gemeten bij de AKF ten opzichte van het influent is daarbij ook opvallend. Een verklaring voor deze resultaten is niet gevonden. Uit de autopsie

blijkt dat er biologische activiteit plaatsvindt op de filters maar dat dit laag is in vergelijking met Spannenburg.

3.3 Werking Diagnosetool

Voor het eerst is gebruik gemaakt van een proefinstallatie waarmee maximaal vijf verschillende behandelingen kunnen worden vergeleken en waarbij direct de effecten op biologische parameters kunnen worden vastgesteld. Op basis van de ervaringen bij Vitens en Evides kan worden gesteld dat de resultaten van de Diagnosetool met IEX op de locatie Spannenburg vergelijkbaar zijn met de praktijkinstallatie. Meer vergelijkingen tussen praktijk en Diagnosetool zijn echter nodig om te kunnen concluderen of de resultaten van de Diagnosetool kunnen worden vertaald naar de praktijk. Tevens moeten in de Diagnosetool vergelijkbare contacttijden en omstandigheden worden gebruikt als in de praktijk. Bijvoorbeeld, voor AKF is de gehanteerde contacttijd (1,5 min) kort in vergelijking met de praktijk (20 - 40 min). Het is daarom aanbevelingswaardig om de contacttijd van de AKF te verlengen naar deze 20 tot 40 min.

De Diagnosetool heeft een aantal voordelen: het is gebruikersvriendelijk, goed te transporteren, heeft weinig onderhoud nodig en de bijstelling van debieten en dergelijke is slechts wekelijks nodig.

De Diagnosetool kan tevens succesvol worden gecombineerd met nageschakelde CBM's.

Er treedt echter relatief makkelijk verstoring op bij een gepakt bed met filtratiemateriaal vanwege de schaalgrootte. Deze verstoring kan monsters die worden genomen beïnvloeden, waardoor de analysesresultaten onbetrouwbaar worden. Verstoring moet dus worden voorkomen bij de uitvoering en dit aspect zal in de handleiding worden opgenomen.

4 Conclusies en aanbevelingen

4.1 Case studie Spannenburg

Conclusies zijn:

- UF (alleen of in combinatie met IEX) geeft de beste verbetering voor 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.
- IEX geeft ook een duidelijke verbetering van de biologische stabiliteit van het water, maar in mindere mate dan UF. De verbetering met IEX wordt veroorzaakt door verwijdering van afbreekbaar organisch materiaal en door een gedeeltelijke verwijdering van deeltjes.
- FIX is niet geschikt om de biologische stabiliteit van het water te verbeteren. Geconcludeerd wordt dat alleen verwijdering van NOM door FIX of IEX niet voldoende is om de biologische stabiliteit van het water te verbeteren.
- Uit de autopsie van de AKF- en IEX-kolommaterialen blijkt dat AKF en IEX biologisch actieve filters zijn. Deze zouden daarom na optimalisatie van de bedrijfsvoering kunnen dienen als polishing filter
- Celtellingen met de flowcytometer (TCC) zijn niet geschikt bevonden als indicator voor biologische stabiliteit omdat er te weinig verschil is gemeten. Deze methode zou eventueel wel kunnen worden gebruikt om de werking van UF te controleren.
- Deeltjestellingen bij een IEX filter in de praktijk geven aan dat circa 59 % van de deeltjes (>1 µm) worden verwijderd. Tevens wordt de concentratie POC en PMn verlaagd.

Aanbevelingen zijn:

- De verbetering te monitoren van de biologische stabiliteit na IEX met de full-scale installatie en of deze voldoende is om de problemen met nagroei in het distributiesysteem te voorkomen.

