



BTO 2018.073 | Mei 2018

BTO rapport

Biologische stabiliteit ps
Witharen nafiltraat,
Archemerberg reinwater
en Hammerflier
reinwater

BTO

**Biologische stabiliteit ps Witharen nafiltraat,
Archemerberg reinwater en Hammerflier reinwater**

BTO 2018.073 | Mei 2018

Opdrachtnummer

402102

Projectmanager

Edwin Kardinaal

Opdrachtgever

BTO - Speerpuntonderzoek

Kwaliteitsborger(s)

Kimberly Learbuch, Paul van der Wielen

Auteur(s)

Anthony Verschoor

Verzonden aan

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten en mag niet openbaar gemaakt worden.

Jaar van publicatie
2018

Meer informatie

dr.ir. A.M. (Anthony) Verschoor

T 030 6069596

E anthony.verschoor@kwrwater.nl

Postbus 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511

F +31 (0)30 60 61 165

E info@kwrwater.nl

I www.kwrwater.nl



BTO 2018.073 | Mei 2018 © KWR

Alle rechten voorbehouden.

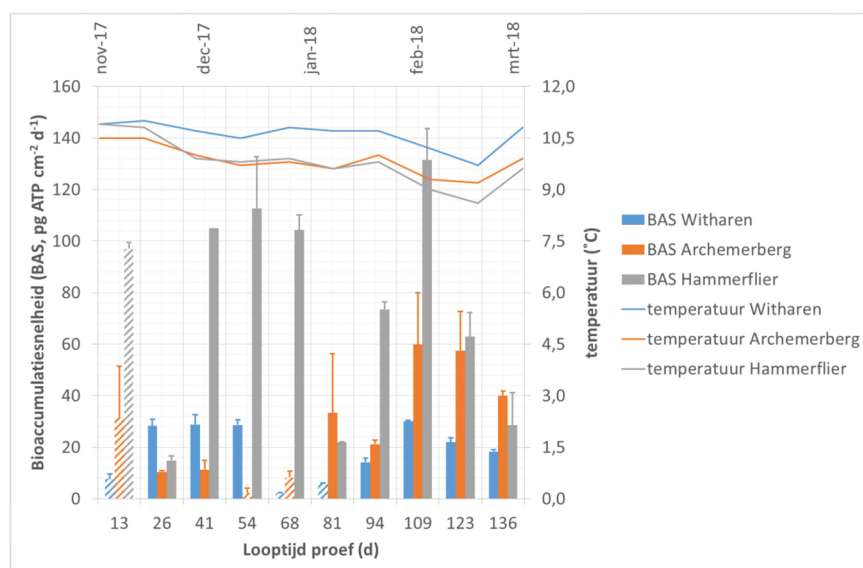
Niets uit deze uitgave mag worden veeleenvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

BTO Managementsamenvatting

Nieuwe meetmethodes brengen biologische stabiliteitsproblemen aan het licht

Auteur dr.ir. A.M. (Anthony) Verschoor

Routinematige metingen door drinkwaterbedrijven geven voor bepaalde locaties onvoldoende garantie dat het geproduceerde drinkwater biologisch stabiel is. Daarom heeft KWR nieuwe meetmethodes ontwikkeld om specifiek de biologische activiteit te kunnen meten: de biomassaproductiepotentie (BPP) en de mate van biofilmvorming, zoals bepaald met de continue biofilmmonitor (CBM). Deze methodes zijn getest op water afkomstig van pompstation Witharen en van twee gekoppelde pompstations in hetzelfde verzorgingsgebied (Archemerberg en Hammerflie). De resultaten zijn vergeleken met de parameters die hier routinematig door Vitens worden gemeten. De biologische stabiliteit bleek onvoldoende voorspeld te kunnen worden uit het reguliere meetprogramma. Er was vaak sprake van behoorlijke biofilmvorming, vooral veroorzaakt door groei en in mindere mate door sedimentatie van biomassa. Op alle locaties is het water niet biologisch stabiel, met name op pompstation Hammerflie. Dankzij de nieuwe meetmethodes kan dit beter in beeld worden gebracht, en kunnen aanpassingen aan het zuiveringsproces worden geëvalueerd.



Biomassa-accumulatiesnelheid (BAS) van de drie onderzochte pompstations (staafdiagram), met foutbalken (standaarddeviaties). Gearceerde staven zijn minder betrouwbaar vanwege (tijdelijk) niet-aangesloten zijn op het desbetreffende monsterpunt en/of een te korte tijdsduur voor betrouwbare schatting van de BAS. Tevens staat de watertemperatuur weergegeven (lijndiagram). Dagnummers verwijzen naar dagen sinds de start van het onderzoek. De recente ontwikkelde aandachtswaarde voor de BAS (zie BTO 2018.049) is 30 pg ATP cm⁻² d⁻¹, wat erop wijst dat de biologische stabiliteit voor alle pompstations niet altijd voldoende is

Belang: huidige parameters bieden onvoldoende zicht op de biologische stabiliteit van het water

Meetprogramma's voor de kwaliteit van het geproduceerde water geven voor sommige locaties mogelijk onvoldoende de biologische stabiliteit weer, waardoor belangrijke informatie over de waterkwaliteit ontbreekt.

Aanpak: toepassing van nieuwe meetmethodes om de biologische stabiliteit te bepalen

KWR heeft recent meetmethodes ontwikkeld die specifiek de biologische activiteit meten:

1. de biomassa-productie-potentie (BPP) meet de maximale biomassagroei die kan optreden met de organische stoffen in het water op een bepaald moment;
2. de mate van biofilmvorming, bepaald met de continue biofilmmonitor (CBM), meet continu de vorming van biofilms over een langere periode.

Met deze methodes is onderzoek gedaan in een verzorgingsgebied van Vitens waar twijfels waren over de biologische stabiliteit: het water afkomstig van pompstation Witharen, en twee gekoppelde pompstations (Archemerberg en Hammerflier). De resultaten zijn vergeleken met enkele parameters die door Vitens routinematig gemeten worden op dezelfde locaties.

Resultaten: biologische stabiliteit nog onvoldoende

Op de drie pompstations was de BPP beneden de aandachtswaarde, terwijl aan de andere kant op

alle locaties overschrijdingen werden gevonden van de bioaccumulatie-snelheid (BAS), een maat voor biofilmvorming. Dit betekent dat de biologische stabiliteit onvoldoende is. De hoeveelheid organisch materiaal in het water is aan de lage kant voor groei in suspensie (het open water) maar kan wel benut kan worden door micro-organismen die biofilms kunnen vormen. Standaardparameters voor de waterkwaliteit lijken geen duidelijke relatie te hebben met BPP of één van de parameters voor biofilmvorming.

Implementatie: verbeterde monitoring en aanpassing van het zuiveringsproces

Zowel de biomassaproductiepotentie als de mate van biofilmvorming zijn betere graadmeters voor de biologische stabiliteit dan de parameters uit het huidige meetprogramma. Het zuiveringsproces dient aangepast te worden om de gewenste biologische stabiliteit te bereiken.

Rapport

Dit onderzoek is beschreven in rapport *Biologische stabiliteit ps Witharen nafiltraat, Archemerberg reinwater en Hammerflier reinwater* (BTO 2018.073). Een andere zeer relevante publicatie in deze context is BTO 2018.049: *Aandachtswaarden nieuwe methoden biologische stabiliteit*.

Samenvatting

Vitens hanteert grens- en drempelwaarden voor verschillende chemische en microbiologische parameters in het reinwater. Voor het totaal organisch koolstofgehalte (TOC) is de grenswaarde 5 mg L^{-1} , en op pompstation Witharen zijn overschrijdingen van deze waarde gemeten. Het zou daarom kunnen zijn dat de biologische stabiliteit van het reinwater niet aan de kwaliteitseisen voldoet die Vitens aan het geproduceerde drinkwater stelt, waardoor Vitens een forse investering zou moeten doen om de zuivering aan te passen. Omdat de biologische stabiliteit niet altijd direct hoeft te correleren met het TOC-gehalte, is er onderzoek gedaan naar de biologische stabiliteit van het water van pompstation Witharen.

Pompstation Witharen ligt in een voorzieningsgebied waarin uitwisseling plaatsvindt met twee andere pompstations, Archemerberg en Hammerflier. Daarom is het doel van dit onderzoek het bepalen van de biologische stabiliteit van het reinwater van de pompstations Witharen, Archemerberg en Hammerflier. Abusievelijk is op ps Witharen het nafiltraat gemonitord, in plaats van het reinwater.

De biologische stabiliteit werd bepaald met de nieuwe meetmethoden die hiervoor zijn ontwikkeld door KWR: biomassa-accumulatiesnelheid (BAS) en biofilmvormingssnelheid (BVS) met de continue biofilmmonitor (CBM) en biomassaproductiepotentie (BPP) van het water.

De BPP liet op alle dagen hetzelfde patroon zien: Witharen en Hammerflier even hoge waarden, en Archemerberg een lagere BPP, zowel voor de maximale biomassaproductie gedurende de eerste zeven dagen (BP_7) als voor de cumulatieve biomassaproductie over 14 dagen (BPC_{14}). De BP_7 lag overall onder de aandachtswaarde voor biologische stabiliteit (9 ng ATP L^{-1}), en had een correlatie met BPC_{14} . Vanwege deze correlatie zou het volstaan om voor bepaling van de BPP voortaan alleen nog maar BP_7 te meten.

De biofilmvormingspotentie was redelijk hoog bij pompstation Witharen, doorgaans hoger voor Archemerberg en het hoogst voor Hammerflier. Dit patroon was zichtbaar in alle hiervoor gemeten parameters: de bioaccumulatiesnelheid (BAS), de biofilmvormingssnelheid (BVS), de ijzeraccumulatiesnelheid (FeAS) en de ijzerafzettingssnelheid (FeAFS). De BAS lag voor alle pompstations op of boven de hiervoor recent gedefinieerde aandachtswaarde ($30 \text{ pg ATP cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$). Voor alle met de CBM bepaalde waarden voor biofilmvormingspotentieel (BAS, BVS, FeAS en FeAFS) lijkt er geen duidelijke relatie te bestaan met de temperatuur. Ook het ijzergehalte lijkt geen directe relatie te hebben met FeAS of FeAFS, en evenmin met BAS of BVS. Verder is voor geen van de onderzochte locaties een duidelijke relatie te zien tussen KG22 en BAS, hoewel beide wel aangeven dat het water niet biologisch stabiel is.

