



Bedrijfstakonderzoek
BTO 2022.069 | Februari 2023

**Anaerobe grondwater
RO concentraat-
behandeling middels
oxische zandfiltratie**

Bedrijfstakonderzoek

KWR

Bridging Science to Practice

Rapport

Anaerobe grondwater RO concentraatbehandeling middels oxische zandfiltratie

BTO 2022.069 | Februari 2023

Dit onderzoek is onderdeel van het collectieve Bedrijfstakonderzoek van KWR, de waterbedrijven en Vewin.

Opdrachtnummer

402045-220 & 402045-280

Projectmanager

Ron Jong, MSc.

Opdrachtgever

BTO - Bedrijfsonderzoek

Auteur(s)

Luuk de Waal, MSc

Kwaliteitsborger(s)

Prof. dr. ir. Emile Cornelissen

Verzonden naar

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten.

Een jaar na publicatie is het openbaar.

Keywords

Omgekeerde osmose, concentraatbehandeling, grondwater, ijzer, mangaan, ammonium

Jaar van publicatie

2023

Meer informatie

L. de Waal, MSc.
T 0306069551
E luuk.de.waal@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

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

KWR

Februari 2023 ©

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

Managementsamenvatting

IJzer-, mangaan- en ammoniumverwijdering uit zuurstofloos grondwater RO concentraat

Auteur(s) Luuk de Waal.

Toepassing van omgekeerde osmose membraanfiltratie op zuurstofloos grondwater heeft als voordeel dat het vaak een vervuiling-vrije bedrijfsvoering van de membraanunit oplevert. De concentraatstroom die gevormd wordt in dit proces bevat echter methaan-gas een factor 4-5x hogere concentratie opgeloste zouten waaronder ijzer, mangaan en ammonium. Om deze concentraatstroom vervolgens te verwerken (bijvoorbeeld door een nabij gelegen rioolwaterzuivering) en de transportleiding vrij te houden van vervuiling is het in veel gevallen wenselijk om de concentraatstroom te ontdoen van deze componenten. In dit onderzoek is een nieuwe combinatie van technieken - namelijk een pilot schaal snelle zandfiltratie unit met een pure zuurstof dosering - getest op verwijderingspotentie voor deze vier componenten. Hoewel snelle zandfiltratie op regulier grondwater veelvuldig wordt toegepast en al sinds jaar en dag een bewezen techniek is vielen de resultaten van behandeling van omgekeerde osmose concentraat behoorlijk tegen.



Zichtbare vervuiling van de aanvoerleiding met ijzervlokken te herkennen aan de typische bruine roestkleur

Belang: Ontwikkelen van behandelmethodieken voor de concentraatstroom van omgekeerde osmose membraan filtratie techniek

Omgekeerde osmose membraan filtratie zuiveringstechniek zal naar verwachting steeds vaker worden toegepast voor de productie van drinkwater. De concentraatstroom die door deze zuiveringstechniek gevormd wordt moet echter worden geloosd en/of worden verwerkt. Vanwege de typisch lage hoeveelheden organische componenten en relatief hoge zuurstofvraag van deze concentraatstromen zijn rioolwaterzuiveringen over

het algemeen niet direct enthousiast om een dergelijke stroom binnen de beperkte hydraulische capaciteit te verwerken. Door toepassing van de klassiek zuiveringstechniek snelle zandfiltratie op RO concentraat gericht op de verwijdering van ijzer, mangaan, methaan en ammonium wordt de zuurstofvraag verlaagd en wordt vervuiling-vrij leidingtransport mogelijk. Dit neemt een aantal belemmeringen voor verwerking door een rioolwaterzuivering en/of voor verdere opwerking van de RO concentraatstroom weg.

Aanpak: Pure zuurstofdosing voor optimale verwijderingsefficiëntie van snel zandfiltratie op RO concentraat

Binnen dit project is een pilot-schaal (2-3m³ per uur) snel zandfiltratie unit ontworpen en gebouwd voorzien van pure zuurstof dosering. Door het zandfilter onder (concentraat-)druk te bedrijven wordt het mogelijk om dusdanig veel zuurstof in oplossing te brengen dat (in theorie) zowel i) de omzetting van opgelost ijzer naar ijzeroxiden ('roest'), ii) de biologische omzetting van methaan tot water en koolstofdioxide, iii) de omzetting van opgelost mangaan tot mangaanoxide en iv) de biologische omzetting van ammonium naar nitriet en nitraat simultaan kunnen plaatsvinden. Door de pilot gedurende twaalf weken op praktijkwater te laten opereren is een praktijkschaal-relevante indruk gekregen van de haalbare verwijderingsefficiëntie en mate van stabiele bedrijfsvoering op RO concentraat.

Resultaten: Stabiele bedrijfsvoering, lage verwijderingsefficiëntie

Gedurende de pilot-periode is er een gemiddelde-maximale verwijdering van 25-50% voor ijzer, 57-83% voor methaan, 0-45% voor ammonium en 18-18% voor mangaan gerealiseerd welke stuk voor stuk ruim beneden de richtwaarde van 95% liggen. Daarnaast varieerde de verwijderingsefficiënties van week op week sterk en lagen gemiddeld over de complete proefperiode aanzienlijk lager. Op een sterke weerstand toename van de aanvoerleiding naar het snelle zandfilter na was de bedrijfsvoering van het zandfilter stabiel. Dit kan echter ook het gevolg zijn van de relatief lage verwijderingsefficiënties. Het is aannemelijk dat door het (verhoogde) totale zoutgehalte van het RO concentraat de interactie tussen de te verwijderen componenten en het (biologisch actieve) filtermateriaal negatief beïnvloed werd. Dit betekent dat er primair gezocht moet worden naar een alternatieve bedrijfsvoering en/of andere zuiveringstechniek voor de verwijdering van de focuscomponenten.

Toepassing: invloed van zoutgehalte op de prestaties van conventionele zuiveringstechnieken

Hoewel snel zandfiltratie al jaren succesvol wordt toegepast in de conventionele drinkwaterproductie ligt toepassing van deze techniek voor behandeling van omgekeerde osmose concentraatstromen op basis van de resultaten van dit onderzoek alleszins niet direct voor de hand. Het is belangrijk om fundamenteel inzicht te verwerven over het effect van totaal zoutgehalte op het werkingsprincipe van zuiveringstechnieken om daarmee succesvolle(re) methodieken te vinden om RO concentraatstromen hanteerbaarder te maken. Dit vergroot de mogelijkheden voor verwerking van de vrijkomende concentraatstroom bij behandeling van anaeroob zoet grondwater.

Het Rapport

Dit onderzoek is beschreven in het rapport *Anaerobe grondwater RO concentraatbehandeling middels oxische zandfiltratie* (BTO-2022.069).

- In het rapport *Behandeling van RO concentraat: een verkenning van (micro)biologische processen t.o.v. fysisch-chemische technieken* (BTO 2022.050) zijn de resultaten van de verwijderingspotentie voor organische microverontreinigingen van de oxische zandfiltratiepilot uitvoerig(er) beschreven.

Inhoud

Rapport	2
<i>Managementsamenvatting</i>	3
Inhoud	5
1 Inleiding	7
2 Pilotontwerp	9
2.1 Pilot-ontwerp proces	9
2.2 Venturi-ontwerp	9
2.3 Pilot-ontwerp oxische zandfiltratie	11
3 Resultaten	13
3.1 Waterkwaliteit	13
3.2 Conversie van focus-componenten	14
3.2.1 Eerste periode	15
3.2.2 Tweede periode	15
3.2.3 Derde periode	15
3.2.4 Vierde periode	15
3.2.5 Vijfde periode	15
3.2.6 Zesde periode	16
3.3 Verwijdering van organische microverontreinigingen gedurende oxische zandfiltratie	18
3.4 Bedrijfsvoering	20
4 Discussie	22
5 Conclusies	26
6 Aanbevelingen	27
7 Literatuurlijst	28
I Technische tekening filterketel Logisticon	30
II Achtergrond en conceptueel ontwerp (micro)bubbel gasdosering	31
III Conceptueel venturi pilotontwerp	33
IV Overzicht aerobe conversieprocessen zandfiltratie	34
V P&ID pilot-installatie oxische zandfiltratie	35
VI Detailtekening modificaties standaardketel Logisticon	36
VII Ontwerpdetail filterdop	37
VIII Operationeel logboek pilotperiode	38
IX Röntgenfluorescentiespectrometrie analysesresultaten	48

X	Analyseresultaten ICP-MS scan	50
XI	Overzicht behaalde verwijdering focus-componenten	52
XII	Overzicht van drukval over het filterbed	56

1 Inleiding

Dit rapport beschrijft de ontwerpprocedure, constructie en bevindingen/resultaten van de oxische zandfiltratie pilot die gedurende een periode van 12 weken praktijkconcentraat van een anaeroob omgekeerde osmose installatie van Oasen (locatie; de Hooge Boom, proefhal Kamerik) heeft behandeld. Het doel van de pilot test is het in kaart brengen van de verwijderingspotentie van oxische zandfiltratie van ijzer, methaan, mangaan en omzetting van ammonium in een RO concentraat matrix. Deze componenten worden over het algemeen gevonden in ieder anaeroob grondwater en moeten verwijderd worden uit drinkwater (conventionele zuivering) en/of reststromen (RO concentraat) vanwege visuele redenen (ijzer), verstoppingspotentie voor distributieleidingen (ijzer, mangaan) en/of biologische stabiliteit en zuurstofconsumptie (methaan en ammonium). Bij een conventionele toepassing van zandfiltratie worden deze componenten geoxideerd middels de in omgevingslucht aanwezige zuurstof waardoor ze uit opgeloste vorm overgaan in de gas- of vaste fase waardoor ze verwijderd kunnen worden in het zandfilter.

Bij toepassing van omgekeerde osmose (RO) membraanfiltratie voor de drinkwaterproductie komen deze componenten echter allemaal in de zogenaamde concentraat-stroom terecht. In deze matrix is de concentratie van alle stoffen typisch 4-5x hoger in vergelijking met het voedingswater. Om RO concentraat van voldoende opgelost zuurstof te voorzien om (in theorie) de totale zuurstofvraag van al deze conversie-processen te voorzien is drukfiltratie in combinatie met dosering van pure zuurstof noodzakelijk. De combinatie van behandeling van RO concentraat matrix middels snelle zandfiltratie en pure zuurstof dosering is nog niet eerder onderzocht. Verwacht wordt dat de hogere ionsterkte invloed zal hebben op i) het gedrag en structuur van natuurlijk organisch materiaal in oplossing, ii) de (elektrostatische) interactie van de ijzervlokken met het filtermateriaal en iii) mogelijk de werking en/of ontwikkeling van biologische conversie van componenten als methaan en ammonium.

Steeds meer Nederlandse drinkwaterbedrijven passen bij de renovatie van bestaande waterzuiveringen en bij nieuwe waterzuiveringen (deelstroom) omgekeerde osmose techniek toe. Deze zuiveringstechniek is een robuuste barrière voor vrijwel alle opgeloste stoffen inclusief zouten en organische microverontreinigingen. Door toepassing van omgekeerde osmose op (een deel van) de te behandelen waterstroom kan een onthardingsinstallatie worden uitgespaard en de waterkwaliteit worden verbeterd. Uit voorgaand (bedrijfs)onderzoek blijkt dat de concentraatstroom (de ingedikte voedingsstroom met componenten uit het bronwater circa 4-5x geconcentreerd) geloosd wordt op oppervlaktewater, buitenhavens en/of rioolwaterzuiveringsinstallaties (de Waal, 2020). In bijna alle gevallen worden de lozingseisen in overleg met lokale regelgevende instanties samengesteld. De lozingsvergunningen bevatten veelal eisen in de vorm van maximale component-concentraties. Veel voorkomende parameters in deze vergunningen zijn normen voor chemisch zuurstof verbruik (CZV), stikstof en fosfaat. Daarnaast is er toenemende aandacht voor organische microverontreinigingen die in toenemende mate aangetroffen worden in diverse drinkwaterbronnen. Aangezien membraanfiltratietechnieken scheidingstechnieken zijn en geen verwijderingstechnieken, worden de concentraties van deze componenten hoger in de resulterende concentraatstroom.

Het is van belang om concentraatbehandelingstechnieken te ontwikkelen die deze voor lozing kritieke component-concentraties kunnen verlagen om zo 1) een kosten- en energie-intensieve verwerking (bijvoorbeeld verdamping) van de concentraatstroom te vermijden en 2) de mogelijkheden voor toepassing van membraanfiltratietechnieken op meer locaties te vergroten. Aerobe biologisch-actieve zandfiltratie (eventueel gevolgd door aerobe biologisch-actieve geactiveerde kool filtratie) is een nog niet eerder beproefde concentraatbehandelingsmethode welke potentie heeft voor omzetting/verwijdering van een aantal kritische componenten voor oppervlaktewaterlozing. Door de verwijdering van ijzer, omzetting van ammonium in nitraat en afbraak van biologisch degradeerbare organische microverontreinigingen neemt de CZV concentratie af. Daarnaast heeft de concentraatbehandelingsmethode ook potentie voor de verwijdering van arseen, mangaan, methaan, fosfaat en

fosfaat-houdende anti-scalants door co-precipitatie met ijzer(hydr)oxiden in het zandfilter. Verwijdering van deze ijzer(hydr)oxiden verlaagt ook de verstoppingspotentie van het RO concentraat hetgeen van belang is aangezien het RO concentraat vaak via een ondergrondse leiding(stelsel) naar bijvoorbeeld een rioolwaterzuivering wordt getransporteerd.

Op locatie 'de Hooge Boom' van Oasen in Kamerik wordt in 2023 een nieuwe waterzuivering op basis van omgekeerde osmose behandelingstechniek in gebruik genomen, waarbij het concentraat op een nabijgelegen rioolwaterzuiveringsinstallatie zal worden geloosd. Op deze locatie is er, naast een full-scale conventionele waterzuivering met beluchting gevolgd door zandfiltratie die op termijn ontmanteld zal worden, ook een proefhal aanwezig waarin een pilot-schaal RO installatie en anaeroob grondwater (praktijkwater) beschikbaar is. Bovendien is een substantiële concentratie ammonium aanwezig in het ruwe water waardoor de zuurstofbehoefte van dit water voor volledige conversie bovengemiddeld hoog is. De biologische conversie van ammonium naar nitraat heeft namelijk (veel) meer opgeloste zuurstof nodig in vergelijking met oxidatie van ijzer, mangaan en/of methaan. Om hoofdzakelijk deze redenen is besloten om specifiek voor deze locatie een proefinstallatie oxische zandfiltratie gezamenlijk te ontwerpen, te bouwen en een 12 weken lange proefperiode te draaien.

De belangrijkste onderzoeksvragen voor dit onderzoek zijn:

- Onder welke proces-condities is de bedrijfsvoering van oxische zandfiltratie op RO concentraat stabiel?
- Hoe ontwikkelen de conversies van ijzer (Fe), methaan (CH₄), ammonium (NH₄) en mangaan (Mn) zich in de tijd?
- Is het mogelijk om gelijktijdig substantiële conversie van ijzer, methaan, ammonium en mangaan te realiseren in één oxisch zandfilterbed?

Het ontwerpproces en de onderzoeksresultaten zijn beschreven in het vervolg van dit rapport.

2 Pilotontwerp

Voorafgaand aan de keuze/selectie van het uiteindelijke oxische zandfiltratie pilotontwerp zijn enkele andere ontwerpen besproken binnen de projectgroep. Deze ontwerpfase was een essentieel onderdeel van het project aangezien oxische zandfiltratie nog niet eerder op RO concentraat is toegepast, er daarom een 4-5x hogere vuilbelasting voorzien werd en er binnen de watersector erg geen/weinig ervaring is met het gebruik van pure zuurstof dosering op bijvoorbeeld de pure zuurstofdosering op de biologisch actief kool filters van de voormalig industriële tak van WMD na (Boorsma et al., 2020; Veenendaal et al., 2019). Dit ontwerpproces (paragraaf 2.1), een conceptuele beschrijving van het uiteindelijk gekozen ontwerp (paragraaf 2.2) en details onderliggend aan het uiteindelijke pilotontwerp (paragraaf 2.3) worden in dit hoofdstuk beschreven.

2.1 Pilot-ontwerp proces

Het pilot-ontwerp proces heeft al met al een klein jaar in beslag genomen (zie Tabel 1). Waar initieel gedacht werd aan een cascade van een oxisch zandfilter gevolgd door een actief kool filtratie bleek gedurende het ontwerpproces dat binnen de (financiële) randvoorwaarden van het project enkel een zandfilter geplaatst kon worden.

Uit een inventarisatie van reeds bestaande en beschikbare proef-/pilot installaties bij de projectpartners (Oasen, WMD, Dunea & KWR) bleek dat er met name kolom-opstellingen met een beperkte diameter beschikbaar waren. Gezien i) de ijzerconcentratie (verstoppingspotentie), ii) de wens voor continue bedrijfsvoering in de beoogde proefperiode van 12 weken, iii) de benodigde drukbestendigheid (bij hogere druk lost er meer zuurstof op in water) en iv) het nut (en de noodzaak) voor het breken van het zandbed gedurende een backwash werd geconcludeerd dat kleine (<200 mm diameter, <50 cm hoog) kolommen van glas en/of kunststof minder geschikt leken voor dit onderzoek.

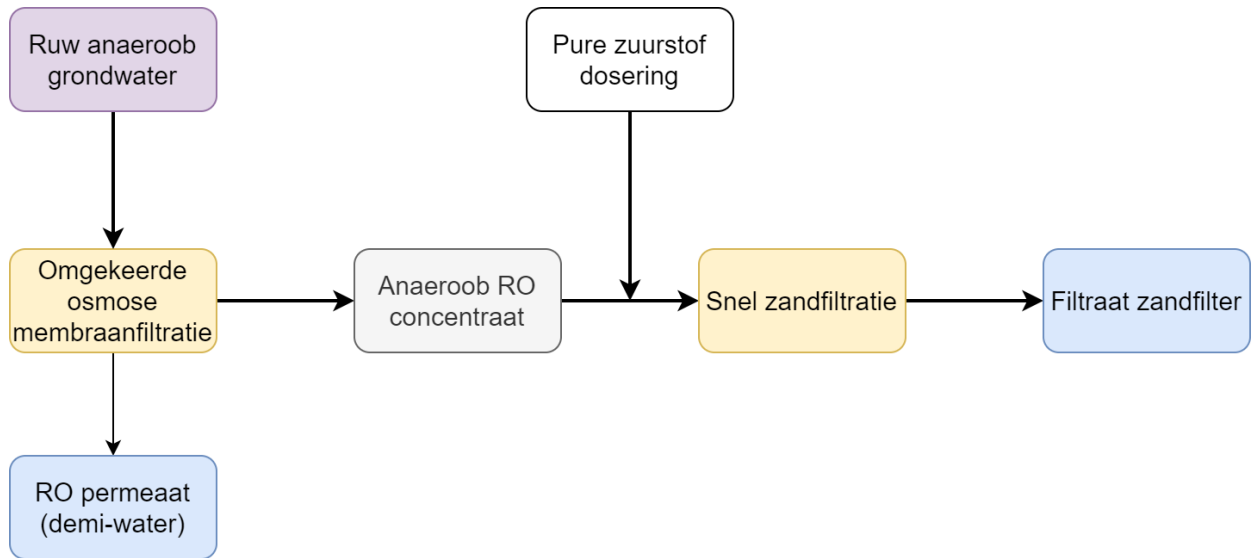
Uitgangspunt voor het uiteindelijke ontwerp was de kleinste zandfiltratie filterketel (900 mm diameter, circa 1,5 meter hoog) die Logisticon (bouwer en verhuurder van waterzuiveringsinstallaties; www.logisticon.com) in hun productgamma aanbiedt. Zie bijlage I voor een schematische technische tekening van deze filterketel. Deze filterketel van staal kon bedreven worden als drukfilter waardoor de oplosbaarheid van gassen (lees: zuurstof) in het te behandelen water aanzienlijk vergroot wordt. Naast het microbubbel ontwerp voor inbrenging van de pure zuurstof (zie bijlage II) is uiteindelijk het ontwerp met een Venturi beluchter geselecteerd voor verdere uitwerking en realisatie.

2.2 Venturi-ontwerp

Het pilotontwerp gebaseerd op pure zuurstof toediening middels een zogenaamde venturi beluchter is uitgewerkt tot een definitief pilotontwerp. Een vereenvoudigde weergave van het totale stroomschema van de oxische zandfiltratiepilot is weergegeven in Figuur 1. In dit ontwerp wordt het zuurstof via een venturi-beluchter¹ gevolgd door een statische menger in de (tot dan anaerobe grondwater) RO concentraatstroom ingebracht. De aanvoerleiding naar het zandfilter toe, direct na toediening van het zuurstof, had een dusdanig kleine diameter dat er een hoog-turbulente flow van zuurstofhoudend RO concentraat ontstond. De turbulentie van een vloeistofstroom kan berekend worden middels het Reynolds getal waarbij een waarde van $\gg 4000$ een hoog-turbulente flow-regime beschrijft (Softschools.com, 2022)). Deze turbulentie moet voor een optimale verdeling en oplossing van het zuurstof in het voedingswater zorgen. Bovendien zouden de ijzer(hydr)oxides door de hoge turbulentie geen kans hebben om

¹ Het venturi principe gaat uit van een onderdruk dat ontstaat in het Venturi ventiel door het aanvoeren van een stroom (voedingswater), waardoor automatisch een andere stroom (pure zuurstof) wordt meegezogen.

zich te hechten aan de gladde (polyethyleen) buiswand. Een conceptueel ontwerp van het venturi ontwerp is terug te vinden in bijlage III. In de onderstaande paragraaf zijn de onderliggende relevante details van dit ontwerp verder uiteengezet.