4.2 Case studie Berenplaat

Conclusies zijn:

- IEX verbetert de biologische stabiliteit van het water het best. Deze verbetering wordt veroorzaakt door de verwijdering van een deel van het NOM (afbreekbare stoffen, humuszuren, laag moleculaire zuren en hydrofoob materiaal) en een beperkte hoeveelheid deeltjes.
- De extra AKF (1,5 min contacttijd) levert een beduidend lagere BAS waarde op maar tevens een hogere BPP waarde. Dit betekent dat AKF geen verbetering oplevert voor alle biologische stabiliteitsparameters.
- UF verbetert de biologische stabiliteit van het drinkwater, echter neemt de BAS in de loop van de tijd toe en vervuilen de membranen relatief snel. Voor een praktijktoepassing zou dit betekenen dat er relatief veel spoelingen en chemicaliën nodig zijn om de membranen schoon te houden.
- Het uitgaande water bevat laagmoleculaire organische zuren (gemeten met LC-OCD) die mogelijk worden gevormd bij de ClO₂ dosering. Deze zuren komen in het distributienet en kunnen een verhoogde groei veroorzaken van bacteriën.
- Er zijn actieve kool deeltjes gevonden op de UF membranen in de Diagnosetool. Deze kooldeeltjes zijn afkomstig uit de AKF in de praktijk. Deze deeltjes komen dus ook terecht in het reinwater en distributiesysteem van productielocatie Berenplaat. Dergelijke deeltjes kunnen sedimenteren en als oppervlakte dienen voor biofilmvorming in het distributienet.

Aanbevelingen zijn:

- De introductie van kooldeeltjes in het distributienet te voorkomen door een extra filtratiestap of door optimalisatie van spoelingen van de koolfilters.
- De oorzaak van de aanwezigheid van de laagmoleculaire zuren te onderzoeken en te voorkomen dat deze zuren in het distributienet terecht komen.

4.3 Gebruik van de Diagnosetool en analysemethoden

Conclusies zijn:

- Resultaten van de Diagnosetool met IEX op de locatie Spannenburg zijn vergelijkbaar met de praktijkinstallatie. Meer vergelijkingen tussen praktijk en Diagnosetool zijn echter nodig.
- Er moeten in de Diagnosetool beter met de praktijk vergelijkbare omstandigheden worden gebruikt, vooral voor AKF.
- De Diagnosetool is gebruikersvriendelijk te noemen en kan succesvol worden gecombineerd met nageschakelde CBMs.
- Verstoring van metingen moet worden voorkomen bij de uitvoering.

Met betrekking tot de uitgevoerde analyses kan worden gesteld dat:

- Om met de Diagnosetool betrouwbare uitspraken te kunnen doen over het effect van de filtratietechnieken op de biologische stabiliteit van het water en de microbiologische waterkwaliteit moeten de BAS, BPP en ATP worden bepaald. Daarnaast is het aan te bevelen om ook de ijzer- en mangaanaccumulatie, POC, PCHC, PFe, PMn, DOC, UV en deeltjes te bepalen.
- NOM karakterisering kan helpen bij het nauwkeurig analyseren van effecten van specifieke NOM fracties bij geconstateerde gebeurtenissen, om meer betrouwbaarheid te verkrijgen zou de analyse echter op regelmatige basis (minimaal 3 keer) moeten worden uitgevoerd.
- Autopsie is een goed hulpmiddel voor het vaststellen van biologie op filters, er dient dan wel gelet te worden op de herhaalbaarheid van de uitvoering voor interpretatie van de gegevens.

Aanbevelingen zijn:

- Tijdens het 3 maanden durende Diagnosetool experiment minimaal 3 keer een BPP en LC-OCD analyse te laten uitvoeren.
- De Diagnosetool aan te passen zodat ook langere contacttijden kunnen worden toegepast.
- De Biomassa bepaling toe te voegen als een goede aanvulling op de metingen die al worden uitgevoerd.

I Literatuur

Cornelissen, E. R., D. Chasseriaud, e.a. (2010). "Effect of anionic fluidized ion exchange (FIX) pre-treatment on nanofiltration (NF) membrane fouling." *Water Research* 44(10): 3283-3293.

Foucher de Melo T., 2012: Effects of ACF, IEX and UF on the biological stability of Spannenburg process water (Vitens, part II). KWR, Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Rennes, studentenrapport (geen nr).

Goulier J., A. Abrahamse, W.G. Siegers en P. van der Wielen (2009) Improvement of the biological stability of drinking water by removal of NOM and particles. KWR BTO rapport 2009.52(s)

Schippers, D. and P. Sjoerdsma, Kwaliteitsverbetering op meerdere fronten door ontkleuring via ionenwisseling, H₂O nr. 20, p. 38-40, 2007.