Voor TOC worden de grenswaarden in het reinwater regelmatig overschreden, maar er lijkt geen duidelijke relatie te zijn tussen TOC en BP_7 , BPC_{14} , BAS en BVS in dit voorzieningsgebied. Dit maakt TOC een minder geschikte parameter om de biologische stabiliteit te beoordelen. Dit komt omdat het TOC in dit verzorgingsgebied voornamelijk bestaat uit gekleurde stoffen die UV absorberen, waarschijnlijk humuszuren. Het is wel te overwegen om een parameter te vinden die het biologisch

beschikbare deel van het TOC snel zou kunnen meten, aangezien dit een goede voorspeller zou kunnen zijn van de biologische activiteit van het water.

De biofilmvormingspotentie bestaat vooral uit groei, en minder uit sedimentatie van biomassa. De hoeveelheid organische stof in het water is voldoende om groei in biofilms te bevorderen, maar het is nog onduidelijk welke stoffen verantwoordelijk zijn voor deze (na)groei, en er zullen maatregelen getroffen dienen te worden om de biologische stabiliteit te vergroten. Voor een goede afweging van deze maatregelen dienen de in dit onderzoek toegepaste parameters voor biologische stabiliteit te worden bepaald voor en na de verschillende zuiveringsstappen, zodat een beter beeld wordt verkregen van de kritische stappen in het productieproces.

Inhoud

Samenvatting	1
Inhoud	3
• Begrippenlijst	4
1 Inleiding	5
1.1 Aanleiding	5
1.2 Onderlinge relaties pompstations distributiegebied	5
1.3 Doel	5
2 Materiaal en methoden	6
2.1 Opzet van het onderzoek	6
2.2 Uitgevoerde analyses	7
3 Resultaten	9
3.1 Biomassaproductiepotentie (BPP) van water	9
4 Discussie	14
4.1 Biologische stabiliteit op basis van de BPP en CBM- proeven	14
4.2 Biologische stabiliteit in relatie tot andere parameters in het reinwater	15
5 Conclusies en aanbevelingen	19
5.1 Conclusies	19
5.2 Aanbevelingen	19
6 Referenties	20
Bijlage I Praktijkopstelling Continue Biofilm Monitors	21
• Witharen	21
• Archemerberg	22
• Hammerflier	23
Bijlage II Vergelijking tussen gemeten temperaturen	24
Bijlage III Correlatie BP₇-BPC₁₄	25
Bijlage IV Correlaties tussen TOC en BPP, BAS en BVS	26
Bijlage V Correlaties tussen ijzer (Fe) en BPP, FeAS en FeAfS	27

Bijlage VI Correlatie tussen TOC en kleur, UV-extinctie en troebelings	28
Bijlage VII Correlatie KG22-BAS	29

Begrippenlijst

ATP	Gehalte adenosinetrifosfaat, maat voor de hoeveelheid biomassa
BAS	Bioaccumulatiesnelheid, bepaald door iedere twee weken de ATP-toename op glazen parels te bepalen met behulp van de CBM
BP₇	Maximale groeiopbrengst gedurende de eerste zeven dagen van de BPP-test
BPC₁₄	Cumulatieve biomassaproductie over de twee weken dat de BPP-test loopt
BPP	Bepaling van de biomassaproductiepotentie
BVS	Biofilmvormingssnelheid, bepaald door iedere twee weken de ATP-toename op glazen plaatjes te bepalen met behulp van de CBM
CBM	Continue biofilmmonitor, door KWR ontwikkeld meetinstrument om in een continue waterstroom de biofilmvorming te meten in cuvetten gevuld met glaspereels of glasplaatjes.
Fe	Ijzergehalte (bepaald na aanzuren)
FeAS	Ijzeraccumulatiesnelheid, bepaald door iedere vier weken de Fe-toename op glazen parels te bepalen met behulp van de CBM
FeAfS	Ijzerafzettingssnelheid, bepaald door iedere vier weken de Fe-toename op glazen plaatjes te bepalen met behulp van de CBM
KG22	Koloniegetal op glucosegistextractagar, bepaald bij 22 °C
KVE	Kolonievormende eenheden
TOC	(Total Organic Carbon) totaal organisch koolstofgehalte
UV	Ultraviolet

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Vitens hanteert grens- en drempelwaarden voor verschillende chemische en microbiologische parameters in het reinwater. Bij overschrijding van één of meerdere grenswaarden wordt nagedacht over investeringen in de zuivering, zodat weer waarden op of onder de drempelwaarde worden gehaald. Voor biologische stabiliteit is er geen snelle eenvoudige parameter die gemeten kan worden, maar het TOC gehalte lijkt in sommige gevallen een relatie te hebben met de biologische stabiliteit. Daarom hanteert Vitens een grenswaarde voor TOC in het reinwater van 5,0 mg/l¹.

Op pompstation Witharen is waargenomen dat de TOC-concentratie van het reinwater maximaal 5,7 mg/l is, wat boven deze grenswaarde zit. Het zou daarom kunnen zijn dat de biologische stabiliteit van het reinwater niet aan de kwaliteitseisen voldoet die Vitens aan het geproduceerde drinkwater stelt, waardoor Vitens een forse investering zou moeten doen om de zuivering aan te passen. Doordat de TOC concentratie echter niet altijd direct correleert met de biologische stabiliteit, is het betrouwbaarder om de biologische stabiliteit van het drinkwater van pompstation Witharen direct te bepalen. Met behulp van die informatie kan dan een betere inschatting worden gemaakt of een (forse) investering in zuivering van Witharen nodig is.

1.2 Onderlinge relaties pompstations distributiegebied

Pompstation Witharen zit gekoppeld aan twee andere pompstations in hetzelfde verzorgingsgebied (Figuur 1). Het nafiltraat van pompstation Witharen wordt gemengd met het ruwwater van pompstation Archemerberg tot reinwater Witharen, het nafiltraat van pompstation Witharen mengt met filtraat van pompstation Archemerberg tot reinwater Archemerberg. Het reinwater van pompstation Archemerberg mengt weer met nafiltraat van pompstation Hammerflier tot reinwater Hammerflier (Figuur 1). Alle mengingen vinden plaats op basis van een vaste verhouding om zodoende een vaste hardheid en kleurintensiteit te bereiken. De distributie vindt plaats in een "open gebied". Dit houdt in dat afsluiters open staan en niet altijd met zekerheid kan worden gezegd van welk pompstation het drinkwater op een locatie afkomstig is. Daarom is het van belang om niet alleen de biologische stabiliteit van het reinwater van pompstation Witharen te meten, maar ook de andere twee pompstations te meten.

1.3 Doel

Het doel van het onderzoek is om de biologische stabiliteit te bepalen van het reinwater van de pompstations Witharen, Archemerberg en Hammerflier. De biologische stabiliteit wordt bepaald met de nieuwe meetmethoden die hiervoor zijn ontwikkeld: biomassa-accumulatiesnelheid (BAS) en biofilmvormingssnelheid (BVS) met de continue biofilmmonitor (CBM) en biomassa-productiepotentie (BPP) van het water.

¹ Vitens heeft inmiddels de grenswaarde van TOC vervangen voor een signaleringswaarde (Schoonenberg et al., 2018). Overschrijding van de signaleringswaarde van 5 mg/l is reden voor nader onderzoek.

2 Materiaal en methoden

2.1 Opzet van het onderzoek

Het onderzoek naar de biologische stabiliteit is gedaan op de drie eerder genoemde pompstations Witharen, Archemerberg en Hammerflie. Gedurende drie maanden is van deze watertypen tweewekelijks de bioaccumulatiesnelheid (BAS) en biofilmvormings-snelheid (BVS) bepaald, en vierwekelijks de ijzeraccumulatiesnelheid (FeAS) en ijzerafzettingssnelheid (FeAfS). Deze parameters zijn bepaald met behulp van de continue biofilm monitor (CBM); foto's van de praktijkopstelling van de CBMs staan in Bijlage I. Daarnaast is op drie momenten van dit water de biomassaproductiepotentie (BPP) bepaald, waardoor de maximale biomassaproductie over een week (BP_7) en de cumulatieve biomassaproductie over twee weken (BPC_{14}) van het water met behulp van de BPP-test is bepaald (dag 26, 81 en 136).

De oorspronkelijke looptijd van het onderzoek zou drie maanden zijn, maar gedurende het onderzoek is op twee verschillende tijdstippen en locaties geconstateerd dat de continue biofilm monitors (CBMs) niet werden voorzien van een continue watertoevoer. Bij PS Archemerberg in week 51 van 2017 (na 54 dagen), en op PS Witharen in week 1 van 2018 (na 68 dagen). De gevolgen hiervan zijn dat een goede onderlinge vergelijking van de biologische stabiliteit maar voor drie data gedaan kon worden, in plaats van de oorspronkelijk geraamde zes data. Voor een goede beoordeling van de biofilmaccumulatie en -vorming is namelijk een ongestoorde watertoevoer over 4 weken nodig.

Tabel 1. Overzicht van data en analyses uitgevoerd op het reinwater van de pompstations Witharen, Archemerberg en Hammerflie.