Figuur 1: vereenvoudigde weergave van het stroomschema van de oxische zandfiltratie pilot zoals gedraaid in de proefhal van het zuiveringsstation de Hooge Boom van waterbedrijf Oasen te Kamerik

Tabel 1: Overzicht van genomen stappen om tot definitief pilot-ontwerp te komen

Wanneer	Activiteit	Betrokken partijen
April 2020	Inventarisatie proefopstellingen	Dunea, Oasen, WMD
Mei 2020	Conceptueel ontwerp & begroting zand & actief kool kolommen	KWR werkplaats
Mei 2020	Vorbereiding & organisatie startbijeenkomst	Dunea, Oasen, WMD
Juni 2020	Inventarisatie uitgangspunten Kamerik	Oasen
Juli 2020	Vorbereiding & organisatie brainstormsessie	Dunea, Oasen, Vitens, WMD
Augustus 2020	Conceptueel ontwerp, P&ID en begroting micro-bubbel ontwerp	KWR werkplaats
September 2020	Vorbereiding & organisatie PG#2 meeting 't Veerhuis in Nieuwegein	Dunea, Oasen, WMD
Oktober 2020	Onderlinge afstemming manier van pure zuurstof dosering per mail	Linde, Oasen, WMD
November 2020	Conceptueel ontwerp, P&ID en begroting venturi ontwerp	Oasen, WMD, KWR werkplaats
November 2020	Checklist Kamerik en aanpassing ontwerp nieuwe uitgangspunten (gasopslag, debiet & anti-scalant)	Oasen
December 2020	Verwerken opmerkingen P&ID, offerte Linde & opstellen totaalbegroting	Oasen, WMD, KWR werkplaats
Januari 2021	Financieel-inhoudelijk overleg op basis van definitief ontwerp	Dunea, Oasen, WMD

2.3 Pilot-ontwerp oxische zandfiltratie

Op zuiveringslocatie De Hooge Boom te Kamerik had Oasen ten tijde van dit onderzoek een RO installatie operationeel in de Proefhal. Deze RO installatie produceerde circa 3 m³/h concentraat bij een recovery tussen de 75% en 80% zonder dosering van anti-scalant. De door Oasen aangeleverde verwachte RO concentraat samenstelling van deze RO installatie inclusief bijbehorende zuurstofvraag (zie bijlage IV en Tabel 2) voor volledige conversie van methaan, ijzer, mangaan en ammonium vormde de basis voor het pilot-ontwerp en -dimensionering (zie bijlage V). Op basis van de berekende totale zuurstofvraag voor de volledige conversie van de vier te onderzoeken componenten is berekend dat de minimale werkdruk onder pure zuurstof atmosfeer 2.1 bar moest zijn om voldoende zuurstof in oplossing te brengen en te houden (Sander et al., 2011; Warneck & Williams, 2012).

Tabel 2: Overzicht zuurstofvraag oxische zandfiltratie RO concentraat

Component	Concentratie in RO concentraat	Zuurstof-vraag
IJzer(II)	41,4 mg/L	5,8 mg O ₂ /L
Methaan	2,1 mg/L	8,4 mg O ₂ /L
Ammonium	20 mg/L	71,2 mg O ₂ /L
Mangaan(II)	2,4 mg/L	0,7 mg O ₂ /L
Totaal	Nvt	86,1 mg O₂/L

De concentraatdruk (variërend tussen de 5 en 6 bar) werd daartoe gebruikt om de pilot te voeden. Om drukvariaties in het systeem zoveel mogelijk te voorkomen en vanwege veiligheidsoverwegingen (de pilot kon immers ook uitvallen hetgeen zou resulteren in een overdruk) werd er parallel aan de voedingsleiding van het oxische zandfilter ook een automatisch overdrukventiel (George Fisher 586 PVC-U/EPDM d40DN32) geplaatst die bij voedingsdrukken hoger dan 5 bar water liet ontsnappen naar de bestaande spoelwatervijver via de anaerobe afvoerleiding.

Direct bij de aanvoer van RO concentraat is een elektromagnetische debietmeter (Proline Promag W 400) geplaatst. Deze debietmeter stuurde (via de PLC) de stand van de filtraatklep van het zandfilter. Hierdoor kon onafhankelijk van de drukopbouw in het zandfilter en/of weerstand(opbouw) in het leidingwerk gedraaid worden op een continu debiet.

Het RO concentraat werd onder druk naar de directe (buiten)omgeving van de proefhal getransporteerd, waar het via de venturi-beluchter (Solvox A4) voorzien werd van gecompriëerde pure zuurstof. Het zuurstofgehalte in het filtraat van het filter werd continu gemeten met een zuurstof-sensor (Endress+Hauser Oxymax W COS31) op basis waarvan de zuurstoftoevoerklep werd bijgestuurd.

Direct na het doseerpunt van de pure zuurstof zorgde een statische mixer voor additionele menging van het water en gasbellen, waarna het mengsel via een 20 meter lange leiding onder hoge stroomsnelheid (circa 2 m/s) terug naar binnen in de proefhal naar de inlaatcombinatie van het zandfilter stroomde. Aangekomen in het zandfilter werd het water via een horizontaal T-stuk naar beide zijanten van het filter gespreid in/op de bovenwaterlaag boven het filterbed.

De drukopbouw over het filterbed is continu gemeten en was de primaire trigger voor een geautomatiseerde filter terugspoeling. Als additionele zekerheid tegen het totaal verstopen van het filter(bed) werd ook filterlooptijd als (secundaire) trigger gebruikt voor een terugspoeling. Voor het backwashen van het oxische zandfilterbed werd de toevoer van de pure zuurstofdosing afgesloten en de toevoerleiding naar het zandfilter anoxisch gemaakt door te spoelen met anaeroob RO concentraat. Vervolgens werd de toevoer van RO concentraat afgesloten en de filterdruk verlaagd door de filtraatklep langzaam te sluiten. Via de filtraataansluiting werd er achtereenvolgens met drinkwater (voorspoelen, 3 min, 20m³/h), enkel met perslucht (voor het breken van het filterbed (Pers. Comm. Ron Jong, 2022), 30 sec), met drinkwater en perslucht (gecombineerde spoeling, 1 min, 6 m³/h water, verhouding lucht/water 1,5) en na een korte rustperiode met drinkwater (naspoelen, 5 min, 20m³/h) gespoeld. Het spoelwater werd via de

nieuwgeplaatste centrale afvoerbuis (zie bijlage VI) afgevoerd naar een spoelwaterbak vanwaar het met een afvoerpomp met constant laag debiet naar de spoelwatervijver werd afgevoerd via de aerobe afvoerleiding. Deze afvoerleiding werd na afloop van de filterspoeling nagespoeld met drinkwater om eventuele verstopping te voorkomen. Door dosering van pure zuurstof in het anaerobe RO concentraat is het mogelijk om voldoende zuurstof opgelost te krijgen om alle filter(bed)processen (ontijzering, ontmanging, methaan oxidatie en nitrificatie/denitrificatie (Huisman, 2004)) simultaan plaats te laten vinden. Aangezien er bij de drie laatstgenoemde processen biologische processen een rol spelen in/bij de omzetting is het (onder andere) essentieel dat het zuurstofgehalte in het filtraat ten minste 1 mg O₂/L bevat (Bruins, 2017). Ontijzering kan echter in aanwezigheid van zuurstof puur fysisch/chemisch plaatsvinden (zogenaamde homo- en/of heterogene oxidatie). In het geval van sterk verhoogde zuurstofconcentraties en daaraan lineair gekoppelde oxidatie-kinetiek is het in theorie dus mogelijk en aannemelijk dat al het ijzer reeds in de bovenwaterlaag is omgezet naar ijzer(hydr)oxides waardoor een zogenaamde koekfiltratie optreedt (Sung & Morgan, 1980; Vries et al., 2016, 2021). Het lag daardoor in de lijn der verwachting dat het terugspoelcriterium zeer frequent bereikt zou worden.

In verband met de veiligheid is er een drukalarm (Ceraphant PTC31 - PTP31/35) ingebouwd bovenin de filterketel; wanneer de druk in de filterketel hoger opliep dan 5.5 bar schakelde het systeem zichzelf uit (en werd het RO concentraat via het overdrukventiel op de spoelwater geloosd). Daarnaast werd op de filterketel een zuurstofmeter geïnstalleerd; wanneer de atmosfeer in de proefhal boven normale zuurstofverzadiging (21%) kwam, werd de zuurstoftoevoer afgesloten en het systeem stopgezet. De filterketel zelf was voorzien van een verticale niveaumeting (Endress+Hauser Levelflex FMP5x). Wanneer het water onder een bepaald niveau kwam (vanwege gasontwikkeling bovenin het filter) werd een ontluchtingsklep(je) open geschakeld waardoor het gas via de dakafvoer werd afgeblazen.

Het zandfilter werd na plaatsing op locatie voorzien van KSH KR1 filterdoppen (zie bijlage VII) voorzien van een spleet van 0,8 mm. Deze spleten waren smal genoeg om uitspoeling van filterzand (1,7-2,4 mm) te voorkomen, maar ook niet te smal om vroegtijdige verstopping en drukopbouw over de filterdoppen op te bouwen door depositie van ijzerhydroxiden. Vervolgens werd het zandfilter gevuld met circa 0,6 m³ 'ervaren' filtergrind uit de conventionele zuivering van zuiveringslocatie De Hooge Boom waardoor er een filterbedhoogte van circa 90 cm ontstond. De gedachte achter het gebruik van dit 'ervaren' filtergrind uit de bestaande zuivering was dat de eventuele adaptatietijd aan de nieuwe matrix (RO concentraat van grondwater heeft circa 4-5x hogere component-concentraties) geminimaliseerd zou worden en de (biologische) conversieprocessen relatief snel op gang zouden komen.

3 Resultaten

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de pilot oxische zandfiltratie van anaeroob RO concentraat op hoofdlijnen beschreven. Voor een gedetailleerd overzicht van de dagelijkse bedrijfsvoering wordt de lezer verwezen naar het operationeel logboek van de gehele pilotperiode (bijlage VII).

3.1 Waterkwaliteit

Gedurende de 12 weken looptijd van de pilot oxische zandfiltratie zijn wekelijks samples genomen en geanalyseerd door het Vitens laboratorium. Van deze metingen zijn de gemiddelde waarden weergegeven (Tabel 3). Ook is er eenmaal gedurende de proef een TOC-meting uitgevoerd: 35 mg TOC/L in het zandfilterinfluent (RO concentraat) en 32 mg TOC/L in het zandfiltereffluent.

Tabel 3: Overzicht gemiddelde component-concentraties van het (onbehandelde) anaerobe RO concentraat en het (behandelde) filtraat van de oxische zandfiltratie pilot

Waterkwaliteitsparameter	Eenheid	RO concentraat	Oxisch zandfilter filtraat	Verwijderingspercentage opgeloste zouten (%)
ammonium	mg NH ₄ /L	11 ± 2	11 ± 3	0,0%
arseen	µg As/L	4,3 ± 0,7	3,3 ± 0,8	23%
calcium	mg Ca/L	461 ± 40	456 ± 39	1,1%
elektrisch geleidend vermogen	mS/m	222 ± 44	198 ± 36	nvt.
fosfaat - totaal	mg PO ₄ /L	5,0 ± 2,8	4,4 ± 0,9	12%
fosfaat - ortho	mg PO ₄ /L	3,4 ± 1,7	0,1 ± 0,0	97%
ijzer	mg Fe/L	28 ± 4	21 ± 6	25%
koolstofdioxide	mg CO ₂ /L	79 ± 13	122 ± 22	nvt.
mangaan	mg Mn/L	2,2 ± 0,6	1,8 ± 0,5	18%
magnesium	mg Mg/L	64 ± 4	64 ± 4	0,0%
methaan	µg CH ₄ /L	1338 ± 783	574 ± 553	nvt. (57%)
nitraat	mg NO ₃ /L	0,0 ± 0,6	7,1 ± 6,3	toename
nitriet	mg NO ₂ /L	0,0 ± 0,0	0,2 ± 0,0	toename
pH	-	7.5 ± 0,1	7.3 ± 0,1	nvt.
silicaat	mg SiO ₂ /L	61 ± 3	59 ± 2	3,3%
stikstof - kjeldahl	mg N/L	11 ± 1	10 ± 1	nvt (9,1%)
sulfaat	mg SO ₄ /L	113 ± 19	144 ± 20	toename
waterstofbicarbonaat	mg HCO ₃ /L	1468 ± 110	1417 ± 110	3,5%
zuurstof	mg O ₂ /L	0,3 ± 0,1 (<0,5)	12,6 ± 3,6 (>10)	nvt.

Wat direct opvalt is dat de concentraties in RO concentraat van ijzer, methaan, ammonium en mangaan substantieel lager liggen in vergelijking met de in paragraaf 2.3 ingeschatte waarde(n). Uitgaande van deze gemiddelde waarden kom je uit op een totale zuurstofvraag van 49 mg O₂/L; significant lager dan de ontwerp-hoeveelheid, maar desalniettemin dusdanig hoog voor het gebruik van pure zuurstof (5,7 bar zou nodig zijn bij toepassing van perslucht).

De minimaal benodigde werkdruk om deze hoeveelheid zuurstof onder pure zuurstof omstandigheden in oplossing te krijgen bedraagt volgens berekeningen met de wet van Henry 1,2 bar (Gezelschaft, 2022).

Op basis van de gemeten concentraties ammonium, arseen, calcium, ortho-fosfaat, ijzer, magnesium, mangaan, sulfaat en waterstofbicarbonaat is de totale ionsterkte van het RO concentraat berekend op 44,2 mmol/liter. Ervan uitgaande dat de rejectie van al deze ionen 99,9% bedraagt voor RO en gegevens de recovery van de RO van 75% kunnen de component-concentraties in het ruwe grondwater uitgerekend worden. Deze concentraties resulteren in een totale ionsterkte voor het ruwe grondwater van 11,1 mmol/L; circa een factor 4x lager dan het RO concentraat.

Wat verder opvalt is dat potentieel scaling-vormende componenten (calcium, magnesium, silica, bicarbonaat) geen (significante) concentratie-daling laten zien. Aangezien er geen koolzuur ontsnapt tijdens de beluchting (hetgeen bij conventionele, atmosferische beluchting-ontijzering wel het geval is) blijft de pH laag waardoor de oplosbaarheid van deze zouten op een dusdanig niveau blijft dat deze in ieder geval tijdens de filtratie over het zandbed geen neerslag vormen. De pH daalt zelfs een enkele tiende pH-eenheid, hetgeen een gevolg zou kunnen zijn van de zuur-vormende conversie-reactie van bijvoorbeeld ijzer en zuurstof (zie bijlage IV). De (subtiele) verlaging van de pH is mogelijk ook een verklaring voor de lichte stijging in CO₂ concentratie in het filtraat vanwege het kalk-koolzuur evenwicht.

De gemiddelde concentraties van arseen, fosfaat en mogelijk silicaat laten een (lichte) daling zien door behandeling met oxische zandfiltratie. Het is bekend dat arseen, fosfaat, silicaat en natuurlijk organisch materiaal co-precipiteren met ijzer(hydr)oxiden en mangaan(hydr)oxiden die worden gevormd na beluchting (Ahmad et al., 2020; Bruins, 2017; van de Wetering & van der Wielen, 2021), en dat verklaart dat de concentraties van die stoffen afnemen in het filtraat.

Ammonium wordt in het filterbed biologisch omgezet naar nitriet, nitraat en gedeeltelijk geassimileerd in de biomassa. De verwijdering van ammonium gemiddeld over de 12 weken is echter niet significant. Dat er wel enige ammonium-conversie is geweest op enig moment laat de toename van nitriet en nitraat zien; er is geen voordehandliggende alternatieve verklaring voor handen voor de significante toename van deze twee componenten. De niet-significante gemiddelde afname in concentratie van Kjedahl stikstof kan verklaard worden middels assimilatie van stikstof in de zich vormende biomassa; bijvoorbeeld de biomassa die verantwoordelijk is voor de methaan conversie.

Opvallend is dat de concentratie van sulfaat (SO₄) significant toeneemt door de behandeling van oxische zandfiltratie. Dit zou verklaard kunnen worden door de conversie van waterstofsulfide-gas (H₂S) naar sulfaat op de mangaanoxidegecoate zanddeeltjes, omdat mangaanoxides deze reactie katalyseert (Edwards et al., 2011). Feit is wel dat een toename van het sulfaatgehalte in de behandelde concentraatstroom ongunstig is, gezien de kwaliteitseisen die aan het oppervlaktewater gesteld worden (Europese Unie, 2020). Waterstofsulfide is echter niet geanalyseerd / gemeten gedurende de pilot-periode.

3.2 Conversie van focus-componenten

Voor de conversie van focus-componenten (ijzer, methaan, ammonium en mangaan) moet echter op week-niveau naar de resultaten gekeken worden. Gedurende de looptijd van de pilot is de bedrijfsvoering namelijk meerdere malen aangepast om de conversie van (één van) deze componenten te bevorderen. In het onderstaande overzicht (zie Tabel 4) zijn de 12 weken dat de pilot operationeel is geweest samengevat in één overzicht. Gedurende deze 12 weken zijn er in totaal 6 'perioden' geweest; iedere periode had zijn eigen specifieke bedrijfsvoering.

3.2.1 Eerste periode

Gedurende de eerste periode (van 3 weken) werd de volledige RO concentraatstroom behandeld hetgeen resulteerde in een filtratiesnelheid van circa 3,2 m/h en een verblijftijd in de bovenwaterlaag en het in filterbed van respectievelijk 6 en 18 minuten. Tijdens deze periode bleef de procentuele ijzerverwijdering <50%, hetgeen veel lager was dan gewoonlijk in de reguliere zuivering (>95%). De methaan-oxidatie was wel substantieel in de 2^{de} week (>50%). De verwijdering van ammonium en mangaan namen echter af in de 2^{de} en 3^{de} week ten opzichte van de 1^{ste} week.

3.2.2 Tweede periode

Gedurende de 4^{de} week werd de toevoer van RO concentraat teruggebracht van 3,25 m/h naar 2,5 m/h. Achterliggende redenen voor deze keuze waren 1) het optreden van storingsen in de pilot vanwege variaties in voedingsflow, 2) de hypothese dat ijzercolloïden mogelijk meer tijd nodig hadden om tot filtreerbare vlokken te groeien en 3) om uitspoeling van ammonium- en mangaan oxiderende bacteriën te voorkomen.

In deze tweede periode (week 4) werd door toepassing van deze filtratiesnelheid de verblijftijd in zowel de bovenwaterlaag als in het filterbed gelijk aan de verblijftijd in de conventionele grondwaterzuivering. Deze procesaanpassing resulteerde echter in vrijwel complete doorslag van zowel ijzer als mangaan door het filter (Tabel 4). De ammonium en methaan verwijdering namen wel toe ten opzichte van week 3. Aangezien ijzer- en mangaanverwijdering echter van groot belang zijn (ammonium en methaan kunnen in theorie ook in een nageschakeld oxisch actief kool filter omgezet worden) werd de bedrijfsvoering opnieuw aangepast.

3.2.3 Derde periode

In de 3^{de} periode (week 5 en 6) werd de hoogte waarop het zuurstofhoudende RO concentraat in de filterketel werd ingebracht aangepast. Hierdoor nam de verblijftijd in de bovenwaterlaag met circa 60% toe. De gedachte hierachter was dat de ijzervlokken op deze manier meer tijd kregen om te flocculeren voordat ze in contact kwamen met het filterbed. De ijzerverwijdering nam toe ten opzichte van week 4 maar bleef ruim onder de maat (<50%). Mangaanconversie bleef afwezig, conversies van methaan en ammonium namen enigszins af.

In de 6^{de} week (derde periode) is de projectgroep bij elkaar gekomen voor een tussentijdse evaluatie. Het spoelcriterium (drukverschil over filterbed van 0,3 bar) dat tot dit moment in tijd werd toegepast werd ter discussie gesteld. Aangezien de vervuilingsopbouw tot een 'verdichting /verstopping' in het filterbed leidt en het filtratiedebiet constant blijft, moet de effectieve filtratiesnelheid progressief toenemen naarmate het filterbed verder vervuild. Deze hogere effectieve filtratiesnelheid kan leiden tot loslaten van afgevangen vlok materiaal hetgeen de geobserveerde ijzerdoorslag zou kunnen verklaren. Daarnaast werd geopperd dat de intensiteit van de filterbackwash (water + lucht) te verlagen aangezien 1) de verwachte aanzienlijke filterbedverstopping met ijzer niet optrad en 2) om (biologische) conversie van methaan, ammonium en/of mangaan positief te beïnvloeden.