Siegers W.G., S. van de Wetering, P. van Dinther, D. van der Kooij, 2011: Verwijdering deeltjes met ultrafiltratie verlaagt snelheid van biofilmvorming. H₂O 02 2011 p37-39.

Siegers W.G, M. Raffin, 2007: Karakterisering van deeltjes in drinkwater; Evaluatie van de mogelijkheden. KWR BTO 2007.046.

Siegers W.G., M. Paon en A. Bourigh (2004). "NOM characterisation methods for water treatment" BTO 2004.077.

Van der Kooij, D. (1992) Assimilable organic carbon as an indicator of bacterial regrowth. *Journal AWWA*; 84 (2): 57-65.

Van der Kooij, D. & W. A. M. Hijnen. 1984. Substrate utilization by an oxalate-consuming *Spirillum* species in relation to its growth in ozonated water. *Appl. Environ. Microbol.* 47:551

Van der Kooij, D. & H. R. Veenendaal. 1993. Assessment of the biofilm formation characteristics of drinking water. *Proceedings AWWA 1992 Water Quality Technology Conference, Toronto*: pp. 1099-1110

Van der Kooij, D., J. S. Vrouwenvelder & H. R. Veenendaal. 1997. Bepaling en betekenis van de biofilmvormende eigenschappen van drinkwater. *H₂O* 30(25):767-771

Van der Kooij, D. & H. R. Veenendaal. 2012a. Bepaling van de biofilmvormende eigenschappen van drinkwater met een continue biofilmmonitor (CBM). KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein. Rapportnr. BTO 2011.050.

Van der Kooij, D. & H. R. Veenendaal. 2012b. Bepaling en beoordeling van de microbiologische groeipotentie van drinkwater. Een vergelijking van AOC, BPP en BVS. KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein. In press

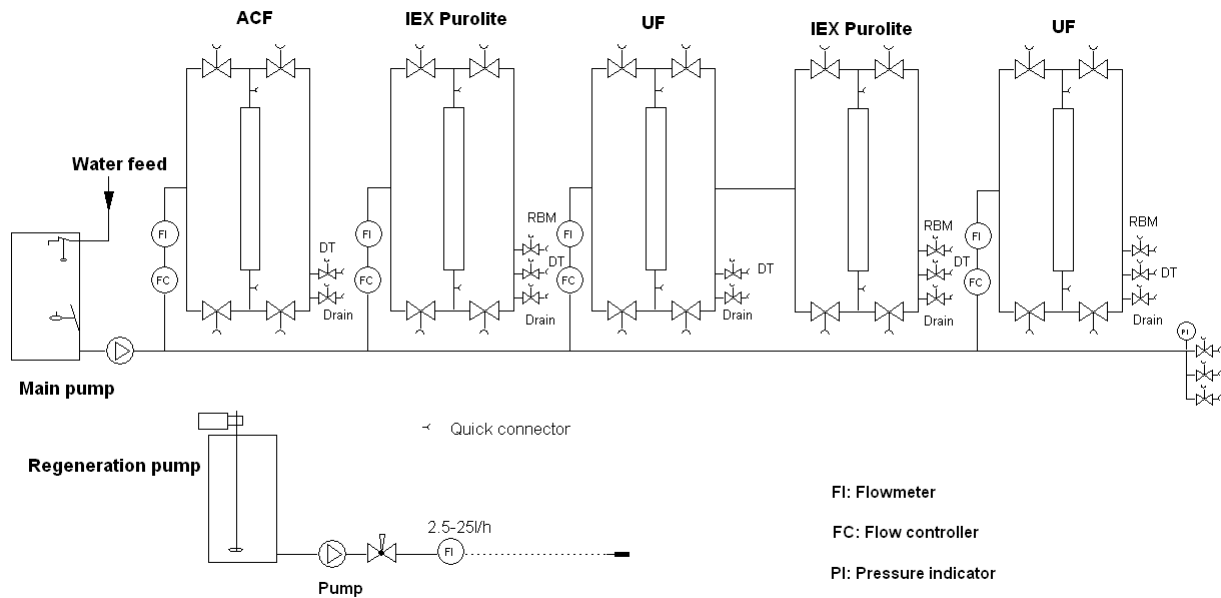
Van der Kooij, D. & H. R. Veenendaal. 2012c. Bepaling van de concentratie van biomassa in drinkwater met behulp van de hemoflow. Kiwa Water Research, Nieuwegein. In press.