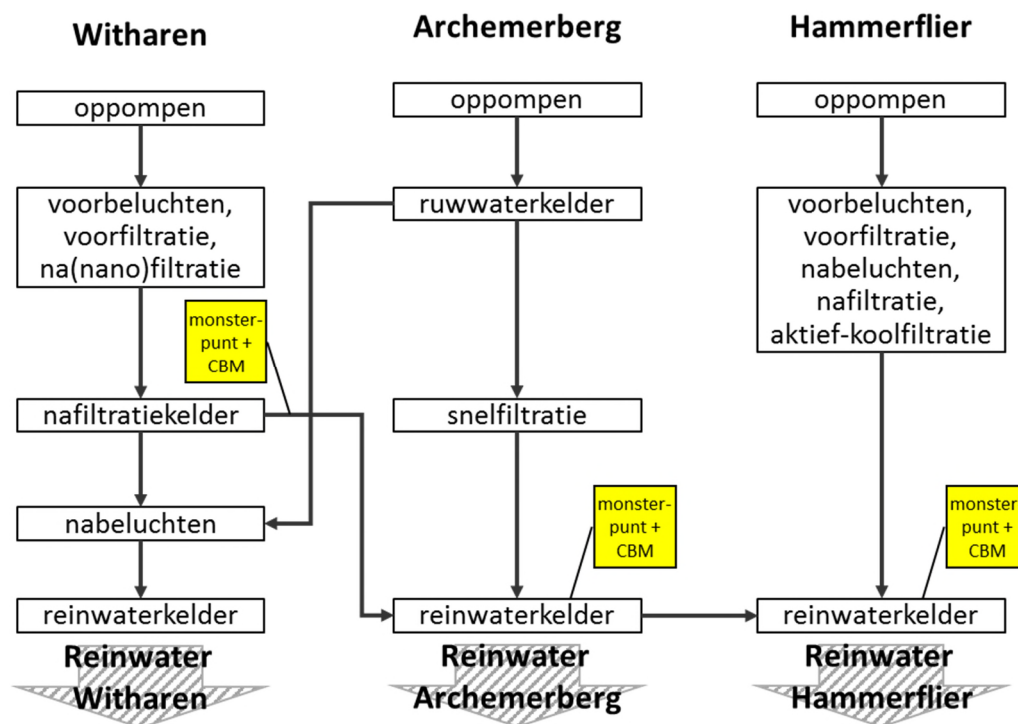
datum	meting dagen	CBM parels ATP	CBM plaatjes ATP	CBM parels Fe	CBM plaatjes Fe	CBM water ATP	BPP water BPP	temp water temp
27-10-17	0							
09-11-17	13	x	x			x		x
22-11-17	26	x	x	x	x	x	x	x
06-12-17	40	x	x			x		x
20-12-17	54*	x	x			x		x
03-01-18	68*	x	x			x		x
16-01-18	81*	x	x			x	x	x
29-01-18	94	x	x			x		x
13-02-18	109	x	x	x	x	x		x
27-02-18	123	x	x			x	x	x
12-03-18	136	x	x	x	x	x		x

*op deze data zijn de CBM-gegevens voor sommige pompstations minder betrouwbaar

Hierop is besloten het onderzoek zes weken langer door te laten lopen, zodat alsnog de CBM-resultaten van drie pompstations op zes verschillende data vergeleken kunnen worden. Op drie data zijn tevens de ijzeraccumulatie en -afzettingssnelheid bepaald van het reinwater van de pompstations. Een overzicht van de uitgevoerde analyses staat in tabel 1.

Volgens het projectplan (KWR, 2017) zou het onderzoek plaatsvinden op drie pompstations met als monsterpunt reinwater. Bij verwerking van de gegevens bleek echter dat het monsterpunt van pompstation Witharen niet zat aangesloten op het reinwater van Witharen, maar op het nafiltraat richting Archemerberg (zie foto's bijlage I en schema Fig. 1).

Figuur 1. Schematische weergave van de belangrijkste zuiveringsstappen op de verschillende pompstations in hetzelfde verzorgingsgebied, en de menging tussen de verschillende waterstromen. In het schema staan tevens de punten aangegeven waar bemonsterd is (geel).



2.2 Uitgevoerde analyses

2.2.1 Analyse van de biomassaproductiepotentie (BPP)

Met behulp van de BPP-methode voor water wordt informatie verkregen over de concentratie van biologische afbreekbare stoffen in het water. De BPP-methode voor het bepalen van de groeipotentie is uitgebreid beschreven in de BTO rapportage 'Bepaling van de biomassaproductiepotentie (BPP) van drinkwater' (Van der Kooij & Veenendaal, 2014) en 'Validatie en standaardisatie van de BPP-test voor drinkwater' (Van der Wielen, 2015). In deze paragraaf zullen kort de methode en de parameters van de methode worden beschreven.

De biomassaproductiepotentie (BPP) werd bepaald door een erlenmeyer te vullen met 600 ml van het te onderzoeken water, waaraan vervolgens fosfaat en nitraat zijn toegevoegd. Deze kolven werden vervolgens 14 dagen geïncubeerd bij 25°C. Tijdens de incubatieperiode werd op dag 0, 1, 2, 4, 7, 9, 11 en 14 monsters genomen van de kolven en werd het ATP-gehalte gemeten volgens NEN-EN 16421:2014, als maat voor actieve biomassa. De maximale groeiopbrengst gedurende de eerste zeven dagen (BP_7) en de cumulatieve groeiopbrengst in 14 dagen (BPC_{14}) werden vervolgens met de gegevens berekend.

2.2.2 Analyse van de biomassa- en ijzeraccumulatiesnelheid met de CBM

De CBM is in meer detail beschreven in 'Bepaling van de biofilmvormende eigenschappen van drinkwater met een continue biofilmmonitor (CBM)' (Van der Kooij & Veenendaal, 2012) en 'Doorontwikkeling van de continue biofouling monitor CBM' (Hijnen et al., 2015). In deze paragraaf zullen kort de methode en de parameters van de methode worden beschreven.

De CBM bestaat uit vier parallel geplaatste leidingen met per leiding bovenin een cuvet gevuld met een glasplaatje (40 x 9,2 x 1,0 mm) met een totaal oppervlakte van 8,3 cm² en onderin een cuvet gevuld met glasporels (Ø 2 mm) met een specifiek totaal oppervlakte van 19,84 cm². De cuvetten hebben een inwendige diameter van 9,8 mm. Een CBM werd aangesloten op het te onderzoeken reinwater, waarbij de vier parallel geplaatste leidingen (en cuvetten) continu werden doorstroomd met een snelheid van 10 liter per uur. Vervolgens werden de CBMs tweewekelijks bemonsterd door twee van de vier cuvetten met glasporels en twee van de vier cuvetten met een glasplaatje te vervangen voor nieuwe cuvetten met glasporels of glasplaatjes.

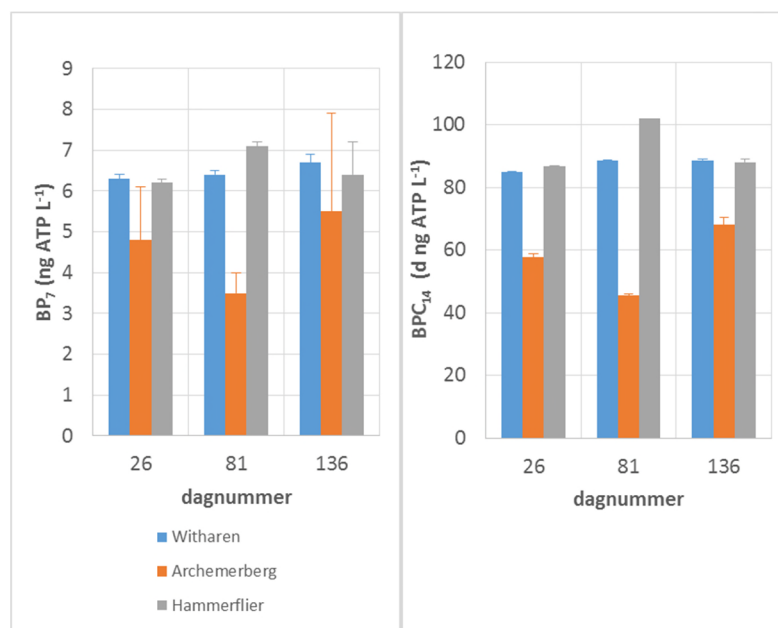
De CBMs zijn direct gevoed met het water van de drie monsterpunten op de productie-locaties (Fig. 1). Hier werd op tien momenten gedurende de meetperiode van drie maanden de biomassa-accumulatiesnelheid (BAS) en biofilmvormingssnelheid (BVS), en op vijf momenten de ijzeraccumulatiesnelheid (FeAS) en ijzerafzettingssnelheid (FeAFS) bepaald. Op deze locaties werden gedurende de periode 27 oktober 2017 t/m 12 maart 2018 tweewekelijks per set cuvetten (vier glasporelcuvetten en vier cuvetten met glasplaatjes) twee van de vier cuvetten vervangen. De uitgehaalde cuvetten met glasporels en -plaatjes 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 drie keer 10 ml per cuvet werden bij elkaar gevoegd en daarna werd van de gepoolde suspensie het ATP-gehalte bepaald volgens NEN-EN 16421:2014 en (maandelijks) de ijzerconcentraties bepaald volgens KWR huisvoorschrift LAM-074.

3 Resultaten

3.1 Biomassaproductiepotentie (BPP) van water

In Figuur 2 staan de maximale biomassaproductie gedurende een week (BP_7) en de cumulatieve biomassaproductie over twee weken (BPC_{14}) weergegeven voor de drie verschillende locaties. De BP_7 en BPC_{14} -waardes laten een vrijwel identiek patroon zien, met vergelijkbare biomassaproductiepotentie (BPP) voor de pompstations Witharen en Hammerflief (BP_7 : 6-7 ng ATP L⁻¹, BPC_{14} : 85-100 d ng ATP L⁻¹), en een lagere BPP voor Archemerberg (BP_7 : 3,5-5,5 ng ATP L⁻¹, BPC_{14} : 45-70 d ng ATP L⁻¹).

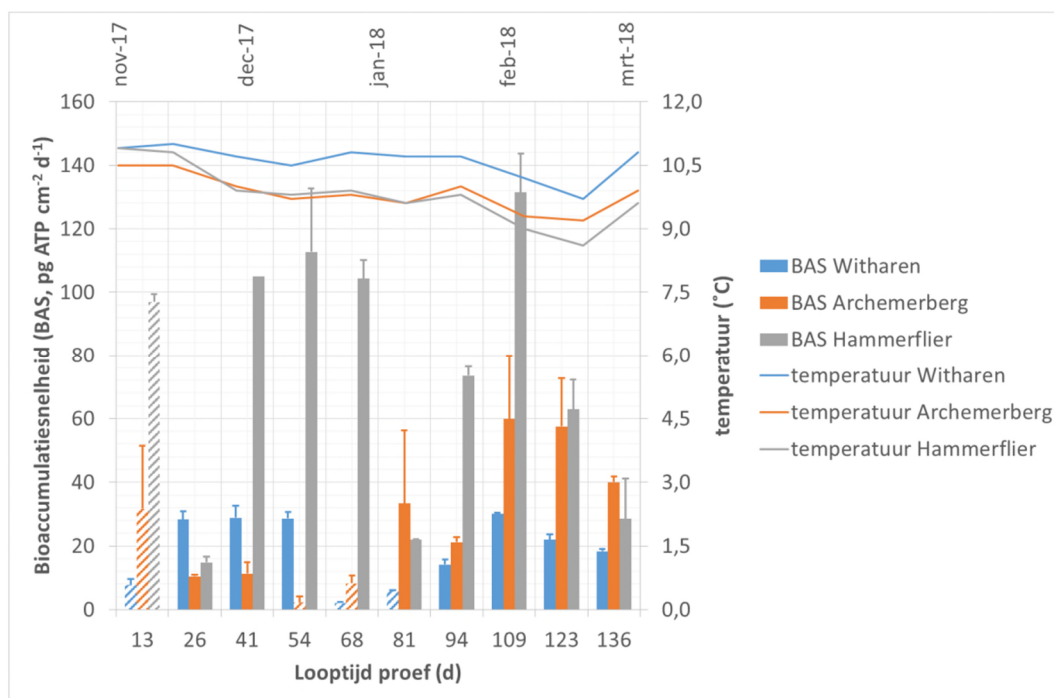
Figuur 2. Biomassaproductiepotentie (BPP) van het Nafiltraat van pompstation Witharen en het reinwater van de pompstations Archemerberg en Hammerflief (staafdiagram), met foutbalken (standaarddeviaties). Links: Maximale biomassaproductie gedurende een week (BP_7), rechts: cumulatieve biomassaproductie over twee weken (BPC_{14}). Dagnummers verwijzen naar dagen sinds de start van het onderzoek: 26 = 22 november 2017, 81 = 16 januari 2018 en 136 = 12 maart 2018.