3.2.4 Vierde periode

Besloten werd om in de 4^{de} periode (week 7 en 8) het spoelcriterium te verlagen naar 0,1 bar drukverschil over het filterbed om hiermee de effectieve filtratiesnelheid te verlagen. Deze procesaanpassing leidde tot een toename van ijzerdoorslag en vrijwel constante conversies van methaan, ammonium en mangaan ten opzichte van week 6. Dit resultaat was zowel ongewenst als onverwacht; op basis van de discussie tijdens de projectgroepbijeenkomst werd verwacht dat door het verlagen van de spoelintensiteit en het verhogen van de backwash frequentie minder ijzercolloïden door het filter heen zouden spoelen.

3.2.5 Vijfde periode

Aangezien de behaalde 'stabiele' conversies niet op een wenselijk/acceptabel niveau stabiliseerden (>95%), werd in de 5^{de} periode (week 9 en 10) besloten om de filtratiesnelheid dusdanig te verlagen dat er een laminair flowregime in de aanvoerleiding ontstond (Reynolds getal <2300 (Softschools.com, 2022)). Uit flocculatie-processen met ijzercoagulant weten we dat G-krachten die gedurende de vlokvorming- en groei uitgeoefend worden op de vlok mede

bepalend zijn wat de uiteindelijke fysieke afmeting van de vlok wordt (vlogroei en vlokafbraak). Ondanks het ontbreken van turbulentie (Reynolds getal <2300 (Softschools.com, 2022)) loste het gedoseerde zuurstof goed op in het RO concentraat. Deze aanpassing van de bedrijfsvoering had een positief effect op zowel de verwijdering van ijzer als de conversie van methaan, ammonium en mogelijk ook mangaan. Echter, de behaalde verwijderings- en conversie-percentages bleven nog steeds ruim beneden de 95% voor de componenten ijzer, ammonium en mangaan.

3.2.6 Zesde periode

In de 6^{de} en laatste periode (week 11 en 12) werd de filtratiesnelheid weer aangepast naar waarden die passen bij snelzandfiltratie (conform periode 4). Echter werd de stuurwaarde voor zuurstofconcentratie in het filtraat verlaagd van 12,5 mg O₂/L (lichte oververzadiging bij atmosferische druk en temperatuur) naar 1 mg O₂/L. Beoogd werd hiermee de Fe-oxidatie kinetiek te verlagen, hetgeen mogelijk invloed had op de structuur en filtreerbaarheid van de vormende ijzervlokken. In de laatste pilot-week werd de hoogste ijzerverwijdering gemeten (50%), hetgeen echter nog steeds ruim onder de gewenste waarde is. Het verlagen van de concentratie zuurstof in het filtraat had echter wel tot gevolg dat de conversie van methaan, ammonium en mangaan afnam.

In bijlage XI is voor iedere focuscomponent een grafiek opgenomen waarbij de procentuele verwijdering van deze component gedurende de 12 weken looptijd overzichtelijk is weergegeven.

Naast de filterperformance zijn er in week 6 (derde periode) ook een tweetal bekeerglastesten uitgevoerd. De totale ijzergehalten van het anaerobe RO concentraat, de bovenwaterlaag en het filter-effluent zijn fotospectrometrisch bepaald op 29.2, 25.6 en 21.2 mg Fe/L, respectievelijk. Vervolgens zijn diezelfde samples uit anaerobe RO concentraat, de bovenwaterlaag en het filter-effluent middels een 0.45 µm filter gefiltreerd en opnieuw geanalyseerd hetgeen resulteerde in 24.8, 0.44 en 0.31 mg Fe/L. Deze test toont aan dat (i) veruit het overgrote deel van het ijzer geoxideerd wordt na toevoeging van pure zuurstof aangezien $>99\%$ van het ijzer verwijderbaar is middels 0.45µm filtratie en (ii) dat het ijzer in het filtraat van het effluent dat door het oxische zandfilter heenkomen voor het overgrote deel $>0.45\mu\text{m}$ zijn. Ook zijn er in die week monsters van zowel de bovenwaterlaag als het filter-effluent genomen in een bekeerglas met totale ijzergehalten van 22.3 en 16.3 mg Fe/L, respectievelijk. Deze monsters zijn vervolgens 18 uur met rust gelaten, om vervolgens de bovenstaande vloeistof van het bovenwaterlaag als het filter-effluent sample op ijzer-totaal te meten hetgeen resulteerde in 0.8 en 0.31 mg Fe/L, respectievelijk. Deze test toont aan dat de ijzerdeeltjes geen colloïdaal stabiele deeltjes zijn; er vindt namelijk duidelijk uitzakken plaats (zie Figuur 2)



Figuur 2: Linkerkant: bovenwatersample (links) en filter-effluent sample (rechts) direct na monsternam. Rechts: bovenwatersample (links) en filter-effluent sample (rechts) na circa 18 uur bezinktijd; er heeft duidelijk bezinking van ijzeroxiden plaatsgevonden

Tabel 4: Overzicht van de bedrijfsvoering en de verwijdering van ijzer, methaan, ammonium en mangaan gedurende de 12 weken dat de oxische zandfiltratie pilot operationeel was. Enkel focusparameter methaan laat een structurele en significante verwijdering zien over de gehele looptijd van de pilot.

Periode	Week#	Bedrijfsvoering	Aantal filter spoelingen	Ijzer				Methaan		Ammonium		Mangaan		Opmerking / motivatie
				Filterbed belasting	Filterbed verwijdering	Verwijdering		Verwijdering		Verwijdering		Verwijdering		
				kg Fe / m2 filteroppervlak	kg Fe / m2 filteroppervlak	g Fe / (m3/h)	%	g CH4 / (m3/h)	%	g NH4 / (m3/h)	%	g Mn / (m3/h)	%	
1	1	3,25 m/h	1	13,9	3,9	7	28%	0,4	17%	0,9	10%	0,1	2%	Opstart, behandeling volledige RO concentraatstroom
	2	Tbwl: 6 min	2	13,9	3,5	7	25%	0,9	57%	-3,8	-46%	-0,1	-3%	
	3	Tbed: 18 min	0	12,0	5,2	11	43%	n.a.	n.a.	-0,2	-3%	-3,0	-50%	
2	4	2,50 m/h Tbwl: 10 min Tbed: 22 min	1	11,5	0,2	1	2%	0,5	65%	2,4	21%	0,1	2%	Kopie verblijftijden praktijkfilter
3	5	2,50 m/h Tbwl: 16 min	1	11,2	3,6	8	32%	0,8	56%	1,0	11%	0,0	-1%	Verhogen flocculatietijd bovenwater
	6	Tbed: 22 min	1	10,6	4,2	10	40%	n.a.	n.a.	1,2	13%	-0,2	-4%	
4	7	Drukverschil backwash 0,3 bar-> 0,1 bar	3	11,5	2,8	7	24%	0,4	52%	0,7	7%	-0,1	-3%	Verhogen spoelfrequentie, verlagen spoel-intensiteit
	8	enkel water spoeling	3	11,7	2,9	7	25%	0,9	67%	1,3	13%	0,3	7%	
5	9	0,2 m/h Tbwl: 180 min	0	1,1	0,5	11	42%	n.a.	n.a.	3,8	45%	0,7	18%	Laminair flowregime vlogroei
	10	Tbed: 250 min	0	1,1	0,4	10	36%	1,0	83%	3,3	32%	-0,5	-38%	
6	11	DO filter effluent 12,5	3	9,3	3,9	9	43%	0,5	71%	0,7	6%	-0,7	-55%	Lagere DO, verlaging oxidatiekinetiek
	12	mg O2/L -> 1 mg O2/L	3	9,0	4,5	12	50%	n.a.	n.a.	1,0	12%	0,0	0%	

3.3 Verwijdering van organische microverontreinigingen gedurende oxische zandfiltratie

Een parallel-lopend BTO onderzoek gericht op de biologische behandeling van RO concentraatstromen heeft gebruik gemaakt van de lopende pilot om een eerste indicatie van de eventuele verwijderingspotentie voor organische microverontreinigingen (OMV's) in kaart te brengen gedurende oxische zandfiltratie van RO concentraat. De resultaten van deze metingen voor de OMV's die detecteerbaar zijn aangetroffen in het RO concentraat zijn weergegeven in onderstaand overzicht (Tabel 5). Veel van de OMV's laten een negatief verwijderingspercentage zien hetgeen betekent dat het filtraat van het oxische zandfilter een hogere concentratie OMV's bevatte dan de voeding bij gelijktijdig moment van monsternemen. De meest plausibele verklaring hiervoor is desorptie van OMV's van het 'ervaren' filtermateriaal vanwege de verhoogde ion-sterkte van het RO concentraat ten opzichte van regulier grondwater. Het rapport van deze studie geeft een uitgebreide(re) analyse (Timmers & de Waal, 2022).

Tabel 5: Overzicht van aangetroffen OMV's boven de detectiegrens in het RO concentraat, hun concentratie in het filtraat van het oxische zandfilter en het berekende verwijderingspercentage

Categorie	Aangetroffen OMV's boven detectiegrens analysemethode	Eenheid	Week 1 (16-9-2021)			Week 4 (7-10-2021)			Week 10 (18-11-2021)		
			concentraat	filtraat	%verwijdering	concentraat	filtraat	%verwijdering	concentraat	filtraat	%verwijdering
Complexvormers	EDTA	µg/L	19,20	29,80	-55%	29,40	27,80	5%	16,20	29,80	-84%
Herbicides & Algicides / + ionisatie	Atrazine-2-hydroxy	µg/L	0,04	0,05	-42%	0,05	0,08	-72%	0,06	0,06	-5%
	BAM	µg/L	0,14	0,15	-8%	0,10	0,14	-46%	0,04	0,15	-254%
	Chloridazon	µg/L	0,01	0,02	-14%	0,02	0,03	-8%	0,01	0,01	-40%
	Dimethenamide (ESA) A+B	µg/L	0,01	0,01	-17%	0,01	0,01	-10%	0,02	0,01	13%
	Dimethenamide (OA)	µg/L	0,01	0,01	8%	0,01	0,01	-30%	0,01	0,01	8%
	Metolachloor (ESA)	µg/L	0,02	0,02	-19%	0,01	0,02	-46%	0,02	0,02	-25%
	Metolachloor (OA)	µg/L	0,01	0,02	-31%	0,01	0,02	-36%	0,01	0,02	-25%
	Bentazon	µg/L	0,18	0,20	-10%	0,15	0,27	-83%	0,06	0,17	-189%
MCPP	µg/L	0,06	0,07	-12%	0,04	0,06	-73%	0,03	0,06	-104%	
Industriële componenten / -ionisatie	HFBA	µg/L	0,03	0,03	0%	0,03	0,05	-41%	0,02	0,03	-35%
	PFBS	µg/L	0,05	0,05	0%	0,06	0,07	-11%	0,04	0,05	-7%
	PFOA	µg/L	0,03	0,03	0%	0,03	0,03	0%	0,03	0,03	0%
Pharmaceutische componenten Groep 2 / + ionisatie	Carbamazepine	µg/L	0,01	0,01	-14%	0,01	0,01	0%	0,01	0,01	2%
	Gabapentin	µg/L	0,04	0,04	0%	0,03	0,04	-58%	0,04	0,05	-20%
	Primidone	µg/L	0,03	0,03	-19%	0,03	0,04	-68%	0,01	0,03	-115%
	Trans-10,11 dihydro-10,11-dihydroxycarbamazepine	µg/L	0,06	0,07	-14%	0,07	0,11	-61%	0,05	0,07	-64%
Zoetstoffen negatieve ionisatie	Acesulfaan	µg/L	1,40	1,50	-7%	1,80	2,50	-39%	1,20	1,50	-25%
	Cyclamaat	µg/L	0,28	0,30	-7%	0,26	0,39	-50%	0,13	0,25	-92%
	Sucralose	µg/L	0,20	0,21	-5%	0,10	0,10	0%	0,28	0,28	0%

3.4 Bedrijfsvoering

De bedrijfsvoering van het zandfilter zelf (los van de performance van het zandfilter) was stabiel gedurende de 12 weken looptijd. Er zijn geen scherpe en ongecontroleerde toenames in drukval over het filterbed geobserveerd. Het filtraatdebiet en zuurstofconcentratie in het filtraat waren (na enkele initiële aanpassingen van de PID instellingen) zowel constant in waarde als stabiel in de tijd (zie Bijlage XII voor een overzicht). Bovenin het filter vond schuim / bellen-vorming plaats, hetgeen typisch veroorzaakt wordt door methaan-oxiderende bacteriën (*Pers. Comm. Ron Jong, 2022*). Deze schuimvorming was echter niet beperkend voor het functioneren van het zandfilter en/of de reguliere bedrijfsvoering van het filter.

Zowel de venturi beluchter als wel de statische menger die met circa 0,5m tussenruimte na elkaar geplaatst waren zijn gedurende de 12 weken proefperiode niet verstopt. Echter werd op beide onderdelen wel een zwart-kleurige aanslag gevormd van hoogstens 1-2 millimeter dik. XRF (zie bijlage IX) en ICP-MS analyse (zie bijlage X) laten zien dat deze aanslag hoofdzakelijk uit ijzer-, fosfaat- en calciumoxiden bestaat.



Figuur 3: Foto van aansluiting van de statische menger. Linkerfoto: voor start van de pilot, schoon materiaal. Rechts: zwart-kleurige aanslag gevormd zichtbaar bij de aansluiting van de statische menger.

Circa 1 meter verder in de PE leiding (dus op circa 1,5 meter na dosering van de pure zuurstof en 1 meter na de statische menger) werd de hechting van bruin/okergeel/bordeauxrode aanslag aan de gladde buisbinnenwand waargenomen. Deze laag groeide uit tot enkele millimeters, waardoor de totale diameter met 10-15 mm afnam (zie Figuur 4). Door de verstopping van deze aanvoerleiding nam de weerstand van de leiding dusdanig toe dat de heersende druk bovenin het filter onder de waarde (zie 3.1) zakte waarbij de oplosbaarheid van zuurstof voldoende was om alle filterbedprocessen volledig van zuurstof te kunnen voorzien. Hiertoe werd besloten om af te wijken van de door Linde geadviseerde contacttijd van 20 seconden (dus bij een watersnelheid van 2 m/s een leidinglengte van 40 meter) en de aanvoerleiding tot de minimaal benodigde lengte in te korten van 12 meter, hetgeen resulteerde in

een verblijftijd van circa 6 seconden bij 2 m/s watersnelheid. Bij deze verblijftijd loste de pure zuurstof nog steeds volledig op aangezien er geen niveau-daling (gasbel-ontwikkeling) bovenin het filter werd waargenomen op de niveau-sensor. Hoewel de snelheid waarmee de weerstand opbouw ontwikkelde afnam door het inkorten van de aanvoerleiding, bleef dit probleem zich voordoen.



Figuur 4: visualisatie van de vervuiling met hoofdzakelijk ijzeroxiden in de PE aanvoerleiding en het PVC leidingwerk op/in het zandfilter. De meest rechterfoto laat het t-stuk zien waardoor het beluchte RO concentraat horizontaal in de filterketel wordt ingebracht

Voor de looptijd van de pilot is een additionele aanvoerleiding aangelegd zodat er relatief gemakkelijk geswitched kon worden tussen de aanvoerleidingen. De vervuilde leiding werd vervolgens voor 24 uur met rust gelaten om daarna met een rubberhamer 'geklopt' te worden en vervolgens met drinkwater doorspoeld te worden. Hierbij kwam de aangekoekte ijzeroxide-laag gedeeltelijk los, waardoor de leiding nogmaals gebruikt kon worden. Gemiddeld ging één stuk aanvoerslang twee weken mee waarna de leiding dusdanig vervuild was dat de weerstand te hoog was om de pilot 24 uur lang boven de ondergrens van de eerder benoemde benodigde druk te houden (zie 3.1). Blijkbaar oxideert tweewaardig ijzer in aanwezigheid van pure zuurstof op een tijdschaal van enkele seconde(n) en was de hoge stroomsnelheid van 2 m/s (en daardoor hoge turbulentie) niet voldoende om in de gladde PE leiding uit één stuk een zelfreinigende werking te realiseren.

4 Discussie

Gelet op (i) de behaalde gemiddelde-maximale conversies van de focus-componenten (25-50% voor ijzer, 57-83% voor methaan, 18-18% voor mangaan en 0-45% voor ammonium) ten opzichte van de gewenste conversies (>95%) en (ii) de sterke variatie in conversie tussen de 12 individuele weken blijkt duidelijk dat het oxische zandfilter (ver) beneden verwachting heeft gepresteerd (ondanks de continu wisselende bedrijfsvoering). Het valt niet uit te sluiten dat er simpelweg meer inlooptijd nodig is voor de biomassa op het zandfilter om zich aan te passen aan de circa 4-5x hogere voedingsconcentratie voor een optimale conversie van methaan en ammonium. De verwijdering van mangaan komt echter ook pas op gang wanneer er >85% ammonium conversie wordt behaald en de ijzerbelasting per filterrun kleiner is dan <2,7 kg Fe/m² (Bruins, 2017). Een opvallend detail is dat in week 9, wanneer de voedingsflow en daarmee de ijzerbelasting sterk verlaagd zijn (zie 3.2), de hoogste mangaan-conversie is gemeten. Deze voedingsflow was echter dusdanig laag dat er gezien de filtratiesnelheid op dat moment beter van langzame zandfiltratie gesproken kan worden (circa 0,2 m/h). Bij filtratiesnelheden meer passend bij snelle zand filtratie (4-6 m/h) varieerde de ijzerbelasting tussen de 9 en 14 kg Fe/m² filteroppervlak uitgaande van >95% ijzerverwijdering (zie 3.2). Op basis van (Bruins, 2017) kun je dus sowieso de vraag stellen in hoeverre het realistisch is om met een enkel zandfilter ijzer, methaan, ammonium en mangaan volledig en simultaan te verwijderen in RO concentraat matrix. Dat 100% simultane conversie/verwijdering van alle vier de componenten niet gehaald zou worden lag in de lijn der verwachting, echter was niet voorzien dat zelfs de ijzerverwijdering zich dermate beperkt zou voordoen en voor ammonium en mangaan gedurende het overgrote deel van de looptijd niet/nauwelijks omzetting plaats heeft gevonden.

Voor de hand liggende alternatieve zuiveringstreinen voor behandeling van RO concentraat zoals een additioneel (na)filter voor conversie van mangaan, al dan niet inclusief een tussengeschakeld oxisch actief kool filter voor biologische conversie van ammonium en OMV's, kunnen echter niet worden toegepast zolang de doorslag van ijzer niet (sterk) wordt gereduceerd in het primaire zandfilter. Aangezien het ijzer wel binnen enkele(n) seconden geoxideerd wordt door (pure) zuurstof - getuige de aanslag in de aanvoerleiding - ligt het voor de hand dat de structuur van de ijzervlokken en/of de interactie met het filtermateriaal dusdanig verandert ten opzichte van conventionele snel zandfiltratie van grondwater dat de verwijdering sterk negatief beïnvloedt wordt. Merk op dat in de RO concentraat matrix de onderlinge verhoudingen tussen opgelost componenten in veel gevallen niet / nauwelijks afwijkt van de verhoudingen in regulier grondwater (behalve bij bijvoorbeeld bicarbonaat, ammonia, methaan en waterstofdisulfide); de rejectie van RO membranen voor opgeloste gassen is <<99,9%). Het absolute aantal geladen deeltjes in oplossing (macroparameter ionsterkte in mmol/L) verschilt echter wel substantieel. Het lijkt dus aannemelijk dat de verlaagde verwijderbaarheid van de zich vormende ijzervlokken verklaard kan worden door het zoutgehalte van de bulk.

In de projectgroep is gesproken naar welke mogelijke redenen er zijn voor de geobserveerde significant lagere ijzerverwijderingsefficiëntie in RO concentraat matrix ten opzichte van de ijzerverwijdering in de bestaande zandfilters op regulier grondwater (>95%). In de projectgroep werd geopperd dat de filterbelasting met ijzer te hoog zou zijn; week 9 en 10 laten echter zien dat bij een extreme verlaging van de filterbelasting niet resulteerde in een ijzerverwijdering die in de buurt kwam van gewenste ijzerverwijderingsefficiëntie. Ook de suggestie dat de ijzerdoorslag een effect zou zijn van een te hoge effectieve filtratiesnelheid (de filtratiesnelheid neemt toe bij een verstoppend filterbed bij gelijkblijvende volumestroom door het filter) wordt in zekere mate ontkracht door de behaalde verwijderingspercentages in week 9 en 10. Bijstelling van het spoelcriterium van 0,35 bar naar 0,10 bar drukval over het filterbed resulteerde niet in een merkbaar hogere ijzerverwijdering. Het lijkt er dus op dat de oorzaak van de beperkte filterbaarheid van de ijzerdeeltjes niet aan de werking van het filter ligt, maar meer een gevolg is van de veranderende waterkwaliteit. Aangezien conversieprocessen vaak sequentieel plaatsvinden in een snelzandfilter zou de onvolledige methaanconversie (die typisch als eerste plaatsvindt) de biologische omzetting van

ammonium en de initieel biologische en vervolgens auto-katalytische omzetting van mangaan negatief kunnen beïnvloeden (Bruins, 2017). Een voorbehandeling met vacuümontgassing (voor de verwijdering van de opgeloste gassen methaan en waterstofsulfide (Huisman, 2004)) voorafgaand aan oxische zandfiltratie zou de conversie van ammonium en/of mangaan mogelijk positief kunnen beïnvloeden. Er zijn in de literatuur echter geen aanwijzingen gevonden dat in aerobe systemen onvolledige methaan-, ammonium- en/of mangaanconversie limiterend zouden kunnen zijn voor de hoofdzakelijk fysisch-chemische conversie van opgeloste ijzer (Fe(II)) naar ijzer(III)oxiden. De continue met ijzeroxiden verstoppende aanvoerleiding na pure zuurstofdosing van de oxische zandfilter pilot op de relevante tijdschaal (seconden, minuten) en het ontbreken van veel beschikbaar oppervlak voor bacteriegroei (diameter aanvoerleiding 25 mm) maken aannemelijk dat de omzetting van opgelost ijzer naar ijzer(III)oxiden voor het overgrote deel via fysisch-chemische omzetting plaatsvindt.