Veenendaal H.R. en A.J. Brouwer- Hanzens (2007): A method for the concentration of microbes in large volumes of water. *Rapport Techneau, D.3.2.4, April 2007*

Vincent M., juli 2011: The effectiveness of natural organic matter (NOM) and particles removal on biofilm formation rate. KWR, Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Mulhouse, studentenrapport (geen nr).

II Schema van de Diagnosetool

Schema van de Diagnosetool zoals toegepast tijdens het 2^e experiment in Spannenburg.



III Analyseresultaten DOC en UV Spannenburg

DOC en UV 1^e experiment

		21-apr	27-apr	2-mei	11-mei	16-mei	23-mei	31-mei	6-jun	14-jun	21-jun	28-jun	6-jul	12-jul	Average
Influent	TOC (mgC/L)	7,30	7,50	7,50	7,60	7,70	7,60	7,40	7,40	7,20	7,20	7,10	7,80	7,40	7,44
	UV abs (m ⁻¹)	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
ACF	TOC (mgC/L)	5,90	6,50	6,80	7,10	7,40	7,30	7,00	7,00	7,00	-	7,00	7,30	7,20	6,96
	UV abs (m ⁻¹)	16,00	17,00	18,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	20,00	18,62
	removal TOC (%)	19,2	13,3	9,3	6,6	3,9	3,9	5,4	5,4	2,8	-	1,4	6,4	2,7	6,7
	removal UV (%)	20,0	15,0	10,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	0,0	6,9
IEX Purolite	TOC (mgC/L)	1,70	3,00	2,30	5,60	2,70	4,80	2,60	4,80	2,70	2,70	2,20	4,90	2,1	3,24
	UV abs (m ⁻¹)	2,30	4,90	3,20	10,00	3,20	8,40	5,00	9,50	4,50	9,20	3,20	8,50	3,1	5,77
	removal TOC (%)	76,7	60,0	69,3	26,3	64,9	36,8	64,9	35,1	62,5	62,5	69,0	37,2	71,6	56,7
	removal UV (%)	88,5	75,5	84,0	50,0	84,0	58,0	75,0	52,5	77,5	54,0	84,0	57,5	84,5	71,2
FIX Lewatit	TOC (mgC/L)	1,80	-	2,20	3,50	2,70	3,50	2,60	5,20	3,00	5,10	2,90	6,60	3,40	3,54
	UV abs (m ⁻¹)	2,40	-	3,10	5,60	3,20	5,30	3,80	5,80	3,90	9,90	4,30	13,00	4,30	5,38
	removal TOC (%)	75,3	-	70,7	53,9	64,9	53,9	64,9	29,7	58,3	29,2	59,2	15,4	54,1	52,5
	removal UV (%)	88,0	-	84,5	72,0	84,0	73,5	81,0	71,0	80,5	50,5	78,5	35,0	78,5	73,1
IEX Lewatit	TOC (mgC/L)	1,80	2,80	2,20	3,00	2,40	2,90	4,40	3,10	2,50	4,00	2,50	5,10	2,40	3,01
	UV abs (m ⁻¹)	2,20	3,90	2,80	4,60	2,90	4,50	3,30	5,30	3,60	6,90	3,90	9,20	4,00	4,39
	removal TOC (%)	75,3	62,7	70,7	60,5	68,8	61,8	40,5	58,1	65,3	44,4	64,8	34,6	67,6	59,6
	removal UV (%)	89,0	80,5	86,0	77,0	85,5	77,5	83,5	73,5	82,0	65,5	80,5	54,0	80,0	78,0
UF	TOC (mgC/L)	7,20	7,50	7,50	7,60	7,70	7,60	7,40	7,20	7,30	7,10	7,30	-	7,10	7,38
	UV abs (m ⁻¹)	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	19,00	20,00	20,00	20,00	19,92
	removal TOC (%)	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,7	-1,4	1,4	-2,8	-	4,1	0,4
	removal UV (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0	0,0	0,0	0,0	0,4