3.1.1 Continue Biofilm Monitors (CBMs)

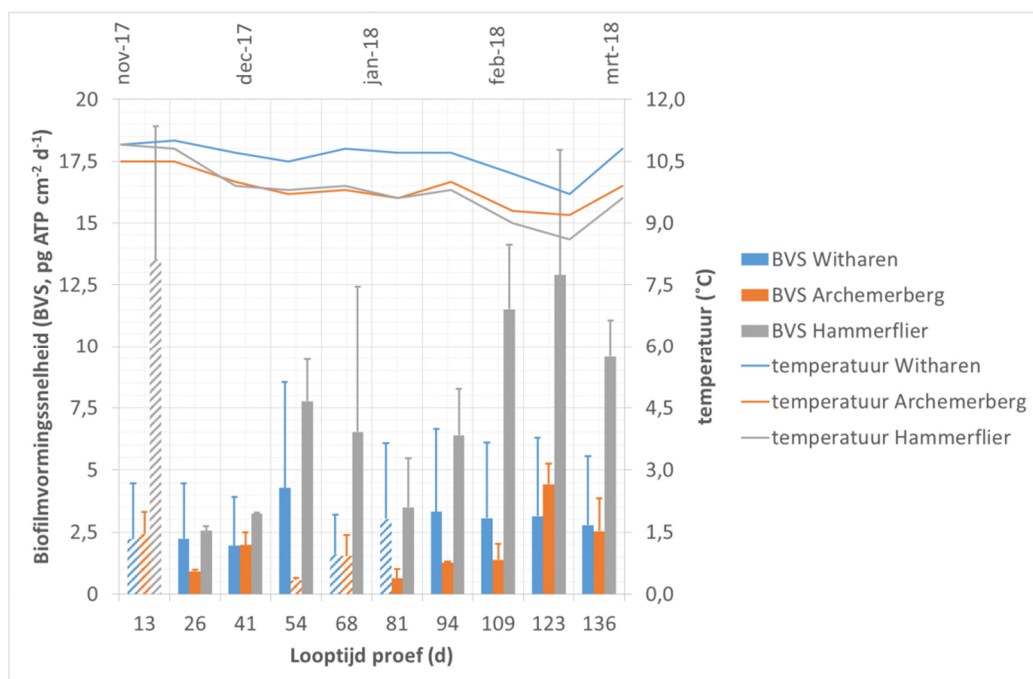
In Figuur 3 staat de biomassa-accumulatiesnelheid (BAS) weergegeven van de drie onderzochte locaties. De BAS van het nafiltraat van pompstation Witharen is relatief laag gedurende de hele duur van het onderzoek, rond $30 \text{ pg ATP cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$. De BAS van het reinwater van pompstation Archemerberg is aanvankelijk laag, rond $10 \text{ pg ATP cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$, maar laat gedurende de tweede helft van het onderzoek soms hogere waarden zien, tussen tot $60 \text{ pg ATP cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$. De BAS van het reinwater van pompstation Hammerflier laat vaak zeer hoge waarden zien, tussen 75 en $130 \text{ pg ATP cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$, hoewel hier soms ook lagere waarden tussen zitten (tussen 15 en $60 \text{ pg ATP cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$). Temperatuur op het moment van monsternamen lijkt geen duidelijke verklaring te zijn voor de waargenomen variatie in BAS.

Figuur 3. Biomassa-accumulatiesnelheid (BAS) van de drie onderzochte pompstations (staafdiagram), met foutbalken (standaarddeviaties). Gearceerde staven zijn minder betrouwbaar vanwege (tijdelijk) niet-aangesloten zijn op het desbetreffende monsterpunt en/of een te korte tijdsduur voor betrouwbare schatting van de BAS. tevens staat de watertemperatuur weergegeven (lijndiagram). Dagnummers verwijzen naar dagen sinds de start van het onderzoek.



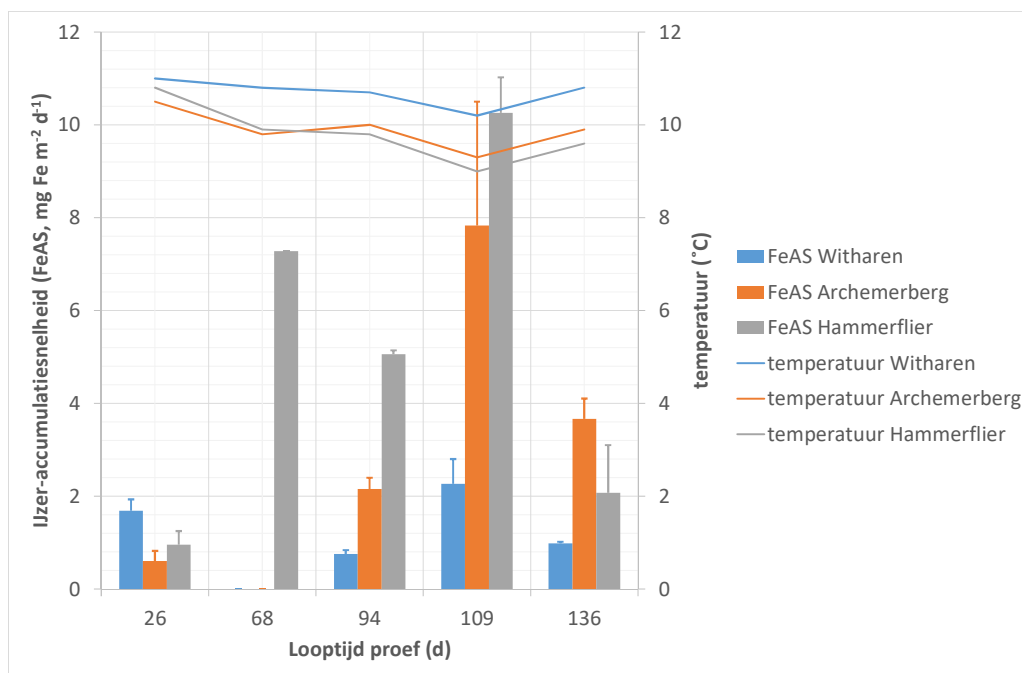
De biofilmvormingssnelheid (BVS) laat grofweg hetzelfde patroon zien, zij het met een relatief hogere standaarddeviatie (Figuur 4): Witharen en Archemerberg hebben doorgaans een lage BVS (tussen 1 en 4 pg ATP cm⁻² d⁻¹), terwijl deze bij Hammerflier hoger is, tot 13 pg ATP cm⁻² d⁻¹. Hier lijkt net als bij de BAS geen relatie te bestaan met de temperatuur op het moment van monsterneming.

Figuur 4. Biofilmvormingssnelheid (BVS) van het water van de drie onderzochte pompstations (staafdiagram), met foutbalken (standaarddeviaties). Gearceerde staven zijn minder betrouwbaar vanwege (tijdelijk) niet-aangesloten zijn op het desbetreffende monsterpunt en/of een te korte tijdsduur voor betrouwbare schatting van de BAS. tevens staat de watertemperatuur weergegeven (lijndiagram). Dagnummers verwijzen naar dagen sinds de start van het onderzoek.



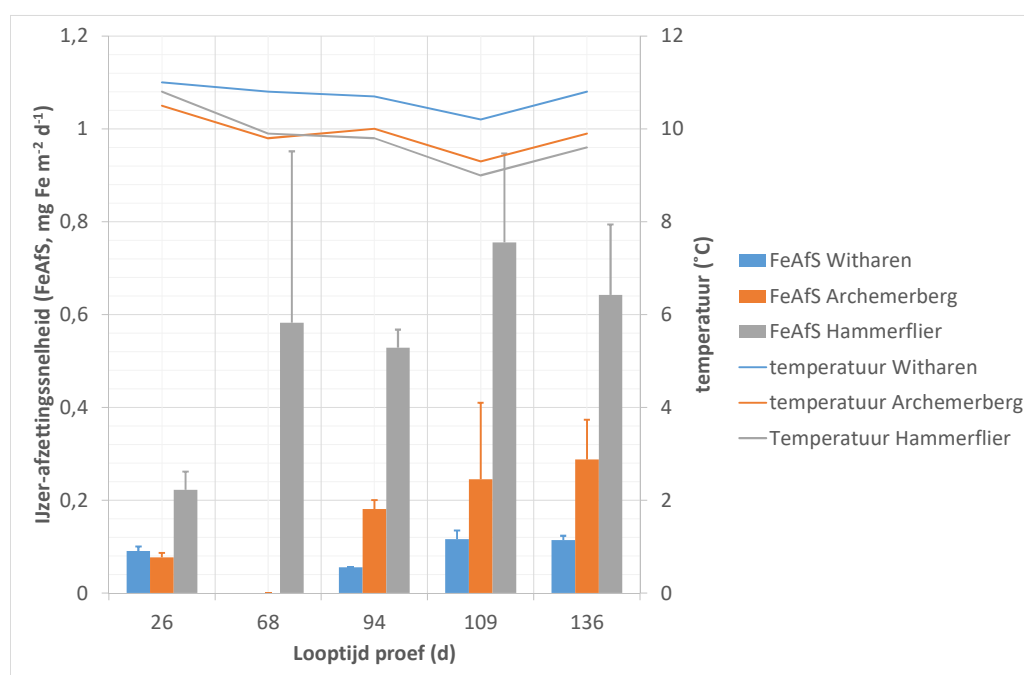
Bij de ijzeraccumulatiesnelheid (FeAS) vertoont pompstation Witharen over het algemeen de laagste waarden ($1-2 \text{ mg Fe m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), Archemerberg doorgaans hogere waarden ($1-8 \text{ mg Fe m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) en Hammerflier de hoogste FeAS-waarden ($1-10 \text{ mg Fe m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) (Figuur 5). Het verloop in de tijd en de onderlinge verhoudingen tussen de pompstations laten ruwweg hetzelfde patroon zien voor de FeAS als voor de BVS (vergelijk met dezelfde dagnummers in Figuur 2), en ook hier lijkt de temperatuur geen sterke invloed te hebben op de FeAS.