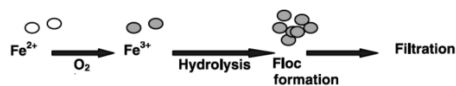
In de literatuur is gezocht naar mogelijke oorzaken voor de verminderde filtreerbaarheid van ijzer(III)oxide deeltjes specifiek bij hogere ionsterkte. Bovendien is er gezocht naar manieren om onder verhoogde zoutconcentraties de ijzerverwijderingsefficiëntie te kunnen verhogen. Van coagulatieprocessen met ijzerchloride is bekend dat de mate van colloïd-destabilisatie door ionsterkte (negatief) beïnvloed kan worden vanwege een effect op chemische hydrolyse en metaal-hydroxide oplosbaarheidsreacties (Umar et al., 2014). Het is bekend dat elektrostatische effecten deeltjes interacties domineren maar dat de invloed van macromoleculen als organisch materiaal niet verwaarloosbaar is (Tiller & O'Melia, 1993). Bij lage ionsterkte verlaagt organisch materiaal de netto oppervlaktelading van positief geladen deeltjes. Hogere ionsterkten (>0.1 mmol/L) hebben invloed op de structuur van organische moleculen in oplossing hetgeen uiteindelijk resulteert in een grotere effectieve afstand waarop elektrostatische repulsie plaatsvindt tussen twee elkaar benaderende deeltjes. Hoe lager de ionsterkte, hoe hoger de elektro-negativiteit van humuszuren (Duan et al., 2002). Daarnaast speelt ook pH een rol; hoe hoger de pH in oplossing, hoe hoger de positieve lading van humuszuren die op het oppervlak van de positieve deeltjes aanwezig zijn en dus hoe groter de stabiliteit van deze deeltjes. Hoe hoger de ionsterkte, hoe lager de oplosbaarheid van Fe(III)-NOM complexen in die oplossing (Liu & Millero, 1999). Zowel het ruwe grondwater (11,1 mmol/L) als het RO concentraat (44,2 mmol/L) hebben een ruim hogere ionsterkte dan de hierboven bovengenoemde 0,1 mmol/L. Daarnaast is er in beide matrices natuurlijk organisch materiaal aanwezig. De toenemende elektrostatische repulsie tussen deeltjes onderling door de hogere ionsterkte kan dus de oorzaak zijn dat i) deeltjes geremd worden in hun groei en ii) gehinderd worden in hun interactie met en/of bezinking op het filtermateriaal.

Al met al is het beeld wat uit de literatuur naar voren komt zo dat ijzerdeeltjes die onder hoge(re) ionsterkte en in aanwezigheid van natuurlijk organisch materiaal gevormd worden stabiele(re) deeltjes zijn die (blijkbaar) slechts zeer beperkt afgevangen kunnen worden in een zandfilterbed. Deze suggestie dat de interactie met het filterbed verandert waardoor (elektrostatische) adsorptie niet meer voldoende werkt wordt ondersteund door de geobserveerde negatieve verwijderingsefficiëntie van veel organische microverontreinigingen. Het feit dat veel OMV's desorberen bij hogere ion-sterkte vanaf het 'ervaren' filtermateriaal geeft aan dat de (elektrostatische) interacties 'op de korrel' daadwerkelijk veranderen waardoor desorptie optreedt. De oplossing lijkt dan ook niet te liggen in lagere filtratiesnelheden en/of fijnere fractie van het filterzand (waardoor de totale adsorptie-oppervlakte stijgt). Andere voor de hand liggende oplossingsroutes gericht op de verwijdering van ijzer uit RO concentraat matrix waaraan gedacht kan worden zijn:

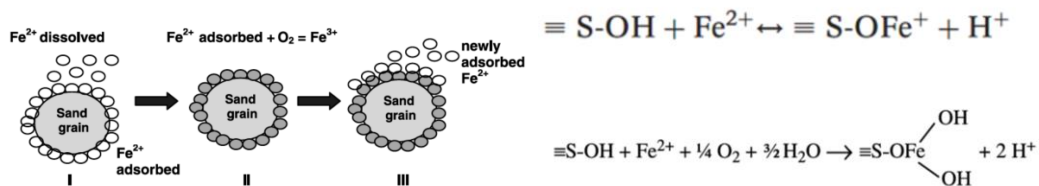
- Verwijdering van organisch materiaal voorafgaand aan de oxidatie middels toepassing van anionwisseling. Minder natuurlijk organisch materiaal zal naar verwachting zorgen voor minder sterische hindering tussen ijzervlokken onderling hetgeen vloggroei en interactie met het filtermateriaal zal bevorderen. Nadeel is echter dat er een nieuwe reststroom / regeneraatsroom wordt geproduceerd die meer zout bevat dan RO concentraat waarvoor een aparte oplossing gevonden moet worden. Bovendien blijft, ondanks het kleinere volume van de RO concentraatstroom, de load anionen (en dus dimensionering van de A-IEX unit) gelijk aan volstroms-toepassing).

- Toepassing van vlokhulpmiddel (zoals polyacrylamide, wisprofloc, ...) wordt bij indikking van coagulatieslib (oppervlaktewaterbehandeling) en waterijzer (grondwaterbehandeling) toegepast om coagulatie – het samenklonteren van ijzerdeeltjes – mogelijk te maken en/of te bespoedigen. De effectiviteit van vlokhulpmiddelen bij normale en verhoogde ionsterkte zou middels een systematische lab-studie in kaart gebracht kunnen worden.
- Toepassing van (biologische) actieve kool adsorptie voor de verwijdering van natuurlijk organisch materiaal, al dan niet in combinatie met geavanceerde oxidatie (Loh et al., 2021). Nadelen zijn echter risico op ongewenste bijproduct-formatie, onvolledige conversie van NOM naar CO₂ en H₂O, energieverbruik op locatie en/of energiebehoefte re-activatie van actieve kool. Bovendien wordt bij toepassing van geavanceerde oxidatie het opgeloste ijzer in dezelfde stap reeds geoxideerd, wat mogelijk negatieve gevolgen heeft voor het beschikbare adsorptieoppervlakte.
- Verlagen van ionsterkte voorafgaand aan beluchting & ijzeroxidatie middels anaerobe ontharding. Aangezien calcium- en magnesium ionen bivalent zijn (2+) en de ionsterkte schaaft met het kwadraat van de valentie van ionen, zal de ionsterkte significant afnemen wanneer calcium- en/of magnesium worden verwijderd. Het is echter goed denkbaar dat een deel van het ijzer (ook een bivalent ion in opgeloste vorm) in de kalkpellen terecht zal komen, hetgeen nadelig is voor de toepassingsmogelijkheden van de kalkkorrels.
- Batch-behandeling van RO concentraat in een zandfilter waarbij het zandfilter (i) gevuld wordt met anaeroob water en Fe(II) bindt aan de zandkorrel en (ii) belucht wordt waardoor ijzer-oxidatie direct op de met ijzeroxide gecoate zandkorrels plaatsvindt en nieuwe Fe(II) sorptieplaatsen ontstaan (zie Figuur 5) (Sharma et al., 2001). Conventioneel wordt ijzer via het oxidatie-vlok-formatie mechanisme verwijderd, maar mogelijk werkt het adsorptie-oxidatie mechanisme voor RO concentraat matrix dus beter.
- Toepassing van een kation wisselaar op RO concentraat waarbij de regeneraatstroom (i) belucht wordt (ijzerhydroxide vorming in afwezigheid van NOM), (ii) middels nanofiltratie behandeld wordt (scheiding mono- en multivalente ionen, monovalente ionen kunnen hergebruikt worden voor regeneratie van hars) en (iii) terugwinning van multivalente zouten uit de resterende concentraatstroom middels precipitatie en/of remineralisatie van het RO permeaat. Nadeel is echter (vergelijk met de optie van an-ion wisselaar) dat de C-IX unit gedimensioneerd moet worden alsof hij de volledige stroom zou moeten behandelen en dat je mogelijk met een gedeeltelijke regeneraatstroom blijft zitten waarvoor een aparte oplossing gevonden moet worden.

Oxidation-floc formation mechanism



Adsorption-oxidation mechanism



Figuur 5: Vergelijk van twee ijzerverwijderingsmechanismen. Boven: conversie van Fe(II) tot Fe(III) middels een oxidator (zuurstof), gevolgd door hydrolyse van Fe(III) en vorming van ijzer(hydr)oxide vlokken die middels filtratie verwijderd kunnen worden. Onder: adsorptie van Fe(II) aan de oppervlakte van een zandkorrel (zie ook bovenste 'reactievergelijking'), gevolgd door oxidatie met zuurstof (zie ook onderste 'reactievergelijking') waarna nieuw Fe(II) zich kan binden aan het vers-gevormde ijzeroxide oppervlak.

- Toepassing van ultrafiltratie op RO concentraat direct na beluchting zou alle (colloïdale) ijzerdeeltjes grotendeels moeten kunnen afvangen. Door gedeeltelijk te beluchten zou de vervuilinglast op de ultrafiltratie teruggebracht kunnen worden (zuurstof wordt primair gebruikt voor fysisch-chemische ijzeroxidatie). Ook zouden er robuuste UF membraanmodules kunnen worden toegepast (bijvoorbeeld keramische modules) die chemisch bestendig zijn zodat depositie van ijzer en/of neergeslagen zouten relatief eenvoudig verwijderd kunnen worden.
- Verwijdering van ijzerdeeltjes op basis van bezinking, bijvoorbeeld via een lamellenseparator. De bezinkproef uitgevoerd in week 6 van de pilot (zie 3.2) toont aan dat de ijzervlokken die gevormd worden met de zwaartekracht kunnen bezinken. Wanneer de bezinking in een gesloten systeem plaatsvindt in afwezigheid van zuurstof kunnen de overige focus-componenten (methaan, ammonium, mangaan) wellicht wel in een nageschakeld zandfilter omgezet worden.

Met het oog op de bedrijfsvoering was de ijzervervuiling op het filterbed de grootste operationele uitdaging. Indien één van bovenstaande suggesties soelaas biedt betreft de scheiding/verwijdering van ijzeroxiden, zal een duurttest van een zandfilter moeten uitwijzen in hoeverre een stabiele bedrijfsvoering gerealiseerd kan worden op een zandfilter waarin conversie van methaan, ammonium en mangaan simultaan plaatsvindt. Mocht er om redenen toch besloten worden om de ontijzering primair via een zandfilter te laten lopen is het voor een stabiele(re) bedrijfsvoering van grote meerwaarde als het punt waar de (pure) zuurstof gedoseerd wordt zich binnen maximaal 1,5 meter van het influent zandfilter bevindt. Op deze manier wordt het drukverlies vanwege weerstandsopbouw geminimaliseerd en wordt de inspanning betreft het schoonmaken van het systeem geminimaliseerd. De aanbeveling van Linde om circa 20-30 seconden verblijftijd aan te houden onder hoog-turbulente condities om het (pure) zuurstof volledig te laten oplossen in het water is met dit onderzoek ontkracht. In week 9 en 10 werd de aanvoersnelheid dusdanig verlaagd dat de stroming in de aanvoerleiding werd teruggebracht tot het laminaire flowregime (Reynolds getal < 4000) en onder deze condities was er nog steeds sprake van ruim voldoende drijvende kracht voor de gassen om op te lossen in de waterstroom. Zeker wanneer er dus niet met pure zuurstof (vanwege veiligheidsrisico's zoals brand- en/of explosiegevaar) maar met perslucht gewerkt gaat worden lijkt het dus geen probleem om de venturi beluchter heel dicht op het zandfilter zelf te plaatsen. De venturi beluchter en de statische menger hebben beide 12 weken lang naar behoren gewerkt, zonder merkbare vervuiling en/of storing(en).

5 Conclusies

Met betrekking tot de drie hoofd-onderzoeksvragen voor het uitgevoerde pilot-onderzoek oxische zandfiltratie kan het volgende worden geconcludeerd:

- De bedrijfsvoering van het oxische zandfilter was stabiel gedurende de 12 weken looptijd op de vervuiling van de aanvoerleiding door hoofdzakelijk depositie van ijzerhydroxiden na. Met de opgedane inzichten tijdens de pilotperiode lijkt het mogelijk om dit aspect te ondervangen door het zuurstof-doseerpunt binnen anderhalve meter van het influent zandfilter te plaatsen.
- De conversie van de focus-componenten gedurende de looptijd van de pilot varieerde sterk van week op week. Enkel voor methaanconversie is gedurende de looptijd van de pilot een positieve trend zichtbaar in conversie-efficiëntie van circa 40% in week 1 naar circa 75% in week 12. Voor de overige focus-componenten (ijzer, ammonium en mangaan) is echter geen consistente trend waargenomen. Aangezien de bedrijfsvoering gedurende de 12 weken looptijd 6x is veranderd kunnen mogelijke trends vertroebeld zijn maar in het algemeen kan gesteld worden dat de conversie-efficiëntie van deze drie focus-componenten geen duidelijke en/of positieve ontwikkeling lieten zien gedurende de looptijd van oxische zandfiltratie pilot.
- De conversie van de focus-componenten gedurende de looptijd van de pilot was ver beneden gewenste conversie-efficiëntie zoals we die kennen van conventionele zandfilters. Een toename van de flocculatietijd in de bovenwaterlaag, het verlagen van de effectieve filtratiesnelheid door verhoging van de spoelfrequentie, het vormen van de ijzervlokken in een laminair flowregime alswel het verlagen van de zuurstofconcentratie in het filter effluent hadden allemaal niet voldoende effect op de conversie-efficiëntie. Geconcludeerd wordt dat het oxische zandfilter zoals beproefd in dit onderzoek onvoldoende zuiveringscapaciteit heeft om alle vier de focus-componenten (ijzer, methaan, ammonium, mangaan) simultaan te verwijderen. Het is aannemelijk dat voor focus-component ijzer er een fundamentele uitdaging is aangezien de verhoogde ionsterkte in RO concentraat van invloed is op de elektrostatische interactie met het filtermateriaal welke een essentiële rol speelt in het verwijderingsrendement

6 Aanbevelingen

Aanbevolen wordt om:

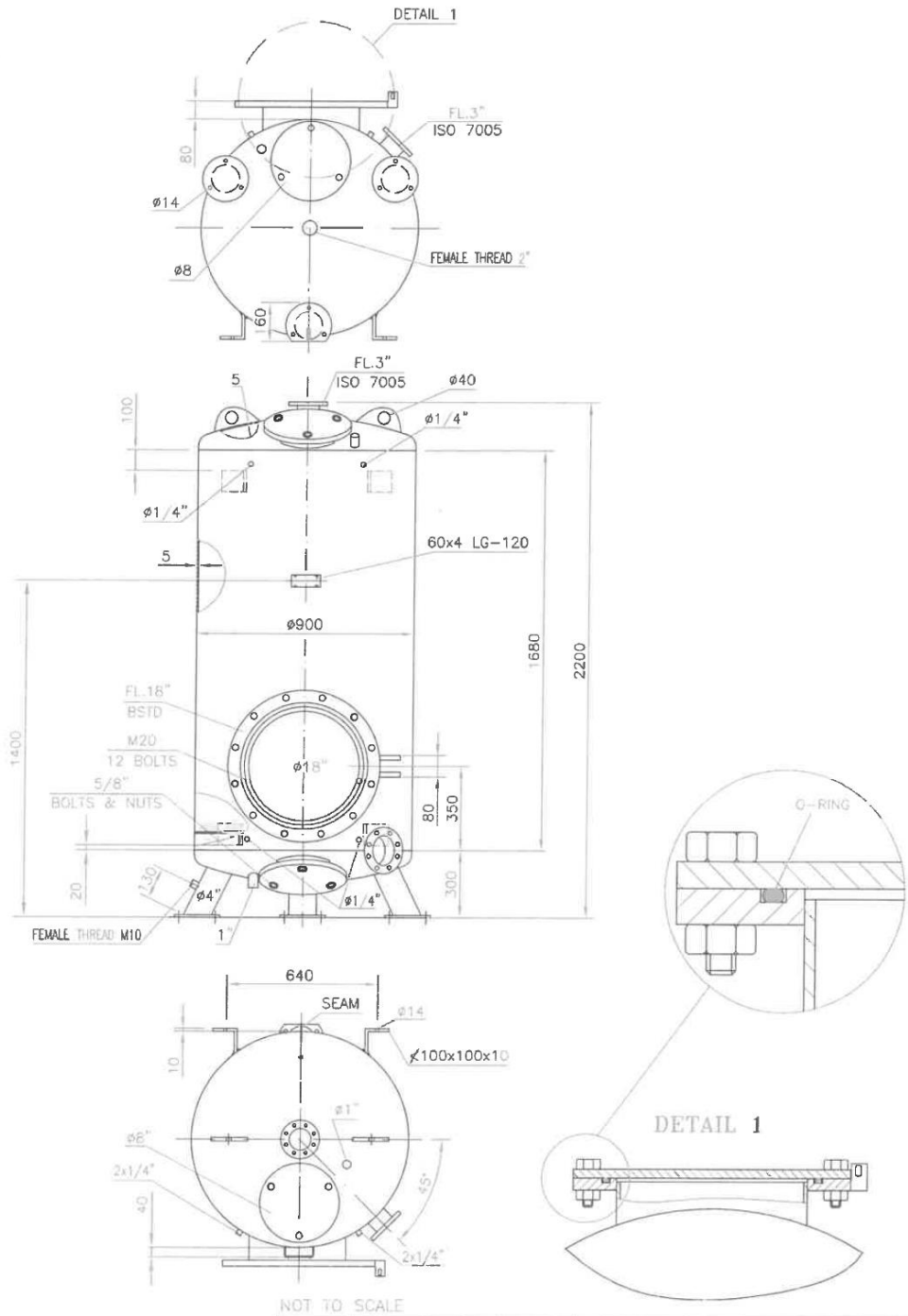
- In een systematische studie de effecten van variërende ionsterkte op i) deeltjesgrootte en ii) bezinksnelheid in kaart te brengen in een praktijk-relevante range van zoetwater bronnen (zoet grondwater, duin- / oeverfiltraat: 0-50 mmol/L), brak grondwater bronnen en samenstelling (mono- en multivalente zouten gezamenlijk, aanwezigheid van NOM). De inzichten uit deze lab-studie worden vervolgens gebruikt om een gedegen afweging te maken betreft de meest effectieve (combinatie van) behandelmethode(n) voor het transporteerbaar / loosbaar maken van RO concentraat van zoet water.
- Op lab-schaal de interactie tussen vers en 'ervaren' filtermateriaal en ijzer(hydr)oxiden te bestuderen in matrixes met verschillende ionsterkte. Ook de geobserveerde desorptie van organische microverontreinigingen van 'ervaren' filtermateriaal is relevant om mee te nemen in deze studie.
- Diverse genoemde alternatieve methodieken om ijzer uit RO concentraat te verwijderen op labschaal te onderzoeken en te rangschikken op potentie. Een batch operatie van een (bestaand) zandfilter zou de meest elegante methode zijn aangezien i) er geen extra processtappen nodig zijn, ii) vanwege de volume reductie van de concentraatstroom er qua dimensionering van een zandfilter 'ruimte' is om een batchgewijze bedrijfsvoering toe te passen en iii) er na verloop van tijd ook simultaan conversie van methaan, ammonium en/of mangaan plaats kan vinden. Dit laatste voordeel wordt verloren wanneer er gekozen zou worden voor bijvoorbeeld een lamellenseparator.
- De potentie van oxische zandfiltratie opnieuw te onderzoeken in RO concentraat matrix maar dan specifiek gericht op de conversie van methaan, ammonium en mangaan