DOC en UV 2^e experiment

		6	12	19	33	47	53	60	67	84	92	104	110
10-11-2011		16-nov.	22-Nov	29-Nov	13-Dec	27-Dec	2-Jan	9-Jan	16-Jan	2-Feb	10-Feb	22-Feb	28-Feb
Influent	TOC (mgC/L)	7,60	7,80	7,50	7,20	7,30	7,30	7,50	7,50	7,60	7,30	7,30	7,60
	UV abs (E/m)	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
ACF	TOC (mgC/L)	6,80	7,10	7,10	7,00	7,3	7,1	7,2	7,4	7,6	7,3	7,3	7,40
	UV abs (E/m)	18,00	19,00	19,00	19,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	19	19	19
	removal TOC (%)	10,53	8,97	5,33	2,78	0,00	2,74	4,00	1,33	0,00	0,00	0,00	2,63
	removal UV (%)	10,00	5,00	5,00	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,00	5,00	5,00
IEX	TOC (mgC/L)	2,30	4,30	5,40	2,30	2,30	4,90	2,10	4,90		4,90	2,50	5,20
	UV abs (E/m)	3,10	7,20	3,20	3,30	3,40	8,90	3,00	8,40		4,90	3,50	8,3
	removal TOC (%)	69,74	44,87	28,00	68,06	68,49	32,88	72,00	34,67		32,88	65,75	31,58
	removal UV (%)	84,50	64,00	84,00	83,50	83,00	55,50	85,00	58,00		75,50	82,50	58,50
UF-IEX	TOC (mgC/L)	2,30	3,70	2,20	2,00	2,20	3,80	1,90	3,60		2,80	2,30	3,80
	UV abs (E/m)	3,10	6,40	3,00	2,90	3,10	6,60	2,60	5,80		4,10	3,00	6,30
	removal TOC (%)	69,74	52,56	70,67	72,22	69,86	47,95	74,67	52,00		61,64	68,49	50,00
	removal UV (%)	84,50	68,00	85,00	85,50	84,50	67,00	87,00	71,00		79,50	85,00	68,50
UF	TOC (mgC/L)	7,40	7,50	7,50	7,10	7,3	7,3	7,5	7,6	7,7	7,3	7,1	7,4
	UV abs (E/m)	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
	removal TOC (%)	2,63	3,85	0,00	1,39	0,00	0,00	0,00	-1,33	-1,32	0,00	2,74	2,63
	removal UV (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

IV Analyseresultaten DOC en UV Berenplaat

DOC (mg C/l)

dagen	Diagnos etool na IEX	Diagnos etool na AKF	Diagnos etool na UF	Diagnos etool influent
7	1,8	1,2	2	2,1
14	1,3	1,9	2,1	2
21	0,5	2	2,1	2,4
27	1,3	1,9	2	2
35	1,3	1,9	2,1	2
42	1,4	2,3	2,2	2,2
49	1,6	2,2	1,9	2,2
56	1,6	2,2	2,2	2,3
63	0,5	2,1	2	2,2
70	1,3	1,9	1,9	2
77	1,3	1,9	1,9	2
84	1,1	1,8	1,9	1,9
91	1,2	1,8	1,9	1,9
98	1,1	1,9	2	1,9
105	1,2	1,9		1,9

UV (1/m)

dagen	Diagnos etool na IEX	Diagnos etool na AKF	Diagnos etool na UF	Diagnos etool influent
7	4,1	3,7	2	4,1
14	4,4	2,1	3,9	4,4
21	4,2	0,7	3,9	4,2
27	3,9	1,7	3,7	4
35	3,9	1,9	3,7	3,9
42	4,2	1,9	3,9	4,1
49	3,4	1,9	3,4	3,4
56	3,4	1,6	3,3	3,4
63	4,7	0,6	3,6	3,6
70	3,4	1,6	3,2	3,3
77	3,2	1,5	3,1	3,1
84	3,1	1,4	2,9	3,1
91	3,1	1,5	3,2	3
98	3,4	1,4	3,5	3,3
105	3,3	1,5	3,5	