Figuur 5. Ijzeraccumulatiesnelheid (FeAS) van de drie onderzochte pompstations (staafdiagram), met foutbalken (standaarddeviaties). tevens staat de watertemperatuur weergegeven (lijndiagram). Dagnummers verwijzen naar dagen sinds de start van het onderzoek. Op dag 68 hadden de CBM's van Witharen en Archemerberg geen continue watertoevoer.



De ijzerafzettingssnelheid (FeAfS) laat vrijwel hetzelfde beeld zien als de ijzeraccumulatiesnelheid (FeAS) (Figuur 6): Witharen heeft hier de laagste waarden (rond 0,1 mg Fe m⁻² d⁻¹), Archemerberg hogere waarden (0,1-0,3 mg Fe m⁻² d⁻¹) en Hammerflier de hoogste waarden (0,2-0,75 mg Fe m⁻² d⁻¹). Vergelijken met het patroon voor de BVS worden voor de FeAfS lagere waarden gehaald bij pompstation Archemerberg.

Figuur 6. Ijzerafzettingssnelheid (FeAfS) van het water van de drie onderzochte pompstations (staafdiagram), met foutbalken (standaarddeviaties). tevens staat de watertemperatuur weergegeven (lijndiagram). Dagnummers verwijzen naar dagen sinds de start van het onderzoek. Op dag 68 hadden de CBM's van Witharen en Archemerberg geen continue watertoevoer.



De watertemperatuur lijkt geen effect op te hebben op de snelheid van biofilmvorming. Om uit te sluiten dat temperatuur op enig ander moment mogelijk wel een rol heeft gespeeld, zijn de eigen temperatuurmetingen op de continue biofilm monitors (CBMs) op het moment van monsternamen vergeleken met de temperaturen *in situ* gemeten door Vitens. De metingen van KWR blijken binnen hetzelfde bereik te vallen, wat aangeeft dat de temperatuur bij monsternamen representatief was voor de desbetreffende periode (Bijlage II): nafiltraat Witharen was het warmst (rond 10,5 °C), reinwater Archemerberg koeler (9,8 °C) en reinwater Hammerflier het koelst (aanvankelijk [november] rond 11 °C, later rond 9,5 °C). Het *reinwater* van Witharen heeft min of meer dezelfde temperatuur als de andere reinwaters (Bijlage II).

4 Discussie

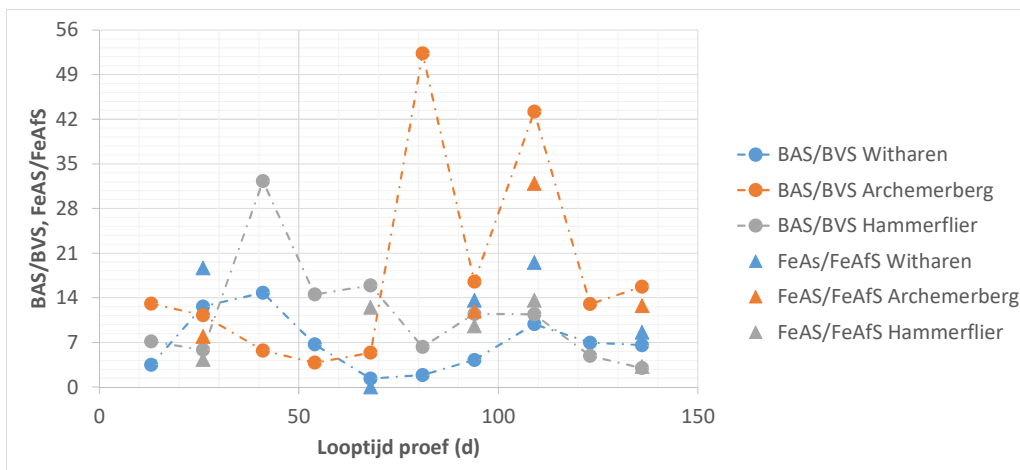
4.1 Biologische stabiliteit op basis van de BPP en CBM-proeven

De biomassaproductiepotentie (BPP) laat voor beide parameters hetzelfde patroon zien. Bij de ontwikkeling van BP_7 en BPC_{14} als indicatoren voor de biomassaproductiepotentie was de oorspronkelijke gedachte dat BP_7 een indicatie geeft van de makkelijk afbreekbare stoffen, terwijl BPC_{14} het totaal aan afbreekbare stoffen in het water weergeeft. Er is een lineaire correlatie zien tussen BP_7 en BPC_{14} , waarbij $BPC_{14}=13,5 BP_7$ ($R^2=0,96$: Bijlage III). Dit geeft aan dat beide parameters sterk samenhangen, wat ook gevonden is in recent afgerond onderzoek naar groeipotentie en biofilmvormende eigenschappen van drinkwater in Nederland (Van der Wielen, 2018). Uit analyse van een database met gegevens van 37 drinkwaterproductielocaties bleek dat deze correlatie dermate sterk is, dat het volstaat om alleen BP_7 te meten. De aandachtswaarde voor de BP_7 bij drinkwater bereid uit grondwater zit op 9 ng ATP L^{-1} (Van der Wielen, 2018), wat betekent alle drie de onderzochte locaties op alle drie onderzochte data onder de aandachtswaarde zitten die zijn vastgesteld voor de biomassaproductiepotentie.

In hetzelfde rapport (Van der Wielen, 2018) is ook een aandachtswaarde gedefinieerd voor de biomassa-accumulatiesnelheid (BAS): deze is $30 \text{ pg ATP cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Het nafiltraat van Witharen zit doorgaans net op of onder deze waarden, het reinwater van Archemerberg meestal rond de 30 gemiddeld (met uitschieters tot $60 \text{ pg ATP cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$) en bij Hammerflier gemiddeld $75 \text{ pg ATP cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ met uitschieters tot $130 \text{ pg ATP cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Figuur 3). Ook in de andere biofilm-gerelateerde parameters (biofilmvormings-snelheid [BVS], ijzeraccumulatiesnelheid [FeAS] en ijzerafzettingssnelheid [FeAFs]) heeft het reinwater van Hammerflier een opvallend hoge nagroeipotentie (Figuren 3, 4, 5 en 6). Op grond van de CBM-gegevens is het water van Hammerflier dus niet biologisch stabiel.

Vanwege de lage biomassaproductiepotentie rijst de vraag in hoeverre de biofilmvorming het resultaat is van groei en/of sedimentatie. Bij opvallend hoge sedimentatie zouden namelijk specifiek ingrepen getroffen kunnen worden op de zuivering om dit proces te beheersen. De CBM-gegevens over biofilm-accumulatie geven een beeld van de biofilmvorming als gevolg van groei en sedimentatie, omdat vanwege de hydrodynamische omstandigheden in het cuvet ook biofilmvorming door sedimentatie kan optreden. Dit is niet het geval bij de plaatjes; hier stroomt het water verticaal erlangs. De verhouding tussen sedimentatie en groei zelf is dus af te leiden de verhouding tussen BAS en BVS enerzijds, en tussen FeAS en FeAFs anderzijds. In Figuur 7 staan deze verhoudingen weergegeven: een hoge BAS/BVS en FeAS/FeAFs betekenen een relatief hoger aandeel van sedimentatie, terwijl lage waarden een relatief hoger aandeel biofilmgroei betekenen.

Figuur 7. Verhouding tussen bioaccumulatiesnelheid en biofilmvormingssnelheid (BAS/BVS), en verhouding tussen ijzeraccumulatiesnelheid en ijzerafzettingssnelheid (FeAS/FeAFS).



Voor Witharen zijn de BAS/BVS en FeAS/FeAFS overwegend aan de lage kant (BAS/BVS gemiddeld rond 7, FeAS/FeAFS rond 10), wat erop wijst dat biofilmgroei het bepalende proces is. Archemerberg zit aanvankelijk ook laag (BAS/BVS en FeAS/FeAFS beiden rond 8), en Hammerflie zit hier wat deze verhoudingen betreft meestal tussenin (BAS/BVS gemiddeld rond 11, FeAS/FeAFS rond 8). Verder lijken BAS/BVS en FeAS/FeAFS in dezelfde mate te variëren in de tijd bij Archemerberg en Hammerflie, terwijl bij Witharen soms hogere FeAS/FeAFS-verhoudingen gevonden worden. Dit zou kunnen wijzen op een relatief groter aandeel ijzersedimentatie ten opzichte van biomassa(ATP)-sedimentatie.

Voor het reinwater van Archemerberg zijn op dag 81 en 109 (16 januari en 13 februari 2018) zijn opvallend hoge waarden te vinden voor BAS/BVS (52 en 43) en FeAS/FeAFS (32). Op 29 tot 30 januari 2018 heeft op pompstation Archemerberg een storing plaatsgevonden, waarbij veel slib vanuit de reinwaterkelder het distributienet is in gepompt. Het reinwater heeft hierbij de wettelijke normen voor het ijzergehalte (1,16 mg/l) en de troebelingsgraad (3,1 FTE) overschreden.