7 Literatuurlijst

- Ahmad, A., Rutten, S., Eikelboom, M., de Waal, L., Bruning, H., Bhattacharya, P., & van der Wal, A. (2020). Impact of phosphate, silicate and natural organic matter on the size of Fe(III) precipitates and arsenate co-precipitation efficiency in calcium containing water. *Separation and Purification Technology*, 235(September 2019), 116117. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116117>
- Boorsma, M., Dost, S., & Prummel, H. (2020). No biofouling on reverse osmosis membranes thanks to pre-treatment with BODAC filtration. *H2O-Online*, 1–6.
- Bruins, J. (2017). Manganese removal from groundwater: Role of biological and physico-chemical autocatalytic processes. In *Manganese Removal from Groundwater: Role of Biological and Physico-Chemical Autocatalytic Processes* (Issue June 2016). <https://doi.org/10.1201/9781315115900>
- de Waal, L. (2020). *Huidige en toekomstige praktijk van NF/RO concentraat management (BTO 2020.019)*.
- Duan, J., Wang, J., Graham, N., & Wilson, F. (2002). Coagulation of humic acid by aluminium sulphate in saline water conditions. *Desalination*, 150(1), 1–14. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00925-6](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00925-6)
- Edwards, S., Alharthi, R., & Ghaly, A. E. (2011). Removal of hydrogen sulphide from water. *American Journal of Environmental Sciences*, 7(4), 295–305. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2011.295.305>
- Europese Unie. (2020). *RICHTLIJN (EU) 2020/2184 Kwaliteit van voor menselijke consumptie bestemd water*.
- Gezelschaft, M. P. (2022). *Henry's Law constants*. <https://henrys-law.org/henry/index.html>
- Huisman, L. (2004). *Rapid filtration*.
- Liu, X., & Millero, F. J. (1999). The solubility of iron hydroxide in sodium chloride solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(19–20), 3487–3497. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00270-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00270-7)
- Loh, W. H., Cai, Q. Q., Li, R., Jothinathan, L., Lee, B. C. Y., Ng, O. H., Guo, J., Ong, S. L., & Hu, J. Y. (2021). Reverse osmosis concentrate treatment by microbubble ozonation-biological activated carbon process: Organics removal performance and environmental impact assessment. *Science of the Total Environment*, 798. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149289>
- Pers. comm. Ron Jong*. (2022).
- Sander, S. P., Abbatt, J., Friedl, R. R., Barker, J. R., Burkholder, J. B., Golden, D. M., Huie, R. E., Kolb, C. E., Kurylo, M. J., Moortgat, G. K., Orkin, V. L., & Wine, P. H. (2011). Chemical kinetics and photochemical data for use in atmospheric studies evaluation Nb. 17. *JPL Publication 10-6, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena*, 17.
- Sharma, S. K., Kappelhof, J., Groenendijk, M., & Schippers, J. C. (2001). Comparison of physicochemical iron removal mechanisms in filters. *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, 50(4), 187–198. <https://doi.org/10.2166/aqua.2001.0017>
- Softschools.com. (2022). *Reynold's Number Formula*. https://www.softschools.com/formulas/physics/reynolds_number_formula/78/
- Sung, W., & Morgan, J. J. (1980). Kinetics and Product of Ferrous Iron Oxygenation in Aqueous Systems. *Environmental Science and Technology*, 14(5), 561–568. <https://doi.org/10.1021/es60165a006>
- Tiller, C. L., & O'Melia, C. R. (1993). Natural organic matter and colloidal stability: Models and measurements. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 73(C), 89–102. [https://doi.org/10.1016/0927-7757\(93\)80009-4](https://doi.org/10.1016/0927-7757(93)80009-4)
- Timmers, P., & de Waal, L. (2022). *Behandeling van RO concentraat: een verkenning van (micro)biologische processen t.o.v. fysisch-chemische technieken (BTO 2202.050)*.
- Umar, M., Roddick, F., & Fan, L. (2014). Effect of coagulation on treatment of municipal wastewater reverse osmosis concentrate by UVC/H₂O₂. *Journal of Hazardous Materials*, 266, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.12.005>
- van de Wetering, S., & van der Wielen, P. (2021). De invloed van mangaan op biofilm en sediment in het distributiesysteem. *H2O Online*, november, 1–6.

- Veenendaal, G., Kuiper, D., Dost, S., & van der Maas, P. (2019). Ultrapuur water uit RWZI-effluent; bijna 10 jaar ervaring in Emmen. *H2O-Online, December*, 1–5.
- Vries, D., Bertelkamp, C., Schoonenberg-Kegel, F., v.d. Akker, B., & Hofs, B. (2016). *Iron and Manganese Removal: Recent Advances in Modelling Treatment Efficiency by Rapid Sand Filtration* (Issue BTO 2016.015).
- Vries, D., Korevaar, M., de Waal, L., & Ahmad, A. (2021). Impact of ionic composition of groundwater on oxidative iron precipitation. *Water Supply, 00(0)*, 1–9. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.406>
- Warneck, P., & Williams, J. (2012). *The Atmospheric Chemist's Companion*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-2275-0>

I Technische tekening filterketel Logisticon



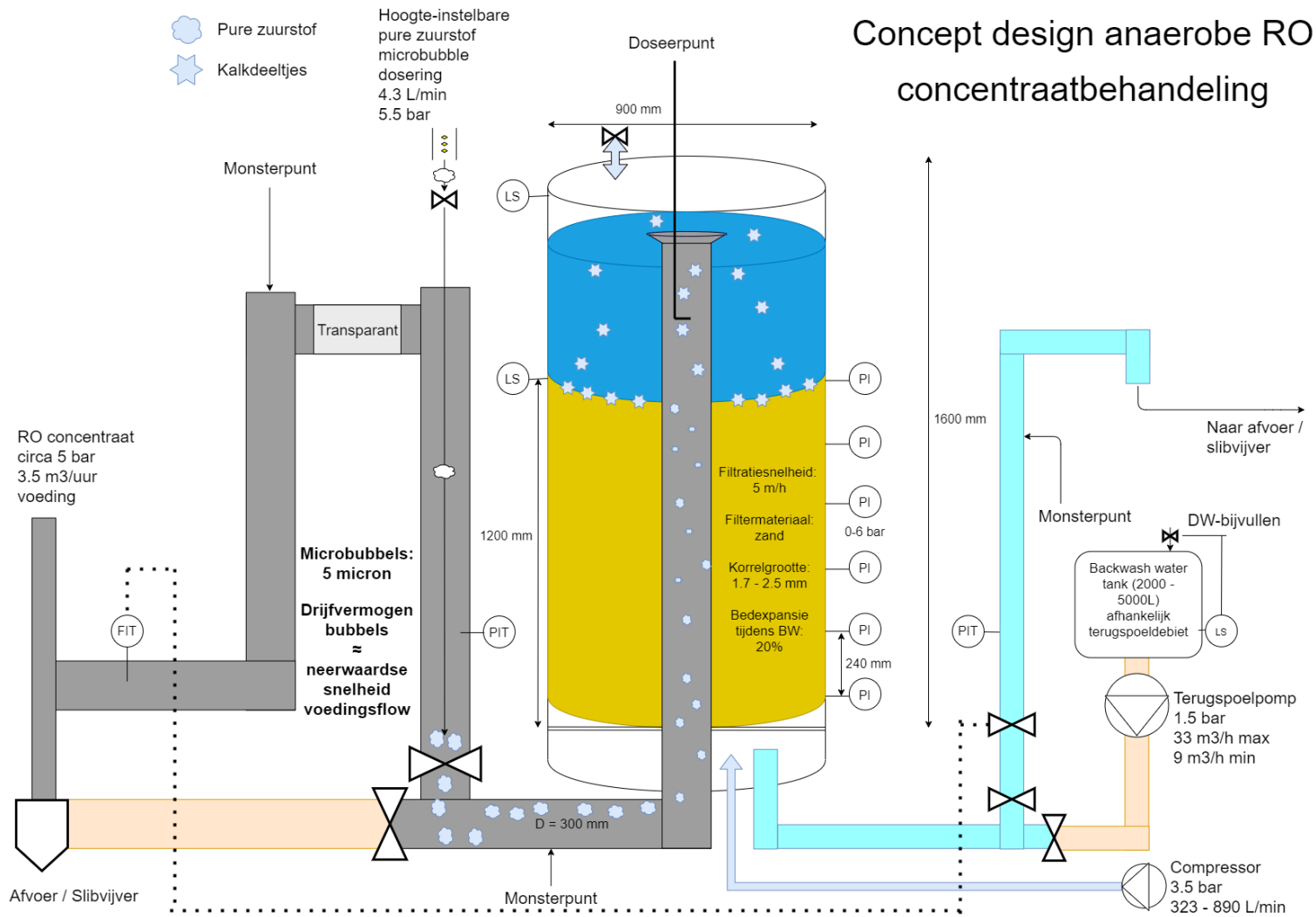
NOT TO SCALE

	17.12.03	ORA	CHECK
	17.12.03	URI	DRAW
	17.12.03	ORA	DESIGN
SIGN.	DATE	NAME	
MAX. WORKING PRES			MATERIAL
6 BAR	CE		ST37.2
ARRAY			

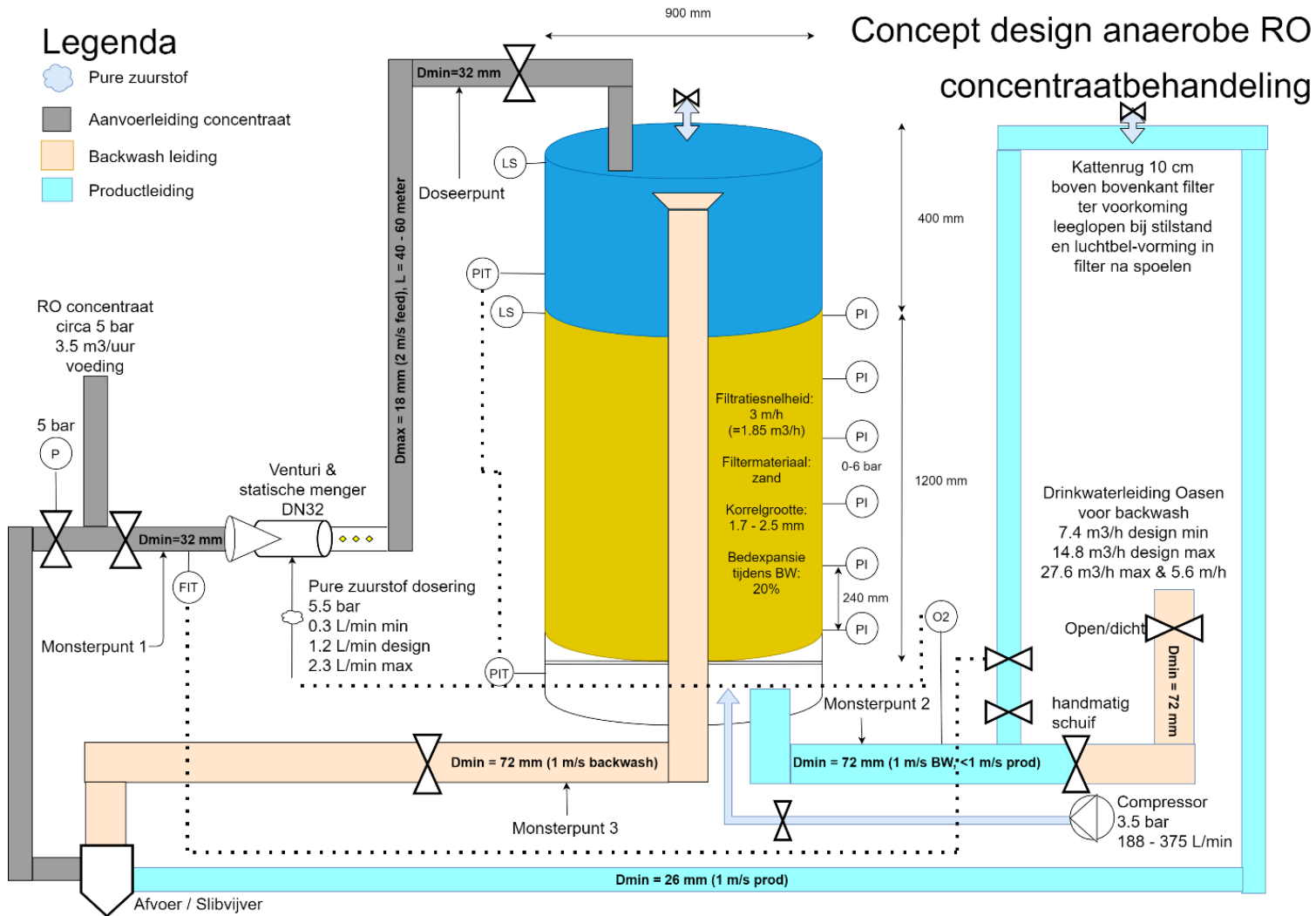
II Achtergrond en conceptueel ontwerp (micro)bubbel gasdosering

Vanaf het moment dat er zuurstof in het systeem gebracht wordt is aannemelijk dat er ijzeroxidatie gevolgd door een flocculatie-coagulatie proces zou optreden. Bedacht werd dat wanneer het zuurstof in een verticaal georiënteerde aanvoerleiding ingebracht zou worden als kleine bubbels/bellen onder druk, de gasbellen langzaam zouden oplossen gegeven voldoende verblijftijd. De stijgsnelheid van (micro)bubbels is echter afhankelijk van de bubbelgrootte (Park, Park, Lee, & Lee, 2017). Dus door de stijgsnelheid van de bubbels en de neerwaartse stroomsnelheid van het te behandelen water op elkaar af te stemmen, is het mogelijk om een bepaalde verblijftijd van de gasbellen in het systeem te kiezen. Hoe kleiner de gasbubbels, hoe lager de stijgsnelheid. Door het zuurstof-doseerpunt dus relatief laag in de verticale aanvoerleiding te plaatsen, stijgen de grootste bubbels wellicht enigszins in de kolom maar doordat ze tijdens het stijgen deels oplossen in het water neemt hun stijgsnelheid af tot het moment dat hun stijgsnelheid gelijk is aan de neerwaartse snelheid van de waterstroom richting het filter. Uiteindelijk zullen dus alle bubbels meegenomen worden het filter in. Wanneer dit gebeurt onder laminaire flow condities ($Re < 2300$ (Softschools.com, 2022)) en een uniforme verdeling van zuurstof door de buis, kan hechting van ijzer(hydr)oxiden aan de gladde buiswand wellicht voorkomen worden (omdat de ijzerhydroxiden en de buiswand niet 'botsen'). Een conceptueel design van het (micro)bubbel design is terug te vinden in bijlage II.

In goed overleg met de projectgroep is echter besloten het microbubbel design uiteindelijk niet te realiseren. Redenen hiervoor waren de ingeschatte potentie voor verstopping van de micro-bubbel bruissteen in combinatie met voorziene uitdagingen met opschaling van deze zuurstof-toedieningstechniek op grote(re) installaties, de mogelijkheid dat er door sedimentatie veroorzaakte verstopping plaats zou vinden in de voedingsleiding en het feit dat de benodigde centrale aan- en afvoerbuis dusdanig groot gedimensioneerd diende te worden dat een aanzienlijk gedeelte van de totale filterinhoud in beslag zou worden genomen (in de pilot ging het om een aan- en afvoerleiding met een diameter van 300 mm in een filterketel met een totale diameter van 900 mm).



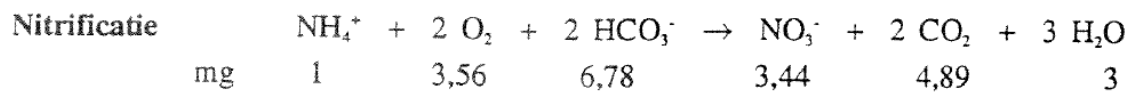
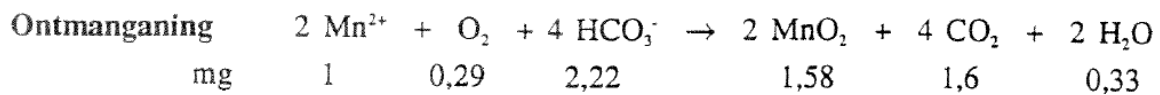
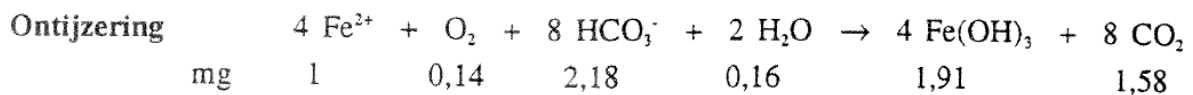
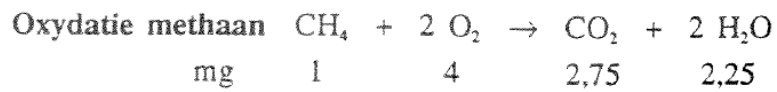
III Conceptueel venturi pilotontwerp



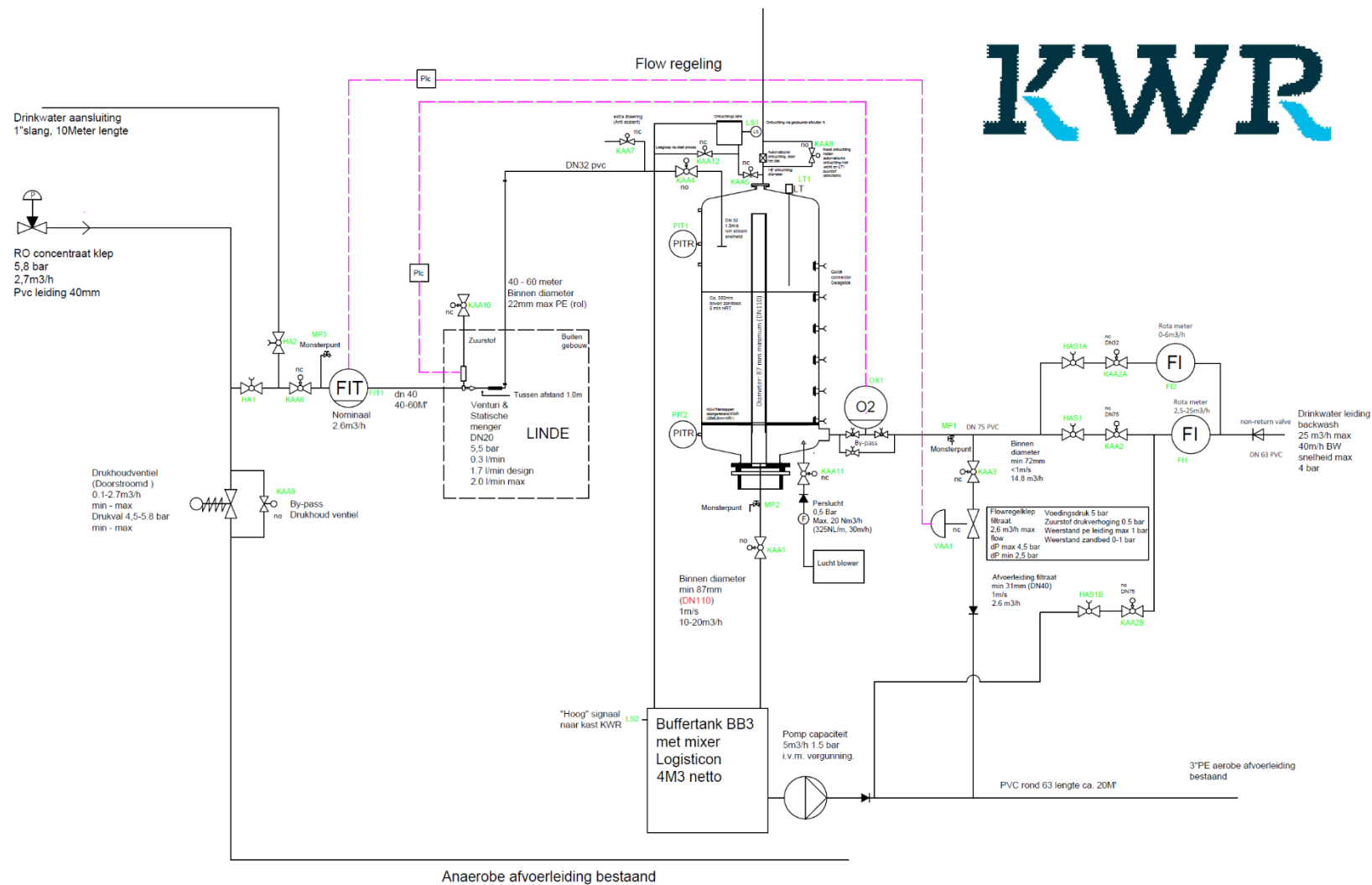
IV Overzicht aerobe conversieprocessen zandfiltratie

Grondwater:

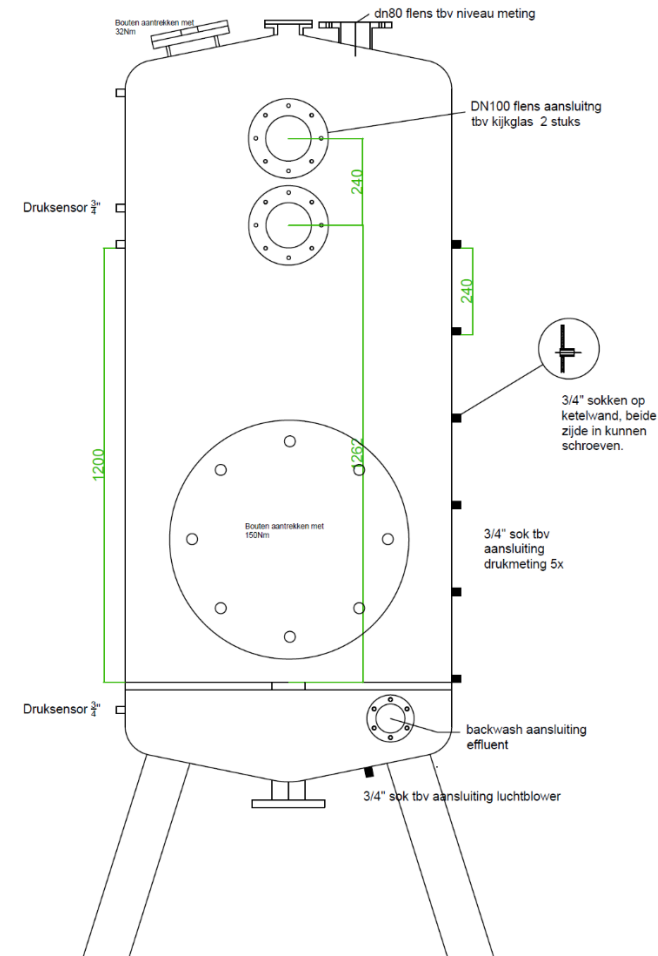
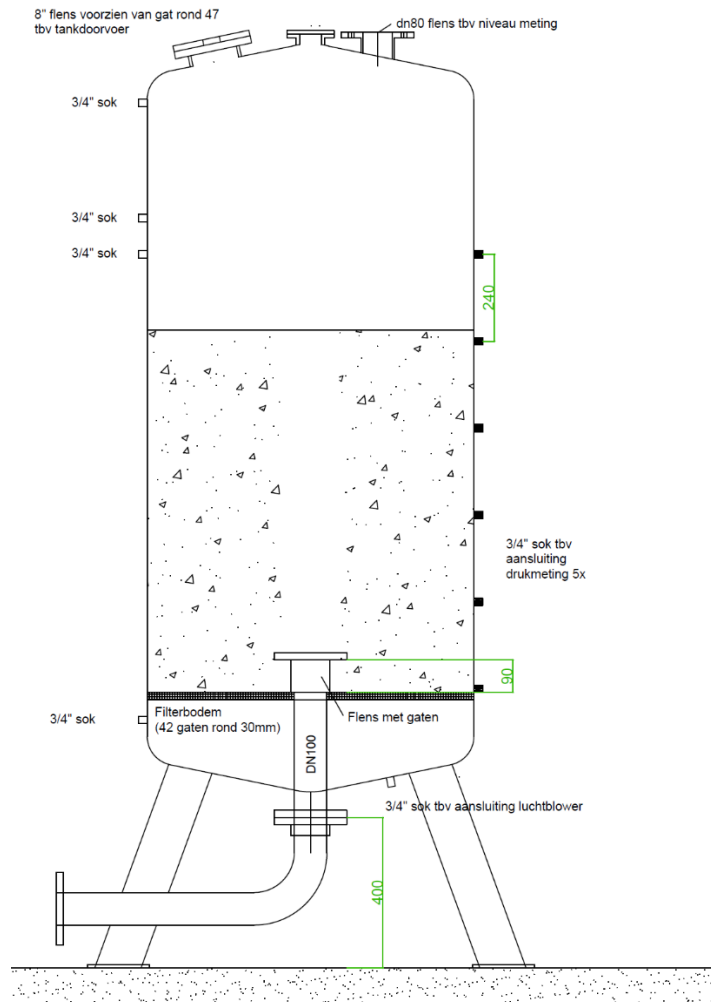
In volgorde van optreden tot het zuurstofgehalte is < 0,5 mg/l.



V P&ID pilot-installatie oxische zandfiltratie



VI Detailtekening modificaties standaardketel Logisticon



VII Ontwerpdetail filterdop

Diese Zeichnung unterliegt unserem ausschließlichen Nutzungsrecht nach §171 UrhG.
 Ohne unsere Zustimmung darf sie nicht vervielfältigt, dritten Personen mitgeteilt
 oder anderweitig verwendet werden. Widersetzliche Nutzung zieht ziv- und
 strafrechtliche Folgen nach sich. Technische Änderungen vorbehalten.

Right of use remains with the company KSH GmbH. All rights are reserved.
 The drawing may not be reproduced, passed on to third parties or used
 in any other form without the consent of KSH GmbH.
 Any unlawful use will be dealt with by law without exception. Subject to change without notice.

	KLEEMMEIER, SCHEWE + Co KSH GmbH D-32051 HERFORD (Germany)	Werkstoff PP	KR1-20x0.8-G $\frac{1}{2}$ "-15-110-s		
	K.Art.Nr.		Datum 29.04.21 KR	Zeichn.Nr.:	Blatt
Gepr. 29.04.21 SCH		Zul. Abw. DIN 16742		Projekt-Nr.: P212306	1/1
Nr. Änderung	Datum Name	*Schutzvermerk ISO 15016 beachten. Refer to protection notice ISO 15016, "KSH GmbH - 06/2012"			

VIII Operationeel logboek pilotperiode

14-12-2021:

Data uit systemen gehaald, ontluchting gechecked op vervuiling, data- en kennisoverdracht Gerben & Luuk.
Besloten om het zand in het filter te laten zitten tot nader order, afvoer moet via aquaminerals gaan.
Pilot kan tot Q1 in Kamerik blijven staan.

13-12-2021:

Fe meting niet gelukt, pilot stabiel gedraaid over het weekend. Onbekend dus hoe ijzerverwijdering zich heeft ontwikkeld over het weekend helaas.
Pilot gestopt na monsternamen, sample genomen van 'vies' zand, aantal keer teruggespoeld met drinkwater, sample genomen van 'schoon' zand, PVC aanvoerleidingen schoongemaakt, PE aanvoerleidingen gedemonteerd, zuurstofflessen opgehaald.

10-12-2021:

Ammonium < 10%

Mangaan: 0% (spectrofout)

Ijzer: 63%

dP: 0.02

Dus als filter net (12 uur) is teruggespoeld wel hoge(re) verwijdering?!

12 uur na de backwash bij dP filterbed 0.02 -> ijzerverwijdering 63% (vandaag)

9-11-2021:

Fe = 33%

NH4 = 20%

Mn 0%

dP sochtends: 0.1 dP

19:57 filter gespoeld.

11 uur voor de backwash bij dP filterbed 0.1 bar -> ijzerverwijdering 33% (gisteren)

8-12-2021:

Filter weer opgestart, storing van Multi-stage RO verholpen.

3 bar bovendruk, morgen wisselen van slangen.

44% ijzerverwijdering, 15% NH4 verwijdering en mangaan niet meetbaar (error spectrofotometer). Ijzer verwijdering na veel moeite bepaald (ook error, dus minder betrouwbaar?)

dP over filterbed laag? Net na storing, even afwachten wat komende dagen gebeurt.. Herhaling van hogere procentuele ijzerverwijdering bij zeer lage dP over filterbed?

6-12-2021:

stabiel gedraaid door het weekend. Zuurstof gedraagd zich stabiel.

Zuurstof wordt niet vastgezet na backwash -> opvallend (eerder 60 min vaste waarde voordat regeling het overnam)

Mangaan weer 0 en 0.. -> vreemd.

Fe: 56% verwijdering, redelijk hoog! 1.5 dag na backwash. dP filterbed 0.05 bar.

NH4: 18% verwijdering.

Stroomuitval proefhal; RO staat uit.

Hulp Logisticon via telefoon, maar onduidelijk wanneer RO weer opgestart kan worden.

5-12-2021:

backwash uitgevoerd om 01:56 bij 0.2 bar.

3-12-2021:

Ijzerverwijdering circa 30%. Spectrofotometer weer up-and-running na opwarmen.

Ammonium lage verwijdering, circa 10%.

Slang gewisseld, 4.2 bar dus weekend zou goed moeten gaan.

2-12-2021:

Monsternamen vitens. Pilot stabiel gedraaid overnacht.

Monsteranalyse spectrofotometer met opgewarmd apparaat nog steeds rare resultaten? Opgewarmde sample cuvetten?

Fe verwijdering circa 40%, maar filtratie over 0.45 µm geeft veel ijzer..

Spectrofotometer doet het beter, lijkt erop dat opwarmen zin heeft gehad.

Filtreerde monsters filtraat en bovenwaterlaag (2 mg/L Fe)

Concentraat na .45 filtratie: 25.4 mg/L Fe.

Bovenwaterlaag na .45 filtratie: 2.59 mg/L Fe

Filtraat na .45 µm: 1.5 mg/L Fe

Hoger dan normaal, maar ook redelijke ijzerverwijdering (40%). Dus mogelijk deeltjesgrootte verdeling sterk geswitched.

Dus: lagere zuurstof meer colloidaal ijzer OF te weinig zuurstof voor volledige oxidatie. Wel altijd zuurstof in effluent, dus te weinig zuurstof lijkt niet voor de hand liggend.

1-12-2021:

Pilot draaide stabiel. Druk in aanvoerslang minima 2.7 bar.

Besloten pilot door te laten draaien op huidige slang.

Rare metingen voor ijzer en mangaan, ook al 29 en 30 november..

Mogelijk wordt spectrofotometer te koud / niet warm genoeg in het lab.

Suggestie om meter in kantoortje proefhal op temperatuur te laten komen sochtends, en dan metingen uitvoeren.

Multi stage RO pilot scherm uitgevallen, tijdelijke fix met een laptopscherm.

26-11-2021:

Tijdens overnacht drinkwater is DP over filterbed afgenomen; drinkwater backwash / uitspoeling ijzer. Nu drukverschil van 0,02.

Pilot opgestart op 1.54 m³/h, dP 0.2 bar, DO effluent 1 mg/L, gecombineerde spoeling aan.

Oude PID instellingen voor flow en zuurstof hersteld. (p waarde op 0.02, I 20, Ymax 2.1%).

25-11-2021:

Bij binnenkomst in proefhal kwam er water uit het dak (ontluchting). Gebeurde sinds half 7 sochtends, dus gelukkig nog niet zo lang en waterschade bleef beperkt.

Oorzaak: Niveausensor bleef steken op 94% gevuld, terwijl ontluchtingsklep bij 95% dicht gaat. Mogelijke oorzaak: schuimvorming door biologische methaanoxidatie, ontijzeringsbacteriën en/of ammonium-oxidatoren.

Vitens samples genomen van stilstaande pilot, opzich wel betrouwbaar schat ik in.

Statische menger met citroenzuur doorgespoeld incl. leidingwerk na venturi.

Voortgangsoverleg met Oasen gehad:

Ontijzering in ieder geval niet significant verbeterd, lagere turbulentie tijdens oxidatie-proces geen duidelijk effect op filtreerbaarheid van ijzervlok.

Ontmangning hoog, maar komt door verlaging van Mn in RO concentraat (putschakeling?)

Nitrificatie significant hoger, maar wanneer factor 10 verlaging van voedingsvolume wordt meegenomen is de activiteit van de nitrificeerders niet per se toegenomen maar is de load gewoon lager en de populatie constant zodat verwijdering toeneemt.

Filter overnacht in drinkwater weggezet, vrijdag opstarten op 1.54 m³/h, oude spoelprogramma, 1 mg O₂/L in het effluent.

Onderzoeken of terugschroeven hoeveelheid zuurstof in RO concentraat leidt tot een beter filtreerbare ijzervlok.

Verwachting is dat met opvoeren van filtratiesnelheid het ammonium-verwijderingspercentage weer inzakt naar voorgaande niveau.

22-11-2021:

Systeem draait! Geen storing afgelopen weekend gelukkig. DO stabiel op 12.5 mg bij klepstand 4.2% (Y-max)

19-11-2021:

Systeem-freeze, aanraakscherm reageert niet meer.

Besloten om pilot te stoppen, aanvoerslang te vervangen (zodat hij draait op lage flow regime en vervuiling aanvoerslang in beeld gebracht kan worden). Systeem spanningsloos gemaakt.

Dikke laag ijzerneerslag in statische menger (flow dusdanig laag dat ijzer al oxideert voordat het door statische menger heen is). Statische menger en PVC werk aanvoerstuk schoongespoeld onder kraan met hoge flow

Daarna weer opgestart.

18-11-2021:

Monstername Vitens. Ontijzering circa 50% bij lagere debiet, denitrificatie lijkt het wel goed/beter te doen.

Pilot stabiel gedraaid bij DO effluent 11.4 mg/L.

17-11-2021:

Pilot draait, zuurstof bij Y-max waarde van 4% stabiel op 11.4 mg/L O₂ in het filter effluent.

Geen gasbelvorming bovenin filter meer, stabiele bedrijfsvoering.

15-11-2021:

Weer opstarten op 'oude PID' regeling en flow (1,54 m³/h).

Als de installatie draait, terugzetten naar 0.2 m³/h.

Max zuurstof van 17% naar 7%.

I waarde zuurstof weer terug naar 20 (van 80)

13-11-2021:

12:30 uitgevallen -> waarschijnlijk door openen ontluchter flink druk

Zuurstof instabiel (45 mg O₂/L aangeraakt).

Circa 1 uur 45 min later krijg je reactie op de sensor.

Geen/lage flow error.

12-11-2021:

Rond 10:00 uur is Logisticon langsgeweest en RO unit gerepareerd.

Catael was niet beschikbaar voor programma-aanpassing, daarom pilot op zo'n laag mogelijk debiet het weekend in laten gaan.

Schoonmaak-actie uitgevoerd sochtends (pilot stond toch stil).

Rond 15:30 ingesteld op 0.2 m³/h, P waarde constant op 0.02, I waarde van 20 naar 80 gezet en maximaal open zuurstofdosing van 20 naar 17% gezet (Y-waarde). Hopen dat het filter het weekend doorkomt met deze nieuwe instellingen (zonder al te hoge zuurstof-pieken in het effluent, aangezien vuillast sterk is teruggebracht en tijd tussen zuurstof dosering en zuurstof meten met een factor 8 is toegenomen (van 45 min bij 1,54 m³/h naar 6 uur bij 0.2 m³/h).

11-11-2021:

Pilot in storing vanwege lekkage op RO unit sinds 12:30. Oasen neemt contact op met Logisticon om de RO unit weer aan de praat te krijgen.

In overleg met Menno en Ron besloten de komende 2 weken de filtratiesnelheid flink terug te brengen (testen invloed stroom-regime op colloïdale 'natuur' van ijzerdeeltjes)

Pilot weggezet op drinkwater om anaerobe zones te voorkomen.

10-11-2021:

Vanaf koppelstuk PE Aanvoerslang #1: 1 meter schoon, 1 meter zwart, daarna bruine roestlaag ontwikkeld. Wel apart dat na 6 dagen draaien er zwarte aanslag op de statische menger zat.. Mangaan-oxidatie onder hyper-oxische omstandigheden?

Checken met Phreeqci -> kinetiek echter niet te voorspellen.

Bij andere aanvoerslangen was de zwarte aanslag direct na het koppelstuk zichtbaar (dus geen meter schoon en daarna pas ontstaan zwarte aanslag).

Observatie bij spoelen: eerst wat zwart materiaal uit de slang, daarna bruine aanslag.

Pilot stabiel gedraaid. Drukval sochtends van 0.03-0.05 bar.

9-11-2021:

Filter gespoeld op 9-11-2021 om 00:30 bij 0.11 dP zandbed. Daarna automatisch opgestart.

8-11-2021:

Filter gespoeld 6-11-2021 0.13 dP backwash. Daarna automatisch opgestart.

5-11-2021:

Sochtends bij 0.06bar drukval over filter filter stopgezet.

Venturi en statische menger bemonsterd met stalen spatel (vaste stof), daarna doorspoelt met 10% HNO₃, gespoeld met milliq en daarna met 10% HCl.

In beide zure oplossingen loste de zwarte aanslag niet (direct) op, wel ijzerkleur zichtbaar. Vaste stof sample dus voorkeur om te analyseren, ivm identificatie van zoutstructuur ipv enkel aanwezigheid van elementen.

Filter opengehaald, sample van filterzand genomen. Daarna aanvoerslang vervangen voor nieuwe.

Instelling veranderd naar drukgestuurd spoelen + tijdsbewaking, ingesteld op 0.11 bar, tijdsinterval spoeling op 3 dagen. Filterdruk neemt circa 0.03 bar/dag toe, dus in 3 dagen max groei van + 0.09 bar (+0.06 bar = 0,15 bar).

4-11-2021:

Sampledag op Kamerik. Filter draaide stabiel. Eerste week waarin we korter spoelinterval aanhielden, en dus afweten van eerdere 6 weken bedrijfsvoering waarbij drukval over filter veel verder.

Catael heeft software aangepast, formule voor backwash was: druk voor – druk na > drukverschil dP ingestelde waarde, formule nu is druk voor – druk na + schoonbedweerstand & statisch drukverschil > dP filter ingestelde waarde.

3-11-2021:

Filter heeft gebackwashed om 17:00 uur. Bij 0.06 bar druk over filterbed.

2-11-2021:

Na filterspoeling 1-11-2021: best aardige verwijding. (13:30 opstart na filterspoeling, 15:20 monsternamen en goede ijzerverwijdering. Conc: 24.4 mg/L Fe, filtraat 9 mg/L Fe)

Meting 2-11-2021: concentraat 20.3 mg/L Fe, effluent 7 mg/L Fe.

Spectrofotometer: bij verwarming aan, minder condens in apparaat.

Doordraaien op filterslang tot woensdag, dan vervangen.

1-11-2021:

Filter heeft in weekend zaterdag gespoeld op tijd, daarna automatisch opgestart. Zaterdag 30 oktober, dp was 0.11 bar bij spoeling (circa 17:22).

Korte spoeling, 1 min voorspoelen + 2 min naspoelen.

dP instelling van 0.35 bar naar 0.11 bar gezet, programma op druk-gerelateerd + tijdsbeveiliging. Signaalvertraging op 31 seconden (= 31.000 ms).

Rond 1-11-2021 11:30: drukpiekjes variëren tussen 0.05 en 0.1 bar, gemiddeld 0.7 bar.

Idee deze week: kijken of ijzerverwijdering vlak voor of vlak na spoeling a) verschilt en b) significant verschilt.

Druk bovenin ketel is 2.7 bar. Slang verwisselen en schoonmaken.

Rond 13:30: plotselinge filterbackwash bij 0.7 bar dP.. probleem met backwash trigger dus nog niet verholpen.

Teruggezet op tijd-gerelateerde spoeling (2 dagen), en probleem bij Werkplaats KWR gerapporteerd.

Samples genomen 3x 45min = 2 uur 15 min na einde filterspoeling, voor ijzerverwijdering.

28-10-2021:

Filter sochtends na samplename onverwacht in spoeling (0,33 bar drukval). Blijkbaar programma nog niet correct.

Filter weer opgestart, en na PG meeting spoelinstellingen veranderd en automatisch laten spoelen en check of het filter weer zelf in bedrijf komt gelukt.

Spoelinterval op 2 dagen gezet (vast, ongeacht drukval).

Slang vervangen en PVC aanvoerstuk schoongemaakt einde dag/middag.

PG meeting gehad, zie notulen voor besproken vervolgstappen.

27-10-2021:

Filter stabiel gedraaid. Circa 3 bar bovenin filter. Aanvoerslang gespoeld, daarna verder gegaan

26-1-2021:

Filter stabiel gedraaid. Slang aan eind van de dag gespoeld, verder geen bijzonderheden.

25-10-2021:

Druk bovenin ketel 2.5 bar. Probleemloos gedraaid over het weekend.

Slang gewisseld en gebruikte slang schoongemaakt, PVC ook schoon gemaakt.

22-10-2021:

Pilot stabiel gedraaid, slang niet gewisseld en het weekend in.

21-10-2021:

Installatie stabiel gedraaid tot 4:38 snachts. Installatie toen backwash uitgevoerd, waarschijnlijk drukpiek van 0.50 bar aangetikt (drukval filterbed lag rond 0.36 bar, maar pieken van +/- 0.1 bar komen voor in systeem door regeling).

Installatie om 8:00 uur weer opgestart, gewacht met monsters nemen. Catael gevraagd om 1) pas backwash te doen als druk voor > 4 logpunten (2 minuten) structureel boven de 0.50 bar is en 2) om uit te zoeken waarom na een backwash het filter wel in storing gaat bij opstart en bij normaal opstarten niet in storing gaat.

Om 9:30 monsters genomen concentraat, bovenwater en filtraat. Opvallend: filtraat-sample was aanzienlijk helderder dan bovenwater-sample.

Samples vitens genomen rond 12 uur, dus na 4 uur operatie. Opvallend: installatie ontijzerde beter dan normaal.

20-10-2021:

Installatie stabiel gedraaid overnacht, aanvoerleiding hoeft niet vervangen te worden.

Druk in filterketel 3.8 bar

Drukval filterbed 0.29 bar

19-01-2021:

Pilot stabiel gedraaid overnacht.

Drukval 0.27 bar. Druk boven filterbed 3.6 bar.

18-10-2021:

Pilot stabiel gedraaid overweekend.

Druk boven in tank was circa 2.7 bar. Drukval over filterbed: 0.2 bar.

Pilot gespoeld, slang gewisseld, pilot weer gespoeld. PVC schoongemaakt.

15-10-2021:

Installatie stabiel gedraaid overnacht. Druk bovenin ketel 4 bar. Rustig het weekend in laten lopen.

14-10-2021:

Installatie stabiel gedraaid overnacht, monsters genomen. Daarna installatie stilgezet, en zuurstofsensor schoongemaakt. Gemakkelijk verwijderbare gele aanslag op sensor.