4.2 Biologische stabiliteit in relatie tot andere parameters in het reinwater

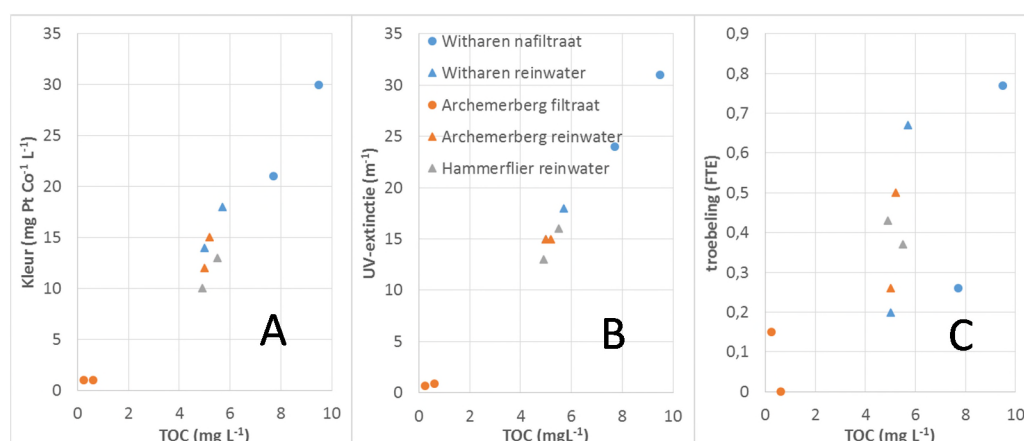
Aanleiding van dit onderzoek naar biologische stabiliteit is het hoge TOC-gehalte van pompstation Witharen. In de onderzochte periode is hier 5,7 mg TOC L⁻¹ gemeten in het reinwater. Uit door Vitens verstrekte gegevens blijkt dat in het nafiltraat nog veel hogere waarden zijn aangetroffen (9,5 resp. 7,7 mg TOC L⁻¹). Dit is hoger dan de eisen die Vitens zelf stelt aan het water (maximaal 5,0 mg TOC L⁻¹), en ook hoger dan de aandachtswaarde van TOC gedefinieerd door Van der Wielen (2018: 4,0 mg TOC L⁻¹). Wanneer wordt gekeken naar de relatie tussen TOC en de verschillende parameters voor biologische stabiliteit (BP₇, BPC₁₄, BAS en BVS), lijkt er geen relatie te bestaan (Bijlage IV). Ondanks het hoge TOC-gehalte van het reinwater en nafiltraat van pompstation Witharen is de biologische activiteit van het water laag. Dit betekent dat TOC een slechte voorspeller is van biologische activiteit, en dat aandachtswaarden hiervoor minder relevant zijn voor dit specifieke verzorgingsgebied.

Omdat verhoogde ijzeraccumulatie en ijzerafzetting ook veroorzaakt kunnen worden door het ijzergehalte, is de mogelijke relatie tussen de ijzerconcentratie en de

ijzeropname door de biofilm (FeAS en FeAFS) onderzocht. Voor de vergelijking is hier tevens gekeken naar de relatie tussen ijzer en BAS en BVS (Bijlage V). Er blijkt echter geen verband te zijn tussen het ijzergehalte en deze parameters.

De resultaten wijzen erop dat een groot deel van de organische koolstof niet beschikbaar is voor biologische activiteit. Organische stoffen zoals humuszuren worden wel gemeten als TOC, maar zijn slecht afbreekbaar. Deze stoffen geven een gelige kleur aan het water en hebben een sterke mate van UV-absorptie. Bij pompstations met een laag TOC-gehalte wordt inderdaad weinig kleur en UV-absorptie waargenomen, en vice versa (Figuur 8). Verder lijkt uit deze figuur weinig relatie te bestaan tussen TOC en troebelings.

Figuur 8. Verband tussen TOC-gehalte en: A) kleur, B) UV-extinctie en C) troebelings op de verschillende door Vitens bemonsterde locaties.



Wat Figuur 8A en 8B duidelijk laten zien is het effect van menging tussen Witharen nafiltraat en Archemerberg filtraat: de waardes hiervan bevinden zich aan de extreme zijden van het spectrum, terwijl de reinwaters in het midden van de figuur liggen. Verder blijkt uit deze gegevens een lineair verband tussen TOC en kleur enerzijds ($Kleur = 3,26 \cdot TOC - 1,23$, $R^2=0,95$) en UV-extinctie anderszijds ($UV-extinctie = 3,03 \cdot TOC - 1,43$, $R^2=0,99$), terwijl dit niet het geval is voor de correlatie tussen TOC en troebelings (Bijlage VI). Het TOC-gehalte bestaat in dit verzorgingsgebied dus voor een groot deel uit gekleurd en UV-absorberend TOC, zoals humuszuren. Dit maakt het vanuit de biologische stabiliteit van het water niet urgent om maatregelen te treffen om het TOC-gehalte te verminderen.

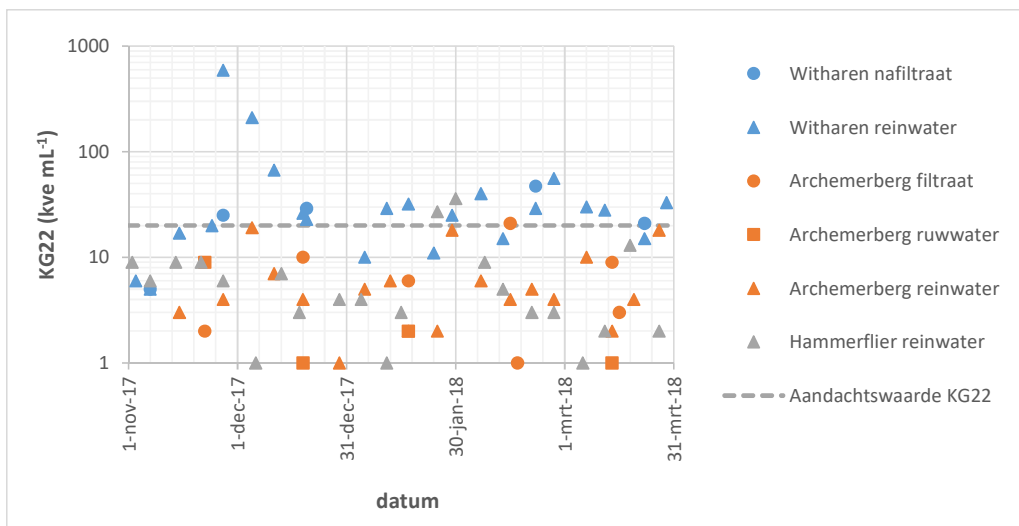
De biologische activiteit kan onvoldoende worden afgeleid uit TOC-gehalten. Aan de andere kant zijn de in dit onderzoek gebruikte parameters voor biologische activiteit minder makkelijk en minder snel te meten; resultaten komen pas na 1-2 weken beschikbaar. Nader onderzoek naar snel meetbare parameters, bijvoorbeeld welke fractie van het totaal organisch koolstof beschikbaar is voor biologische activiteit, kan aangeven of het zinvol is om naast of in plaats van TOC andere parameters te meten om de biologisch beschikbare organische koolstof te beschrijven.

De verminderde biologische stabiliteit van het water houdt mogelijk verband met het koloniegetal bij 22 °C (KG22). Ook voor KG22 is een aandachtswaarde ontwikkeld (Van der Wielen, 2018), deze is 20 kve mL⁻¹ voor KG22. In Figuur 9 worden de voor KG22

gevonden waarden weergegeven, samen met de aandachtswaarde hiervoor. Het nafiltraat en reinwater van Witharen hebben regelmatig KG22-waarden boven de aandachtswaarde; in het reinwater worden waarden tot wel 590 kve mL⁻¹, met een geometrisch gemiddelde van 28. Het reinwater van Archemerberg en Hammerfliet doorgaans veel lagere KG22-waarden (beiden een geometrisch gemiddelde van 5), met maar een enkele overschrijding. Dit contrasteert met de biologische activiteit, waarvoor juist bij Archemerberg en zeker bij Hammerfliet hogere waarden dan de aandachtswaarde van 30 pg ATP cm⁻² d⁻¹ zijn gevonden: bij Archemerberg was de BAS gemiddeld 33, en rond 75 bij Hammerfliet.

Voor geen van de onderzochte locaties is dan een duidelijke correlatie gevonden tussen KG22 en BAS: bij Witharen is een zwakke positieve correlatie gevonden ($R_2=0,76$), maar dit is op basis van een beperkt aantal data (n=5, Bijlage VII).

Figuur 9. Door Vitens gemeten koloniegetal bij 22 °C (KG22) en de hiervoor gedefinieerde aandachtswaarde.



Dit onderzoek laat zien dat verschillende parameters waarvoor aandachtswaarden zijn gedefinieerd niet altijd hetzelfde beeld laten zien, wat vragen op kan roepen over het nut van het meten van al deze parameters. Hierbij dient opgemerkt te worden dat deze parameters allemaal een ander aspect van biologische stabiliteit belichten:

- TOC: dit betreft het totaal organisch koolstofgehalte;
- BPP: de groei van de van nature aanwezige soorten op het te onderzoeken water bij afwezigheid van nitraat- of fosfaatlimitatie: in feite een maat voor de biologisch beschikbare organische stof (gemeten als ATP) voor micro-organismen in het open water;
- KG22: aantal heterotrofe micro-organismen (bacteriën) die in een vaste en rijke voedingsbodem kolonies kunnen vormen bij 22°C (gemeten als kve). Dit wordt geïnterpreteerd als het vermogen van de van nature aanwezige soorten om biofilms te vormen in afwezigheid van substraatlimitatie;
- CBM-analyses: de vorming van biofilms op een glasoppervlak door van de van nature aanwezige soorten onder continue doorstroming van het te onderzoeken water (gemeten als ATP of Fe).

In dit onderzoek komt naar voren dat TOC, door de specifieke samenstelling in dit verzorgingsgebied, minder bruikbaar is als maat voor de biologische stabiliteit. De BPP laat zien dat de organische stoffen (wat geïnterpreteerd kan worden als een deel van de TOC) benut kunnen worden door micro-organismen in het open water, maar niet in zulke mate dat dit gevolgen heeft voor de biologische stabiliteit. KG22 laat zien dat de van nature aanwezige soorten in staat zijn om kolonies ("biofilms") te vormen op een kunstmatige voedingsbodem. De CBM-analyses laten tenslotte zien dat de van nature aanwezige soorten bij continue doorstroming in staat zijn om biofilms te vormen, welke voornamelijk toe te schrijven zijn aan groei en in mindere mate aan sedimentatie. Dit wijst er dus op dat de hoeveelheid organisch materiaal in het water aan de lage kant is voor groei in suspensie (het open water), terwijl dit wel toereikend is voor micro-organismen die biofilms kunnen vormen.