Herkalibratie aan 100% rv gaf verandering kalibratieslope van 48.5% naar 46.4%, lichte verandering. Verslechterde ontijzering dus geen gevolg van zuurstofloosheid in effluent filter, zuurstofsensor functioneert naar behoren.

13-10-2021:

Pilot stabiel gedraaid. Lagere ijzerverwijdering gemeten dan 12-10-2021. Drukval over filterbed iets toegenomen, maar geen sterkte toename.

Opleving verbetering filter-performance tijdelijk?

12-10-2021:

Installatie uitgevallen op 11-10-2021 om 16:00, rond 16:26 uitgevallen.

Backwash uitgevoerd, mogelijk drukvariatie in systeem waardoor er even 0.5 bar drukval werd aangetikt -> drukval hoogste (gelogde) punt is 0.39 bar.

Na backwash te lage flow error.. -> fout in flow => actie werkplaats om dit euvel te verhelpen.

Nieuwe aanvoerleiding geïnstalleerd, meest oude aanvoerleiding was zwaar irreversibel vervuild. Aanvoerleiding korter gemaakt, langere verblijftijd in bovenwaterlaag.

Daarna installatie opgestart zonder foutmeldingen op concentraat met nieuwe slang, zodat het tot donderdag (sample-dag) stabiel kan draaien.

Eerste meting gaf minder troebel filter-effluent, lijkt erop dat ijzerverwijdering is verbeterd.

11-10-2021:

Stabiel gedraaid over weekend. Druk bovenin ketel is 1.5 bar gemiddeld (tussen 1 en 2.3 bar).

Drukval over filterbed amper toegenomen (0.24 bar), voor het weekend was 0.23 bar (amper toegenomen).

PVC aanvoerstuk + aanvoerleiding schoongemaakt / verwisseld, daarna installatie weer opgestart. Druk bovenin filter 2.5 bar, 'irreversibele' vervuiling aanvoerleiding. Zandbed hoogte is 92,5 cm boven filterdoppenbodem

Oude situatie tot 4-10-2021 (2 m³/uur): Verblijftijd bovenwaterlaag bij 3,25 m/h = 7,75 minuten => op basis van 92,5 cm zandbed en 40 cm lange PVC aanvoerleiding vanaf bovenkant filter.

Nieuwe situatie sinds 4-10-2021 (1,54 m³/uur): Verbliftijd bovenwaterlaag bij 2,5 m/h = 10,08 minuten => op basis van 92,5 cm zandbed en 40 cm lange PVC aanvoerleiding vanaf bovenkant filter.

Observatie: filterbed vervuild amper, drukval aanvoerleiding neemt toe en schoonmaken aanvoerleiding wordt minder effectief.

Acties: nieuwe PE aanvoerleiding besteld (100 m, genoeg voor circa 5x vervanging) & actie werkplaats KWR inkorten aanvoerstuk belucht concentraat voor verlengen verblijftijd in bovenwater.

Nieuwe gewenste situatie (1,54 m³/uur): Verbliftijd bovenwaterlaag bij 2,5 m/h = 15,84 minuten => op basis van 92,5 cm zandbed en 16 cm lange PVC aanvoerleiding vanaf bovenkant filter.

8-10-2021:

Installatie overnacht doorgedraaid zonder storingen.

Na spoelen aanvoerleiding met drinkwater even een check gedaan op hoogte filterbed, niveau-sensor 92% en 96% waarde. Ook hoogte aanvoerleiding boven filterbed bepaald (verblijftijd bovenwaterlaag berekening). Relevant voor als ontijzering niet op gang komt, verkorten aanvoerleiding in filter verlengt verblijftijd in bovenwaterlaag en verlengd mogelijkheid tot vlokvorming.

Oude situatie tot 4-10-2021 (2 m³/uur): Verbliftijd bovenwaterlaag bij 3,25 m/h = 6 min en 22 sec. => op basis van 100 cm zandbed

Nieuwe situatie sinds 4-10-2021 (1,54 m³/uur): Verbliftijd bovenwaterlaag bij 2,5 m/h = 8 min en 16 sec. => op basis van 100 cm zandbed

Drukval over filterbed 0.23 bar.

7-10-2021:

Installatie overnacht doorgedraaid zonder storingen. Data geanalyseerd: na procesaanpassing 3.25 m/h naar 2.5 m/h lijkt nitrificatie en ontijzering weer op gang te komen.

Conclusie: afwachten tot meetresultaten Vitens week #4, mocht er geen duidelijke verbetering zijn van in ieder geval ontijzering moet verblijftijd in bovenwaterlaag worden verlengt door inkorten van de PVC aanvoerpijp

6-10-2021:

Installatie overnacht doorgedraaid zonder storingen.

Observatie: ontluchtingklep bovenop filterketel heeft iedere dag circa 20 mL water boven de klep staan.

Actie: niveau-sensor waarde waarop onluchtingklep weer dicht schakeld omgezet van 96% naar 95%. Testen of komende dagen het vocht boven de ontluchtingsafsluiter weg blijft.

5-10-2021:

Installatie overnacht doorgedraaid zonder storingen. Druk bovenin filterketel van 4 bar naar 3.5 bar gegaan -> vervuiling aanvoerleiding.

Drukval over filterbed 0.1 bar, geringe vervuilingsofbouw in filterbed.

Half uurtje aanvoerleiding gespoeld icm kloppen met hamer, daarna systeem weer opgestart en doorgedraaid (door spoelactie verminderde drukval over aanvoerleiding met 0,4 bar (3.4 bar voor, 3.8 bar na spoeling bovenin filterketel). Start gemaakt met dataverwerking metingen etc.

4-10-2021:

Installatie heeft gehele weekend doorgedraaid automatisch! Druk wel laag in ketel (0.8-2 bar), en flow (2m³/h) haalt hij niet meer => vervuiling aanvoerleiding.

Drukval over filterbed 0.1 bar gestegen t.o.v. donderdag 30 september na spoeling, geen sterkte toename dus.

Redundante aanvoerleiding geklopt met een hamer, schoongespoeld met drinkwater. Daarna systeem gestopt, ontlufter gechecked op vervuiling, PVC leidingwerk aanvoerstuk schoongemaakt, andere aanvoerleiding gemonteerd.

Systeem opgestart op 1.54 m³/h ipv 2 m³/h, omlaag brengen ijzerbelasting en toenemen contacttijd met filterbed.

1-10-2021:

Niemand aanwezig in Kamerik, bedrijfsvoering-technisch geen update. Wel voorstel uitgewerkt om filtratiesnelheid van 3,25 m/h terug te brengen naar 2.5 m/h.

Redenen: ijzerverwijdering leek af te nemen in week 2 t.o.v. week 1, door terugbrengen filtratiesnelheid neemt heterogene ontijzering in bovenwaterlaag toe.

Daarnaast geeft een lager debiet ook minder grote drukval over aanvoerleiding, waardoor er minder ontgassing optreedt en mogelijk de aanvoerleiding langer in bedrijf kan blijven voordat hij verwisseld moet worden.

30-9-2021:

Sample-dag Vitens lab, filter stabiel gedraaid gedurende de nacht. Sochtends samples genomen 11:00, voordat pilot stilgezet werd voor onderhoud.

Backwash uitgevoerd rond 13 uur, om filterbed weer schoon te maken, filterbed weer teruggekomen op -0.15 bar drukverschil tussen PIT1 en PIT2.

Ontluchtingsslang was losgeschoten, water rondom het filter. Afsluiter tussen ontluchtingsklep gebouwd, zodat ontluchting door smallere buis gaat (DN40 was het, nu kleiner). Hierdoor rustiger ontlichten, minder druk op de ontluchtingsslang.

P&ID settings van flow iets sneller gezet, waardoor flow (en druk-) variaties in het systeem minder werden. Flow variaties komen door ontwikkeling luchtbel in filter, correspondeert met drухhoudventiel en zorgt voor instabiele flow.

Instellingen aangepast dat ontluchtingsklep tijdig dicht gaat zodat ontluchtingsslang niet nat wordt met concentraat - > voorkomt vervuiling van ontluchtingssysteem.

Filter na technische aanpassingen en schoonmaak-actie aanvoerstuk naar filter (drukval over circa 2 meter PVC leidingwerk: 0.6 bar) weer in bedrijf genomen rond 14:00 uur.

29-9-2021:

Filter sochtends wederom uitgevallen op 75% niveau storing zoals verwacht. Druk bij uitvallen in filterketel was circa 2.3 bar, precies op het kritische punt. Bij aankomst in proefhal van aanvoerleiding gewisseld, check of schoonmaken met uitdrogen & hamerkloppen een werkbare procedure is. Na aanvoerslangwissel filter opgestart, en vlak voordat er technische werkzaamheden plaatsvonden samples genomen voor verwijderings-analyse. Automatische vlotter ontluucher vervangen voor gestuurde klep die open gaat (tijdens proces) bij 90% niveau in tank en sluit bij 98% niveau in tank.

28-9-2021:

Filter was sochtends (rond 6 uur) uitgevallen op 75% niveau storing; zoals verwacht. As woensdag wordt automatische ontluucher vervangen voor gestuurde klep die schakelt op basis van het niveau in de tank tijdens productie. Filter opgestart, overdag laten lopen, eind middag uit- en aangezet zodat het filter zolang mogelijk snachts doorliep.

Kloppen op PE leiding met hamer gevolgt door drinkwaterflush resulteerde in loslaten van wat ijzer, PE leiding lijkt redelijk schoon op foto.

27-9-2021:

Zaterdagavond 25-9-2021 23:44 uitgevallen, 75 procent niveau in tank bereikt. Blijkbaar vervuild ontluucher binnen circa 1.0 dag, 1.5 uit vanwege niveaubeveiliging.

Aanvoerleiding direct maar gespoeld met drinkwater (installatie stond toch stil), daarna opgestart op concentraat. Genoteerd hoelang het duurt voor stabiele bedrijfsvoering is bereikt met nieuwe P&ID instellingen.

Overweekend uitgedroogde aanvoerleiding met hamer 'geklopt' en daarna met drinkwater doorgespoeld: checken of het uitdrogen van de ijzerafzetting gevolgd door breken van de laag resulteert in betere vuilverwijdering uit de redundant uitgevoerde aanvoerleiding.

24-9-2021:

Nieuwe, schone aanvoerleiding geplaatst. Software zaken zijn opgelost, ook van het uitvoeren van de spoeling. Ontluchting zat vol ijzer, vandaar dat niveau in tank daalde. E.e.a. schoongemaakt en teruggeplaatst. Blijkbaar is de aanvoerleiding nu te kort (22 meter) om al het zuurstof tijdig op te lossen. Langere aanvoerleiding echter geen optie vanwege toename drukval over aanvoerleiding en snelle verstopping.

23-9-2021:

Filter stabiel gedraaid overnacht. Niveau in tank gedaald tot circa 90%. Drukval over filterbed circa 0.15 bar. Sochtends samples concentraat & filtraat voor spectrofotometrische analyse genomen, incl. ijzer-bepaling in bovenwaterlaag filter. Samples Vitens lab genomen (macro-parameters & OMV's), daarna aanvoerleiding 30 min doorgespoeld met drinkwater. Filter vervolgens opgestart op concentraat (zonder backwash).

22-9-2021:

Niveau in tank was gedaald tot circa 80%. Flow en druk stabiel. O2 klep steeds verder open. O2 sensor schoongemaakt, enige vervuiling maar niet heel erg. Tijdens terugplaatsen O2 sensor ging filter in storing / haalde hij spoelcriterium (expanderende luchtbel zorgde voor daling niveau tank tot 55% niveausensor, dus statisch drukverschil tussen PIT 1 en PIT 2 werd minder). Tijdens backwash op stop gedrukt. Aanvoerleiding met drinkwater gespoeld. Op concentraat opgestart, kijken of niveau in tank weer terug ging lopen. Ontgassing in tank? Spectrofotometrische monsters genomen vrij kort na / tijdens opstart.

21-9-2021:

RJ en MvL overleg: proberen via drinkwaterleiding aanvoerleiding te spuien tot in het filter ivm schoonblazen aanvoerstuk naar filter toe -> drukval nam iets af, besloten om dagelijks een half uur te spoelen met drinkwater om zo aanvoerleiding zo lang als mogelijk in bedrijf te houden. Afvoer van spui-drinkwater gaat via centrale afvoerbuis, dus filter zelf ziet geen / nauwelijks een zout-schok vanwege concentratieverschil drinkwater en concentraat. Alternatieven: -dubbele leiding aanleggen, leiding laten opdrogen, kloppen met hamer, schoonspoelen met drinkwater (koppeling maken) OF iedere week Gerben PE leiding laten vervangen zodat filter door kan draaien. Zwarte neerslag in statische menger geconstateerd, zou ijzersulfide neerslag kunnen zijn volgens RJ.

20-9-2021:

De pilot had zonder storingen doorgedraaid over het weekend heen. Verwijderingsmonsters genomen sochtends spectrofotometer. Observatie: druk boven filter flink afgenomen (1.5 bar) en vervolgens voedingsflow niet meer gehaald (1,8 m3/h ipv 2,0 m3/h). Vermoeden: aanvoerleiding slibt dicht en wordt ruwer qua oppervlakte, waardoor drukval toeneemt. Actie: Aanvoerslang vervangen voor nieuwe PE slang. Gevolg: drukval over aanvoerleiding veel lager (circa 1 bar). Voedingsdruk vanaf RO constant op 5 bar.

17-9-2021:

Stopzetten zuurstofdosing lijkt ervoor te zorgen dat niveausensor op 100% blijft -> inkorten aanvoerleiding heeft tot gevolg dat zuurstof niet geheel oplost mogelijk, kleine bel. Na backwash start filter niet automatisch op (geen / lage flow), programma aanpassing nodig.

Mogelijk dus geen goed idee om dosering zuurstof nog dichterbij de pilot te plaatsen, aangezien de zuurstofbel dan nog groter wordt (kan evt. exp. vastgesteld worden).

Indicatie kan zijn om huidige vervuilde aanvoerleiding open te zagen, en te kijken na hoeveel meter na dosering zuurstof de vervuiling van de leiding begint (direct of na X meter?)

16-9-2021:

Vitens samples. Stabiel gedraaid overnacht.

dP licht toegenomen (vervuiling filterbed), druk boven filterbed afgenomen (vervuiling aanvoerleiding).

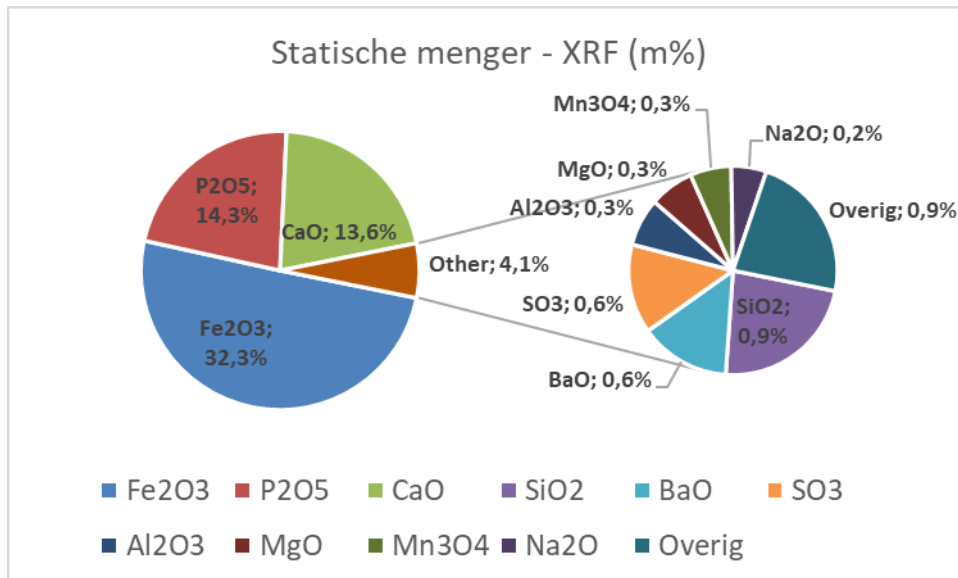
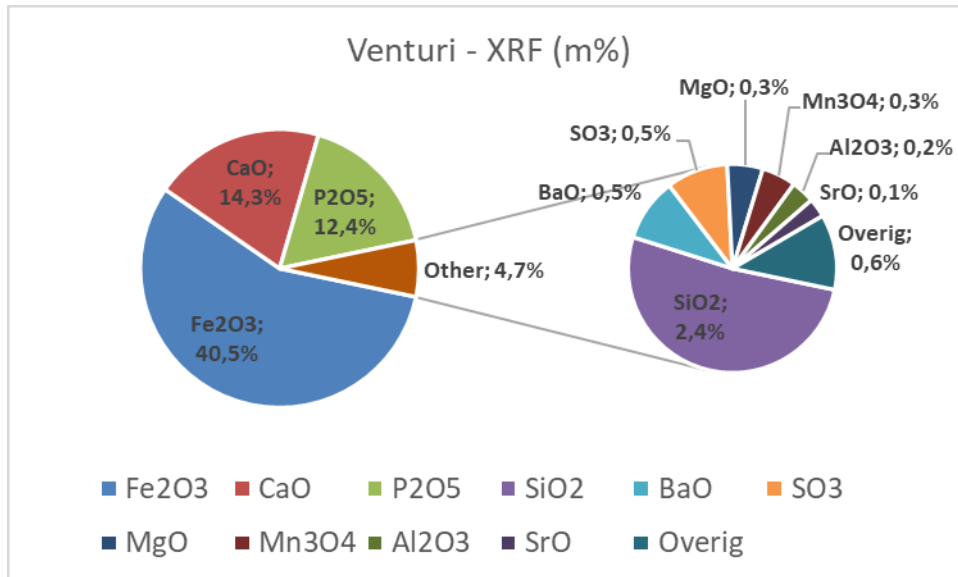
Niveau-sensor soms 99% ipv 100%; mogelijk niet alle pure zuurstof opgelost in water en luchtbel bovenin filter ivm inkorten aanvoerleiding vanwege te grote drukval?

Overnacht door laten lopen, kijken of hogere stroomsnelheid in dichtslibbende / vernauwende aanvoerleiding leidt tot een stabiele situatie.

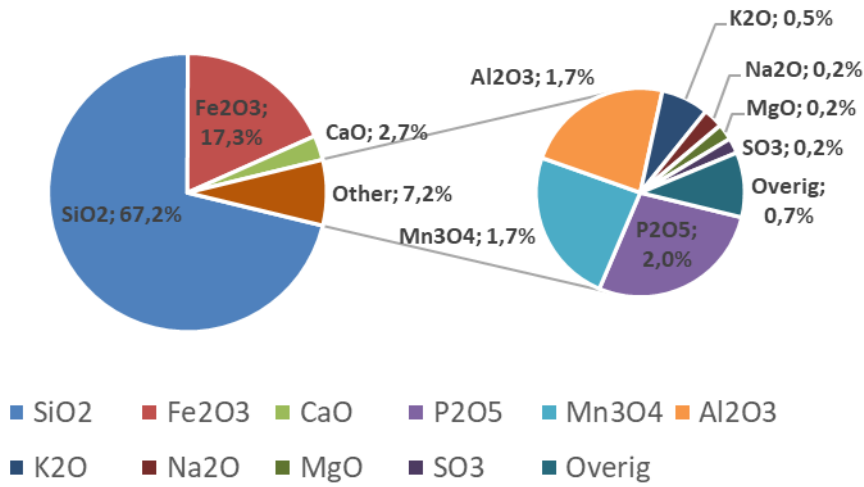
15-9-2021:

Opgestart op concentraat, na 4 uur stabiele DO in effluent.