Alle drie de onderzochte locaties laten voor één of meerdere parameters zien dat de biologische stabiliteit van het water laag is. Dit blijkt dus niet alleen het geval voor pompstation Witharen, maar ook voor de pompstations Archemerberg en Hammerflie. Om de biologische stabiliteit beter te kunnen beheersen is het nodig om per locatie de effectiviteit van iedere zuiveringsstap te evalueren aan de hand van groeipotentie en biofilmvormende eigenschappen, zoals bepaald in dit onderzoek. Aan de hand hiervan kunnen de meest kritische processen worden geïdentificeerd, en kan een betere inschatting worden gemaakt van het effect van menging tussen locaties en eventuele optimalisatie van de zuiveringen op de eindkwaliteit van het reinwater. Uiteindelijk moet dit leiden tot een betere afweging van de maatregelen die genomen dienen te worden ten behoeven van een grotere biologische stabiliteit in het verzorgingsgebied.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

Voor alle drie de meetdagen is de biomassaproductiepotentie (BPP) even hoog op pompstations Witharen en Hammerflier, en wat lager op Archemerberg, zowel bij de maximale biomassa over de eerste zeven dagen (BP_7) als de cumulatieve biomassaproductie over 14 dagen (BPC_{14}). De BP_7 blijft op alle drie de locaties onder de aandachtswaarde gedefinieerd voor drinkwater geproduceerd uit grondwater ($BP_7 = 9 \text{ ng ATP L}^{-1}$). De potentie van nagroei van biofilms is echter wel aanwezig, en hiervoor worden overschrijdingen van de aandachtswaarde gevonden voor de bioaccumulatiesnelheid ($BAS = 30 \text{ pg ATP cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$), met name op pompstation Hammerflier.

Er is geen duidelijke relatie gevonden tussen het TOC-gehalte en verschillende biologische stabiliteitsparameters (BP_7 , BPC_{14} , BAS en BVS). Verder lijken BAS, BVS, FeAS en FeAFS niet af te hangen van temperatuur of ijzergehalte; evenmin is er een relatie gevonden tussen het koloniegetal bij 22°C (KG22) en BAS. Het TOC-gehalte blijkt voornamelijk uit gekleurd en UV-absorberend materiaal te bestaan, voornamelijk humuszuren, en is daarmee minder biologisch beschikbaar.

De biofilmvorming is voornamelijk toe te schrijven aan groei, en in mindere mate aan sedimentatie van biomassa. De hoeveelheid organische stof in het water is aan de lage kant voor groei van micro-organismen in suspensie, maar voldoende om groei in biofilms te bevorderen. De biologische stabiliteit is hierdoor laag op alle onderzochte locaties, en het is nog onduidelijk welke stoffen verantwoordelijk zijn voor deze (na)groei. Het is wel duidelijk dat er maatregelen getroffen dienen te worden om de biologische stabiliteit te vergroten.

5.2 Aanbevelingen

Vanwege de sterke correlatie tussen BP_7 en BPC_{14} volstaat het om BP_7 te meten voor bepaling van de biomassaproductiepotentie (BPP).

In plaats van TOC zou in dit voorzieningsgebied een andere parameter gekozen dienen te worden om het biologisch beschikbare deel hiervan te kunnen bepalen. Dit moet leiden tot het ontwikkelen van een parameter die snel te meten is en een goede voorspeller kan zijn van de biologische activiteit van het water.

Het is aan te bevelen dat de in dit onderzoek toegepaste parameters voor biologische stabiliteit worden bepaald voor en na de verschillende zuiveringsstappen, zodat een beter beeld wordt verkregen van de kritische stappen in het productieproces. Op basis hiervan kan een betere afweging gedaan worden van de maatregelen die benodigd zijn om de biologische stabiliteit te vergroten.

6 Referenties

- Hijnen, W.A.M., Schulz, F., Hensen, L., Bahlman J.A., 2014. Doorontwikkeling van de continue biofouling monitor CBM. BTO 2014.034; KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.
- KWR, 2017. BTO Projectplan project 402102 (d.d. 22-sep-2017): Biologische stabiliteit reinwater ps Witharen, Archemerberg en Hammerflier – KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein, reg. nr. 1701590.
- Schoonenberg, F., G. Bakker, M. Schriks, 2018. Vitens grens- en drempelwaarden drinkwater versie 5 (AM-BD-AM-02) d.d. 15 maart 2018.
- Van der Kooij, D.; Veenendaal, H.R., 2012. Bepaling van de biofilmvormende eigenschappen van drinkwater met een continue biofilmmonitor (CBM); BTO 2011.050; KWR Watercycle Research Institute; Nieuwegein.
- Van der Kooij, D.; Veenendaal, H. R., 2014. Bepaling van de biomassaproductiepotentie (BPP) van drinkwater.; BTO 2014.038; KWR Watercycle Research Institute; Nieuwegein.
- Van der Wielen, P.W.J.J., 2015. Validatie en standaardisatie van de BPP-test voor drinkwater.; BTO 2015.019; KWR Watercycle Research Institute; Nieuwegein.
- Van der Wielen, P.W.J.J., 2018. Aandachtswaarden nieuwe methoden biologische stabiliteit. BTO 2018.049; KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.