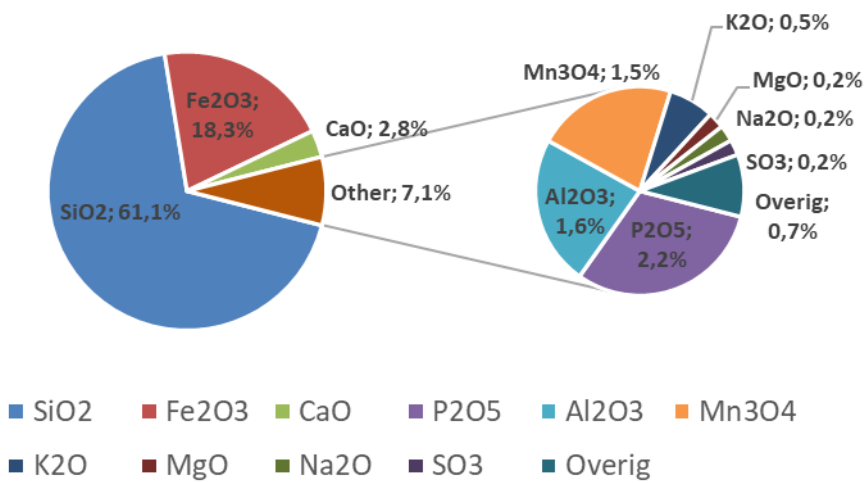
IX Röntgenfluorescentiespectrometrie analyseresultaten



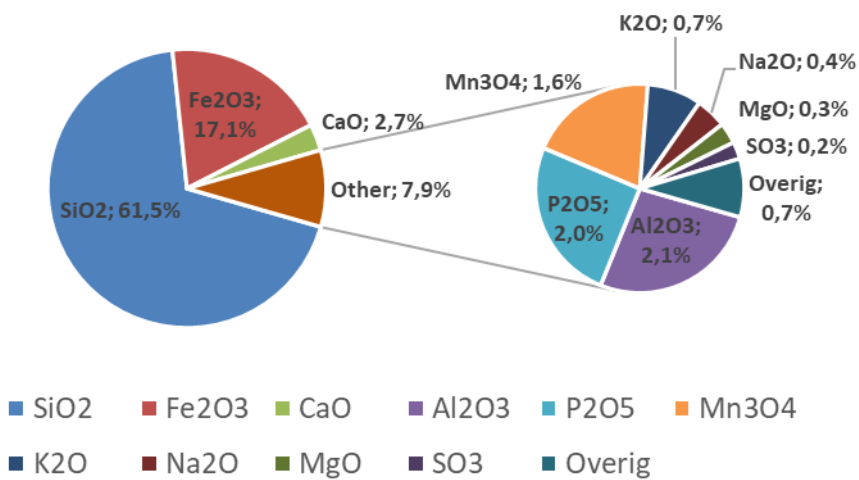
Zand uit zandfilter - Kamerik - XRF (m%)



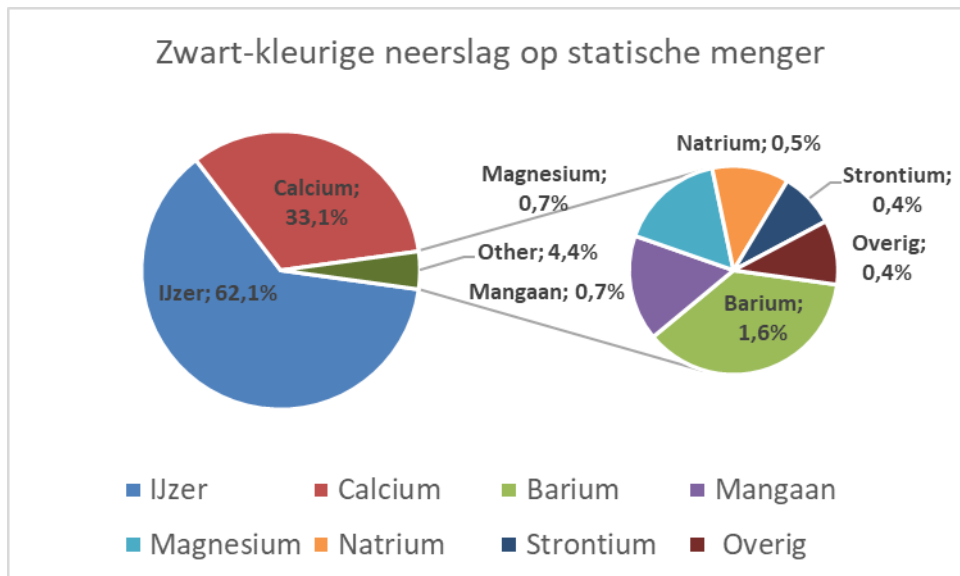
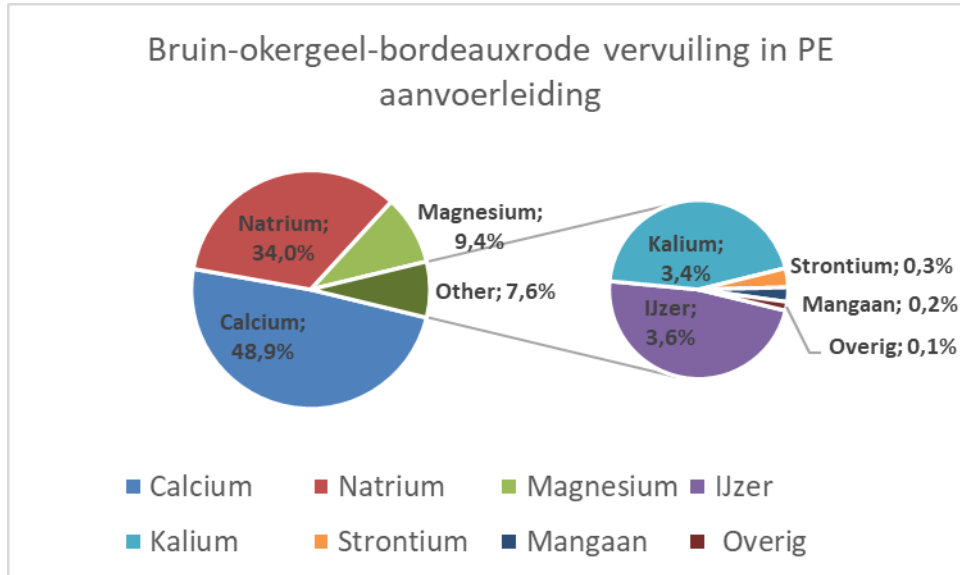
Filterbed "schoon" - XRF (m%)



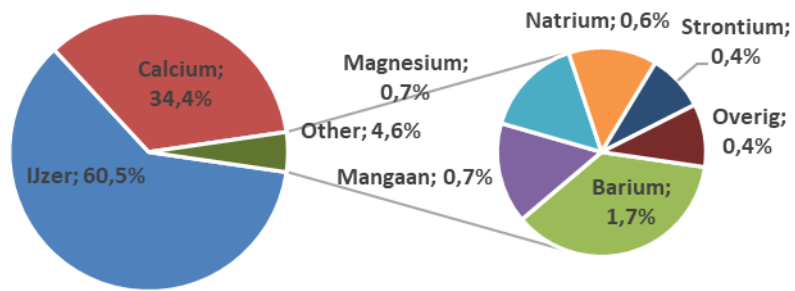
Filterbed "vies" - XRF (m%)



X Analyseresultaten ICP-MS scan

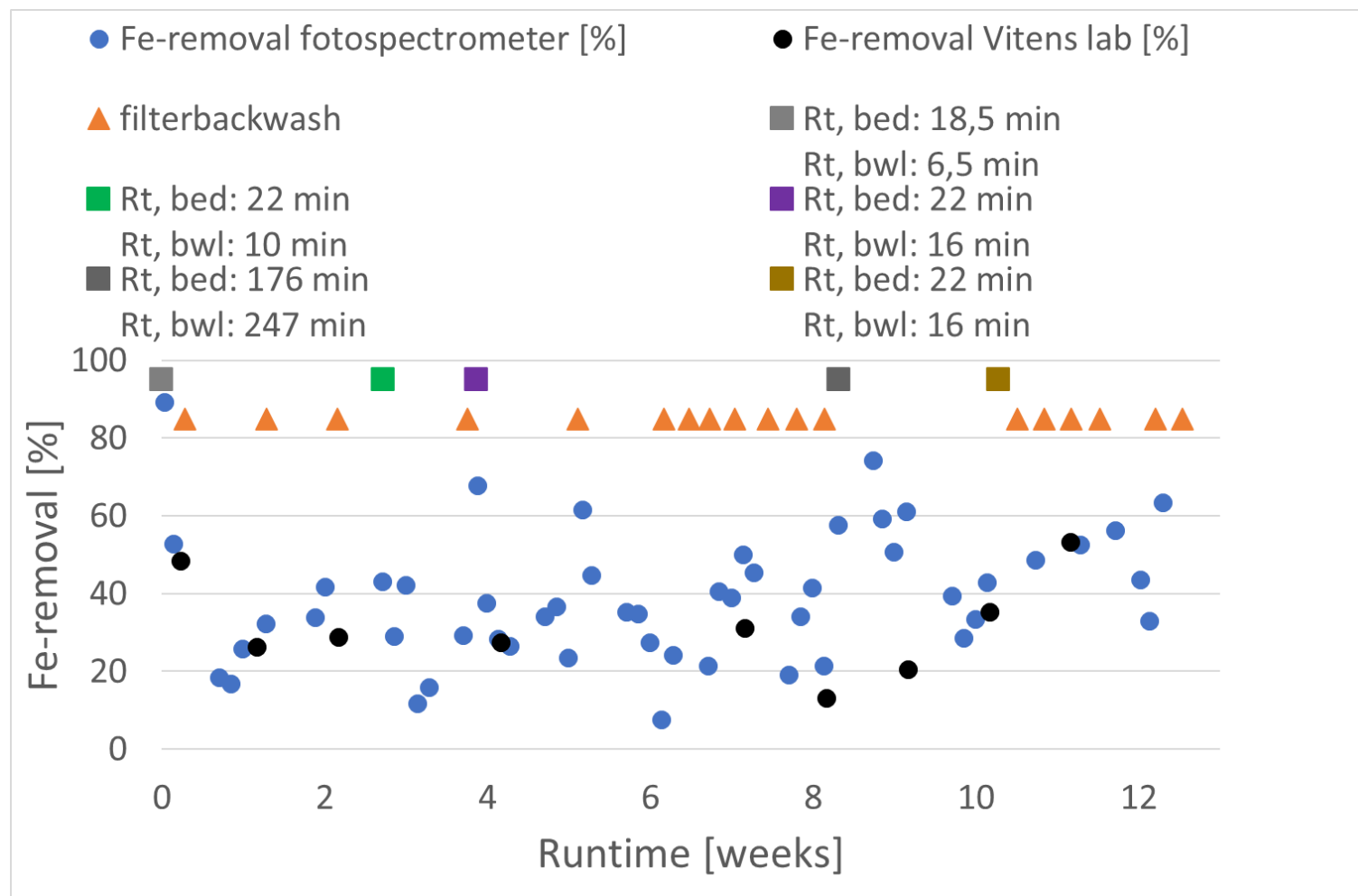


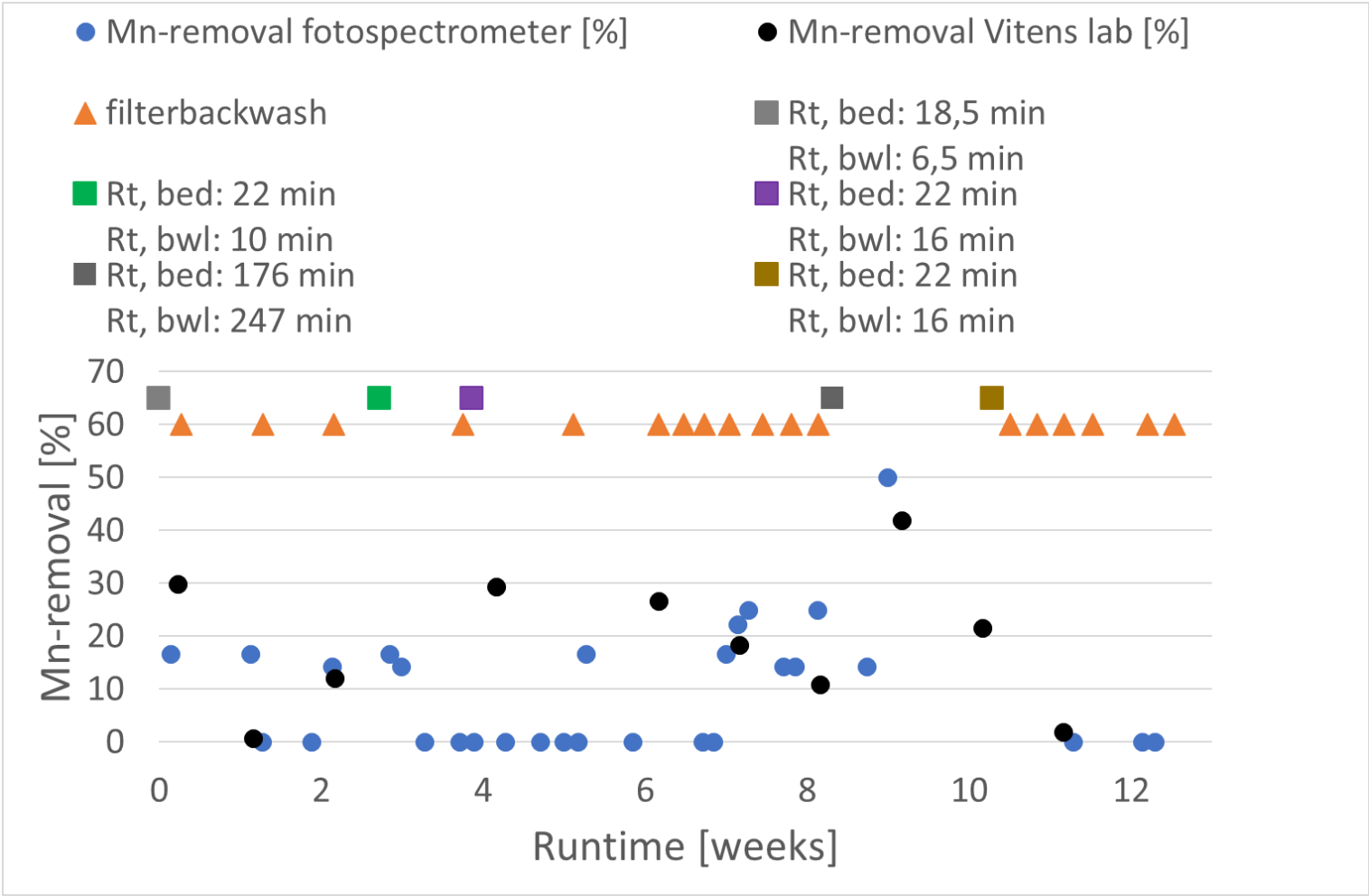
Zwart-kleurige neerslag op Venturi beluchter

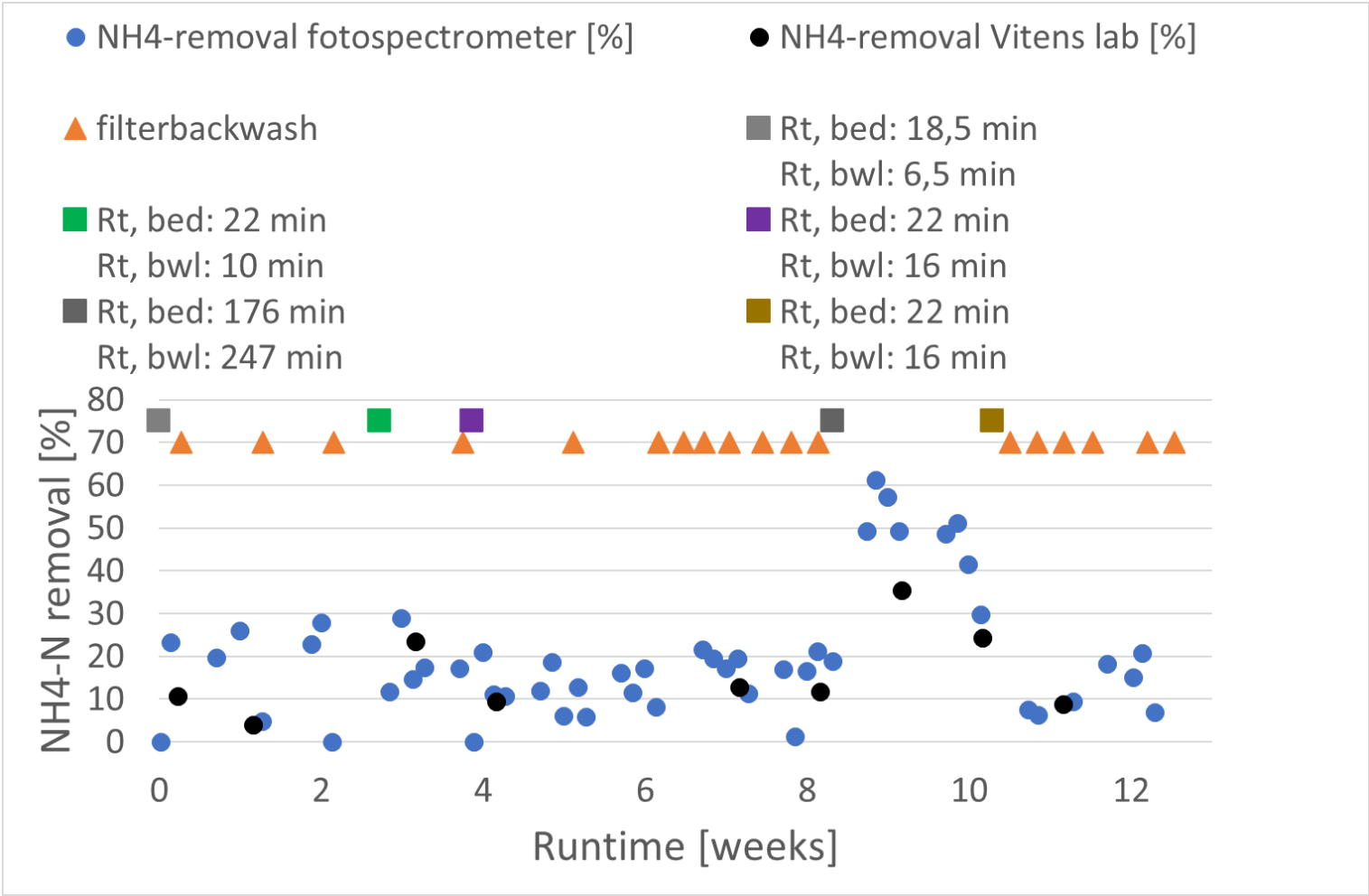


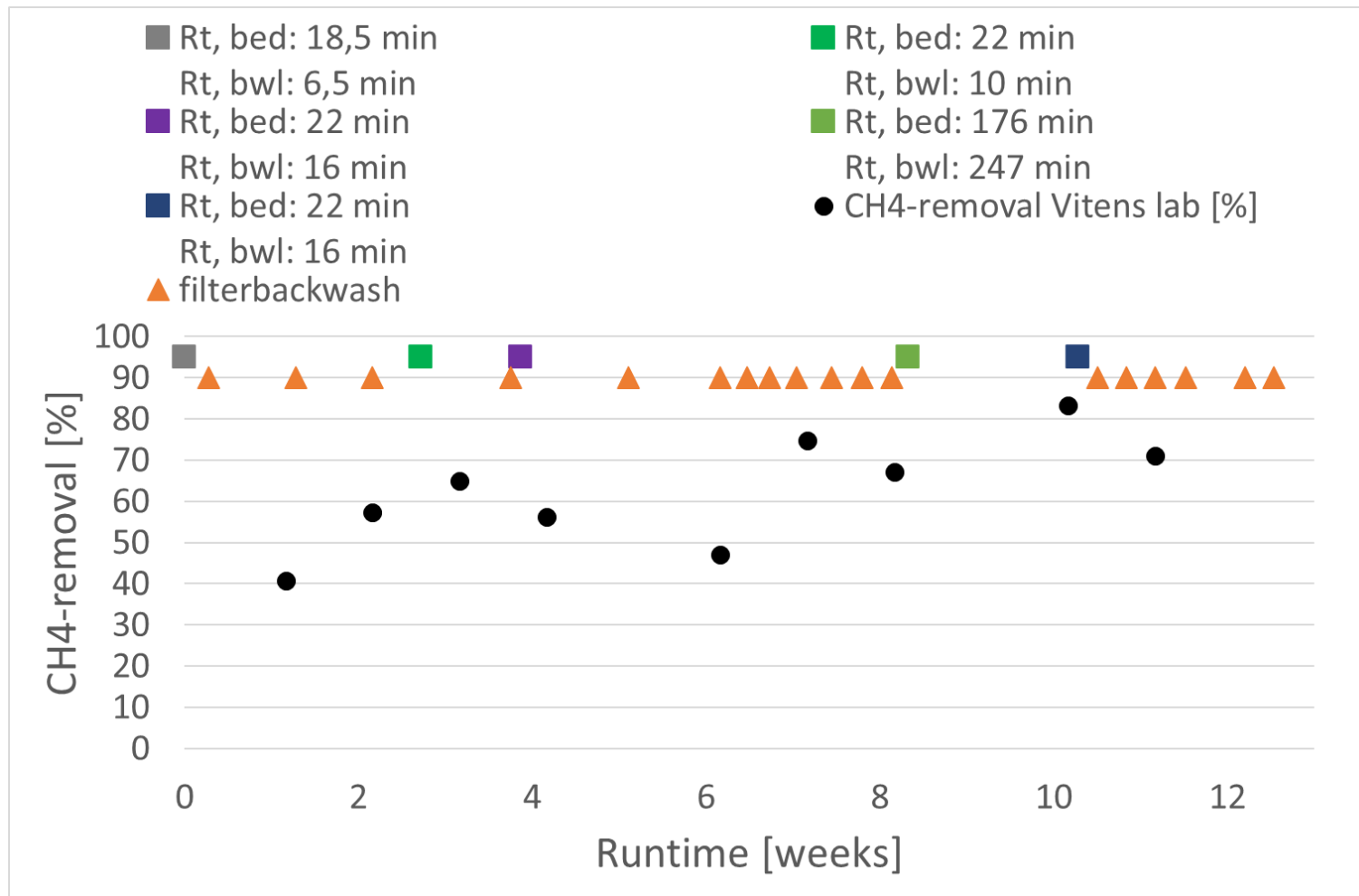
- IJzer
- Calcium
- Barium
- Mangan
- Magnesium
- Natrium
- Strontium
- Overig

XI Overzicht behaalde verwijdering focus-componenten









XII Overzicht van drukval over het filterbed