Bijlage I Praktijkopstelling Continue Biofilm Monitors

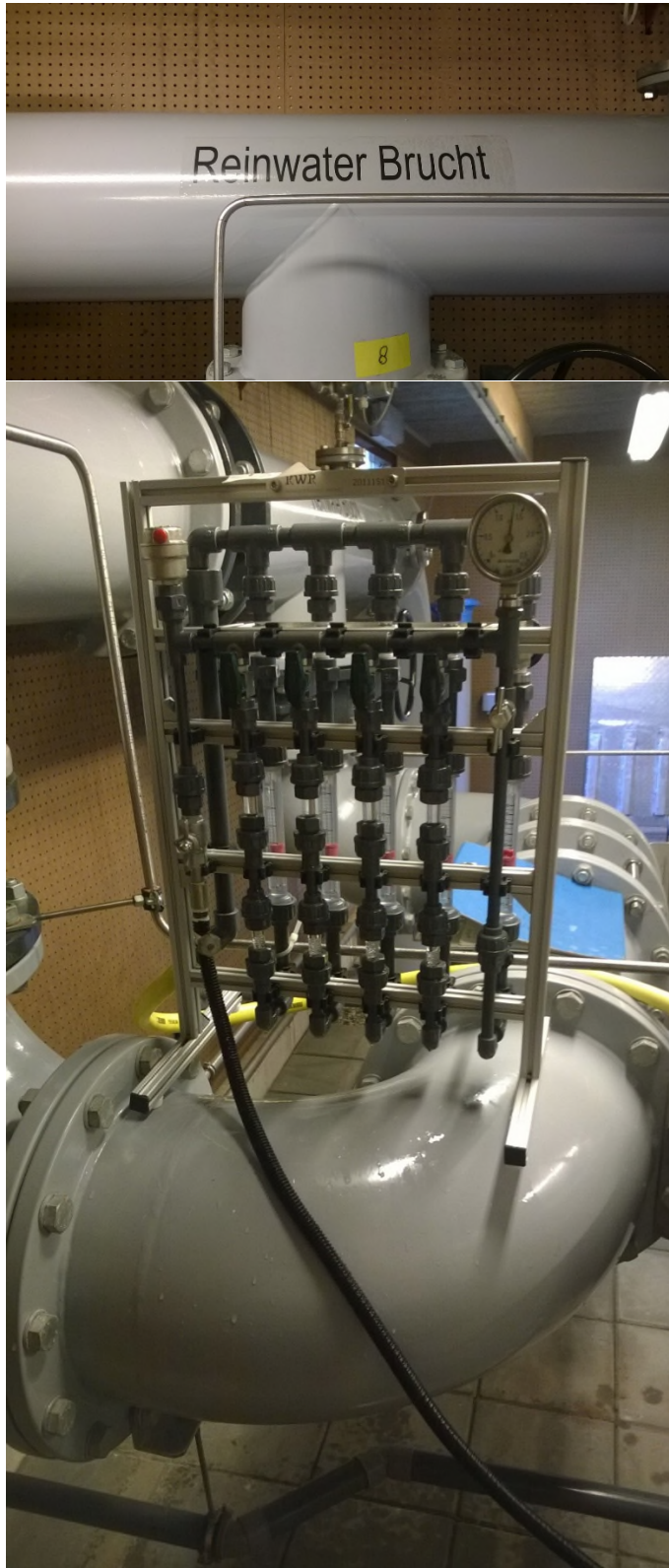
Witharen



Archemerberg

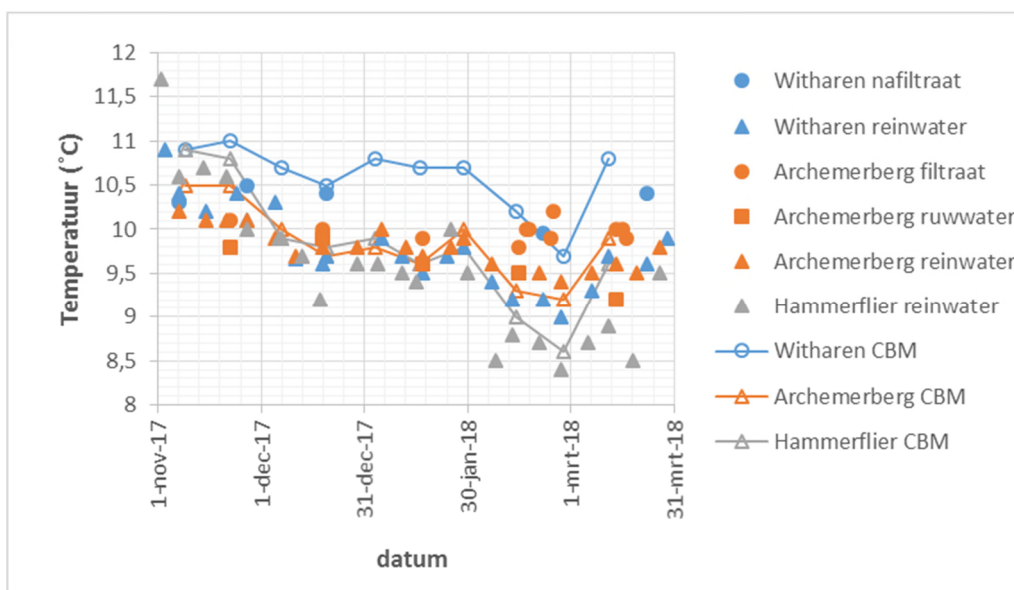


Hammerflier

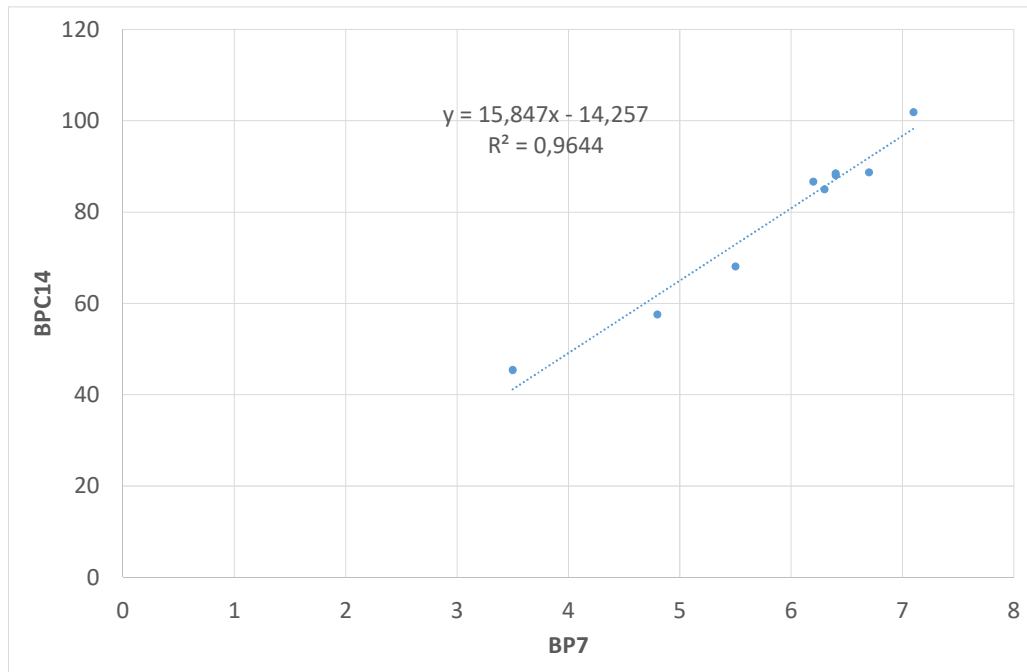


Bijlage II Vergelijking tussen gemeten temperaturen

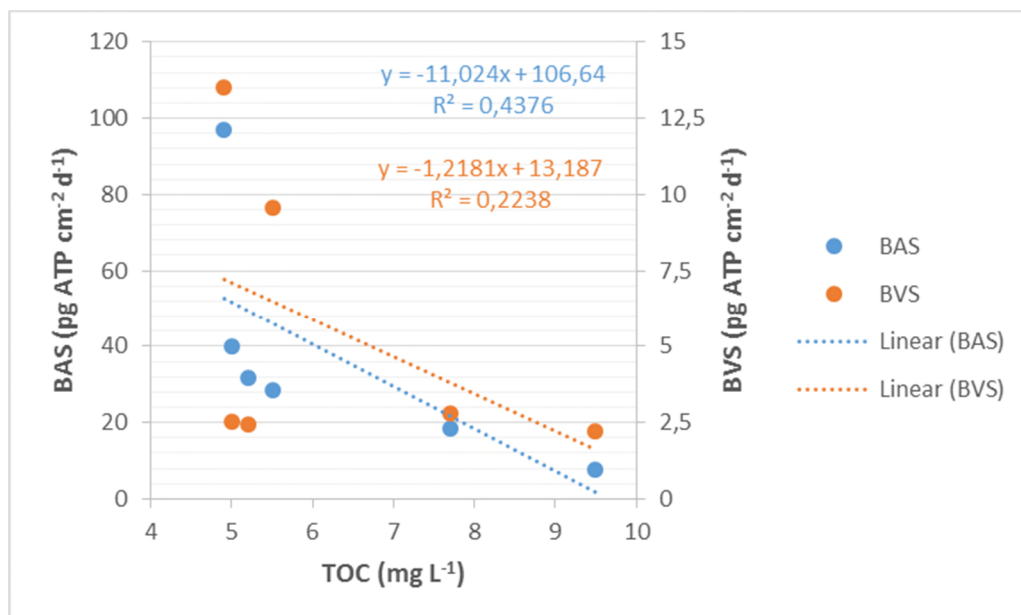
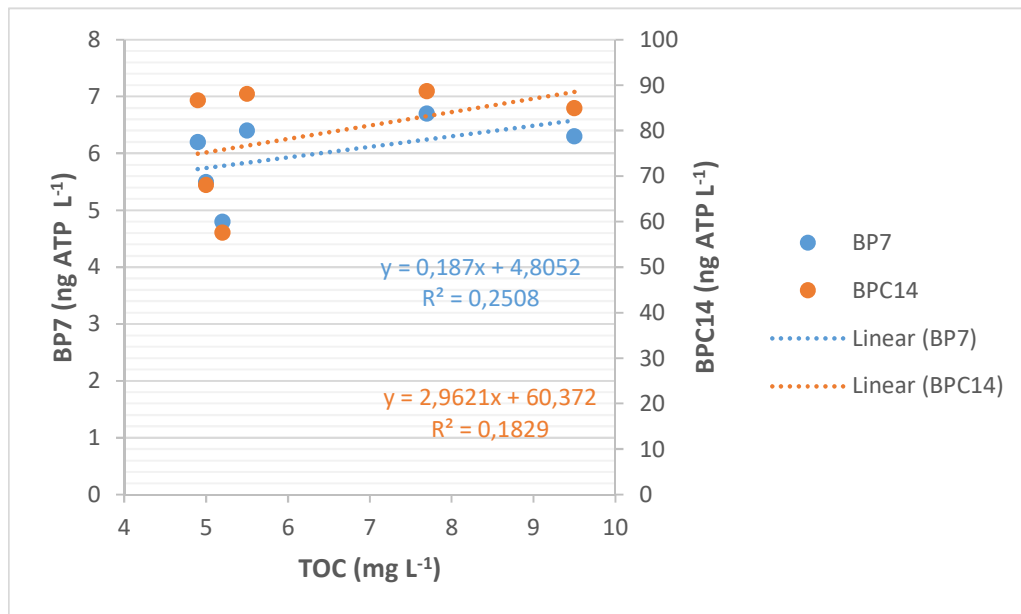
Vergelijking tussen de watertemperatuur afgelezen tijdens de CBM-bemonstering en de temperatuur in situ gemeten door Vitens. De gekleurde symbolen zijn de in situ temperaturen, de open symbolen (met lijn verbonden) zijn de metingen tijdens monstername.



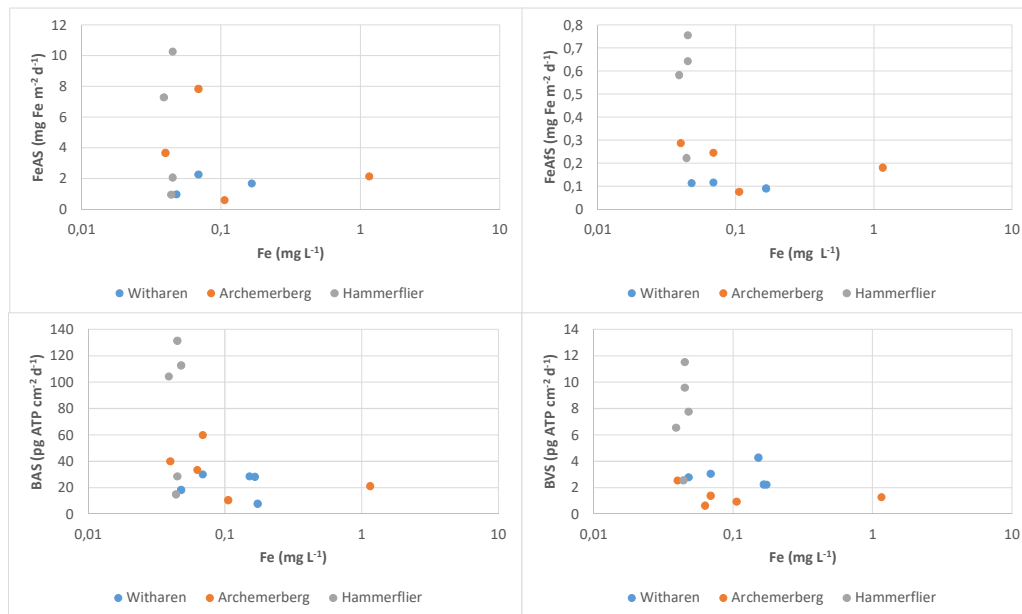
Bijlage III Correlatie BP₇-BPC₁₄



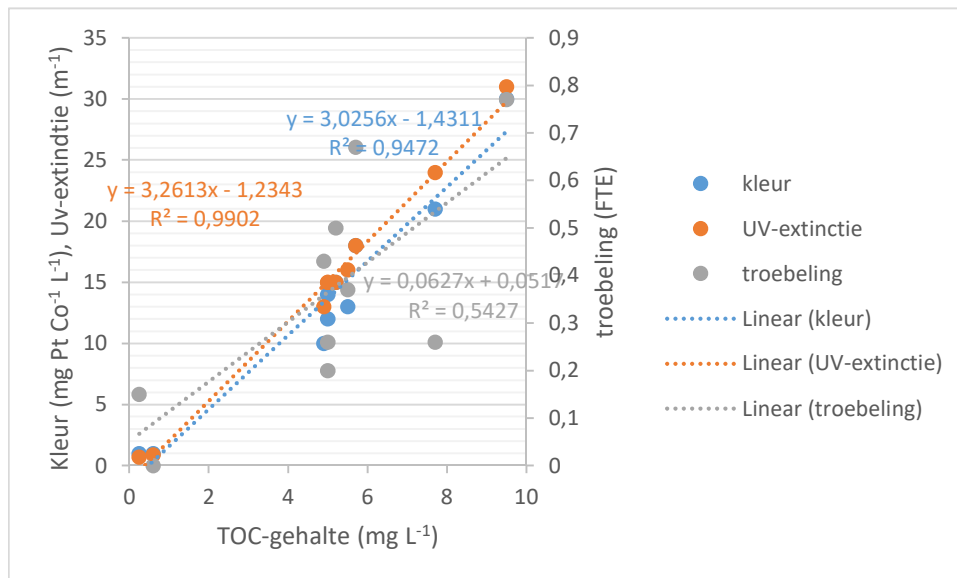
Bijlage IV Correlaties tussen TOC en BPP, BAS en BVS



Bijlage V Correlaties tussen ijzer (Fe) en BPP, FeAS en FeAfS



Bijlage VI Correlatie tussen TOC en kleur, UV-extinctie en troebeling



Bijlage VII Correlatie KG22-BAS

